



**CARTOGRAFÍA DE
ZONAS
INUNDABLES.
ANÁLISIS DE
SENSIBILIDAD DE
DISTINTAS
FUENTES
CARTOGRÁFICAS
EN EL RESULTADO
DE SIMULACIONES
HIDRÁULICAS.
APLICACIÓN AL
ESTUDIO DE
ROTURA DE
BALSAS**

Ávila, septiembre
de 2011



Alumno: Fernando Espejo Almodóvar

Director: D. Diego González Aguilera



POSTGRADO OFICIAL

GEOTECNOLOGIAS CARTOGRAFICAS
EN INGENIERIA Y ARQUITECTURA





(Hoja en blanco)



Foto de portada:

Vuelo fotogramétrico de la zona de actuación del año 2010.

Fuente: http://www.geo.euskadi.net/s69-geodir/es/contenidos/informacion/recursocartografia2009/es_29/cartografia.html#elem22



Agradecimientos

Al final de cualquier proyecto cuando las noches toledanas dejan paso al descanso del guerrero conviene siempre analizar que se ha hecho bien y qué mal, lo primero no soy yo quién debe juzgarlo y lo segundo lo de siempre, dejarlo todo para el final.

Lo bueno de esto es que siempre puedes recordar a aquellos que lo han hecho posible, y que sin su apoyo y ayuda difícilmente pudiera haberse terminado con éxito esta faena.

Hay muchos, pero particularmente pienso en tres, Diego por su confianza, Javier por su paciencia y Mercedes por su generosidad.

Y para acabar qué decir de los que duermen detrás de mí, gracias Cris, gracias Lu y gracias DVD.



INDICE GENERAL

<i>INDICE</i>	<i>i</i>
<i>capítulo 0</i>	<i>vi</i>
<i>PRESENTACIÓN</i>	<i>vi</i>
<i>ESTRUCTURA</i>	<i>vi</i>
<i>capítulo I</i>	<i>1</i>
<i>CONTEXTO DEL TRABAJO</i>	<i>1</i>
<i>INTRODUCCIÓN.LAS BALSAS EN ESPAÑA. SITUACIÓN ACTUAL</i>	<i>1</i>
<i>ESTUDIO NORMATIVO</i>	<i>3</i>
<i>capítulo II</i>	<i>15</i>
<i>OBJETIVOS</i>	<i>15</i>
<i>INTRODUCCIÓN</i>	<i>15</i>
<i>OBJETIVOS</i>	<i>16</i>
<i>capítulo III</i>	<i>17</i>
<i>SOFTWARE</i>	<i>17</i>
<i>INTRODUCCIÓN</i>	<i>17</i>
<i>MODELOS DE SIMULACIÓN. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</i>	<i>19</i>
<i>Esquemas unidimensionales</i>	<i>23</i>
<i>Régimen permanente</i>	<i>23</i>
<i>Régimen variable</i>	<i>24</i>
<i>Esquemas unidimensionales clásicos</i>	<i>24</i>
<i>Esquemas bidimensionales</i>	<i>28</i>
<i>Esquemas bidimensionales clásicos</i>	<i>29</i>
<i>Esquemas bidimensionales de alta resolución</i>	<i>31</i>
<i>Modelos comerciales</i>	<i>33</i>
<i>IBER</i>	<i>39</i>
<i>Campos de aplicación</i>	<i>40</i>
<i>Capacidades</i>	<i>40</i>
<i>Entorno</i>	<i>42</i>
<i>GiD</i>	<i>43</i>

Funcionamiento.....	43
Hidráulica	44
ECUACIONES DE ST. VENANT.....	44
Fricción de fondo.....	45
Implementación de la simulación	46
Procedimiento	47
Geometría.....	48
Condiciones Hidrodinámicas (iniciales).....	49
Condiciones Hidrodinámicas (entrada).....	50
Condiciones Hidrodinámicas (salida).....	51
Rugosidad.....	52
Mallado	53
Cálculo	56
<i>FUSION</i>	57
Metodología y estructura.....	58
Estudio y análisis de los datos LIDAR:	58
Creación y carga de la imagen de referencia	60
Catalog.exe	63
Modelo Digital de Elevaciones (Suelo).....	65
Carga de los datos LIDAR:.....	65
MDE.....	65
Filtrado de datos.....	66
Creación del Modelo Digital de Elevaciones (suelo desnudo)	72
Modelo de Cubierta Vegetal.....	81
<i>capítulo IV</i>	87
<i>METODOLOGÍA</i>	87
<i>INTRODUCCIÓN</i>	87
<i>FASES DEL TRABAJO</i>	88
<i>ÁMBITO DE ACTUACIÓN</i>	89
Características de las obras	91
Descripción de la balsa	93
<i>MODELOS DIGITALES DE ELEVACIÓN</i>	95
<i>capítulo V</i>	99
<i>RESULTADOS</i>	99

<i>SIMULACIÓN HIDRÁULICA</i>	99
MDE procedente de LIDAR	103
MDEH	103
MDS.....	104
MDT.....	105
MDS-LIDAR.....	106
MDE procedente de fotogrametría	107
MDT-2007	107
MDT-2009	108
Relaciones entre modelos	109
<i>DISCUSIÓN DE RESULTADOS</i>	111
<i>capítulo VI</i>	113
<i>CONCLUSIONES</i>	113
<i>CONSECUCIÓN DE OBJETIVOS</i>	113
<i>capítulo VII</i>	116
<i>BIBLIOGRAFÍA</i>	116
<i>REFERENCIAS</i>	116
<i>ANEXO DE RESULTADOS</i>	118

INDICE DE IMÁGENES

<i>Imagen1: Rotura de la Balsa de Sangonera la Seca. Mayo 2003. Fuente: CENTER</i>	2
<i>Imagen2: Portada Pliego de Bases Fuente: Contratación del Estado</i>	13
<i>Imagen3: Link promocional del programa IBER. Fuente: IBERAULA</i>	39
<i>Imagen4: Link promocional del programa GiD. Fuente: http://gid.cimne.upc.es/</i>	43
<i>Imagen5: Menús desplegables del programa IBER</i>	43
<i>Imagen6: Interfaz gráfica IBER</i>	47
<i>Imagen7: Ventana desplegable de formatos de importación</i>	48
<i>Imagen8: Formato de importación de ficheros de terreno ASCII, xyz</i>	48
<i>Imagen9: Ventana de introducción de las condiciones de salida en análisis bidimensionales.</i>	51
<i>Imagen10: Indicación de las condiciones hidrodinámicas de entrada y salida</i>	52
<i>Imagen11: Ventana de asignación de tamaños en el mallado por error cordal</i>	54
<i>Imagen12: Mallado correspondiente al modelo MDT, filtrado con paso 5 y con tamaño de malla 20-50 (mín-máx))</i>	55
<i>Imagen13: Ventana de datos del problema</i>	56
<i>Imagen14: Pantalla inicial del programa FUSION. Apertura de ficheros</i>	59
<i>Imagen15: Características del formato LAS. Programa FUSION</i>	60
<i>Imagen16: Carga de la imagen georreferenciada. Programa FUSION</i>	61
<i>Imagen17: ftp://ftp.geo.euskadi.net/cartografia</i>	61
<i>Imagen18: ftp://ftp.geo.euskadi.net/lidar</i>	62
<i>Imagen19: Resultado final de la carga de la imagen. Programa FUSION</i>	62
<i>Imagen20: Resultado final de la carga del fichero LIDAR. Programa FUSION</i>	63
<i>Imagen21: Acceso a "catalog.exe". Programa FUSION</i>	63
<i>Imagen22: Opciones de "catalog.exe" bajo MS-DOS. Programa FUSION</i>	64
<i>Imagen23: Carga de fichero *.las. Programa FUSION</i>	65
<i>Imagen24: Opciones de "groundfilter.exe" bajo MS-DOS. Programa FUSION</i>	66
<i>Imagen25: Salida visor PDQ Programa FUSION</i>	68
<i>Imagen26: Salida visor PDQ 960814 ptos. Programa FUSION</i>	69
<i>Imagen27: Salida visor PDQ 316979 ptos. Programa FUSION</i>	70
<i>Imagen28: Salida visor PDQ 237408 ptos. Programa FUSION</i>	70
<i>Imagen29: Diagnóstico groundfilter. Programa FUSION</i>	71
<i>Imagen30: Carga de "gridsurfacecreate". Programa FUSION</i>	72
<i>Imagen31: Switches de "gridsurfacecreate". Programa FUSION</i>	73
<i>Imagen32: MDE. Salidas Global Mapper. Filtrado puntos clase 2</i>	74
<i>Imagen33: MDE. Salidas Global Mapper. Resultado del proceso de filtrado</i>	75
<i>Imagen34: MDEH. Salidas Global Mapper.</i>	77
<i>Imagen35: Comparativo modelos. Distorsión alturas. Global Mapper.</i>	77
<i>Imagen36: Comparativo modelos. Global Mapper.</i>	78
<i>Imagen37: Curvas de nivel en FUSION</i>	79
<i>Imagen38: Opciones visualización modelos. FUSION</i>	80
<i>Imagen39: Opciones de corte en LDV. FUSION</i>	80

<i>Imagen40: Resultado visualización cortes en LDV. FUSION.....</i>	<i>81</i>
<i>Imagen41: Visualización modelos de cubierta vegetal y ortofotos en LDV. FUSION.....</i>	<i>82</i>
<i>Imagen42: Visualización modelos de cubierta vegetal y ortofotos considerando vegetación arbórea en LDV. FUSION.....</i>	<i>83</i>
<i>Imagen43: Visualización modelos de cubierta vegetal y ortofotos a partir del MDEV de la CAPV en LDV. FUSION.....</i>	<i>84</i>
<i>Imagen44: Visualización modelos de cubierta vegetal desde Canopy model en LDV. FUSION.....</i>	<i>86</i>
<i>Imagen45: Visualización modelos de cubierta vegetal sobre superficie plana en LDV. FUSION .</i>	<i>86</i>
<i>Imagen46: Zona de estudio. Visor GeoEuzkadi.....</i>	<i>90</i>
<i>Imagen47: Balsa de Pozalao actualmente en construcción. Vuelo 2011. Visor GeoEuzkadi.....</i>	<i>91</i>
<i>Imagen48: Esquema funcional actuación general.....</i>	<i>92</i>
<i>Imagen49: Planta general balsa.....</i>	<i>94</i>
<i>Imagen50: Oferta MDE de la CAPV.....</i>	<i>95</i>
<i>Imagen51: Salidas gráficas de resultados de Breach GUI.....</i>	<i>101</i>

capítulo 0

PRESENTACIÓN

ESTRUCTURA.

Este trabajo que se presenta a la consideración del tribunal responde a las necesidades evaluadoras del Proyecto Fin de Máster que culmina los estudios de Posgrado en “Geotecnologías Cartográficas en Ingeniería y Arquitectura” de la Universidad de Salamanca.

Se estructura conforme a las recomendaciones realizadas por los coordinadores y que en nuestro caso se distribuyen en 8 capítulos y un anexo de resultados.

En el capítulo I, “Contexto del trabajo” se introduce el problema dentro del mundo de la ingeniería civil donde la necesidad de clasificar las balsas de regulación de recursos hidráulicos en un tiempo tasado normativamente, exigirá metodologías acordes al acceso de datos que ofrece la tecnología LIDAR en la actualidad.

En el capítulo II, “Objetivos”, se extracta y define el alcance del estudio abordado. Donde la utilización de software de libre distribución y con algoritmos de cálculo robusto responde fielmente a los requisitos necesarios para analizar el tránsito de la onda de avenida y delimitar los mapas de inundación y riesgo correspondiente, provocados por el colapso de este tipo de infraestructuras.

En el capítulo III, “Software”, se realiza un exhaustivo repaso de las principales herramientas utilizadas, y que se concretan en los software de libre distribución IBER y FUSION previa justificación apoyada en los resultados de la Tesis Doctoral leída por uno de los creadores de IBER, Ernest Bladé.

En el capítulo IV, “Metodología “ se describen las fases del trabajo y la zona objeto de estudio concretando el volumen de información analizada describiendo el origen y procesado posterior de los Modelos Digitales de Elevación utilizados para tal fin.

En el capítulo V, “Resultados” se repasan los distintos postprocesos de la simulación hidráulica que convergen en una multitud de variables con múltiples relaciones que permitirán abrir nuevas líneas de investigación posterior.

En el capítulo VI, “Conclusiones” se muestran las que a juicio del autor responden a los objetivos marcados en el capítulo II y de mayor relevancia.

En el capítulo VII, “Bibliografía”, se hace un repaso de las principales referencias bibliográficas consultadas para la realización del estudio.

Y finalmente y dado el volumen de información generada se ha considerado oportuno ubicar los resultados a modo de anexo.

capítulo I

CONTEXTO DEL TRABAJO

INTRODUCCIÓN.LAS BALSAS EN ESPAÑA. SITUACIÓN ACTUAL.

El paulatino aumento que en los últimos años se ha venido observando en el proyecto y construcción de balsas fuera de dominio público, como respuesta de las Comunidades de Regantes a las nuevas políticas de modernización de regadíos, conjuntamente a la disminución de obras de regulación en cauces, está planteando nuevos desafíos en su gestión, acordes a su vez, con la entrada en vigor de nuevas normativas y directrices emanadas de la Unión Europea.

La realidad sobre la situación actual de las balsas en España, dista mucho de ser conocida, si analizamos la disparidad de datos existentes sobre su número total. La horquilla que muestran distintos estudios es excesivamente amplia, desde las 50.000 unidades del más “austero”, a las 100.000 de otras fuentes más “generosas”. Respecto a su ubicación geográfica, se concentran en la vertiente mediterránea, zona de tradición intensiva en agricultura. Encontrándonos con 16.000 en Andalucía, 11.000 en la comunidad murciana o cerca de 3.600 en la valenciana, siendo esta comunidad pionera en la publicación de Guías de carácter técnico que aborden todas las fases del ciclo de vida de estas infraestructuras, como las *“Guías para el proyecto, construcción,*

explotación, mantenimiento, vigilancia y planes de emergencia de las balsas de riego con vistas a la seguridad” de octubre de 2.009. En cualquier caso, si comparamos estas cifras con las que ofrece el inventario actual de grandes presas, cercano a las 1.400, se observa la enorme distancia existente entre los dos conjuntos de infraestructuras. Esta enorme separación se acrecienta cuando tratamos del riesgo potencial asociado a su propia existencia, de relevancia social en el caso de las grandes presas, y sin embargo, apenas perceptible en el caso de las balsas. Que al analizar su singular concepción, con una menor exigencia proyectual y constructiva, una notable antigüedad de muchas de ellas sin revisión técnica alguna y la cercanía de gran número de infraestructuras potencialmente afectadas en caso de fallo, hacen necesario mejorar el control de su seguridad.



Imagen1: Rotura de la Balsa de Sangonera la Seca. Mayo 2003. Fuente: CENTER

A todo ello, hay que sumar las características especiales que envuelven este tipo de obras, su carácter singular y “privativo”, que permite una notable flexibilidad al usuario final para poder almacenar agua cerca de la zona de consumo, sin esperar a las elevadas inversiones de las obras de regulación en cauce y a la incertidumbre sobre su planificación, enmarcadas en la lucha política y partidista.

Es esta circunstancia, la que unida a su particular situación, normalmente fuera del Dominio Público Hidráulico (DPH), la que ha mantenido durante mucho tiempo fuera de los cauces normativos al uso, la gestión del riesgo de este tipo de infraestructuras. Así como, la experiencia acumulada en el campo presístico se tradujo en el reglamento técnico de seguridad de presas y embalses en el año 1.996, esta prolífica infraestructura nunca tuvo una normativa específica sobre la gestión de riesgos. Esto obligó a aplicar de forma más o menos acertada, los preceptos del reglamento sin contemplar su particular concepción, sobre todo en aquellas de pequeñas dimensiones, y en un punto importante relativo a la confusión competencial. Bajo este marco, no extraña la relativa laxitud con que los “titulares” de estas infraestructuras cumplen con dicho reglamento

ESTUDIO NORMATIVO

La lista cronológica que muestra el actual Ministerio de Medio Ambiente, Rural y Marino, al remitirnos a la legislación aplicable a seguridad de presas, abarca todo el siglo XX, como es posible observar:

- *Ley de Aguas de 1879.*
- *Instrucción para el Proyecto de Pantanos, 1905.*
- *Normas transitorias para Grandes Presas 1960.*
- *Instrucción para el Proyecto, Construcción y Explotación de Grandes Presas de 1962.*
- *Instrucción para el Proyecto, Construcción y Explotación de Grandes Presas de 1967.*
- *Ley de Aguas de 1985.*
- *Directriz Básica de Planificación de Protección Civil de 1994.*
- *Reglamento Técnico sobre seguridad de Presas y Embalses de Marzo 1996.*
- *Real Decreto 9/2008, de 11 de enero, por el que se modifica el Reglamento del Dominio Público Hidráulico.*

Las infraestructuras de regulación han estado sometidas a actualizaciones normativas a lo largo del tiempo, normalmente como consecuencia de siniestros. Del conjunto de normas expuestas la consideración implícita del riesgo se encuentra en su articulado principalmente a partir de la Instrucción del 67. La rotura de la presa de Vega de Tera en la provincia de Zamora a comienzos de 1.959, con un elevado número de pérdidas humanas, provocó la creación de un Comité de expertos que concluyó en la redacción de la "Instrucción para Proyecto, Construcción y Explotación de Grandes Presas", por orden de 31 de marzo de 1967, en BOE de 27-10-67, (IGP). En ésta se marcaban criterios de diseño contemplando todas las fases del ciclo de vida de estas obras de regulación, sin distinguir titularidades, aunque deberíamos esperar casi cuatro décadas, para que la balsa se contemplara de forma específica. En esta Instrucción ya se planteaba la necesidad de reducir los riesgos aguas abajo de las presas e incluso de establecer la forma de advertir a la población potencialmente afectada sobre los riesgos que pudieran existir, si bien se refería fundamentalmente a los riesgos derivados de la evacuación de las avenidas.

Quince años más tarde en 1.982, tuvo lugar la rotura de la presa de Tous, en Valencia, aunque con una incidencia menor en cuanto a pérdidas humanas, tuvo un impacto mediático y social muy considerable. Las consecuencias de carácter normativo darían lugar al Reglamento Técnico de Seguridad de Presas y Embalses, de 1.996, basándose en las indicaciones de la Directriz Básica de Planificación de Protección Civil (Directriz) ante el riesgo de inundaciones, publicada en febrero de 1995.

La singularidad ofrecida por el Reglamento tenía varias vertientes, se habla explícitamente del riesgo potencial, ya se había contemplado en la Directriz, como se comentará a continuación, y se distinguía claramente entre titularidades, aplicándose en principio a las obras del Estado. Los cerca de 15 años transcurridos entre el siniestro de Tous y la publicación del Reglamento permitió adecuarse a los estándares de nuestro entorno cercano, se analizaron las legislaciones que tenían los suizos, italianos y estadounidenses, reparando en que estos últimos clasificaban en función de las pérdidas humanas acaecidas en caso de fallo. Finalmente la opción adoptada fue clasificar en tres categorías A, B y C, de forma que se laminara la respuesta mediática.

El Reglamento incluye en su ámbito de aplicación todas las fases de desarrollo y utilización de las presas y de los embalses, desde la fase de proyecto hasta la de su eventual puesta fuera de servicio, aportando como se ve un enfoque integral, y determina responsabilidades en tanto el titular de la presa será el encargado de velar por el estricto cumplimiento de las normas de seguridad en todas sus fases.

Será de aplicación a aquellas que se clasifiquen como “gran presa” y aquellas que se clasifiquen A o B en función de su riesgo potencial en caso de rotura según lo establecido en la Directriz, aun cuando no se clasifiquen como “gran presa”, siendo ésta aquellas que cumplan con una de estas condiciones como mínimo:

- *Altura superior a 15 metros, medida desde la parte más baja de la superficie general de cimentación hasta la coronación.*
- *Altura comprendida entre 10 y 15 metros, siempre que tengan alguna de las siguientes características:*
 - *Longitud de coronación superior a 500 metros.*
 - *Capacidad de embalse superior a 1.000.000 m³.*
 - *Capacidad de desagüe superior a 2.000 m³/s.*

Por otro lado, deja la puerta abierta a considerar “gran presa”, a cualquiera que presenten dificultades especiales en su cimentación o sean de características no habituales, siguiendo la estela de la IGP

Como se ha indicado, previo a este reglamento se redactó la Directriz, y es aquí donde por primera vez se habla explícitamente de los riesgos que pudieran derivarse del funcionamiento incorrecto o de la rotura potencial de presas.

Su objetivo es claro, establecer los requisitos mínimos que deben cumplir los correspondientes Planes Especiales de Protección Civil en cuanto a fundamentos, estructura, organización y criterios operativos de respuesta, para ser homologados e implantados en su correspondiente ámbito territorial, con la finalidad de prever un diseño o modelo nacional mínimo que haga posible, en su caso, una coordinación y actuación de los distintos servicios y Administraciones implicadas.

La clasificación de presas en tres categorías surge aquí. Siendo uno de los elementos más novedosos y distinguibles del futuro reglamento. Se establece la obligatoriedad de clasificar las presas en función del riesgo potencial derivado de su posible rotura o funcionamiento incorrecto, analizando las afecciones a la población, servicios esenciales y bienes materiales y medioambientales:

- CATEGORIA A: Corresponde a las presas cuya rotura o funcionamiento incorrecto puede afectar gravemente a núcleos urbanos o servicios esenciales, o producir daños materiales o medio ambientales muy importantes.
- CATEGORIA B: Corresponde a las presas cuya rotura o funcionamiento incorrecto puede ocasionar daños materiales o medio ambientales importantes o afectar a un reducido número de viviendas.
- CATEGORIA C: Corresponde a las presas cuya rotura o funcionamiento incorrecto puede producir daños materiales de moderada importancia y solo incidentalmente pérdida de vidas humanas. En todo caso, a esta categoría pertenecerán todas las presas no incluidas en las Categorías A o B.

Dada la novedad planteada, fue necesario redactar un documento a modo de guía que permitiera cumplir con los requisitos normativos, y así también en 1996 se publicó la “Guía Técnica para clasificación de Presas en función de su riesgo potencial” que desarrollaba los criterios descriptivos del Reglamento, estableciendo una metodología general de aplicación y los contenidos mínimos de las propuestas a presentar a la Administración, con objeto de homogeneizar la documentación que debería gestionar ésta.

Así mismo y como “leit motiv” de este estudio, se establece la obligatoriedad de redactar un Plan de Emergencia de Presas para todas aquellas que resulten clasificadas como A ó B.

En junio de 2001 aparece la Guía Técnica para la elaboración de los Planes de Emergencia de Presas, que tiene la finalidad de establecer las recomendaciones, criterios y metodologías a seguir en su redacción, teniendo en cuenta las singularidades que estos presentan con respecto a la planificación general de

emergencias ante inundaciones, de modo que se facilite la elaboración de unos planes homogéneos.

Un Plan de Emergencia de Presa debe consistir en un documento en el que se sistematicen las actividades que deban ser acometidas para la detección de las situaciones de emergencia y para su tratamiento, de forma que se minimice la probabilidad de fallo o mal funcionamiento y los eventuales daños a ellos asociados.

En general, responderán a los siguientes puntos.

1. Estrategia de control ante situaciones de alarmas.
2. Determinar las zonas potencialmente inundables.
3. Organizar los medios adecuados.

Los Planes de Emergencia de Presas consisten en el establecimiento de la organización y planificación de los recursos humanos y materiales necesarios, en situaciones de emergencia para controlar los distintos factores de riesgo que puedan comprometer la seguridad de la presa, y con ello eliminar o reducir la probabilidad de la rotura o avería grave.

Asimismo, establecen un sistema de información y comunicación, con los correspondientes escenarios de seguridad y peligro, a las autoridades de Protección Civil competentes, para que se activen un conjunto de actuaciones preventivas y de aviso a la población para reducir o eliminar los daños potenciales en caso de rotura o avería grave de la presa. Para ello es necesario que en los Planes de Emergencia de presas se determine la zona inundable en caso de rotura, indicando los tiempos de propagación de la onda de avenida y efectuar el correspondiente análisis de riesgos.

El riesgo potencial asociado a estas infraestructuras y las medidas a acometer para su análisis quedan claramente definidas en el conjunto de normativas descritas, aunque en ningún caso se referencian las balsas como elementos de similares características. No es hasta 2008, cuando de forma explícita en el R.D. REAL DECRETO 9/2008, de 11 de Enero, de BOE 16 de enero, por el que se modifica el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, aprobado por el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, se produce la modificación del texto refundido de la Ley de Aguas, para incorporar los

aspectos relativos a la seguridad de presas y embalses, adicionando un nuevo Título VII con la denominación de “De la seguridad de la presa y de su embalse”, donde el artículo 357 define entre otros de forma expresa el concepto de balsa:

“...c) Balsa: Estructura artificial destinada al almacenamiento de agua situada fuera de un cauce y delimitada total o parcialmente por un dique de retención.

d) Altura de balsa: Diferencia de cota entre el punto más bajo de la cimentación del talud exterior del dique de cierre y el punto más alto de la estructura resistente...”

Incorpora en su articulado la clasificación en función del riesgo potencial, de igual forma a lo expuesto hasta ahora, en su artículo 358, y para garantizar la correcta implantación y desarrollo práctico, evitando las discordancias observadas por la coexistencia de la IGP y del Reglamento, establece en su Capítulo IV, sobre Régimen jurídico de la seguridad de las presas y balsas la redacción de unas Normas Técnicas de Seguridad (NTS), que derogarán sendas normativas:

"Artículo 364. Normas Técnicas de Seguridad de Presas y Embalses.

1. Las Normas Técnicas de Seguridad, que serán aprobadas mediante real decreto, previo informe de la Comisión Técnica de Seguridad de Presas y de la Comisión de Normas para Grandes Presas, establecerán las exigencias mínimas de seguridad de las presas y embalses, graduándolas según su clasificación y determinarán los estudios, comprobaciones y actuaciones que el titular debe realizar y cumplimentar en cada una de las fases de la presa.

Las exigencias de seguridad son aquellas condiciones que deben cumplir las presas y embalses en todas sus fases. El criterio básico para determinar las exigencias de seguridad será el riesgo potencial que pueda derivarse de la rotura o el funcionamiento incorrecto de la misma, evaluado en el proceso de clasificación de la presa.

2. Asimismo, las Normas Técnicas de Seguridad establecerán los criterios básicos para la convalidación o adaptación, en su caso, de las actuaciones y exigencias

de seguridad en las presas y embalses existentes, que se hubiesen realizado de acuerdo con las normas dictadas antes de la entrada en vigor de aquéllas.

3. Deberán aprobarse las siguientes Normas Técnicas de Seguridad:

a) Norma Técnica de Seguridad para la clasificación de las presas y para la elaboración e implantación de los planes de emergencia de presas y embalses.

b) Norma Técnica de Seguridad para el proyecto, construcción y puesta en carga de presas y llenado de embalses.

c) Norma Técnica de Seguridad para la explotación, revisiones de seguridad y puesta fuera de servicio de presas.

Con posterioridad y tratando de las obligaciones del Titular en el artículo 367 señala:

“Artículo 367. Obligaciones del titular.

1. Los titulares de presas y balsas de altura superior a 5 metros o de capacidad de embalse mayor de 100.000 m³, de titularidad privada o pública, existentes, en construcción o que se vayan a construir, estarán obligados a solicitar su clasificación y registro. La resolución de clasificación deberá dictarse en el plazo máximo de un año.

2. A los efectos previstos en el artículo anterior, el titular deberá disponer de los medios humanos y materiales necesarios para garantizar el cumplimiento de sus obligaciones en materia de seguridad.

3. Además de lo indicado en los anteriores apartados, al titular de la presa que se encuentre dentro del ámbito de aplicación establecido en el artículo 356 le corresponden las siguientes obligaciones:

a) Cumplir las Normas Técnicas de Seguridad a que se refiere el artículo 364...”

El primer borrador de las normas técnicas de seguridad de presas y embalses se publicó en noviembre de 2010. Tras un proceso de participación se publica el segundo borrador de las normas técnicas este pasado mes de julio.

En cuanto a la metodología a aplicar, y sobre todo respecto a “exigencias cartográficas”, respecto a los planes de emergencia señala en su artículo 19, de la Sección II. Elaboración de los Planes de Emergencia, recordemos su condición de borrador:

“Artículo 19º.- Zonificación territorial y análisis de los daños generados por la rotura

19.1.- La zonificación territorial tiene por objetivo conocer, con suficiente aproximación, los potenciales efectos que produciría la rotura de la presa, delimitando las zonas progresivamente inundables, y la estimación de daños que ello podría ocasionar.

19.2.- La delimitación de la zona potencialmente inundable debida a la propagación de la onda de avenida se establecerá contemplando diversas hipótesis de rotura, según las diferentes causas potenciales, estableciéndose en cada caso los mapas de inundación correspondientes a la envolvente de las hipótesis contempladas.

Las hipótesis de rotura, salvo justificación en contra, serán:

a. En situación normal. Hipótesis de rotura sin avenida, o sin aportación ni entrada de agua en las balsas, y con el embalse en su máximo nivel normal.

b. En situación límite. Con el embalse a nivel de coronación de la presa, y desaguando la avenida extrema.

Para las balsas, la avenida extrema a considerar se entiende como la correspondiente al máximo caudal de entrada por los órganos de aportación coincidente con las máximas precipitaciones que pudiesen registrarse sobre su vaso, así como con las eventuales escorrentías que pudiesen entrar en el mismo.

c. Se considerará la situación de rotura encadenada

19.3.- Los estudios de propagación de la onda de avenida se realizarán con modelos de simulación acordes a la orografía del área de inundación y a las características del flujo.

Se estudiarán todos los parámetros hidráulicos que se consideren útiles para la identificación y evaluación de las afecciones. Como mínimo serán los siguientes:

a. Calado y velocidad del agua.

b. Tiempo de llegada de la onda de avenida.

19.4.- Se delimitarán las áreas inundadas en tiempos progresivos adecuados a las características de la onda de avenida.

Se delimitará la zona inundable en la primera media hora a partir del inicio del fenómeno de la rotura.

Se realizará un inventario de afecciones y daños potenciales asociados a cada una de las hipótesis de rotura consideradas en los escenarios simulados.

El límite del estudio se establecerá cuando se alcance un caudal máximo inferior a la capacidad del cauce sin producir daños, salvo que la onda de avenida llegue a un embalse clasificado en A o B, en cuyo caso dicho embalse será el límite del estudio.

Los planos de zonificación territorial y de delimitación de las áreas de inundación potencial se representarán sobre cartografía oficial, en formato digital y georreferenciada, a escala adecuada conforme a lo dispuesto en cada ámbito territorial, mínima de 1:25.000, y preferiblemente sobre cartografía de zonas inundables.

Que como se puede ver es todo un esquema de trabajo para el presente estudio.

Finalmente y dado el alcance de nuestro análisis conviene estudiar que se indica normativamente sobre cartografía de zonas inundables. Si nos remitimos al Real Decreto 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación, como respuesta a la trasposición de la Directiva Europea 2007/60/CE relativa a la

evaluación y gestión de los riesgos de inundación, no observamos de forma explícita ninguna consideración de carácter metodológico, referido a la calidad de la información de partida, existiendo en todo caso referencias al SNCZI, Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables.

Remitiéndonos ahora a la información ofrecida por el Ministerio nos encontramos en su página web:

“El Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino, siguiendo los principios de la Directiva 2007/60 sobre evaluación y gestión de riesgos de inundación, ha puesto en marcha el Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI), un instrumento de apoyo a la gestión del espacio fluvial, la prevención de riesgos, la planificación territorial y la transparencia administrativa.

El eje central del SNCZI es el visor cartográfico de zonas inundables, que permite a todos los interesados visualizar los estudios de delimitación del Dominio Público Hidráulico (DPH) y los estudios de cartografía de zonas inundables, elaborados por el MARM y aquellos que han aportado las Comunidades Autónomas.

El visor sirve de ayuda a los organismos de cuenca en la emisión de informes sobre autorizaciones en el DPH y zona de policía, en la gestión de avenidas en conexión con el S.A.I.H. (Sistema Automático de Información Hidrológica) y en la planificación de las actuaciones de defensa frente a inundaciones; agiliza la planificación y gestión de inundaciones por los servicios de Protección Civil; facilita la transmisión de información sobre zonas inundables a las administraciones competentes en planificación territorial y empresas promotoras; y permite a los ciudadanos conocer la peligrosidad de una zona determinada.”

Que igualmente carece de referencia procedimental, salvo un enlace a la “Guía Metodológica de determinación de zonas inundables”, que se encuentra en fase de

redacción y con fecha prevista de publicación a finales de este año 2.011, y en la que intervienen el CEDEX, IGME e INDUROT de la Universidad de Oviedo.

Dado que en la actualidad se están acometiendo múltiples trabajos relacionados con el SNCZI, se opta por analizar la información relativa a los concursos públicos para el desarrollo de esas asistencias, encontrándonos ahora sí con características específicas en los pliegos de bases como en el caso siguiente para la demarcación hidrográfica del Ebro.

Que indica en las páginas 24 y 25 las características técnicas de los Modelos Digitales del Terreno a presentar por el adjudicatario, que como se puede comprobar estipula mallas regulares de 2 m en formato ASCII, tanto para los Modelos Digitales del Terreno como los de Superficie.

09 803 393 0411 SERVICIO PARA EL DESARROLLO DEL SISTEMA NACIONAL DE CARTOGRAFÍA DE ZONAS INUNDABLES EN LA DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL EBRO	
 MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL Y MARINO	SECRETARÍA DE ESTADO DE MEDIO RURAL Y AGUA DIRECCIÓN GENERAL DEL AGUA CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL EBRO Q-5017001-H
CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL EBRO GABINETE TÉCNICO COMPROBADO ARITMETICAMENTE 30 SET. 2009 Zaragoza, de de	
 09.803.393/0411	
TIPO: PLIEGO DE BASES	REFERENCIA CRONOLÓGICA: 09/09
CLASE: SERVICIOS ASISTENCIA TÉCNICA PARA EL DESARROLLO DEL SISTEMA NACIONAL DE CARTOGRAFÍA DE ZONAS INUNDABLES EN LA DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL EBRO	
PROVINCIA: VARIAS	CLAVE:
TÉRMINO MUNICIPAL: VARIOS	CLAVE:
RÍO: VARIOS	CLAVE:
PRESUPUESTO TOTAL:	6.196.118,66 EUROS
AUTOR:	MARIA LUISA MORENO SANTAENGRACIA

Imagen2: Portada Pliego de Bases Fuente: Contratación del Estado

Las características técnicas serán las siguientes:

- 1 El Modelo Digital de Terreno a entregar será una malla regular de 2 metros en formato ASCII x,y,z en el que se habrán eliminado las alturas referentes a edificaciones, otras construcciones como antenas, aerogeneradores, catenarias, puentes y pasos elevados, vegetación y vehículos. En estas zonas se interpolarán datos altimétricos cercanos con objeto de cubrir la

09 803-1 3.04 1

SERVICIO PARA EL DESARROLLO DEL SISTEMA NACIONAL DE CARTOGRAFÍA DE ZONAS INUNDABLES EN LA DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL EBRO

totalidad de la superficie.

- 2 El Modelo Digital de Superficies a entregar será una malla regular de 2 metros en formato ASCII x,y,z.
- 3 El Modelo de Intensidades a entregar será una malla regular de 2 metros en formato GeoTiff.
- 4 Los puntos interpolados se entregarán como malla regular de 2 metros en formato GeoTiff y en formato ASCII x,y.

36

Habiendo repasado la normativa referida a los riesgos potenciales asociados a este tipo de infraestructuras de regulación, conviene remarcar que para dar respuesta al conjunto de trabajos que deberán acometerse en las balsas en los próximos años el CEDEX, junto con el CNEGP y bajo el auspicio del Ministerio se publicó el pasado año el “Manual para el Diseño, Construcción, Explotación y Mantenimiento de Balsas”, que remite a la normativa ya descrita a la hora de abordar los estudios de clasificación.

capítulo II

OBJETIVOS

INTRODUCCIÓN

En el capítulo I se ha expuesto el punto de partida sobre la situación de las balsas en nuestro país, el contexto general del estudio que se pretende elaborar, con una disparidad normativa, en el momento de presentarlo, que ha sido objeto de dudas por las Comunidades de Regantes por inseguridad jurídica, con una inversión realizada por parte de las administraciones muy notable, y con perspectivas futuras a considerar, y más en la coyuntura actual, en función de los horizontes temporales de la trasposición de la Directiva Europea y del RD 9/2008, con el imperativo legal de clasificar estas infraestructuras. No en vano y desde 1996 se han venido estudiando las consecuencias de fenómenos de colapso de estas estructuras, alrededor de 1.400, llegando a completarse dichos estudios hace pocos años.

Los cambios introducidos en el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, tras la entrada en vigor del Real Decreto 9/2008, de 11 de enero, por el que se modifica el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, aprobado por el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril (BOE de 16 de enero de 2008), se han mostrado como relevantes al ofrecer la inclusión de las balsas, elemento primordial en la regulación del recurso para riego, al que se le prestará una especial atención a semejanza de sus hermanas

mayores las presas, excluyendo las de carácter minero. Señalando en su artículo 367, como obligaciones del titular, la solicitud de clasificación y registro.

Vemos por tanto, como la necesidad de clasificar este tipo de infraestructuras, atendiendo a su riesgo potencial, es un hecho que deberá cumplimentarse a lo largo de estos años, dado el número existente y cuyas cifras reales se desconocen, estimándose entre 50.000 y 100.000 en nuestro país.

La metodología a seguir expuesta en la Guía Técnica sobre Clasificación de Presas en Función del Riesgo Potencial, tanto en cuanto no exista una particular para este tipo de obras, presta una especial atención a las fuentes cartográficas, base para una correcta definición de las “manchas de inundación”. Este particular es especialmente importante en las balsas, dada su particular situación fuera de cauce, y cuya rotura potencial deberá responder a distintos escenarios por poderse dar a lo largo de todo el dique de cierre. Este proyecto pretende analizar cómo la calidad de las fuentes cartográficas condiciona el resultado final, que no es otro que la delimitación de daños por ocupación de terrenos circundantes. Siendo este particular de especial relevancia en zonas urbanas.

OBJETIVOS

Aplicando la metodología expuesta en el punto anterior se pretende responder a los siguientes objetivos:

- Delimitar zonas inundables por colapso de balsas, cartografiando zonas de riesgo potencial atendiendo a la normativa vigente
- Analizar la sensibilidad de los modelos hidráulicos atendiendo a la calidad de la fuente cartográfica.
- Establecer correlaciones en función del origen de los datos cartográficos:
 - Convencional
 - Láser (LIDAR)

capítulo III

SOFTWARE

INTRODUCCIÓN

Los capítulos precedentes han mostrado las necesidades que señalan las normativas vigentes para establecer las cartografías de riesgo. El desarrollo de las Guías Técnicas, tanto las de clasificación de presas en función del riesgo potencial, como la de elaboración de los planes de emergencia, permite incidir sobre el principal ítem que este tipo de trabajos exige, y que conforma el corazón del estudio, y es la metodología empleada para realizar la simulación hidráulica, y que se sustenta por software específico. Según un estudio del ICOLD, Comité Internacional de Grandes Presas y sin ánimo de ser exhaustivo, existen como mínimo 27 programas distintos, comúnmente conocidos por “modelos”, con posibilidad de ser empleados, como vemos en la página siguiente, y que dan cuenta de paquetes tanto comerciales como de libre distribución. Esta lista se encuentra pendiente de actualizar, por lo que no contempla uno de reciente aparición, como evolución de otro software de mayor recorrido, CARPA, Cálculo en Alta Resolución de Propagación de Avenidas, desarrollado por el Grupo FLUMEN de la UPC. Nos referimos al modelo IBER, de muy reciente aparición, apenas un año, de desarrollo español y con grandes perspectivas, conformando actualmente un duro competidor con otros paquetes comerciales de gran historia en el mercado.

Nº	Agencia	Nombre del modelo
1	USA / National Weather Service	DAMBRK (original)
2	USA / National Weather Service	SMPDBK (Simplifield Dambreak)
3	BOSS International	BOSS DAMBRK
4	HAESTAD METHODS	HAESTAD DAMBRK
5	Binnic & Partners	UKDAMBRK
6	Department of Weather Affairs and Forestry Pretoria, South Africa	DWAF-DAMBRK
7	USA / COE Hydrologic Engineering Center	HEC-programs (HEC-RAS)
8	Tams	LATIS
9	IWHR, PR China	DBK 1
10	IWHR, PR China	DBK 2
11	Royal Institute of Technology, Stockolm	TVDDAM
12	Cemagref	RUBAR 3
13	Cemagref	RUBAR 20
14	Cemagref	CASTOR
15	Delf Hydraulics	SOBEK
16	Delf Hydraulics	DELFT 2 D
17	Consulting Engineers Reiter Ltd.	DYX 10
18	ANU-Reiter Ltd	DYNET ANUFLOOD
19	ENEL Centro di Ricerca Idraulica e Strutturale	RECAST
20	ENEL Centro di Ricerca Idraulica e Strutturale	FLOOD 2D
21	ENEL Centro di Ricerca Idraulica e Strutturale	STREAM
22	Danish Hydraulic Institute	MIKE 11
23	Danish Hydraulic Institute	MIKE 21
24	ETH Zürich	FLORIS
25	ETH Zürich	2D-MB
26	EDF-Laboratoire National Hydraulique	RUPTURE
27	EDF-Laboratoire National Hydraulique	TELEMAC-2D

Dada la importancia de la tipología de modelos puesta de manifiesto en la normativa, conviene realizar una revisión previa de los esquemas numéricos de simulación que fundamente la elección del software adecuado, para ello en el siguiente epígrafe se han reproducido extractos de la Tesis Doctoral *“Análisis integrado con esquemas en volúmenes finitos en una y dos dimensiones”*, de Ernest Bladé de la UPC, donde se realiza una revisión bibliográfica de los fundamentos de dichos modelos, que permiten encauzar la elección del más adecuado para cada caso.

MODELOS DE SIMULACIÓN. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

“La modelación matemática del flujo en lámina libre ha evolucionado paralelamente a la capacidad de los ordenadores, al desarrollo del cálculo numérico en general y al desarrollo de la modelación numérica en áreas de conocimiento próximas.

Para el estudio de los efectos de la propagación de avenidas en ríos, y en concreto para la obtención de valores de velocidad y niveles de agua, se han usado en el pasado, y todavía se usan mayoritariamente en la actualidad, modelos unidimensionales en régimen permanente gradualmente variado y fondo fijo. Estos pueden ser una herramienta suficiente para estudios donde la evolución temporal no sea un factor a tener en cuenta y el flujo sea eminentemente unidimensional. Este tipo de modelos se basan en esquemas numéricos relativamente simples pero eficaces, pueden considerar cambios de régimen, cauces con geometrías complejas y con llanuras de inundación, y singularidades tales como azudes, puentes, pasos bajo vía, etc.

En el caso que el proceso a estudiar sea claramente no permanente se debe recurrir a las ecuaciones unidimensionales del régimen gradualmente variable o ecuaciones de Saint Venant unidimensionales. Para intentar resolver estas ecuaciones se han utilizado en el pasado gran cantidad de esquemas numéricos distintos, algunos de ellos con las ecuaciones completas y muchos otros con distintas simplificaciones consistentes en despreciar los términos con menor contribución, dando lugar a los métodos conocidos como métodos hidrológicos, onda cinemática y onda difusiva. La razón para no utilizar las ecuaciones completas, que es poder reducir el tiempo de cálculo, tiene menos sentido actualmente que hace unos años.

En este epígrafe se mencionan los distintos esquemas utilizados tradicionalmente para la resolución del movimiento no permanente gradualmente variable, así como sus limitaciones, y se da una visión general de las necesidades que han llevado al desarrollo de esquemas numéricos más complejos. También se citan algunos trabajos en otras materias que han servido para desarrollar herramientas que se utilizan en capítulos posteriores, así como los llamados modelos cuasi-bidimensionales que resuelven las ecuaciones de Saint Venant en una dimensión y usan técnicas simplificadas para tener en cuenta la inundación de las llanuras adyacentes al cauce.

La necesidad de estudiar fenómenos más complejos donde la hipótesis de unidimensionalidad se aleja demasiado de la realidad, como es el caso de la consideración rotura de infraestructuras, y la observación que en la naturaleza se encuentran muchas situaciones donde el flujo parece ser efectivamente bidimensional, es decir, predominan las dimensiones horizontales sobre la vertical, condujo al desarrollo de los esquemas bidimensionales. Para ello se pueden hacer distintas aproximaciones según se trate de estudiar un problema fluvial o de ingeniería marítima, según cuales sean las principales fuerzas determinantes del movimiento del agua, y según qué variables interese conocer.

En el último apartado se hace un repaso de los modelos comerciales de uso más generalizado que existen actualmente para modelación en hidráulica de ríos. La mayoría de ellos poseen potentes herramientas de pre y post proceso, pero módulos de cálculo con esquemas que suelen estar alejados de las últimas tendencias que se pueden encontrar en las publicaciones técnicas. A pesar de la progresión de las técnicas informáticas que han impulsado la evolución de los modelos numéricos en el campo de la hidráulica, a través de las distintas generaciones que se comentan a continuación, los algoritmos de los modelos más comúnmente utilizados para el estudio de problemas reales están cada vez más alejados de los últimos esquemas desarrollados en las Universidades y centros de investigación.

La evolución de la modelación numérica se suele describir dividiendo su historia en base a generaciones de modelos (Cunge, 1989), (Abbott, 1991) La primera generación, en los años 50, consistió simplemente en utilizar primitivos ordenadores

o calculadoras programables para la resolución de ecuaciones matemáticas. La segunda generación (años 60) fueron modelos numéricos que se construían enteramente, del principio al fin, para un problema concreto, destacando como adelantado a su tiempo, el modelo del delta del río Mekong (Cunge, 1975). La tercera generación supuso la creación de esquemas numéricos básicos, cada uno para un tipo de problema, que podían luego adaptarse con relativa facilidad para un estudio concreto de un río o un área determinada, es decir, para desarrollar un modelo a partir de unas herramientas existentes. Con esta tercera generación, que se prolongó hasta mediados de los 80, la modelación numérica se convirtió en una herramienta práctica que podía ser adquirida o construida por las principales empresas consultoras y comportó el desarrollo de métodos numéricos refinados y eficientes. Un inconveniente de los modelos de esta generación era su complejidad de uso, por lo que el productor y el usuario generalmente debían ser el mismo, siendo tan solo los resultados los que eran transferidos al cliente.

La cuarta generación ocurrió gracias a la generalización de los ordenadores personales, cada vez más económicos y potentes, y ha supuesto la popularización definitiva del uso de modelos numéricos en el campo de la hidráulica. En esta generación se han construido una serie de paquetes informáticos, o sistemas de modelación, económicos y de uso sencillo y amigable, de manera que un usuario distinto del constructor puede utilizarlos y crear sus propios modelos para problemas relativamente estándares. Los modelos de la cuarta generación, que son los que mayoritariamente se utilizan actualmente, requieren sin embargo personas con suficiente criterio y conocimiento en hidráulica para asegurar que los datos han estado utilizados de manera correcta y para una buena interpretación de los resultados.

La quinta generación, todavía en sus inicios, sería la inclusión de los modelos hidráulicos dentro de sistemas informáticos más amplios junto con otros modelos complementarios (meteorológicos, hidrológicos etc.), con actualizaciones y adquisición de datos automatizadas (a través por ejemplo, de sensores colocados en sitios estratégicos, imágenes vía satélite, sistemas de información geográfica y otras bases de datos) y verdaderamente expertos, es decir, que integren el conocimiento en

distintos campos y sean capaces de expresar los resultados de manera comprensible para una persona no experta en hidráulica, e incluso capaces de tomar decisiones. Abbott (1991) sugiere el término de hidroinformática para esta quinta generación de modelos, que supone la unión entre la hidráulica computacional y la inteligencia artificial y los sistemas de apoyo a la toma de decisiones (DSS de Decisión Support System).

La cuarta generación de modelos, y la incipiente quinta generación, han comportado la existencia de unas herramientas relativamente sencillas de utilizar. Algunas se han popularizado en gran manera y se están convirtiendo en estándares a la hora de estudiar problemas hidráulicos concretos, como la propagación de avenidas en ríos. Sin embargo, los esquemas numéricos utilizados por estos modelos están muy distanciados de las últimas aportaciones que se encuentran en la bibliografía especializada. En la tercera generación de modelos había un desequilibrio, en el sentido de ser modelos muy avanzados para la época en los esquemas numéricos, pero muy poco amigables y engorrosos de utilizar. Actualmente el desequilibrio se está produciendo en sentido contrario: en el mercado existe una considerable variedad de modelos comerciales, con una facilidad creciente de introducción de datos y potentes representaciones de los resultados, pero cuyos módulos de cálculo han evolucionado poco en los últimos años y no incorporan los últimos avances en sus esquemas numéricos.

La facilidad de uso de estos modelos y sus capacidades a la hora de representar los resultados deberían ir acompañadas de una evolución paralela en sus esquemas de resolución de las ecuaciones. Si no, se puede correr el riesgo de tomar como ciertos unos resultados poco correspondientes con la realidad, o en todo caso, mejorables. Los grandes avances en la capacidad y velocidad de los ordenadores parece que haya servido últimamente sólo para mejorar la presentación y facilidad de uso, pero precisamente estos avances hacen que la utilización de esquemas simplificados, o poco adecuados a cada problema, ya no sea justificable como podía haber sido hace un tiempo. Los modelos van a ser cada vez más utilizados por personas u organismos poco expertos en hidráulica, y sus resultados van a servir cada vez más para tomar decisiones importantes. Su evolución debería ser, por lo tanto, también hacia generalizar el uso de los últimos esquemas de alta resolución, capaces de representar

correctamente problemas complejos como soluciones discontinuas y **topografías complicadas**, y hacia la construcción de modelos inteligentes en el sentido de gestión de información y toma de decisiones, pero también en el sentido de utilización del mejor código o esquema numérico (unidimensional, bidimensional, de alta resolución, etc.) para cada problema determinado.

Esquemas unidimensionales

Régimen permanente

Para el estudio de los niveles y velocidades de agua en ríos, la aproximación que sin duda se ha utilizado más es la de flujo unidimensional y régimen permanente gradualmente variado. Por sencillez de programación y de discretización del dominio, y a veces por falta de información en las condiciones de contorno en régimen no permanente (hidrogramas), ésta es la metodología que más se utiliza incluso hoy. *Las hipótesis fundamentales para este tipo de aproximación son movimiento unidimensional, régimen permanente y fondo fijo.* La ecuación fundamental es la conservación de la energía entre dos secciones de río, aunque también se utiliza la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento para fenómenos locales, como pueden ser cambios de régimen, y otras ecuaciones más o menos empíricas para otros efectos locales como puentes, azudes, etc. En general estos esquemas de cálculo de curvas de remanso están del lado de la seguridad cuando el objetivo es conocer los niveles máximos en avenida, pero presentan limitaciones importantes a la hora de representar fenómenos reales, ya que la lámina de agua que se obtiene con ellos suele estar por encima de la envolvente de calados máximos que se obtendrían con un modelo en régimen variable y un hidrograma cuyo caudal punta fuera el caudal utilizado en el cálculo en régimen permanente.

Métodos para la resolución numérica de este tipo de flujo se pueden encontrar en libros generales de hidráulica de lámina libre, (Henderson, 1966), (Chaudhry, 1993),

siendo el más utilizado entre ellos el conocido método paso a paso, o “standard step method”

Régimen variable

El régimen variable se suele subdividir en régimen gradualmente variable, cuando las variaciones en calado y caudal se producen en tiempos prolongados y distancias grandes (como la propagación de una avenida en un gran río en régimen lento), y en régimen rápidamente variado cuando estas variaciones tienen lugar en tiempos cortos y distancias reducidas (resalto hidráulico en un río de montaña, frente de onda producido por una rotura de presa, etc.).

Las ecuaciones que describen el régimen variable en lámina libre en una dimensión son las ecuaciones de Saint Venant, escritas por primera vez por Barré de Saint Venant en 1871 y que sirven para describir tanto el régimen gradualmente variable, como el rápidamente variable. Estas ecuaciones no se pueden resolver para geometrías reales con métodos analíticos, mientras que el estudio de los fenómenos que describen mediante modelos físicos resulta enormemente complejo y costoso. Por todo ello, y gracias al desarrollo de la informática en las últimas décadas, los esfuerzos han ido encaminados hacia la resolución mediante modelos numéricos.

Esquemas unidimensionales clásicos

Un repaso detallado de los esquemas numéricos clásicos (por contraposición a los esquemas de alta resolución desarrollados más recientemente y que se introducen en el próximo apartado) de resolución de las ecuaciones completas de Saint Venant unidimensionales en lámina libre, se puede encontrar en Gómez (1988) y Chaudhry (1993). Todos ellos se podrían clasificar en tres grandes grupos, que son el método de las características, los métodos en diferencias finitas y los métodos en elementos finitos.

Merecen un comentario aparte los métodos que utilizan las ecuaciones de Saint Venant simplificadas, entendiendo como tales aquellos que prescinden de alguno de los términos de la ecuación del movimiento. Estos métodos se pueden consultar en Abbott (1979) y son básicamente los métodos hidrológicos, que desprecian completamente la ecuación del movimiento (entre los cuales destaca el método de Muskingum), el método de la onda cinemática, que sólo considera el término de fricción y de la pendiente de la solera en la ecuación del movimiento, el método de la onda difusiva que incluye además los términos de presión, y el método de la onda dinámica cuasi-permanente, que tan solo desprecia el término de la aceleración local. Estos métodos tenían sentido cuando la capacidad y velocidad de los ordenadores era limitada, pero por lo general lo han ido perdiendo a lo largo del tiempo, tan solo los métodos de Muskingum y la onda cinemática siguen utilizándose ampliamente en estudios hidrológicos.

De entre los métodos que utilizan las ecuaciones completas de Saint Venant, o métodos de onda dinámica, *el método de las características* (Gómez, 1988), (Bateman, 1993), (Chaudhry, 1993), tiene la ventaja de tener un gran significado físico, ya que aprovecha las propiedades físicas de transmisión de la información en el espacio y el tiempo. Fue de los primeros en utilizarse en los años 50. Existen distintas variantes del mismo como son las características rectas explícitas, características rectas implícitas, y las características curvas, pero todos ellos necesitan incrementos de tiempo de cálculo muy pequeños y discretizaciones espaciales también reducidas. *Al igual que el resto de métodos clásicos presenta inconvenientes a la hora de representar flujo rápidamente variable para el cual pueden aparecer discontinuidades en la solución, aunque puede utilizarse tanto para régimen lento como para régimen rápido.* Bateman (1993) introduce el método de las características modificadas, capaz de representar correctamente la propagación de frentes de onda en canales prismáticos. El método de las características, puede servir para canales prismáticos, pero su aplicación para canales no prismáticos y de geometría irregular es de una enorme complejidad y resultados poco fiables, por lo que no son adecuados, *ni han sido utilizados, para cauces fluviales.*

Los métodos en diferencias finitas pueden clasificarse en diferencias finitas explícitas y diferencias finitas implícitas dependiendo de si el proceso de encontrar la solución a lo largo del tiempo lo hacen punto por punto en la malla de discretización espacial del dominio, o bien resolviendo conjuntamente todos los puntos de la malla en cada instante. Asimismo, pueden tener distintos órdenes de aproximación según sea el término de error debido al truncamiento a la hora de expresar las derivadas, y distintas posibilidades de discretización en cuanto a localización de las variables de cálculo en la malla. En este apartado no se entra en detalle en cada uno de los muchos esquemas clásicos en diferencias finitas existentes, tan solo se mencionan algunos de los más utilizados, el resto aparecen detallados en (Mahmood y Yevjevich, 1975), (Abbott, 1979), (Cunge, 1980), (Gómez, 1988), (Chaudhry, 1993) y (Bateman, 1993).

Los métodos en diferencias finitas explícitos más utilizados han sido el esquema difusivo (llamado también esquema de Lax-Friedrichs o simplemente esquema de Lax), esquema Leap-Frog, esquema de McCormack, y esquema Lambda. Entre ellos el esquema de McCormack ha sido el más difundido; es un esquema de segundo orden de precisión en dos pasos que permite, en principio, un tratamiento sencillo de los términos fuente. Además el esquema de McCormack se ha utilizado como esquema de partida para la construcción de esquemas de alta resolución (Alcrudo, 1992), (García-Navarro y Alcrudo, 1992a), (Franco, 1996). Los esquemas explícitos presentan el inconveniente de requerir incrementos de tiempo muy pequeños en el proceso de cálculo para cumplir la condición de estabilidad de Courant y, por lo tanto, son más caros computacionalmente hablando respecto los métodos implícitos, aunque esta desventaja se atenúa cuando el flujo es rápidamente variable.

Entre los métodos en diferencias finitas implícitas destacan en primer lugar el esquema de Preissmann, también llamado esquema de los cuatro puntos, extensamente utilizado en ríos desde su formulación en los años 60 (Abbott, 1979), (Cunge, 1980), (Chaudhry, 1993), (Bladé, Gómez, Dolz, 1994). Es un esquema que proporciona resultados extraordinariamente precisos en régimen lento, con una gran velocidad de cálculo y que permite utilizar grandes incrementos de espacio y de tiempo. Otros esquemas en diferencias finitas implícitas son el esquema de Beam and Warming (Chaudhry, 1993) y el esquema de Vasiliev (Gómez, 1988), (Chaudhry,

1993). Los esquemas implícitos se han utilizado también para flujo rápidamente variable, aunque entonces el incremento de tiempo debe reducirse hasta valores similares a los de los esquemas explícitos para representar las discontinuidades.

El método de los elementos finitos también se ha utilizado para la resolución de las ecuaciones de Saint Venant unidimensionales (Katopodes, 1984) (Gómez, 1988), (Hicks, 1992), (Yang, 1993). Este método, desarrollado y aplicado principalmente para problemas estructurales, da *óptimos resultados para ecuaciones elípticas o parabólicas*, mientras que las *ecuaciones de Saint Venant* forman un sistema *hiperbólico*. Necesita un elevado consumo de tiempo de cálculo (para problemas no lineales se deben utilizar las variantes más complejas del método) y la integración temporal se debe hacer igualmente en diferencias finitas. *Todo ello, junto con la sencillez de los contornos en una dimensión, hace que para el caso unidimensional este método no aporta ventajas considerables respecto de las diferencias finitas y sí más complejidad* (Cunge, 1980), (Gómez, 1988), (Franco, 1996).

A la hora de representar fenómenos reales de propagación de avenidas en ríos, frecuentemente ocurre que se encuentran discontinuidades en la solución en forma de resaltos hidráulicos o frentes de onda, es decir, el flujo ya no es gradualmente variable sino rápidamente variable. Las mismas ecuaciones de Saint Venant pueden servir para representar el flujo rápidamente variable, si se escriben en forma conservativa, pero la aplicación sin más de los métodos mencionados puede dar problemas de estabilidad y oscilaciones no reales de la solución. En este caso se han empleado dos tipos de aproximaciones distintas (Abbott, 1975), (Cunge, 1980), (Bateman, 1993): “Métodos de aislamiento del frente de onda” y “Métodos directos” siendo ésta última la deseable, ya que son capaces de localizar, simular y propagar las soluciones discontinuas sin necesidad de ninguna técnica especial....

...

Esquemas bidimensionales

Para describir muchos fenómenos naturales como puede ser la inundación de una gran llanura, la confluencia de dos cauces, el cruce de dos corrientes de agua, el flujo en un cauce ancho e irregular, etc., la aproximación unidimensional deja de ser adecuada y por ello se desarrollaron primero los esquemas cuasi-bidimensionales, y luego los esquemas bidimensionales propiamente dichos.

Los esquemas cuasi-bidimensionales fueron los primeros intentos de modelar la inundación de una zona llana a partir del desbordamiento de cauces principales. En ellos se aplican las ecuaciones de Saint Venant unidimensionales en un cauce principal, mientras que la llanura de inundación se representa mediante una serie de células de almacenaje. El primero de ellos fue el modelo del delta del río Mekong (Cunge, 1975); en este modelo se consideraban únicamente células de almacenaje conectadas entre ellas por ecuaciones de vertedero, al igual que en el modelo del delta del río Chao Phraya, en Bangkok (Vongvisessomjai y Tingsanchali, 1985). Pender (1992) utiliza esta misma aproximación cuasi-bidimensional e incorporó un mecanismo de reducción automática del incremento de tiempo para eliminar inestabilidades en el caso de una sola célula, que luego se generalizó para un número cualquiera de células (Bladé, Gómez, Dolz, 1994).

La modelación cuasi-bidimensional era la única que se podía pretender en un principio, debido a la poca capacidad y baja velocidad de los ordenadores antiguos. Hoy es posible utilizar esquemas numéricos más complejos. *Para algunos problemas de inundaciones por desbordamiento de cauces, y especialmente **si se dispone de poca información topográfica**, los esquemas cuasi-bidimensionales pueden representar todavía una aproximación práctica y de bajo coste, comparado con los esquemas verdaderamente bidimensionales que se discuten a continuación.*

Al igual que en el caso unidimensional, para la resolución de las ecuaciones de Saint Venant en dos dimensiones se ha utilizado el método de las características, métodos en diferencias finitas, y métodos en elementos finitos, pero en el caso bidimensional

además se ha utilizado la técnica de discretización en volúmenes finitos. Todas las aproximaciones pueden servir para obtener métodos de alta resolución, pero la técnica de los volúmenes finitos es especialmente adecuada para ello.

Esquemas bidimensionales clásicos

Llamamos, como en el caso unidimensional, esquemas clásicos a todos aquellos que no sean de alta resolución. *Los esquemas clásicos se han utilizado con buenos resultados para flujo gradualmente variable, pero no sirven en general para rápidamente variable.*

El método de las características en dos dimensiones se utilizó por Katopodes y Strelkoff (1978) para la simulación bidimensional de rotura de presas y por Aleán (1997) para la modelación de una sistema de lagunas en México. Este método comporta grandes dificultades de implementación, especialmente en geometrías reales, necesita incrementos de tiempo muy pequeños y, en el caso de flujo rápidamente variable precisa una aproximación del tipo de aislamiento del frente de onda (shock fitting) con todas sus complicaciones, de manera que no tiene ninguna ventaja respecto de otras aproximaciones. Por ello ha quedado tan solo como una herramienta para la incorporación de las condiciones de contorno, en lo que sí se ha revelado útil y potente (Alcrudo, 1992), (Franco, 1996).

Existen gran variedad de métodos en diferencias finitas utilizados con buenos resultados para la modelación del flujo gradualmente variable en dos dimensiones. Incluso algunos se aplicaron para flujo rápidamente variable con resultados aceptablemente buenos antes del desarrollo de los esquemas de alta resolución (Chaudhry, 1993). Los esquemas clásicos en diferencias finitas se pueden dividir en aquellos que utilizan diferencias finitas explícitas y los que utilizan diferencias finitas implícitas. Dentro de los últimos tienen una relevancia especial los métodos de direcciones alternadas (ADI, de Alternate Direction Implicit).

El esquema en diferencias finitas explícitas más utilizado para la resolución de las ecuaciones del flujo en lámina libre en dos dimensiones es el esquema de McCormack, propuesto en 1969 por el autor del cual tomó el nombre y extensamente utilizado en mecánica de fluidos. Es un esquema en dos pasos (predictor–corrector) explícito, de segundo orden de precisión, compacto, que sirve para flujo gradualmente y rápidamente variable (añadiéndole un término de viscosidad artificial), que de forma sencilla se puede utilizar en dos dimensiones, incorporando los términos fuente y condiciones de contorno, y extenderlo a un esquema de alta resolución. El esquema de McCormack fue utilizado para las ecuaciones de Saint Venant bidimensionales por Jiménez y Chaudhry (1987) para la resolución de flujos supercríticos y cambios de régimen; por Zhang y Cundy (1989) para flujo superficial (overland flow) en laderas, donde probaron su capacidad de representar soluciones discontinuas; Fennema y Chaudhry (1990) y Chaudhry (1993) también lo aplicaron para flujo rápidamente y gradualmente variable a través de un estrechamiento; Valiani (1992) lo utilizó para la simulación de rotura de presas con fondo móvil y Shettar y Murthy (1996) para el estudio numérico de bifurcaciones junto con un modelo de turbulencia...

...

El método de los elementos finitos no ha sido demasiado popular a la hora de resolver las ecuaciones de Saint Venant en dos dimensiones por las mismas razones citadas en el caso unidimensional: complejidad y coste computacional. Con respecto a éste último, Vreugdenhil (1994) lo compara con distintos métodos de diferencias finitas llegando a la conclusión que, para una malla de unos mil nodos, el método requiere aproximadamente 200 veces más operaciones en cada incremento de tiempo que uno en diferencias finitas (la diferencia aumenta hasta 1800 veces más para diez mil nodos). *Los elementos finitos tienen ventajas, frente a las diferencias finitas clásicas, para considerar mallas irregulares adaptadas a los contornos y con distintas densidades en distintas partes del dominio. **Sin embargo, esta ventaja también la posee la técnica de los volúmenes finitos, utilizada por la mayoría de esquemas de alta resolución (apartado siguiente) y mucho más sencilla.*** Naaim y Brugnot (1994) comparan el método de los elementos finitos con un esquema de alta resolución en

volúmenes finitos para una rotura de presa: ambos consiguen una precisión parecida en los resultados, pero el primero necesita 233 veces más tiempo de CPU.

...

...También algunos de los modelos comerciales más utilizados (RMA-2, HVEL, FESWMS, y TELEMAC) utilizan elementos finitos...

Esquemas bidimensionales de alta resolución

En este epígrafe se observará como el conjunto de autores citados han venido utilizando estos esquemas en el análisis de roturas de presas.

Los esquemas numéricos clásicos en dos dimensiones sufren los mismos problemas que para una dimensión en cuanto aparecen discontinuidades en la solución (resaltos hidráulicos, frentes de onda, etc.), por lo que en los últimos años se ha realizado un considerable esfuerzo para conseguir esquemas bidimensionales de alta resolución. *Para ello, la técnica de los volúmenes finitos se ha mostrado muy útil, tomando las ventajas tanto de las diferencias finitas como de los elementos finitos.* Partiendo de la forma integral de las ecuaciones en forma conservativa, las discontinuidades se representan sin ninguna técnica especial a la vez que se conserva la masa y la cantidad de movimiento (Tan, 1992), (Zhao, Shen, Lai y Tabios III, 1996).

Los primeros trabajos en esta línea fueron los realizados por Alcrudo y García Navarro, que presentan la extensión a dos dimensiones del esquema MUSCL (Alcrudo, 1992), (Alcrudo y García-Navarro, 1992b, 1993), y del esquema de McCormack TVD (Alcrudo, 1992), (Alcrudo y García-Navarro, 1994). Más adelante, Elliot y Chaudhry (1993) presentan un esquema para la resolución de problemas de rotura de presa en canales rectangulares curvos que consiste en una extensión del método de las características.

Tchamen y Kahawita (1994) presentan la comparación de varios Riemann Solvers para la resolución del problema de rotura de presa sobre lecho seco. Paquier (1994) desarrolla un esquema de alta resolución basándose directamente en el problema de

Riemann y lo aplica a la presa del río Angly (Francia) y a la presa del Lawn Lake en Colorado mientras que Bechteler, Nujic y Otto (1994) desarrollan un esquema tipo ENO basándose en el esquema MUSCL para la resolución de las ecuaciones de Saint Venant en dos dimensiones y lo aplican al área inundable del Polder-Altenheim, en Alemania, al lado del Rin. Más adelante, Nujic (1995) presenta dos esquemas de alta resolución basados en el esquema de Lax-Friedrichs, obteniendo versiones simplificadas y más eficientes de los métodos ENO desarrollados por Shu y Osher (1986) y Alcrudo y García-Navarro (1992a), y del esquema MUSCL (Alcrudo y García-Navarro, 1993), pero con el inconveniente de introducir un parámetro de calibración que tiene un efecto parecido a una viscosidad artificial.

Francarollo y Toro (1995) utilizan el esquema WAF (Weight Averaged Flux), esquema conservativo, de segundo orden de precisión, que se puede ver como una generalización a sistemas no lineales de los esquemas de Lax-Wendroff o del Beam and Warming, junto con el Riemann Solver de Harten-Lax-Van Leer (o HLL). El esquema lo utilizan para un estudio numérico-experimental de problemas de rotura de presa. Franco (1996) realiza una comparación numérico-experimental del problema de rotura de presa utilizando el esquema de McCormack TVD, pero aplicado a una discretización en diferencias finitas.

Zhao, Shen, Lai y Tabios III (1996) presentan tres esquemas que, aunque no son realmente de alta resolución por ser de primer orden de precisión, utilizan Riemann Solvers para la resolución de flujo rápidamente variables. En el primero de ellos utilizan la técnica de Flux Vector Splitting, desarrollada para las ecuaciones de Euler y que en un principio no es válida para las ecuaciones de Saint Venant, en las que el vector de flujo no cumple la condición de homogeneidad (Alcrudo, 1992); sin embargo, añadiendo la ecuación de la energía a las de Saint Venant, obtienen un esquema análogo a las ecuaciones de Euler para el que sí se puede utilizar la técnica mencionada. Los otros esquemas que presentan son el Riemann Solver de Roe (también llamado Flux Difference Splitting) y el de Osher. Los tres esquemas los aplican para la rotura parcial de una presa y el resalto hidráulico oblicuo. Los mismos autores junto con Tan (Zhao, Shen, Lai, Tabios III, Tan, 1994) utilizan este último esquema de Osher para el estudio del río Kissimmee en Florida. También Faeh (1996)

desarrolla un modelo basado en el Riemann Solver de Roe para estudiar la erosión provocada por la rotura de presas.

Un modelo curioso es el de Unami, Kawachi, Munir Babar y Itagati (1999), que utiliza a la vez la técnica de los elementos finitos y la de los volúmenes finitos, la primera para la ecuación de continuidad y la segunda para la del movimiento, junto con una integración temporal por el método de Runge-Kutta de cuarto orden. El esquema lo utilizan para modelar el flujo en un aliviadero, y aunque no es estrictamente de alta resolución, los autores afirman que la combinación de los dos tipos de discretización permite eliminar las oscilaciones espúreas, aunque para ello añaden un término de dispersión artificial.

Al igual que en el problema unidimensional, en geometrías irregulares un buen tratamiento del término independiente de las ecuaciones de Saint Venant es fundamental, pero nada sencillo para esquemas conservativos, especialmente para segundo orden de precisión. Todos los esquemas mencionados anteriormente, o bien se aplican únicamente a geometrías sencillas, donde el problema no se pone de manifiesto, o bien no entran en el problema. Como en una dimensión, fue también Vázquez-Cendon (Vázquez-Cendon, 1999c) la primera en proponer una discretización upwind del término independiente para esquemas bidimensionales de primer orden de precisión, seguida por Brufau (Brufau, 2000) con aplicaciones a geometrías reales. Posteriormente, los trabajos de Hubbard y García-Navarro (2000) realizan las primeras extensiones para esquemas de alta resolución con ejemplos para geometrías irregulares simples.

Modelos comerciales

Como se ha comentado en la introducción del presente epígrafe, fue a partir de la aparición de modelos de la llamada cuarta generación que se popularizó el uso de modelos numéricos en el campo de la hidráulica, principalmente debido a la

construcción y distribución de modelos comerciales por parte de una serie de centros e instituciones.

Una primera familia de modelos comerciales, que representa sin duda los más extensamente utilizados por su sencillez y amplia difusión, son aquellos que permiten estudiar cauces fluviales mediante la aproximación unidimensional y régimen gradualmente variado. Entre ellos destacan los modelos del Hydraulic Engineering Center (HEC) del U.S. Army Corps of Engineers, modelos HEC-2 y HEC-RAS, junto con el modelo WSPRO del U.S. Federal Highway Administration. Estos modelos han ido evolucionando con el tiempo y aumentando sus capacidades, de manera que permiten representar ríos con cambios de régimen, secciones compuestas irregulares, puentes, pasos bajo vías, uniones, etc. A su vez, poseen cómodas interfaces gráficas para representar la geometría y ver los resultados, comparando distintas hipótesis de funcionamiento, y realizar informes. Su limitación evidente es la de sus hipótesis principales: régimen permanente y unidimensional. Este tipo de modelos unidimensionales en régimen permanente, aunque representan una simplificación importante del fenómeno de propagación de una avenida, en muchos casos pueden ser una aproximación suficientemente adecuada para predecir niveles de agua y por ello son ampliamente utilizados en ingeniería. Otro modelo unidimensional para régimen permanente, de uso más restringido, es el ISIS Steady de HR Wallingord. Éste resuelve el mismo problema pero utilizando las ecuaciones completas de Saint Venant y un esquema típico para régimen no permanente (se puede escoger entre el esquema de los cuatro puntos de Preissmann u otro que se conoce como Pseudo-Timestepping Method) y condiciones de contorno constantes.

El segundo paso en los modelos comerciales, que representa un salto cualitativo importante en cuanto a complejidad de sus esquemas numéricos, son aquellos que mantienen la hipótesis de unidimensionalidad pero resuelven las ecuaciones de Saint Venant, es decir, permiten modelar cauces fluviales en régimen no permanente. De entre ellos destaca el MIKE 11 en propagación de avenidas, que tiene una serie de módulos que permiten distintas aproximaciones al fenómeno (régimen permanente, onda cinemática, onda difusiva y ecuaciones completas) y capacidad de modelar secciones compuestas y llanuras de inundación mediante células de almacenaje, así

como azudes, pasos bajo vías y otras estructuras. Junto al módulo hidrodinámico se pueden utilizar otros módulos para el estudio de transporte de sedimentos y de calidad de aguas. MIKE 11 permite realizar la entrada de datos a partir de programas que utilizan Sistemas de Información Geográfica (GIS) y exportar los resultados hacia ellos. Por su lado, el modelo SOBEK, de Delft Hydraulics, para ríos canales y estuarios, bastante menos extendido, también permite la aproximación en régimen permanente o régimen variable y dispone de módulos adicionales para el estudio de calidad de aguas, intrusiones salinas, transporte de sedimentos y cambios morfológicos en ríos y estuarios. Finalmente, otro modelo unidimensional en régimen variable destacable es el DAMBRK, de BOSS International, orientado al estudio de la formación y propagación de ondas de rotura de presas, con capacidades para modelar desbordamientos. HR Wallingford dispone del modelo unidimensional ISIS Flow, basado en el esquema de los cuatro puntos de Preissmann, pero que permite también utilizar los métodos hidrológicos de Muskingum y VPMC (Variable Point Muskingum-Cunge). Finalmente recientemente, el US Army corps of Engineers Hydrologic Engineering Centre ha incorporado el modelo UNET, para flujo unidimensional, que utiliza un esquema en diferencias finitas implícitas de los cuatro puntos, en el conocido paquete HEC-RAS. Como este tipo de modelos se basan en resolver las ecuaciones de Saint Venant, lo que en algunos casos, como es la formación de discontinuidades, puede ser complejo, su uso debe hacerse con cuidado, ya que aunque el modelo dé una solución, el usuario debe asegurarse hasta que punto ésta es acorde con la realidad.

En cuanto a los modelos bidimensionales destaca sin duda, por su amplia difusión, el BOSS SMS de BOSS International Inc., que incorpora distintos módulos de cálculo como son el RMA-2 y el HIVEL2D, desarrollados por el Waterways Experiment Station Hydraulics Laboratory del U.S. Army Corps of Engineers, el FESWMS del U.S. Federal Highway Administration, el SED-2D para transporte de sedimentos y el RMA-4 para transporte de contaminantes. En definitiva el SMS es una interface de pre y post proceso para los distintos módulos de cálculo, con capacidad de generación de mallas de elementos finitos a partir de datos suministrados por el usuario o de información topográfica digitalizada. Tanto el RMA-2 como el FESWMS son módulos

hidrodinámicos con esquemas de elementos finitos que permiten el cálculo tanto en régimen lento como en rápido gracias a la inclusión de coeficientes de viscosidad turbulenta que pueden cambiar automáticamente para hacer estable el esquema. El FESWMS fue inicialmente desarrollado para el flujo alrededor de estructuras artificiales y estaciones de aforo, por lo que permite incorporar más fácilmente azudes, pasos bajo vías y pilas de puente. El HIVEL2D por otro lado es específico para flujos que contienen regímenes subcríticos y supercríticos a la vez, obteniéndose soluciones estables para flujos con discontinuidades como resaltos hidráulicos.

Electricité de France (EDF), a su vez, desarrolló un modelo bidimensional parecido, el modelo TELEMAC (Hervouet y Janin, 1994), (Bates, 1995), distribuido también por HR Wallingford, que utiliza un código de elementos finitos y viscosidad turbulenta constante, con capacidades de modelación hidrodinámica, dispersión de contaminantes, transporte de sedimentos y calidad de aguas. El Danish Hydraulic Institute ofrece el modelo MIKE21, con un módulo hidrodinámico que utiliza un esquema numérico del tipo ADI para resolver las ecuaciones de Saint Venant bidimensionales (y limitado por consiguiente a la modelación de flujo en régimen lento), que puede considerar, a parte de la pendiente del fondo y las fuerzas de fricción, el efecto de fuerzas como el viento, la fuerza de Coriolis, corrientes inducidas por el oleaje y la evapotranspiración. A parte del módulo básico hidrodinámico consta también de módulos para transporte de arena, material sólido cohesivo, transporte de contaminantes, calidad de aguas, eutrofización y polución por materiales pesados. Recientemente el DHI ha integrado en uno los dos modelos MIKE 11 y MIKE 21, dando paso al modelo MIKE FLOOD, de manera que en un único modelo puede haber zonas con aproximación unidimensional y otras en dos dimensiones. Sin embargo, los esquemas numéricos siguen siendo los del MIKE 11 y MIKE 21.

Otro modelo en diferencias finitas para la modelación del flujo hidrodinámico no permanente es el SOBEK, de Delft Hydraulics, que se basa en un esquema en diferencias finitas basado en una malla rectangular, permite modelar flujo subcrítico y supercrítico y tener en cuenta estructuras especiales como diques, viaductos, pasos bajo vía, azudes, etc.

Como se ha apuntado en la introducción de este capítulo, estos modelos comerciales, unidimensionales o bidimensionales, son muy amigables de utilizar pero sus esquemas numéricos distan mucho de ser punteros. Aunque poseen unas entradas de datos y salida de resultados gráficos espectaculares, y están contruidos de manera que prácticamente siempre se obtiene una solución, pueden ser engañosos. Se presentan como modelos capaces de resolver prácticamente cualquier tipo de problema de hidráulica fluvial: problemas de hidrodinámica, transporte de contaminantes, transporte sólido de materiales sueltos y cohesivos, problemas de calidad de aguas, inclusión de cualquier tipo de estructuras, eutrofización, etc. Sin embargo la mayoría de estos fenómenos son todavía muy desconocidos incluso en casos sencillos, por lo que estos modelos comerciales sólo pueden emplear ecuaciones y esquemas numéricos simples o válidos únicamente para algún caso particular, y en ningún caso son tan fiables ni precisos como su publicidad y su bonita presentación pueden hacer creer. El hecho de que con un modelo de los mencionados se obtenga un resultado a un problema determinado, no tiene por que implicar que este resultado sea siempre acorde con la realidad, ya que todos ellos utilizan una serie de hipótesis y simplificaciones importantes de las cuales no se suele informar al usuario. Por ello, los modelos comerciales pueden servir para conocer la respuesta global a un problema determinado, pero no tanto de detalle ya que puede haber discrepancias locales muy importantes. En el estado actual del conocimiento, los resultados obtenidos con cualquier modelo que pretenda ser general y capaz de resolver por si sólo un gran abanico de problemas distintos, deben ser utilizado con una precaución extrema.

Entre los modelos comerciales bidimensionales destacaría el modelo TASE/SWAN Plus de TASE Software Corporation Inc., modelo bidimensional para la modelación de flujo de agua en dos dimensiones y transporte de contaminantes, que es el único modelo comercial que utiliza un esquema numérico de alta resolución, basado en el Rieman Solver de Roe. Este modelo fue presentado en 1994 pero parece que no ha tenido continuidad.

Para finalizar debemos mencionar algunos modelos comerciales en tres dimensiones que han aparecido recientemente. En primer lugar el modelo MIKE 3 del Danish

Hydraulics Institute, desarrollado para la simulación de la hidrodinámica, calidad de aguas y transporte de sedimentos (cohesivos y no cohesivos) en ríos, estuarios, bahías, zonas costeras y mares. MIKE 3 resuelve las ecuaciones de Reynolds con un esquema en diferencias finitas y permite utilizar distintas formulaciones para la consideración de la turbulencia como un coeficiente de viscosidad turbulenta de Boussinesq constante, un modelo de submalla de Smagorinsky, un modelo k , un modelo $k - \varepsilon$, y un modelo mixto Smagorinsky/ $k - \varepsilon$. El RMA-10, desarrollado por el Waterways Experiment Station Hydraulics Laboratory del U.S. Army Corps of Engineers para ser utilizado en superordenadores tipo CRAY, se basa en un código de elementos finitos tridimensionales, extensión del RMA-2, y puede modelar flujo permanente y no permanente, transporte de salinidad y de sedimentos. RMA-10 supone que el flujo se puede considerar como hidrostático, despreciando la aceleración vertical, y contempla la interacción del sedimento transportado con el fondo (evolución morfológica). Finalmente, el modelo Delft3D, de Delft Hydraulics, que se ofrece para el estudio de la hidrodinámica, calidad de agua, transporte de contaminantes y cambios morfológicos en ríos, lagos y embalses, estuarios, puertos, bahías, zonas costeras y mares cerrados, permite una aproximación tanto bidimensional como tridimensional y distintas opciones para considerar la turbulencia basándose también en el concepto de viscosidad turbulenta de Boussinesq.

Finalmente sólo mencionar que algunos modelos desarrollados inicialmente para mecánica de gases, como es el caso de FLOW3D, debido a la similitud de las ecuaciones a resolver, se están utilizando actualmente para calcular flujos de agua en lámina libre. Respecto estos modelos comerciales tridimensionales, sirve el mismo comentario hecho para los modelos unidimensionales y bidimensionales sobre la precaución con que se deben contemplar los resultados obtenidos y la necesidad de un análisis crítico de los resultados.”

IBER

En el epígrafe anterior se ha mostrado una completa revisión bibliográfica tanto de los fundamentos de los modelos numéricos, como de sus respectivos esquemas de resolución de ecuaciones, indicando pros y contras, de modo que permiten justificar la elección del utilizado en este estudio. Se ha optado por analizar las posibilidades de un modelo nuevo, de apenas un año de vida, pero con un bagaje muy notable, el modelo IBER, de carácter libre, en español y con un respaldo institucional digno de reseñar.



Imagen3: Link promocional del programa IBER. Fuente: IBERAULA

IBER es un modelo matemático bidimensional para la simulación de flujos en ríos y estuarios promovido por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX en el marco de un Convenio de Colaboración suscrito entre el CEDEX y la Dirección General del Agua, y desarrollado en colaboración con el Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, GEAMA (de la Universidad de A Coruña UDC), el Grupo FLUMEN (de la Universitat Politècnica de Catalunya UPC y de la Universität de Barcelona UB) y el Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, CIMNE (vinculado a la Universität Politècnica de Catalunya UPC).

En la actualidad se encuentra operativa la versión IBER v 1.6 que mantiene las capacidades de sus antecesoras. Consta de un módulo hidrodinámico que permite la simulación bidimensional de cauces (y en consecuencia posibilita la definición de zonas inundables, la delimitación de vías de intenso desagüe o en general la

delimitación del Dominio Público Hidráulico), un segundo módulo de turbulencia y un tercer módulo de transporte de sedimentos para la cuantificación de la evolución de la carga sólida, tanto por arrastre de fondo como en suspensión, en la actualidad se está implementando un módulo nuevo de rotura de presas encontrándose en fase beta.

De esta manera, IBER se configura como un modelo numérico desarrollado directamente desde la administración pública española, fácilmente adaptable a las necesidades específicas de cada momento, diseñado para ser útil a las exigencias técnicas de las Confederaciones Hidrográficas en la aplicación de la legislación sectorial vigente en materia de aguas, especialmente en los requerimientos derivados de la Directiva Marco del Agua, la Instrucción de Planificación Hidrológica, la Directiva de Inundaciones o el Plan Nacional de Calidad de las Aguas.

Campos de aplicación

Entre otros, los principales campos de aplicación de la versión actual de IBER, en ingeniería fluvial son:

- Simulación del flujo en lámina libre en cauces naturales
- Evaluación de zonas inundables
- Cálculo de las zonas de flujo preferente
- Cálculo hidráulico de encauzamientos
- Cálculo hidráulico de redes de canales en lámina libre
- Cálculo de corrientes de marea en estuarios
- Estabilidad de los sedimentos del lecho
- Procesos de erosión y sedimentación por transporte de material granular

Capacidades

Las capacidades más destacadas de este modelo se centran en el esquema de resolución de las ecuaciones de Saint Venant bidimensionales, que como ha quedado de manifiesto en el epígrafe anterior, la utilización de esquemas explícitos en

volúmenes finitos permite dotar de gran robustez, fiabilidad y rapidez de cálculo al programa. Entre otras son las siguientes:

- *Resolución integrada de las ecuaciones de Saint Venant 2D Esquemas explícitos en volúmenes finitos con mallas no estructuradas Capacidad de resolver flujo subcrítico y supercrítico, incluyendo resaltos hidráulicos móviles*
- Mojado y secado del dominio con la conservación exacta del volumen de agua
- Modelización de la turbulencia mediante modelos de diferente complejidad
- Cálculo de la infiltración
- Tensión superficial por viento
- Estructuras internas: puentes, compuertas y vertederos
- Delimitación de la zona de flujo preferente según RDPH (vía de intenso desagüe y zonas de grave riesgo para personas y bienes)
- Evolución del lecho debido a transporte de sedimentos por carga de fondo y en suspensión
- Interfaz amigable de pre y post-proceso
- Integración en GIS

Este modelo ha sido verificado y contrastado tanto con soluciones analíticas, como con otros modelos comerciales y de libre distribución, y muy importante, con ensayos de laboratorio y con medidas de campo

El modelo IBER se encuentra en desarrollo. Es, por tanto, un modelo vivo, abierto fácilmente a mejoras o adaptaciones. Entre las líneas prioritarias de desarrollo del modelo se encuentran:

- Evaluación del hábitat fluvial
- Definición de caudales ecológicos con métodos hidrobiológicos
- Nuevas condiciones de contorno internas
- Transporte de mezclas de sedimentos
- Modelos de calidad de aguas

Entorno

IBER se basa en el sistema GiD, mostrando un entorno que incluye dos módulos de trabajo: uno de preprocesado de los datos y otro de postproceso de resultados. Dada la singularidad de los trabajos a desarrollar y conscientes del fin de estos, se implementa la compatibilidad con entornos SIG, que permitan con posterioridad reanalizar los resultados en base a formatos de transferencia de ficheros ráster. Entre las capacidades analizadas en este estudio como se puede comprobar en el anexo de se encuentra

Capacidades del módulo de preproceso

- Aplicaciones CAD para diseño de geometrías de cálculo
- Generación de mallas estructuradas y no-estructuradas mediante diferentes algoritmos de mallado
- Capacidad de importar imágenes georreferenciada
- Definición de propiedades y parámetros de cálculo variables espacialmente
- Posibilidad de importar la rugosidad de fondo de forma automática a partir de datos georreferenciados de usos del suelo
- Mensajes de aviso frente a errores comunes
- Posibilidad de reemprender un cálculo interrumpido

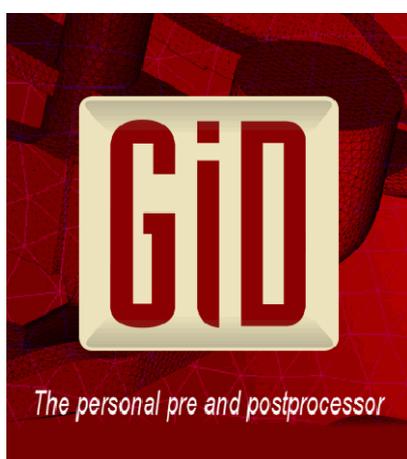
Capacidades del módulo de postproceso

- Visualización de campos **2D** escalares y vectoriales
- Extracción de secciones y perfiles longitudinales
- Visualización de resultados temporales mientras se ejecuta la simulación
Visualización de zonas de riesgo según Reglamento del Dominio Público Hidráulico
- Visualización de zonas inundables y frentes seco-mojado no estacionarios
- Herramientas para la visualización de los resultados en formato SIG
- Exportación de resultados en formato ráster para ser visualizados directamente en entornos SIG

- Visualización de resultados sobre imágenes georreferenciadas
- Creación de videos con animación de resultados no estacionarios

GiD

GiD es un programa de carácter general desarrollado por el CIMNE (Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería) que proporciona una interfaz gráfica usada para la definición, preparación y visualización de todos los datos relativos a una simulación numérica. Estos datos incluyen la definición de la



geometría, materiales, condiciones de contorno y otros parámetros. El programa puede generar una malla para realizar análisis mediante elementos finitos, volúmenes finitos o diferencias finitas, e introducir la información para una simulación numérica en el formato deseado. También se pueden lanzar estas simulaciones desde GiD y luego visualizar los resultados del análisis.

Imagen4: Link promocional del programa GiD. Fuente: <http://gid.cimne.upc.es/>

Funcionamiento

La interfaz gráfica se asemeja a la matriz de GiD, al que se le han asociado algunos complementos para contemplar las aplicaciones del software.



Imagen5: Menús desplegables del programa IBER

Hidráulica

Los cálculos hidráulicos los realiza gracias a su módulo hidrodinámico, que deberá completarse una vez cargada la geometría.

El módulo hidrodinámico facilita la introducción de los datos del problema. Este módulo se basa en la resolución de ecuaciones de aguas someras, también conocidas como ecuaciones de St. Venant bidimensionales. Dichas ecuaciones asumen una distribución de presión hidrostática y una distribución relativamente uniforme de la velocidad en profundidad.

ECUACIONES DE ST. VENANT

Cuando las leyes de la conservación de la masa y la energía se aplican a un fluido isotrópico e incompresible, como el agua, se obtienen las ecuaciones de Navier-Stokes para el movimiento instantáneo del fluido. A partir de estas, se pueden obtener las ecuaciones de Reynolds, y si estas son integradas en un flujo de agua en régimen libre con una profundidad determinada, resultan en las ecuaciones de Saint Venant. Estas ecuaciones son válidas cuando el flujo tiene predominantemente un comportamiento bidimensional, con velocidades verticales despreciables, poca pendiente y en general cuando las dimensiones horizontales predominan sobre la vertical.

Las ecuaciones bidimensionales de Saint Venant pueden ser escritas en forma conservativa como:

$$\frac{\partial}{\partial t} U + \nabla F = H$$

Siendo U el vector de variables de flujo, F el tensor y H el término independiente.

$$U = \begin{pmatrix} h \\ h_u \\ h_v \end{pmatrix}$$

$$F = \begin{pmatrix} h_u & h_v \\ h^2_u + g \frac{h^2}{2} & h_{uv} \\ h_{uv} & h^2_u + g \frac{h^2}{2} \end{pmatrix}$$

$$H = \begin{pmatrix} 0 \\ g_{h(S_{0x}-S_{fx})} \\ g_{h(S_{0y}-S_{fy})} \end{pmatrix}$$

La ecuación consta de tres términos: el primer término representa la variación temporal local de las variables hidráulicas: masa y cantidad de movimiento, el segundo término representa la variación espacial de los flujos de dichas cantidades y el tercer término (término independiente) representa la ganancia o pérdida de masa y cantidad de movimiento por unidad de tiempo en un volumen diferencial que se mueve con el fluido.

Evidentemente la variación de masa debe de ser nula, por lo que la primera componente del vector de variables independientes es cero. También existen las ecuaciones de Saint Venant en forma unidimensional, aplicables en casos en los que predomina la componente longitudinal de la velocidad del flujo. Estas ecuaciones se pueden deducir directamente a partir de las leyes de conservación de la masa y la cantidad de movimiento

Fricción de fondo

El fondo ejerce una fuerza de rozamiento sobre el fluido que es equivalente al rozamiento con una pared, con la particularidad de que, en general, en ingeniería hidráulica la rugosidad del fondo es elevada, como ocurre en los ríos.

La fricción del fondo tiene un doble efecto en las ecuaciones de flujo, por un lado produce una fuerza de fricción que se opone a la velocidad media, y por otro lado, produce turbulencia.

En los modelos promediados en profundidad, como es nuestro caso, no es posible calcular la velocidad de fricción por medio de funciones de pared estándar, tal y como

se hace en los contornos tipo pared, ya que las ecuaciones no se resuelven en la dirección vertical.

Por tanto es necesario relacionar la velocidad de fricción con la velocidad media promediada en profundidad mediante un coeficiente de fricción.

IBER evalúa la fricción de fondo mediante la fórmula de Manning, la cual utiliza el coeficiente de Manning n como parámetro. La fórmula de Manning utiliza el siguiente coeficiente de rugosidad:

$$C_f = g \frac{n^2}{h^{1/3}}$$

Implementación de la simulación

Como se ha venido indicando, el programa IBER realiza los análisis 2D resolviendo las ecuaciones bidimensionales de Saint Venant, mediante esquemas numéricos de volúmenes finitos, que requieren de una discretización del dominio. Esta discretización se lleva a cabo mediante la creación de una malla, formada por cuadrados, triángulos o la combinación de ambos. En función de su forma y composición, puede ser estructurada o no estructurada y regular o irregular.

Entre los objetivos del trabajo se encuentra cómo afecta la elección del tipo de mallado en los resultados finales, para lo que se han implementado para cada Modelo Digital de Elevación 5 tipos distintos de malla no estructurada, con tamaños mínimo-máximo de los elementos los definidos a continuación, los resultados comparativo de los mallados pueden consultarse en el anexo correspondiente:

1. 2-20
2. 3-50
3. 5-50
4. 10-50
5. 20-50

Procedimiento

El proceso de descarga e instalación no reviste complicación alguna a cualquier usuario doméstico por lo que se obviará su comentario.

Una vez instalado al arrancarlo nos enfrentamos a la pantalla inicial:

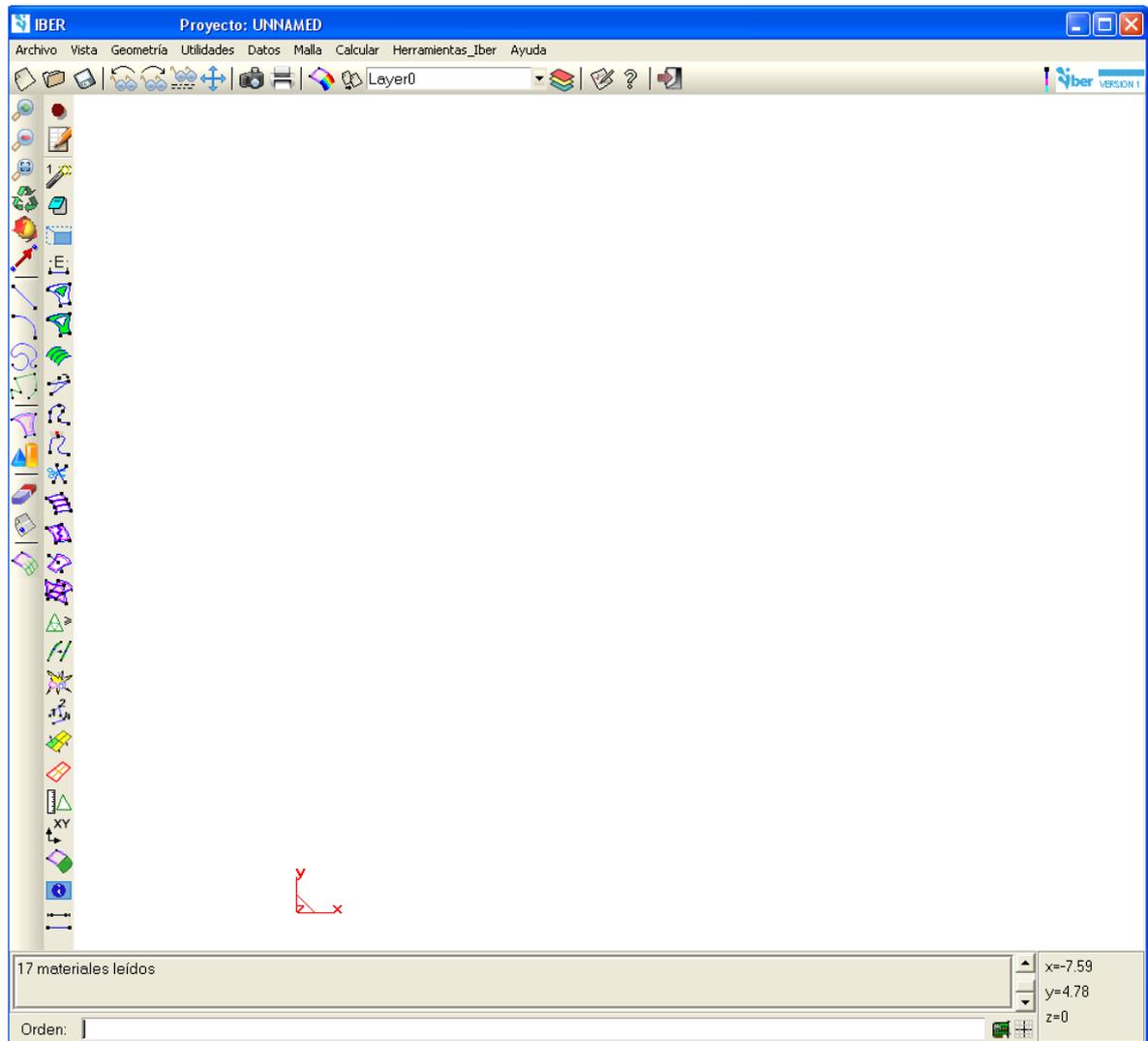


Imagen6: Interfaz gráfica IBER

El esquema de presentación de la aplicación es el estándar de programas Windows, con menús desplegables superiores y acceso directo a las herramientas más representativas a la izquierda.

Geometría

Todo el proceso comienza con la importación de la geometría, base del presente estudio ya que es la que determinará la bondad de la utilización de los distintos MDE implementados en los diversos modelos ejecutados. Para ello es necesario tener guardado el proyecto, con extensión *.gid.

Ofrece varias posibilidades, bien optando por el menú ad-hoc, “Herramientas_Iber”, bien importando directamente desde “Archivo”, “puntos XYZ”.

Imagen7: Ventana desplegable de formatos de importación

En nuestro caso se ha optado por ficheros ASCII, en formato xyz., como se ve en la imagen siguiente:

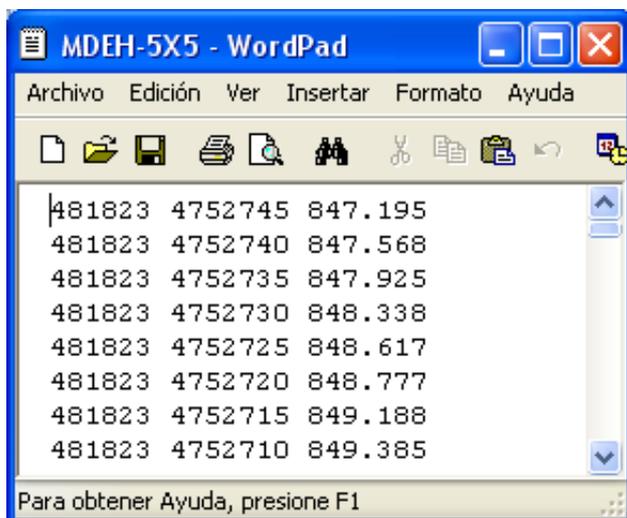
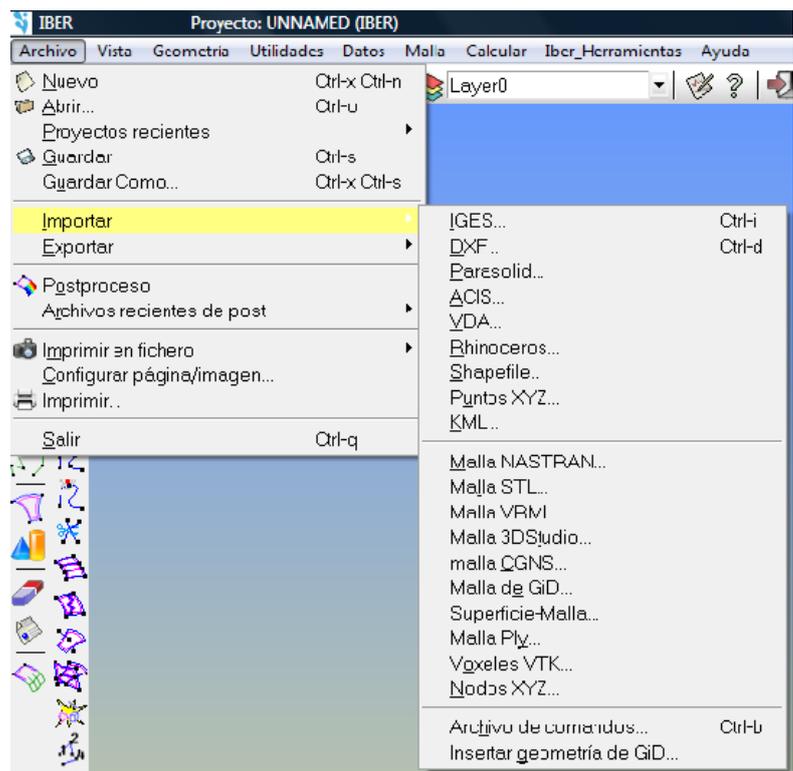


Imagen8: Formato de importación de ficheros de terreno ASCII, xyz

Las opciones bajo el menú de Herramientas son:

- MDT:

El submenú Combinar/Dividir MDT crea una serie de nuevos archivos ASCII a partir de todos los archivos ASCII (con extensión .txt) que se encuentren en una carpeta. Se puede escoger el número de filas y columnas de los archivos resultantes. También se crea un archivo dtms_file.dat que es el listado de los nuevos archivos creados.

El submenú Importar MDT permite importar un archivo en formato ASCII seleccionándolo, o un grupo de archivos seleccionando el archivo dtms_file.dat correspondiente.

- RTIN:

Con este menú se puede crear e importar una geometría formada por una red irregular de triángulos rectángulos (RTIN).

Con el submenú crear RTIN se selecciona el archivo ASCII del MDT, y se crea un archivo "rtin.dxf" dentro de la carpeta del proyecto IBER. Al crearlo se debe indicar la longitud mínima y máxima de lado de los triángulos que se formarán, así como una tolerancia (máxima distancia en vertical entre el MDT y la geometría creada) que debe de ser del orden de la precisión altimétrica del MDT.

Condiciones Hidrodinámicas (iniciales)

Las condiciones iniciales se establecen a través del menú Datos / Hidrodinámica/ Condiciones iniciales.

En modelización bidimensional, se establecen las condiciones iniciales en cada elemento de volumen mediante su calado y las dos componentes de velocidad. Debido a la discretización del dominio, las condiciones iniciales pueden variar de un elemento a otro, pudiendo establecerse por ejemplo diferentes calados en cada uno

de los distintos elementos, o incluso partir en ciertos elementos de unas condiciones iniciales de seco, en las cuales el calado y la velocidad serán considerados nulos.

Dada la singularidad del trabajo en el que no se parte de estudio hidrológico alguno, ya que solo se considera la concurrencia de caudales procedentes de la rotura de la balsa, y puesto que el objeto no es llegar a definir de forma correcta y cuantitativa la “mancha de inundación”, sino obtener ratios entre los distintos modelos para finalmente optar por el que mejor respuesta de en cuanto a necesidades de preproceso y resultados acordes a la normativa vigente, se considera la totalidad del terreno con unas condiciones iniciales de seco, al desconocer en régimen natural la lámina existente en el cauce del río Omecillo a su paso por el municipio de Bóveda.

En cualquier caso al corresponder con una tipología de escenario de rotura tipo I, sin avenida, y considerando el tiempo de simulación del proceso 2400 s. es de prever que la onda de avenida ya haya superado el pueblo, al ser cercana su llegada a los 1000 s. de producirse la rotura, como se puede observar en los resultados y la llanura se haya estabilizado.

Condiciones Hidrodinámicas (entrada)

Las condiciones de entrada suponen la asignación en la zona adecuada del caudal total que entra en el sistema o bien del caudal específico (caudal por unidad de ancho) o una cota de agua. El programa nos ofrece estas posibilidades accediendo al menú a través de Datos/ Hidrodinámica/ Condiciones de Contorno/ Entrada 2D.

En cada caso de los anteriormente citados se exigirán unos parámetros necesarios en función de si el régimen es subcrítico, crítico o supercrítico.

Para una entrada de datos de caudal total, y régimen supercrítico, el programa nos va a exigir el caudal (Q) en m³/s y la velocidad (V) en m/s; y en régimen crítico/ subcrítico, tan solo sería necesario el caudal (Q) en m³/s, aunque el programa nos permite importar un hidrograma, de manera que podamos contemplar una simulación bidimensional en régimen variable, como es nuestro caso, siendo ésta la opción elegida.

Si nos decidimos introducir los datos como Caudal específico, es decir, caudal por unidad de ancho, también podemos elegir entre un régimen supercrítico en el que se nos exigirá el caudal específico (q) en m^2/s y la cota de la lámina de agua o el calado en m ; o bien podemos elegir un régimen subcrítico, el cual nos exigirá tan solo el caudal específico (q) en m^2/s .

Por último, IBER, nos brinda la posibilidad de introducir los datos de entrada de agua al sistema como una cota de la lámina de agua en m .

Condiciones Hidrodinámicas (salida)

Las condiciones de contorno de salida, se asignan accediendo a la siguiente ventana, Datos/ Hidrodinámica/ Condiciones de contorno/ Salida 2D

En este caso solo se deben especificar parámetros adicionales si el régimen es subcrítico, en cuyo caso es posible utilizar una condición tipo vertedero, una condición de nivel dado (cota o calado) o una curva de gasto. En caso de régimen supercrítico o crítico no es necesario asignar parámetros adicionales, por lo que se ha optado por esta opción en este trabajo.

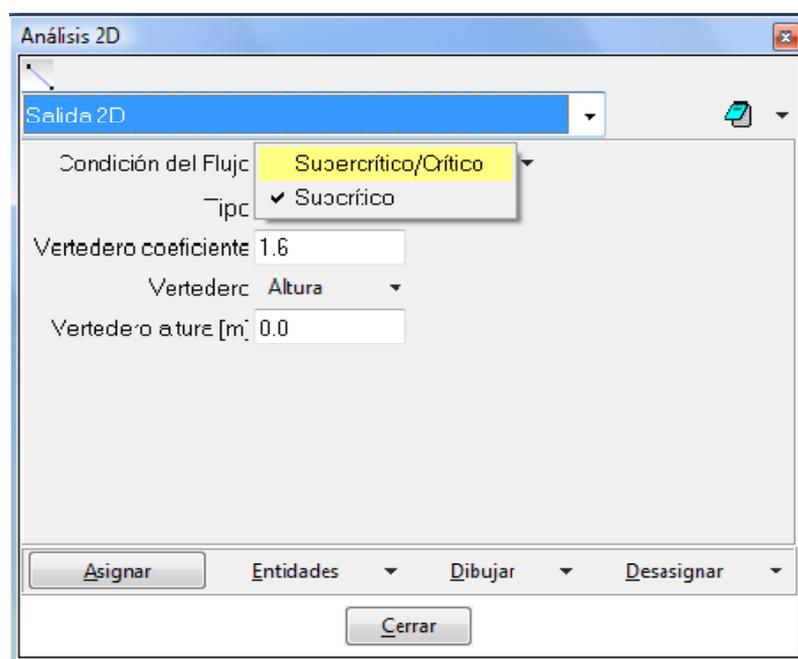


Imagen9: Ventana de introducción de las condiciones de salida en análisis bidimensionales.

La imagen siguiente muestra la zona de trabajo donde se representa la superficie NURB procedente de la importación de la geometría en xyz. Sobre ésta se desarrolla el mallado previo a la simulación. Se muestra en la parte superior la condición de entrada en el contorno de la balsa, y en la inferior la condición de salida, coincidiendo con el fin del municipio.

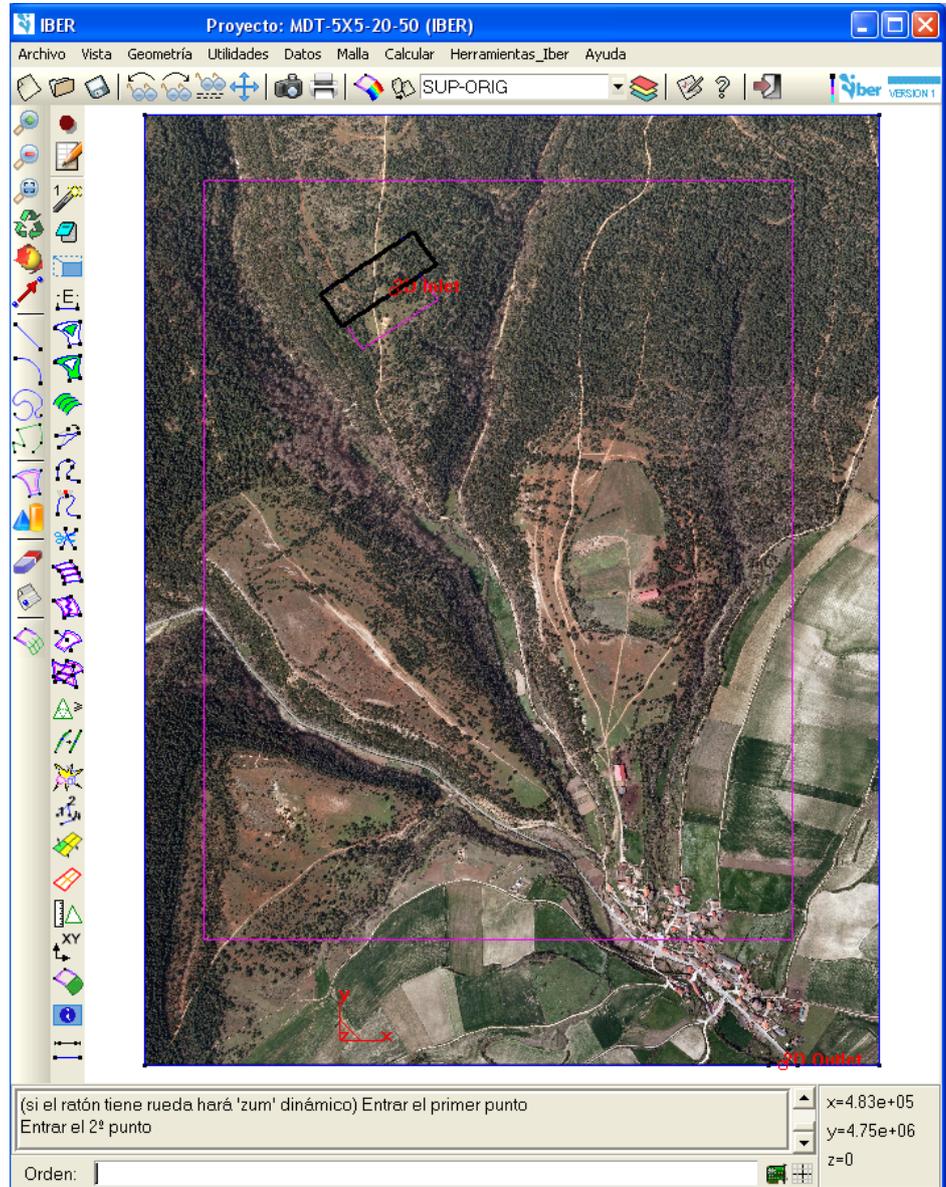


Imagen10: Indicación de las condiciones hidrodinámicas de entrada y salida.

Rugosidad

La rugosidad del terreno se determina por el número de Manning. El programa cuenta con dos métodos para la asignación de los coeficientes de rugosidad. Por un lado cuenta con la opción de asignarlos según usos del suelo, y por otro asignarlo de forma automática con datos georreferenciados.

En el primer caso, accediendo al menú Rugosidad/ Usos del suelo se abre la posibilidad de escoger un uso del suelo y asignarlo a las superficies que forman la geometría (o en su caso a los elementos de la malla). Dada la elevada incertidumbre en su obtención existen valores predeterminados asignados a cada uso, permitiendo editarlos.

En el segundo caso, mediante la asignación automática del coeficiente de rugosidad, accederemos a partir del menú Datos/ Rugosidad/Asignación automática.

Este menú abre una ventana de selección donde el usuario puede escoger el tipo de archivo desde donde se leerá la información de usos del suelo. Iber tiene implementados dos formatos, el formato estándar ASCII Grid Arclnfo y un formato XY definido específicamente. En ambos casos debe existir en el mismo directorio un archivo *.csv que contenga la lista de los tipo utilizados, que además deberán coincidir con los existentes en la base de datos del programa. Si las clases no existieran pueden crearse dentro de la base de datos mediante la ventana de asignación manual mencionada anteriormente.

Dado el enfoque del trabajo, y puesto que no se pretende obtener valores reales sino analizar la relación entre los MDE, se ha optado por adoptar un valor único para toda la superficie siendo conscientes del error sistemático que se cometerá. En nuestro caso se ha utilizado el valor de 0.050, correspondiente a los arbustos.

Mallado

Una vez completados los pasos anteriores, el problema se encuentra totalmente definido tanto en su geometría como en las condiciones de caudal, etc.

Nos encontramos frente la etapa crítica del proceso de simulación, por la relevancia que tiene la elección de las características de la malla en los resultados finales, como veremos en el apartado correspondiente.

La malla de cálculo de volúmenes finitos es un elemento fundamental para conseguir buenos resultados. IBER aprovechando la potencialidad de GiD, permite múltiples

opciones, ya que puede trabajar tanto con elementos triangulares como con cuadriláteros, o con mallas mixtas de triángulos y cuadriláteros. Las mallas de cálculo pueden ser a su vez regulares o irregulares, así como estructuradas o no estructuradas. Una malla estructurada se define como aquella donde cada elemento de control tiene el mismo número de elementos vecinos, mientras que en una malla no estructurada estos tienen diferentes números de elementos vecinos.

El tipo de superficie objeto de análisis, como es la zona plana fuera de cauce donde se ubican las balsas, conjuntamente con las zonas de drenaje natural de las cuencas, debe contemplarse de manera que el método elegido sea lo suficientemente flexible para que el propio mallado lo considere de forma correcta. Una buena malla debe de ser irregular, con el fin de minimizar el número de elementos con transiciones suaves. Para ello son muy adecuados los métodos de mallado basados en el error cordal (que

obtiene la máxima diferencia entre el terreno original y la malla).

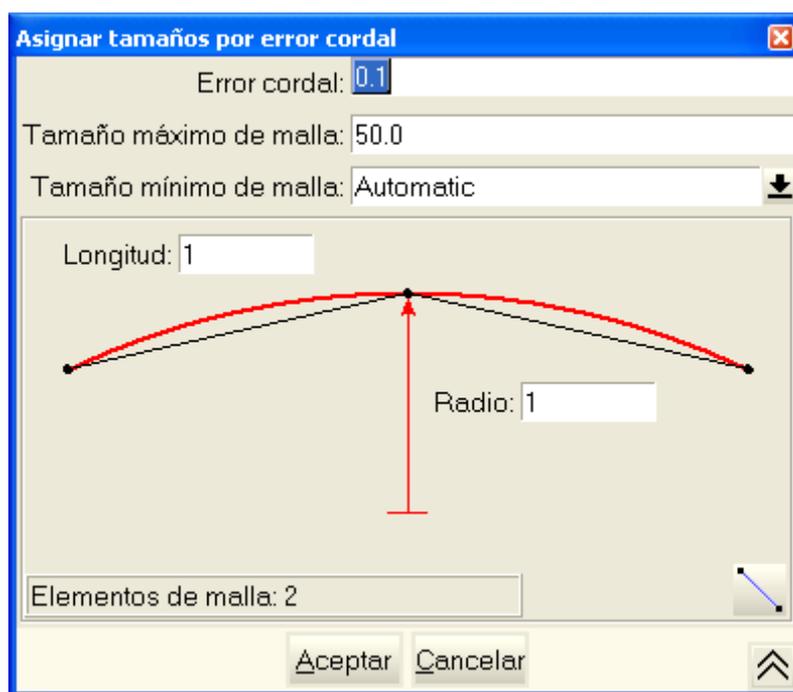


Imagen11: Ventana de asignación de tamaños en el mallado por error cordal

En IBER se incluyen los siguientes métodos de generación de mallas:

- Mallas estructuradas.
- Malla de triángulos irregulares generada con error cordal.
- Malla de triángulos rectángulos equiláteros o RTIN. (Rectangular Triangulated Irregular Network), generada con error cordal.

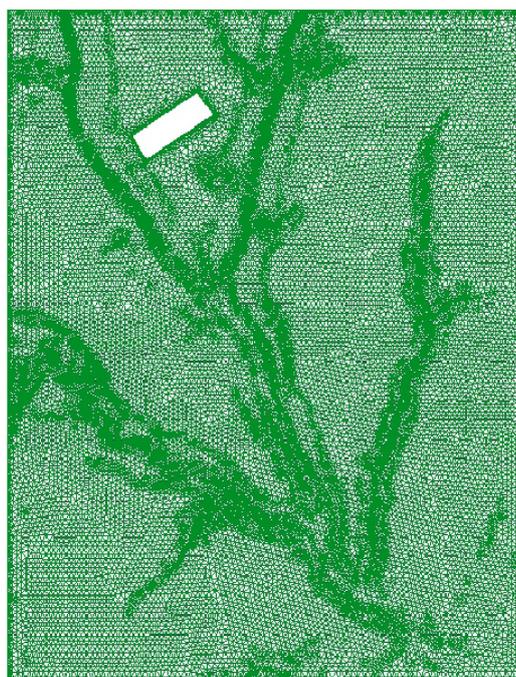
- Malla regular con todos los puntos del MDT (Modelo Digital del Terreno).
- Importación de mallas generadas con SMS (formato .2dm).

Y tres sistemas de mallado distintos:

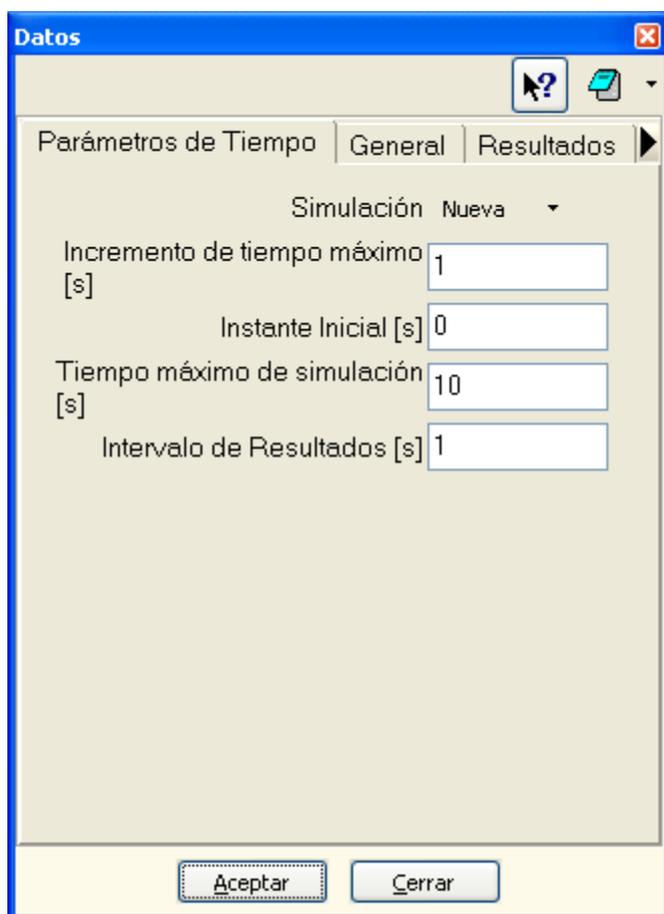
1. RFast: las mallas hechas con RFast son las más eficientes tanto en rapidez como en fiabilidad. Con superficies deformadas puede dar lugar a elementos distorsionados.
2. RSurf: genera mallas directamente en el espacio. Son de mayor calidad pero es más lento y puede fallar en superficies distorsionadas.
3. RJump: también genera mallas directamente en el espacio, y las líneas de contacto entre superficies que son casi tangentes (menos de 10° entre vectores tangentes) son ignoradas al mallar, así como los puntos de contacto entre líneas casi tangentes. Con este mallador, se pueden generar mallas con menos elementos que con los anteriores, porque es menos dependiente de las dimensiones de las superficies geométricas. Sin embargo, es lento y puede dar fallos en superficies distorsionadas.

Bajo este marco, la opción finalmente elegida fue la de malla no estructura asignando tamaño de los elementos por error cordal, definiendo para cada MDE 5 mallados distintos

Imagen12: Mallado correspondiente al modelo MDT, filtrado con paso 5 y con tamaño de malla 20-50 (mín-máx)



Cálculo



El preproceso del modelo termina cuando inciamos el “solver” lanzando el proceso de cálculo. Las condiciones en que debe desarrollarse, es decir, tiempo de simulación, esquema del “solver”, tipología de resultados, opciones de postproceso, deberán introducirse en el menú Datos/ Datos del Problema.

Imagen13: Ventana de datos del problema

Se definió un tiempo de simulación de 2400 s. coincidente con el hidrograma de cálculo, procedente de la rotura del dique de la balsa, con visualización de resultados tipo como calados, velocidades, y zonas de riesgo.

Es aquí donde se pudo comprobar la incidencia de los distintos tipos de mallado en el tiempo de proceso, yendo de pocos minutos en el caso de MDE con filtro alto y tamaños de malla grande, a media hora en el caso de filtros de 1 y malla de 2-20.

FUSION

Entre los objetivos que se plantearon al abordar este estudio se encontraba la comparación de resultados de modelización atendiendo a distintos MDE, de diversas procedencias. El caso estudiado y explicitado en el capítulo siguiente, permite la utilización de modelos ofrecidos por la Comunidad Autónoma del País Vasco, CAPV. No obstante y puesto que se quería analizar la importancia de los modelos digitales procedentes del LIDAR, se ha optado por añadir un nuevo MDE procesando los datos ofrecidos por la CAPV en su ftp para obtener nuestro propio modelo digital, en este caso de superficies, con un paso de malla de 1 m.

La existencia de aplicaciones informáticas no comerciales y de libre distribución es una realidad cada vez más extendida en múltiples disciplinas. El elevado coste de los paquetes comerciales en todos los ámbitos, con precios que superan los 12.000€, por las opciones básicas, debe enfrentarse a una competencia dura, sustentada en los software que con licencia GNU, o de libre distribución están surgiendo con bastante celeridad. En el campo del procesamiento de datos láser, y concretamente los procedentes de vehículos aerotransportados, podemos encontrarnos con software muy potente pero de precios elevados. Una alternativa no desdeñable es la que se presenta a consideración, el software FUSION/LDV desarrollado por el Servicio forestal del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, USDA, en su versión 2.90 de julio de 2010. Este nos permitirá según se indica en el manual del usuario:

“The analysis and visualization system consists of two main programs, FUSION and LDV (LIDAR data viewer), and a collection of task-specific command line programs. The primary interface, provided by FUSION, consists of a graphical display window and a control window. The FUSION display presents all project data using a 2D display typical of geographic information systems. It supports a variety of data types and formats including shapefiles, images, digital terrain models, canopy surface models, and LIDAR return data. LDV provides the 3D visualization environment for the examination and measurement of spatially-explicit data subsets. Command line programs provide specific analysis and data

processing capabilities designed to make FUSION suitable for processing large LIDAR acquisitions.”

Si se observan los requerimientos del sistema necesarios para ejecutar la aplicación, llamará la atención que múltiples tareas se realizarán en DOS, en ventanas emergentes, con la típica definición de parámetros de los programas del sistema operativo de disco. Esto permite dotarle de la máxima difusión evitando excesivo consumo de recursos, y por tanto permitiéndole ser ejecutado en cualquier plataforma.

Sin ánimo de ser exhaustivo, en este epígrafe se explorarán las posibilidades de este software en cuanto a su manejo de modelos digitales de elevación, MDE, según las indicaciones de los tutoriales publicados por la USDA, no contemplando todas las opciones posibles

Metodología y estructura

El epígrafe se estructura en tres partes: una primera de carácter introductorio y general, donde se analizarán los datos de partida, por un lado los proporcionados por el vuelo LIDAR y por otro los de la ortoimagen donde se proyectarán los resultados del procesamiento. Una segunda donde se cargarán los datos LIDAR, se filtrarán y se creará un modelo digital de elevaciones de suelo desnudo, que permitirá estudiar coberturas de vegetación con posterioridad, en la tercera parte.

Estudio y análisis de los datos LIDAR:

En primer lugar es necesario establecer el formato de entrada de los datos alfanuméricos. Los ficheros nativos definen extensiones LDA o LAS, aunque es posible encontrar ficheros tipo ASCII o CSV. FUSION/LDV puede abrir directamente los LDA, LAS y XYZ.

Es necesario por tanto cerciorarse de la tipología de fichero que disponemos. Al abrir el programa responde con la pantalla siguiente, donde se pueden ver en el menú desplegable de la izquierda las opciones principales de la aplicación. Las dos primeras se analizarán en esta primera etapa. Si se pincha en “Raw data...” nos solicita la entrada de los ficheros LIDAR.

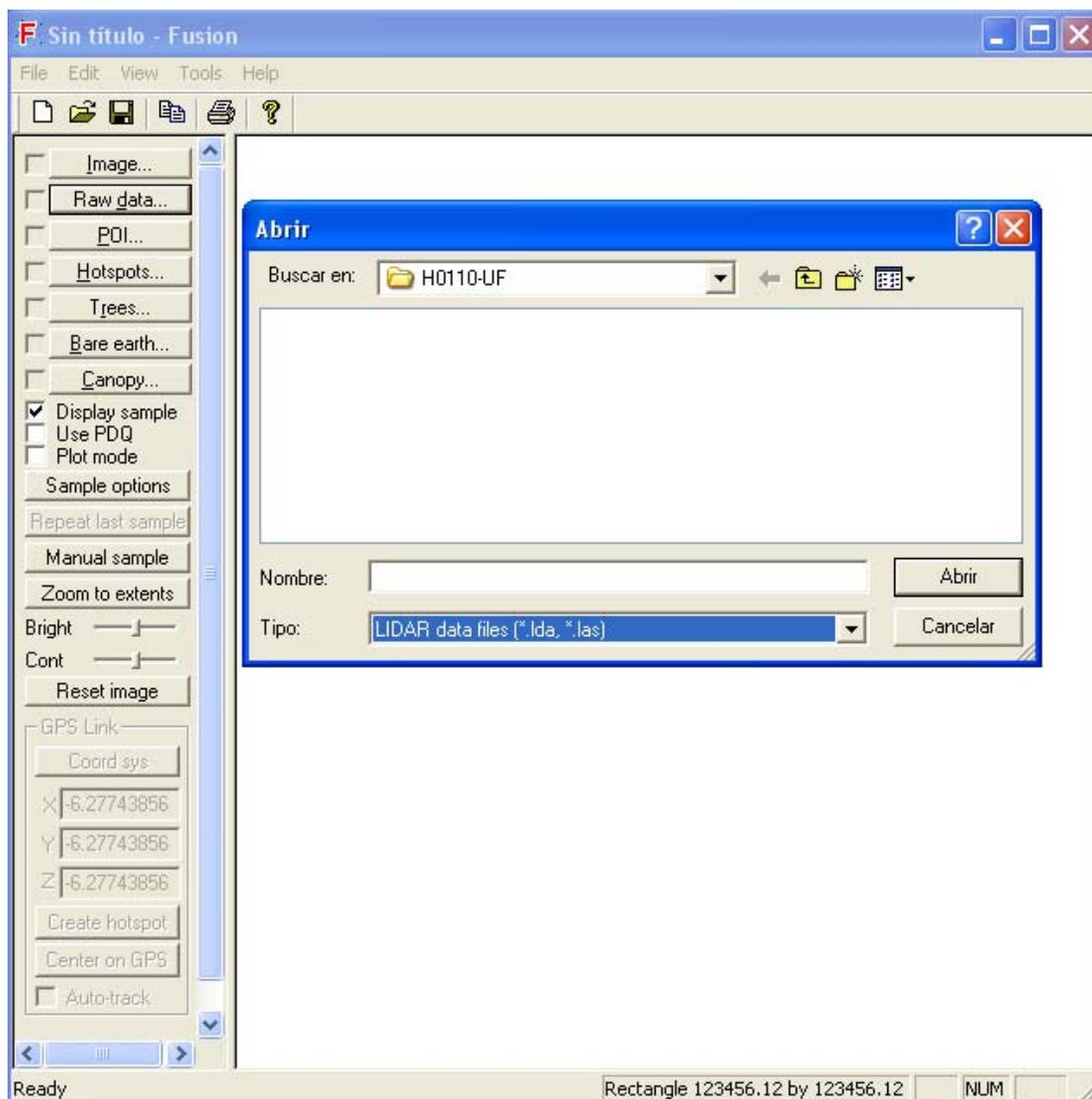


Imagen14: Pantalla inicial del programa FUSION. Apertura de ficheros

Si no conocemos la tipología, tiene una serie de utilidades que permiten inspeccionar las cabeceras de los ficheros y cerciorarse de la información contenida. En “Tools/Miscellaneous Utilities/Examine LAS file headers” podremos comprobarlo.

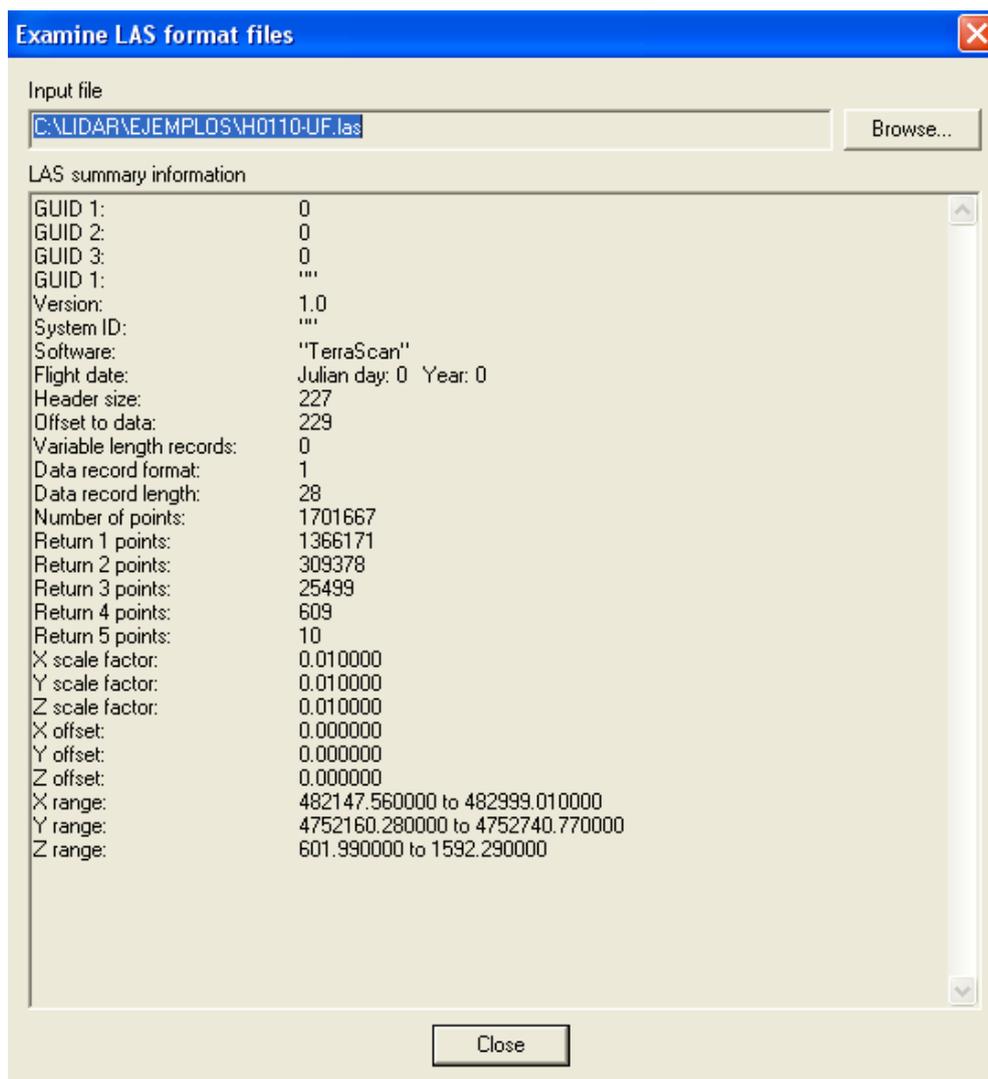


Imagen15: Características del formato LAS. Programa FUSION.

Creación y carga de la imagen de referencia

Esta aplicación se sirve de la imagen de referencia para explorar los datos de los ficheros LIDAR, por defecto solo muestra al cargar estos ficheros un recuadro con una cruz, con el objeto de no consumir recursos gráficos al mover tanta información en su procesado. Existen varios caminos que nos permitirían cargar la imagen. Es imprescindible que esté georreferenciada, pudiendo cargarla de partida o bien, usar otra utilidad **"Tools/Miscellaneous Utilities/Create image using LIDAR data"** de la aplicación.

En nuestro caso la información de trabajo forma parte de la suministrada por el Gobierno Vasco en: **ftp://ftp.geo.euskadi.net/lidar** y **ftp://ftp.geo.euskadi.net/cartografia**, georreferenciada al datum **ETRS89**.

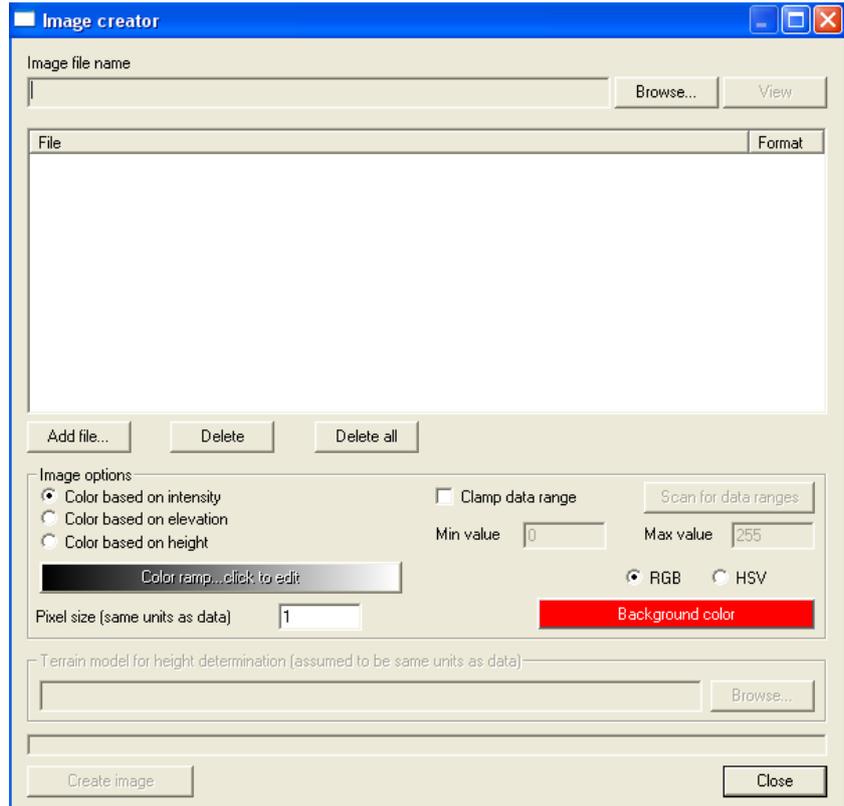


Imagen16: Carga de la imagen georreferenciada. Programa FUSION.

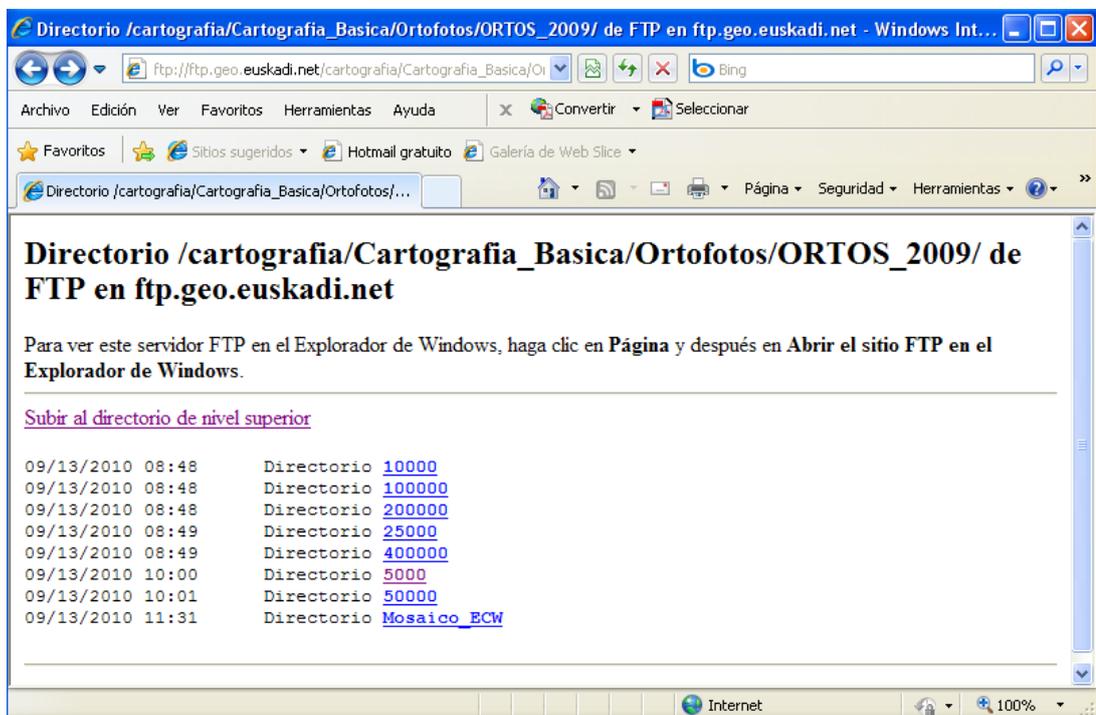


Imagen17: ftp://ftp.geo.euskadi.net/cartografia



Imagen18: <ftp://ftp.geo.euskadi.net/lidar>

Se volcará la imagen correspondiente del ftp anterior a escala 1:5.000:

 12/23/2009 01:37 30,524,011 [110-8-4.zip](#)

Quedando como sigue...

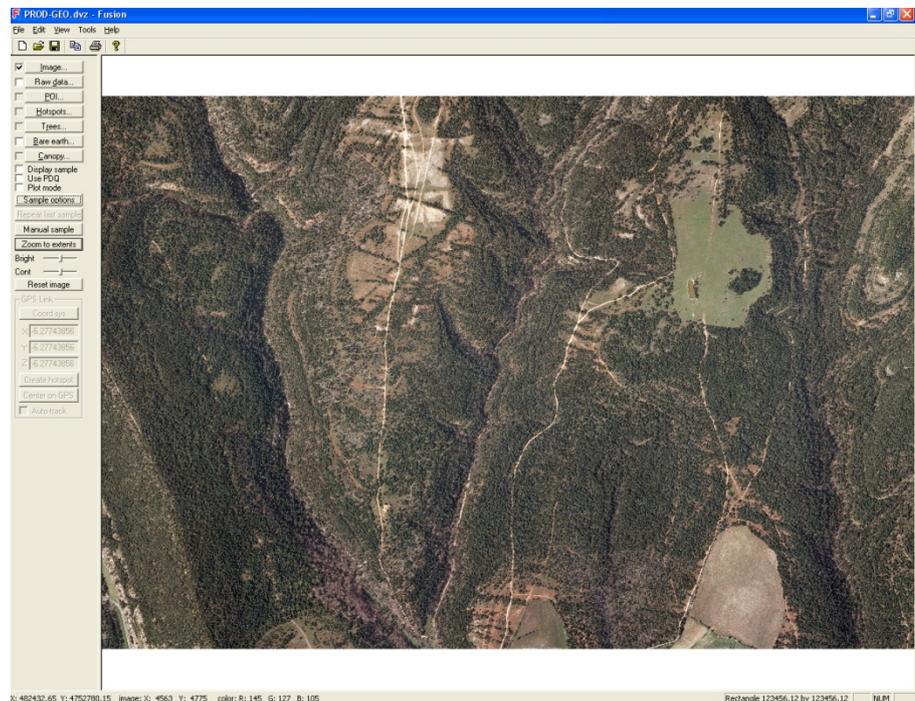


Imagen19: Resultado final de la carga de la imagen. Programa FUSION

Quedaría por cargar el fichero LIDAR, que como hemos indicado anteriormente sería la hoja H0110-UF.

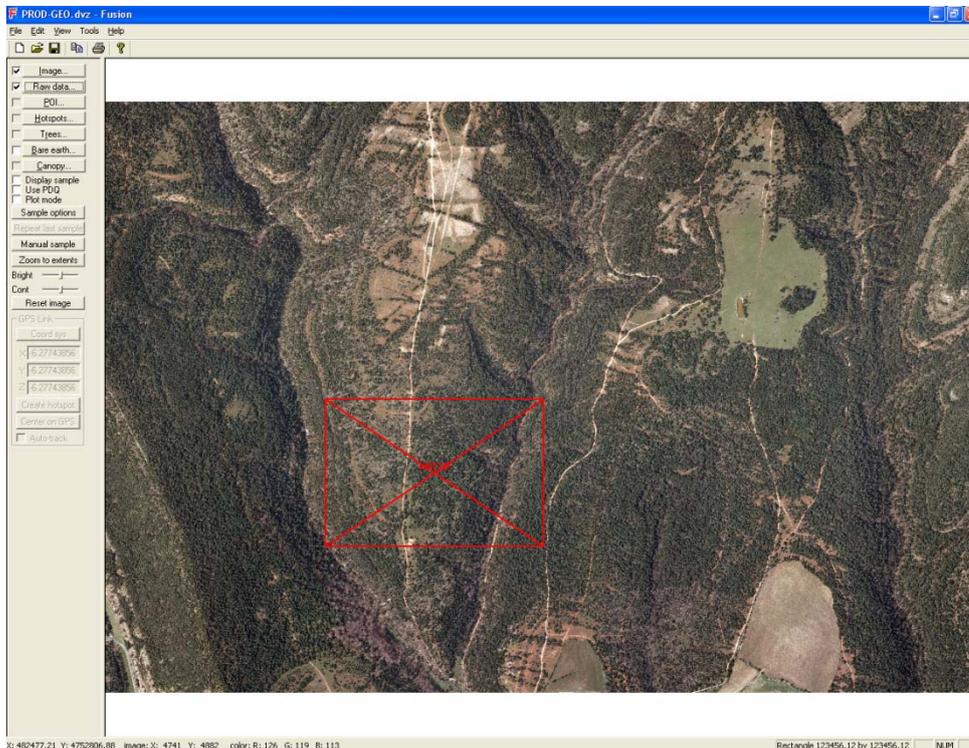


Imagen20:
Resultado final
de la carga del
fichero LIDAR.
Programa
FUSION

Catalog.exe

La tercera opción que nos ofrece es utilizar las aplicaciones que corren bajo DOS, ejecutando el fichero catalog.exe, desde una ventana emergente. Para ello en Windows XP, desde inicio, pincharemos en Ejecutar y teclearemos "cmd".

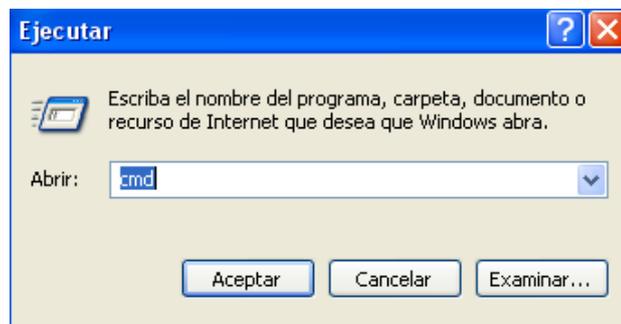


Imagen21: Acceso a "catalog.exe". Programa FUSION

Nos remitiremos al directorio por defecto del programa y teclearemos “catalog”, ofreciendo todos los switch posibles y opciones de análisis. Se utilizará para conocer las características de los datos de partida.

```

C:\WINDOWS\system32\cmd.exe

C:\>cd fusion

C:\FUSION>catalog
Catalog v1.94 (FUSION v2.90) (Built on Jul  7 2010 14:58:42) DEBUG
Prepares a report describing a LIDAR dataset and optionally indexes all data
file for use in FUSION

Syntax: Catalog [switches] DataFile [CatalogFile]
DataFile      LIDAR data file template or name of a text file containing a list
               of file names (must have .txt extension)
CatalogFile   Base name for the output catalog file (extensions will be added)

Switches:
Switches are preceded by a "/". If a switch has multiple parameters after
the ":", they should be separated by a single comma with no spaces before
or after the comma.

interactive  Present a dialog-based interface
quiet        Suppress all output during the run
verbose      Display all status information during the run
version      Report version information and exit with no processing
newlog       Erase the existing log file and start a new log
log:name     Use the name specified for the log file
image        Create image files showing the coverage area for each LIDAR file
index        Create LIDAR data file indexes if they don't already exist
newindex     Create new LIDAR data file indexes for all files (even if they
             already exist)
drawtiles    Draw data file extents and names on the intensity image
coverage     Create one image that shows the nominal coverage area for all
             data files included in the catalog. Also creates a FUSION
             hotspot file that provides details for each file in the catalog
countreturns Produce a count of returns by return number and include in the
             CSU and HTML output reports
uselascounts Use the return counts from the header of LAS files instead of
             scanning the entire data file to count the returns. Many LAS
             files produced by TerraScan do not contain valid data for the
             return counts so make sure your data has good numbers before
             using this switch
rawcounts    Outputs the number of returns (or first returns) in each cell.
             Used in conjunction with the /density and /firstdensity options.
             The output is in PLANS DTM format.
density:area,min,max
             Creates an image for all data files that shows the return density
             for the area represented by each pixel. area is the pixel area,
             min is the minimum acceptable point density, and max is the
             upper limit for the acceptable density range. Cells with point
             densities falling within the min-max range are colored green,
             cells with point densities below the minimum are colored red,
             and cells with densities above the maximum are colored blue
firstdensity:ceareall,min,max
             Creates an image for all data files that shows the density of
             first returns for the area represented by each pixel. area is the
             pixel area, min is the minimum acceptable point density, and max
             is the upper limit for the acceptable density range. Cells with
             first return densities falling within the min-max range are
             colored green, cells with point densities below the minimum are
             colored red, and cells with densities above the maximum are
             colored blue
intensity:area,min,max
             Creates an intensity image for all data files using the average
             intensity for all first returns within each pixel. area is the
             pixel area, min is the minimum intensity value, and max is the
             maximum intensity value. A black to white color ramp is mapped
             to the range of intensity values defined by min and max. Ideally,
             min and max correspond to the range of intensity values present
             in the data. However, you may not always know the range of values
             for a given data set.
bmp          Save second copy of intensity, return density, and pulse density
             images in BMP format with associated world file.
outlier:multiplier
             Performs a simple analysis to identify data tiles that might
             contain elevation outliers. The analysis marks tiles where the
             minimum, maximum, or range of elevations are outside the range
             defined by:
             mean value +/- multiplier * std dev
             The default multiplier is 2.0
lasclass:string LAS files only: Specifies that only points with classification
             values listed are to be included in the subsample.

```

Imagen22: Opciones de “catalog.exe” bajo MS-DOS.Programa FUSION

Modelo Digital de Elevaciones (Suelo)

Dado que el objetivo de este proyecto es analizar como intervienen los modelos de elevaciones en los resultados de simulaciones hidráulicas de roturas de grandes infraestructuras de almacenamiento de agua, fuera de cauce. Se estudiará cómo esta aplicación permite la obtención de estos a partir de los ficheros LIDAR.

Carga de los datos LIDAR:

En el epígrafe anterior ya habíamos cargado el fichero de trabajo. Para ello seleccionamos del menú izquierdo de la pantalla **“Raw data”**, que abre un cuadro de diálogo que permite seleccionar el fichero correspondiente, y que sobretodo permite indicar al programa que no gestione toda la información de los puntos en la vista inicial, para ello en **“Symbol”** marcaremos la opción **“None”** que evita su visualización.

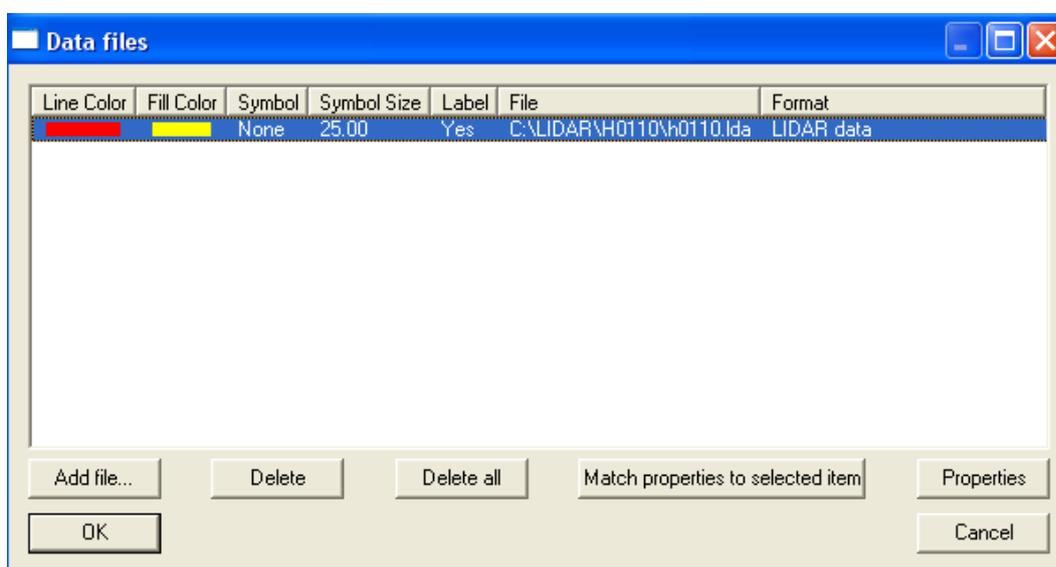


Imagen23: Carga de fichero *.las. Programa FUSION

MDE

Como se ha indicado es el objetivo principal de este estudio. Dado que el enfoque del programa es eminentemente Forestal es de interés determinar el plano de comparación para analizar las coberturas de vegetación, de ahí que en primer lugar se determine el MDE de suelo desnudo. Por otro lado este planteamiento a efectos

hidrológico-hidráulicos no se aleja de nuestra meta, por lo que se mantendrá. La distinta rugosidad superficial asociada a la cobertura vegetal se solventa en la simulación hidráulica mediante la adopción de parámetros tasados. Para ello se establecen dos pasos en el proceso: primero se filtrarán los datos para eliminar los que superan el retorno de “suelo”, para a continuación crear el modelo.

Filtrado de datos

Se había llamado la atención sobre los procedimientos del programa en cuanto a correr subrutinas de DOS. Este caso es uno de ellos, por lo que nos remitiremos a la pantalla de este sistema y teclearemos “Groundfilter”, en el directorio c:\FUSION.

```

C:\WINDOWS\system32\cmd.exe
C:\FUSION>groundfilter
GroundFilter v1.50 (FUSION v2.90) (Built on Jul 7 2010 14:58:51) DEBUG
Filters a point cloud to identify bare-earth points

Syntax: GroundFilter [switches] outputfile cellsize datafile1 datafile2 ...
outputfile Name for the output point data file (stored in LDA format)
cellsize Desired grid cell size in the same units as LIDAR data
datafile1 1st LIDAR data file (LDA, LAS, ASCII XYZ, ASCII XYZI format)...
           may be wildcard or text file listing the data files (if using
           wildcard or text file, omit other data file parameters)
datafile2 2nd LIDAR data file (LDA, LAS, ASCII XYZ, ASCII XYZI format)
           You can specify as many data files as you need but a wildcard
           specifier may be more efficient

Switches:
Switches are preceded by a "/". If a switch has multiple parameters after
the ":", they should be separated by a single comma with no spaces before
or after the comma.

interactive Present a dialog-based interface
quiet Suppress all output during the run
verbose Display all status information during the run
version Report version information and exit with no processing
newlog Erase the existing log file and start a new log
log:name Use the name specified for the log file
surface Create a surface model using the final ground points
median:# Apply median filter to intermediate surface model using # by #
         window (default is no median filter)
smooth:# Apply mean filter to intermediate surface model using # by #
         window (default is no smoothing)
finalsmooth Apply smoothing after the final iteration before selecting bare-
earth points...only used when smooth or median switch is used
outlier:low,high Omit points with elevations below low and above high
gparam:# Value of g parameter (default is -2.0)
wparam:# Value of w parameter (default is 2.5)
aparam:# Value of a parameter (default is 1.0)
bparam:# Value of b parameter (default is 4.0)
tolerance:# Tolerance value for final filtering of ground points. If not
            specified, weight values are used to determine final ground
            points. When specified, points with elevations less than or equal
            to the final surface elevation plus the tolerance are included
            in the ground point data set.
iterations:# Number of iterations for the filtering logic (default is 5)
class:string LAS files only: Specifies that only points with classification
            values listed are to be included in the subsample.
            Classification values should be separated by a comma
            e.g. (2,3,4,5) and can range from 0 to 32.
diagnostics Display diagnostic information and produce diagnostic files
The order of the median and smooth switches is important...the first filter
specified will be the first filter applied to the intermediate surface model

C:\FUSION>

```

Imagen24: Opciones de “groundfilter.exe” bajo MS-DOS. Programa FUSION

Este programa ejecuta el algoritmo descrito en:

*“Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data”
por K. Kraus y N. Pfeifer (1998, ISPRS).*

Este filtro está basado en una función lineal individualizada para cada medida; fue postulada por Kraus y Mikahail en 1972, como un proceso iterativo.

En el primer paso, se calcula una superficie con igualdad de pesos en todos los puntos LIDAR, obteniendo por tanto un modelo intermedio entre la cubierta arbolada y el suelo. De esta forma se puede obtener un plano de comparación, que ponderará los pesos en las siguientes pasadas, ya que los puntos del suelo quedarán por debajo de éste y los de la cubierta por encima. La función de pesos utilizada es:

$$p_i = \begin{cases} 1 & v_i \leq g \\ \frac{1}{1 + (a(v_i - g)^b)} & g < v_i \leq g + w \\ 0 & g + w < v_i \end{cases}$$

Al ser una función lineal, los valores a y b definen la pendiente, siendo los valores más extendidos y aplicados en la mayoría de los casos, 1.0 y 4.0 respectivamente. El parámetro g de cambio determina los puntos a los que se les asigna el valor 1.0, el peso máximo. Aquellos puntos que queden por debajo de la superficie y superen el valor dado a g, se les asignará un peso de 1.0. El parámetro w determina el límite superior de puntos que pueden tener influencia en la superficie media. A aquellos puntos situados por encima del nivel señalado por g+w se les asignará un peso de 0.0. Tras la última iteración los puntos considerados como de tierra desnuda se seleccionarán a partir de la superficie intermedia inicial. Todos aquellos cuyas cotas cumplan las dos primeras condiciones de la función de peso se considerarán del suelo. Es posible jugar con un intervalo asociado al switch “tolerance”, que permita adaptar los resultados a circunstancias singulares, ya que todos aquellos puntos que entren en esa tolerancia se considerarán de suelo.

Se permite así mismo suavizar la superficie intermedia mediante el controlador “finalsmooth” justo antes de finalizar el proceso iterativo. En este caso se obviarán las líneas de rotura, por lo que habrá que considerarlo con atención.

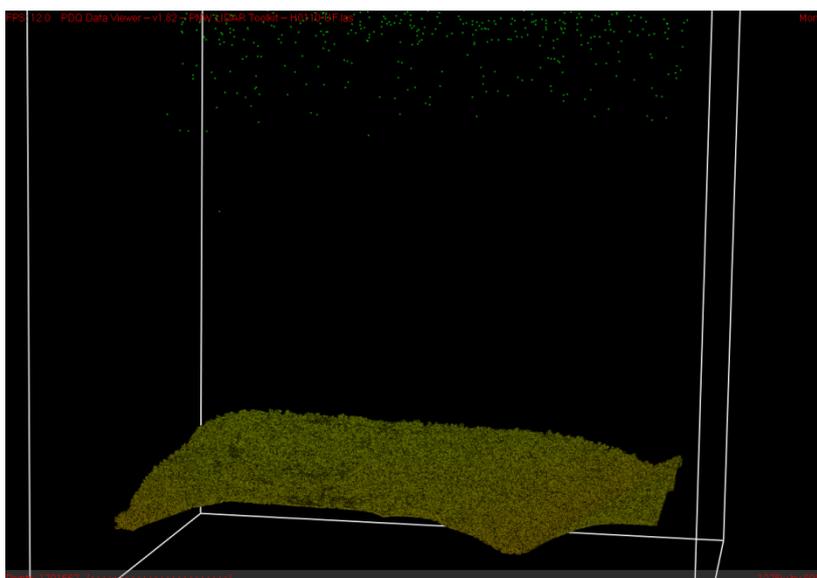
Como podemos ver, la utilización de este tipo de subrutinas exigirá un análisis exhaustivo de los resultados, ya que la excesiva proliferación de parámetros generará una elevada incertidumbre sobre su validez. De partida, ya se indica en los manuales que la aplicación de estos filtros suele dar resultados groseros. Para ello se establece la posibilidad de activar el switch “diagnostics” que permita obtener más información que nos ayude en la toma de decisiones, sobre la viabilidad o no de los resultados.

Aplicaremos este filtro considerando los valores por defecto y comparando diversos resultados.

La sintaxis es la que sigue:

```
“Groundfilter /gparam: ? /wparam: ? /tolerance: ? /iterations: ? <directorio salida>\nombre fichero.lda ? <directorio origen>\nombre fichero a filtrar”
```

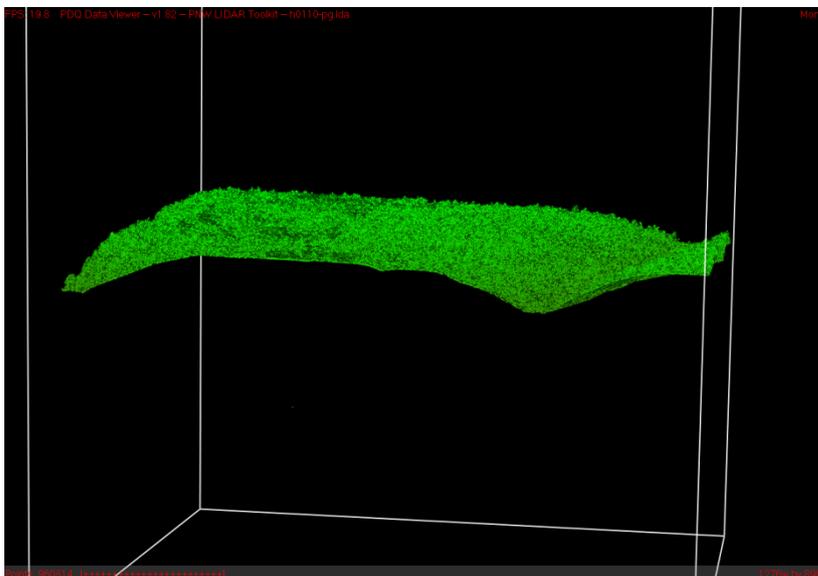
El resultado final del filtrado se muestra en las imágenes siguientes, procedentes del visor PDQ, que es posible activar también en DOS, desde el directorio c:\fusion.



En este caso el fichero inicial H0110-UF.las tiene un total de 1701667 puntos quedando en 960814 una vez filtrados.

Imagen25: Salida visor PDQ Programa FUSION

No hay que olvidar que el filtrado es la operación previa a la generación del modelo digital de elevaciones, por lo que una correcta eliminación del ruido generado por los



outliers, junto a una adecuada elección de los puntos usados en su definición, mediante el switch “class” podrá converger en la solución buscada.

Imagen26: Salida visor PDQ

960814 ptos. Programa FUSION

Los ejemplos de filtrado se realizaron tomando como valores de referencia los adoptados por defecto, si los modificamos adecuándolos a nuestros datos podremos ver como el resultado de la conformación del MDE varía sustancialmente.

Procedimentalmente, la actuación con las ventanas emergentes de DOS, ralentiza el proceso de forma sustancial. Para mejorar la respuesta y eficiencia del proceso se opta por generar ficheros *.bat ejecutables desde las propias ventanas de Windows, y editables más fácilmente ganando operatividad. Se crea un subdirectorio “BATCH”, que cuelga desde el de FUSION, y ahí se irán guardando los ficheros que se vayan creando.

En este segundo filtrado adoptando la secuencia siguiente:

```
"Groundfilter /gparam:-1 /wparam:1 /tolerance:0.1 /iterations:15 c:\lidar\h0110-pg1.lda 1 c:\lidar\h0110-uf.las"
```

```
gf.bat - Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
.\groundfilter /gparam:-1 /wparam:1 /tolerance:0.1 /iterations:15 /class:2
/diagnostics c:\lidar\h0110-pg1.lda 1 c:\lidar\h0110-uf.las
```

Tendremos este resultado con 316979 puntos. Podemos activar más switches para filtrar exclusivamente los puntos asociados a la clase suelo y que realice un diagnóstico de los retornos considerados en la superficie media, por debajo y encima. Nos aprovechamos ahora del fichero *.bat creado, para modificar fácilmente los atributos de los switches.

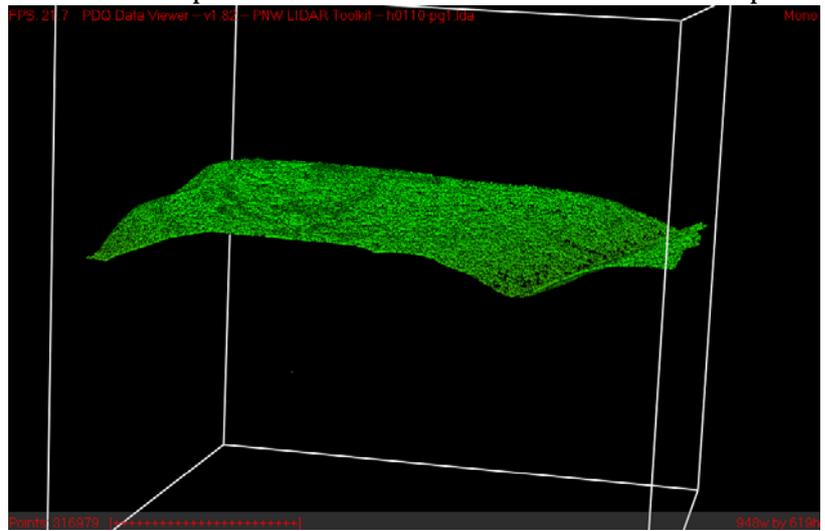
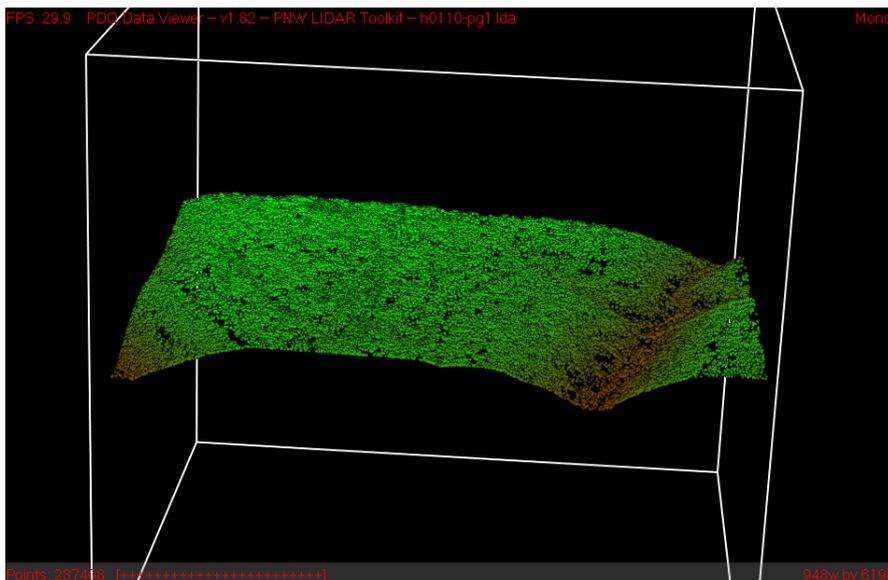


Imagen27: Salida visor PDQ 316979 pts. Programa FUSION



El resultado final congrega a 237408 puntos.

Imagen28: Salida visor PDQ 237408 pts. Programa FUSION

La tabla resume estos resultados:

ZONAS	PUNTOS
Hole points (zonas sin datos)	43131
Below points	0
Near points	237408
Above points	151496
TOTAL	388904

La imagen siguiente muestra el diagnóstico que indica los puntos asociados al filtro planteado.

```

C:\WINDOWS\system32\cmd.exe

C:\FUSION\batch>gf

C:\FUSION\batch>..\groundfilter /gparam:-1 /wparam:1 /tolerance:0.1 /iterations:
15 /class:2 /diagnostics c:\lidar\h0110-pg1.lda 1 c:\lidar\h0110-uf.las
GroundFilter v1.50 (FUSION v2.90) (Built on Jul 7 2010 14:58:51) DEBUG
Command line: ..\groundfilter /gparam:-1 /wparam:1 /tolerance:0.1 /iterations:15
Run started: Sat Apr 02 14:05:47 2011
Parameters (including defaults):
  Not using median filter
  Not using mean filter
  gParam: -1.0000  wParam: 1.0000  aParam: 1.0000  hParam: 4.0000
  Iterations: 15
Data files:
  c:\lidar\h0110-uf.las: 1701667 points
***Loading all data points into memory for processing
Iteration: 0 Hole pts: 0 Below pts: 6 Near pts: 211183 Above
pts: 220846 Total pts: 1701667
Iteration: 1 Hole pts: 6176 Below pts: 31 Near pts: 149934 Above
pts: 275894 Total pts: 1701667
Iteration: 2 Hole pts: 21598 Below pts: 22 Near pts: 125677 Above
pts: 284738 Total pts: 1701667
Iteration: 3 Hole pts: 46259 Below pts: 31 Near pts: 114377 Above
pts: 271368 Total pts: 1701667
Iteration: 4 Hole pts: 70343 Below pts: 43 Near pts: 103688 Above
pts: 257961 Total pts: 1701667
Iteration: 5 Hole pts: 91064 Below pts: 50 Near pts: 99792 Above
pts: 241129 Total pts: 1701667
Iteration: 6 Hole pts: 106434 Below pts: 58 Near pts: 94219 Above
pts: 231324 Total pts: 1701667
Iteration: 7 Hole pts: 118350 Below pts: 48 Near pts: 92178 Above
pts: 221459 Total pts: 1701667
Iteration: 8 Hole pts: 129030 Below pts: 68 Near pts: 88804 Above
pts: 214133 Total pts: 1701667
Iteration: 9 Hole pts: 136909 Below pts: 57 Near pts: 88011 Above
pts: 207058 Total pts: 1701667
Iteration: 10 Hole pts: 144391 Below pts: 47 Near pts: 84488 Above
pts: 203109 Total pts: 1701667
Iteration: 11 Hole pts: 150666 Below pts: 66 Near pts: 84581 Above
pts: 196722 Total pts: 1701667
Iteration: 12 Hole pts: 156222 Below pts: 49 Near pts: 81800 Above
pts: 193964 Total pts: 1701667
Iteration: 13 Hole pts: 161815 Below pts: 55 Near pts: 80583 Above
pts: 189582 Total pts: 1701667
Iteration: 14 Hole pts: 167267 Below pts: 56 Near pts: 78601 Above
pts: 186111 Total pts: 1701667
Final: Hole pts: 43131 Below pts: 0 Near pts: 237408 Above pts
: 151496 Total pts: 388904
Ground point file produced:
  c:\lidar\h0110-pg1.lda Apr 2, 2011 @ 2:06 PM
  237408 ground points
Run finished: Sat Apr 02 14:06:08 2011 (elapsed time: 21 seconds)
Done
C:\FUSION\batch>

```

Imagen29: Diagnóstico groundfilter. Programa FUSION

Se ha indicado cómo es posible filtrar los datos asociados a una clase de puntos exclusiva. Geo.euzkadi distingue 4 tipologías distintas de MDE, asociadas a distintos usos ya procesadas y que pone a disposición en su web:

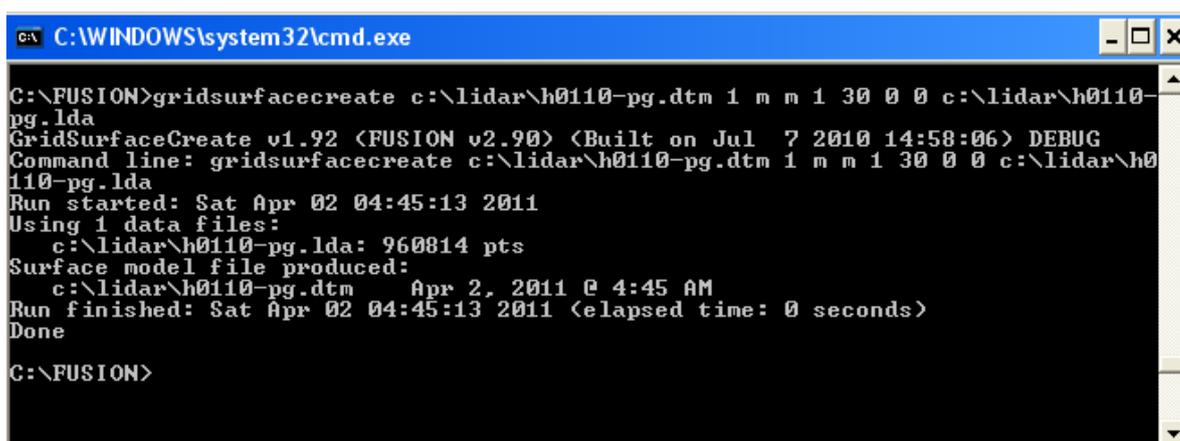
- MDT: Modelo Digital del Terreno

- MDEH: Modelo Digital de Elevaciones para Hidrografía (MDT sin puentes y con edificios)
- MDEV: Modelo Digital de Elevaciones de Vegetación (MDT con vegetación)
- MDSO: Modelos Digitales de Superficies para las Ortofotos (MDT sin edificios y con puentes)

Dadas las características de la zona de estudio no hay diferencias sustanciales al no existir puntos de clase “edificios”, salvo el considerado en vegetación, por lo que los resultados finales de aplicar la creación de los MDE no presentan diferencias.

Creación del Modelo Digital de Elevaciones (suelo desnudo)

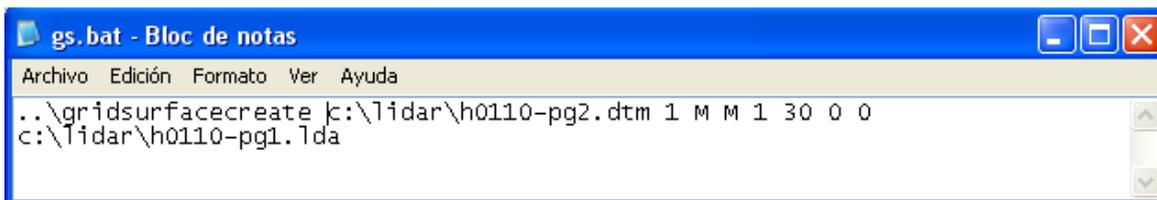
La siguiente parte del epígrafe nos permitirá obtener finalmente el MDE. Una vez filtrados los datos que necesitamos a partir del fichero *.las y generado el nuevo *.lda podemos acometer la parte más interesante respecto el objeto que nos ocupa, obtener los MDE a utilizar en el proceso de simulación hidráulica. Debemos remitirnos nuevamente a DOS, y cargar “GridSurfaceCreate”.



```
C:\WINDOWS\system32\cmd.exe
C:\FUSION>gridsurfacecreate c:\lidar\h0110-pg.dtm 1 m m 1 30 0 0 c:\lidar\h0110-
pg.lda
GridSurfaceCreate v1.92 <FUSION v2.90> <Built on Jul 7 2010 14:58:06> DEBUG
Command line: gridsurfacecreate c:\lidar\h0110-pg.dtm 1 m m 1 30 0 0 c:\lidar\h0
110-pg.lda
Run started: Sat Apr 02 04:45:13 2011
Using 1 data files:
  c:\lidar\h0110-pg.lda: 960814 pts
Surface model file produced:
  c:\lidar\h0110-pg.dtm   Apr 2, 2011 @ 4:45 AM
Run finished: Sat Apr 02 04:45:13 2011 <elapsed time: 0 seconds>
Done
C:\FUSION>
```

Imagen30: Carga de “gridsurfacecreate”. Programa FUSION

De igual forma que con el filtrado es posible crear un ejecutable *.bat para mejorar en eficiencia.



```

gs.bat - Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
..\gridsurfacecreate c:\lidar\h0110-pg2.dtm 1 M M 1 30 0 0
c:\lidar\h0110-pg1.lda

```

La utilización adecuada de los switch nos permitirá en función del objetivo del MDE obviar la parte del filtrado, ya que nos permite escoger la clase de puntos que mejor se adecue al tipo de modelo a crear, activando “/class”.



```

C:\WINDOWS\system32\cmd.exe
C:\FUSION>gridsurfacecreate
GridSurfaceCreate v1.92 (FUSION v2.90) (Built on Jul  7 2010 14:58:06) DEBUG
Creates a gridded surface model from point data

Syntax: GridSurfaceCreate [switches] surfacefile cellsize xyunits zunits
        coordsys zone horizdatum vertdatum
        datafile1 datafile2...datafileN

surfacefile  Name for output surface file (stored in PLANS DTM format
              with .dtm extension)
cellsize     Desired grid cell size in the same units as LIDAR data
xyunits      Units for LIDAR data XY (M for meters or F for feet)
zunits       Units for LIDAR data elevations (M for meters or F for feet)
coordsys     Coordinate system for LIDAR data:
              0 for unknown
              1 for UTM
              2 for state plane)
zone         Coordinate system zone for LIDAR data (0 for unknown)
horizdatum   Horizontal datum:
              0 for unknown
              1 for NAD27
              2 for NAD83
vertdatum    Vertical datum:
              0 for unknown
              1 for NGVD29
              2 for NAUD88
              3 for GRS80
datafile1    First LIDAR file (LDA, LAS, ASCII XYZ, ASCII XYZI formats)...
              may be wildcard and omit other data file parameters
datafile2    Second LIDAR file (LDA, LAS, ASCII XYZ, ASCII XYZI formats)
datafileN    Nth LIDAR file (LDA, LAS, ASCII XYZ, ASCII XYZI formats)

Switches:
Switches are preceded by a "/". If a switch has multiple parameters after
the "-", they should be separated by a single comma with no spaces before
or after the comma.

interactive Present a dialog-based interface
quiet        Suppress all output during the run
verbose      Display all status information during the run
version      Report version information and exit with no processing
newlog       Erase the existing log file and start a new log
log:name     Use the name specified for the log file
median:#     Apply median filter to model using # by # neighbor window
smooth:#     Apply mean filter to model using # by # neighbor window
slope:#      Filter areas from the surface with slope greater than # percent
              Slope filtering takes place after all other smoothing operations
spike:#      Filter to remove spikes with slopes greater than # percent
              Spike filtering takes place after slope filtering
residuals    Compute residual statistics for all points
lasclass:#   Use only returns with a classification code of # to create
              the surface model (LAS data files only). This switch has been
              replaced by the /class switch.
class:string LAS files only: Specifies that only points with classification
              values listed are to be included in the subsample.
              Classification values should be separated by a comma
              e.g. (2,3,4,5) and can range from 0 to 32.
minimum     Use the minimum elevation value in cells to create the surface
              The order of the switches is important...the first filter specified on the
              command line will be the first filter applied to the model (median or smooth)

C:\FUSION>

```

Imagen31: Switches de “gridsurfacecreate”. Programa FUSION

En este caso el procedimiento es bastante simple ya que deberemos indicar una vez definido el fichero *.dtm a generar, el tamaño de celda, las unidades en XY, y en Z, el sistema de coordenadas, la zona del sistema de coordenadas, y los datum horizontal y vertical, para acabar la rutina, con el fichero origen de los datos. Como se puede ver en la imagen siguiente podemos activar más opciones, principalmente de suavizado, usando filtros de media y mediana respecto a los puntos contiguos. Conviene indicar que la opción "interactive" todavía no se encuentra implementada en la última versión disponible.

Los resultados de este primer modelo digital de elevaciones de "suelo desnudo" ofrece distintas salidas en función de la aplicación del filtrado o no. Las dos imágenes mostradas a continuación, generadas a partir del software GlobalMapper en su versión 12.01, muestran en efecto, el matiz del suavizado provocado por el filtrado previo de los datos.

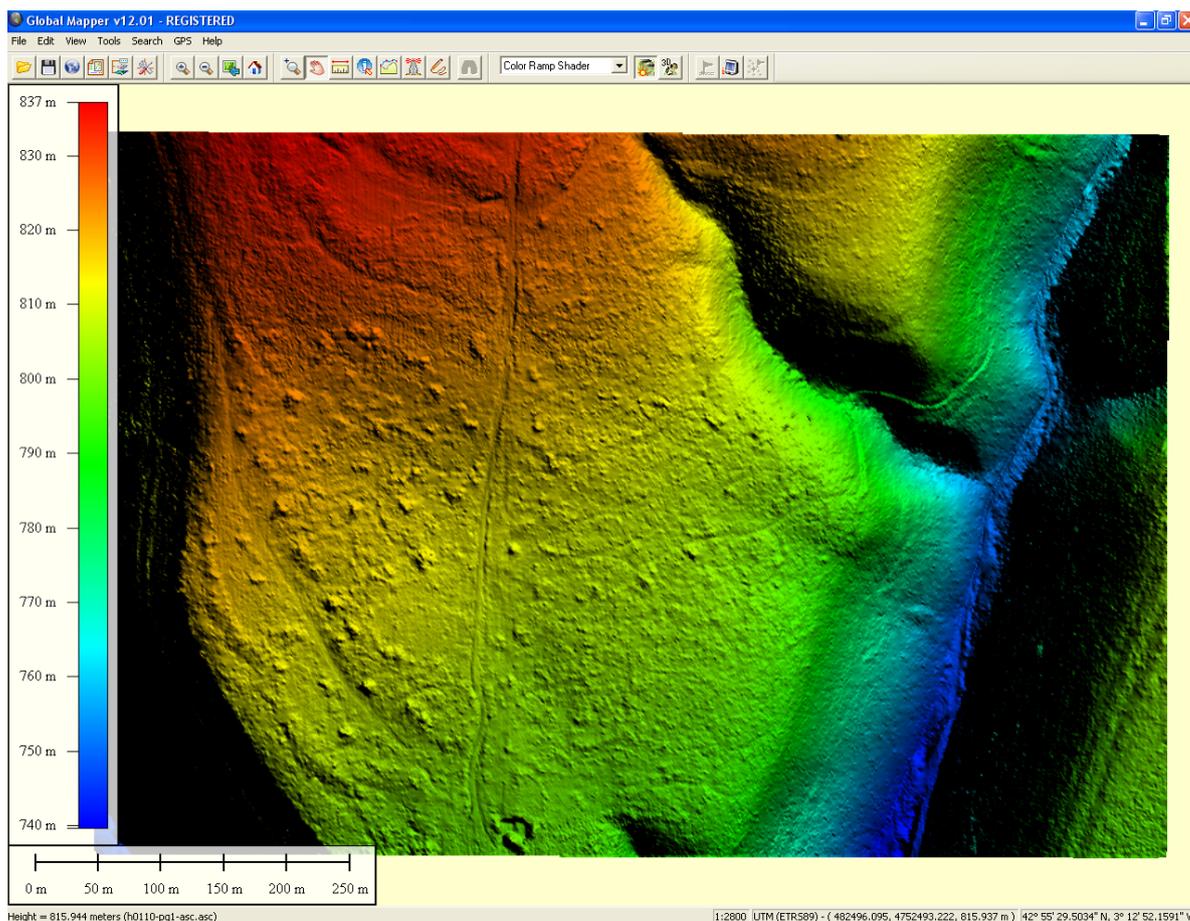


Imagen32: MDE. Salidas Global Mapper. Filtrado puntos clase 2

La primera imagen surge a partir del fichero original *.las, escogiendo solo los puntos de la clase 2.

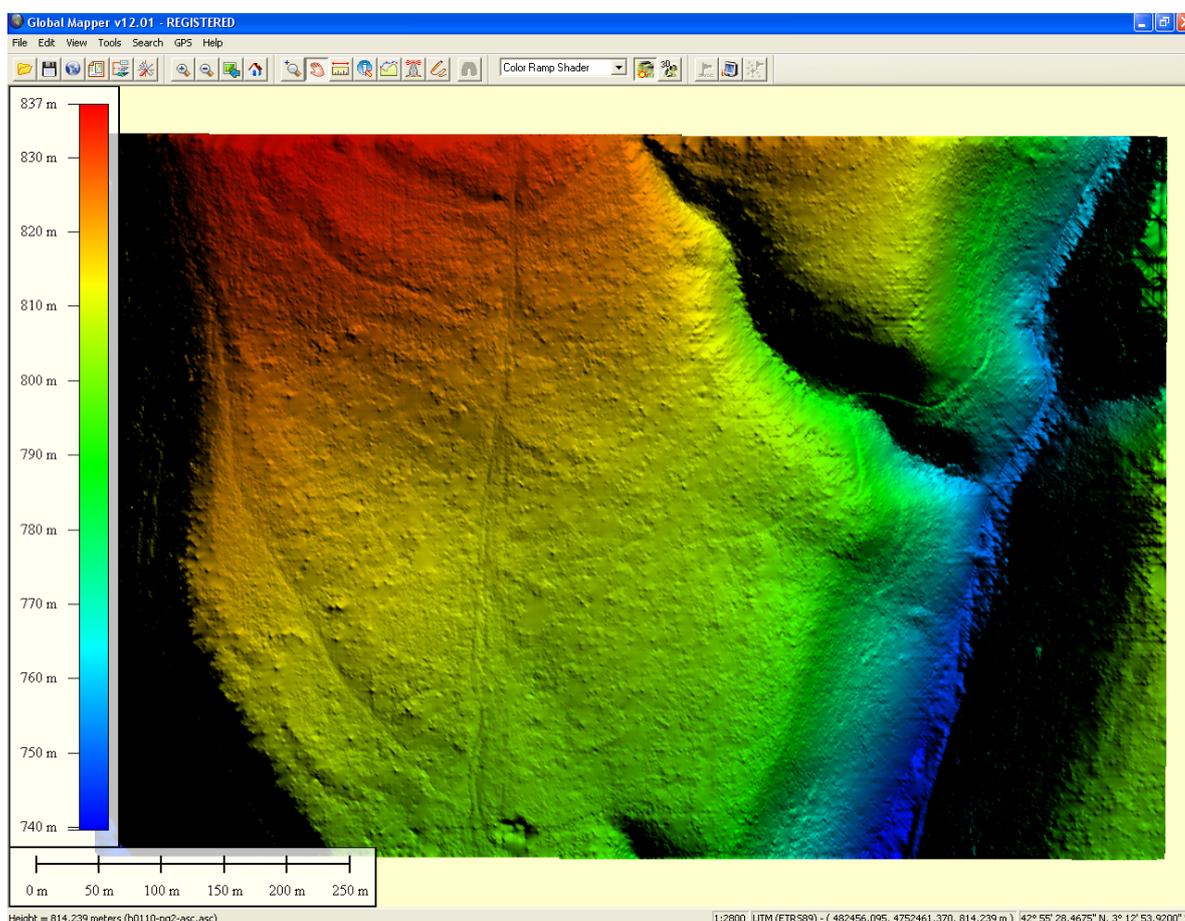


Imagen33: MDE. Salidas Global Mapper. Resultado del proceso de filtrado

La segunda surge del fichero procesado por filtrado.

Siguiendo en GlobalMapper, al cargar el modelo digital de elevaciones proporcionado por Geo Euzkadi, como tipo MDEH, se puede ver que coinciden plenamente. Los metadatos nos indican un encaje adecuado dado el fin que se busca. El tercer modelo es el comparativo de los dos. Mediante la subrutina "GridSurfaceStats" es posible realizar ciertas operaciones entre dos superficies. Se ha utilizado la opción de obtener la máxima altura existente entre las dos, mostrando un valor máximo de 1.6 m. en la vaguada, considerando el plano de comparación el modelo generado por la agencia vasca. Las dos imágenes de la página siguiente muestran el modelo de la agencia y el comparativo con la nube de pixeles con distorsión en la altura.

FILENAME	C:\LIDAR\h0110-pg1-asc.asc	C:\LIDAR\MDEH\H0110-UF.TXT	C:\LIDAR\h0110-comp_max_height.asc
DESCRIPTION	h0110-pg1-asc.asc	H0110-UF.TXT	h0110-comp_max_height.asc
UPPER LEFT X	482147.5	482145.97	482147.5
UPPER LEFT Y	4752741.5	4752741.76	4752741.5
LOWER RIGHT X	483000.5	482999.97	483000.5
LOWER RIGHT Y	4752160.5	4752158.76	4752160.5
WEST LONGITUDE	3° 13' 7.5652" W	3° 13' 7.6327" W	3° 13' 7.5652" W
NORTH LATITUDE	42° 55' 37.5933" N	42° 55' 37.6016" N	42° 55' 37.5933" N
EAST LONGITUDE	3° 12' 29.8718" W	3° 12' 29.8950" W	3° 12' 29.8718" W
SOUTH LATITUDE	42° 55' 18.6879" N	42° 55' 18.6314" N	42° 55' 18.6879" N
PROJ_DESC	UTM Zone 30 / ETRS89 / meters	UTM Zone 30 / ETRS89 / meters	UTM Zone 30 / ETRS89 / meters
PROJ_DATUM	ETRS89	ETRS89	ETRS89
PROJ_UNITS	meters	meters	meters
EPSG_CODE	3042	3042	3042
COVERED AREA	0.4956 sq km	0.4979 sq km	0.4956 sq km
NUM COLUMNS	854	855	854
NUM ROWS	582	584	582
PIXEL WIDTH	1 meters	1 meters	1 meters
PIXEL HEIGHT	1 meters	1 meters	1 meters
MIN ELEVATION	739.64 meters	739.67 meters	0 meters
MAX ELEVATION	837.163 meters	837.31 meters	1.617 meters
ELEVATION UNITS	meters	meters	meters
BIT_DEPTH	24	24	24

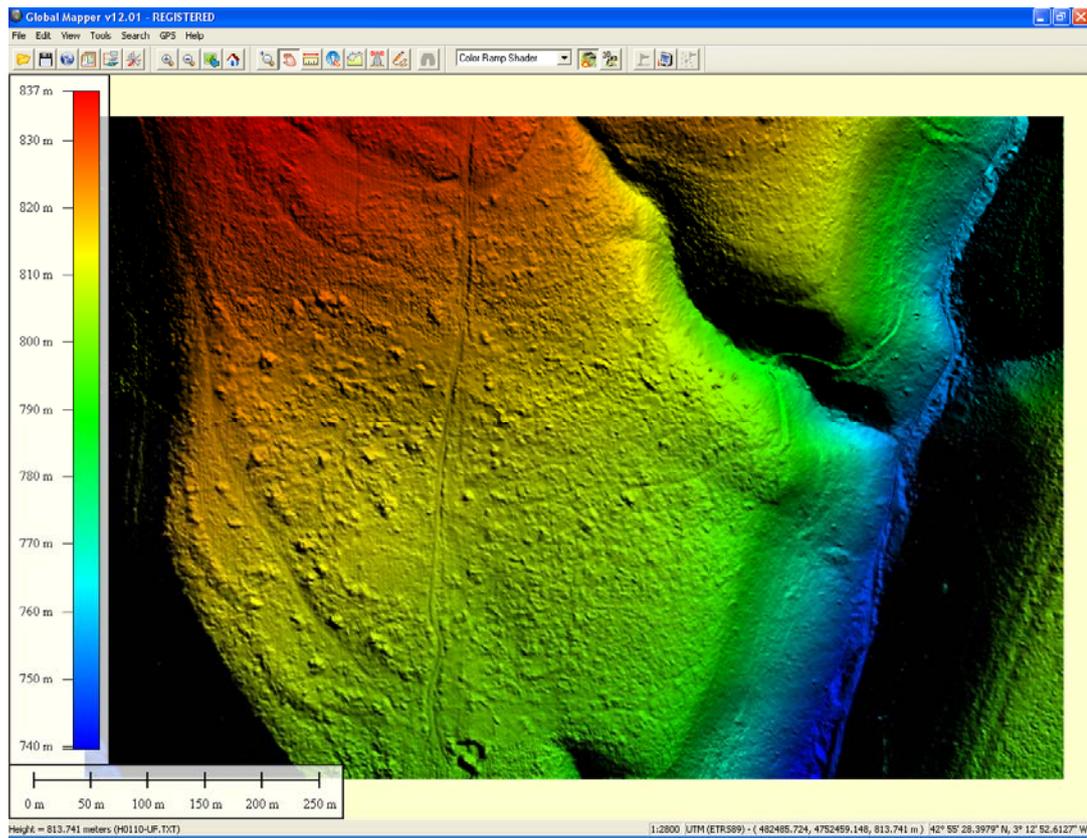


Imagen34: MDEH. Salidas Global Mapper.

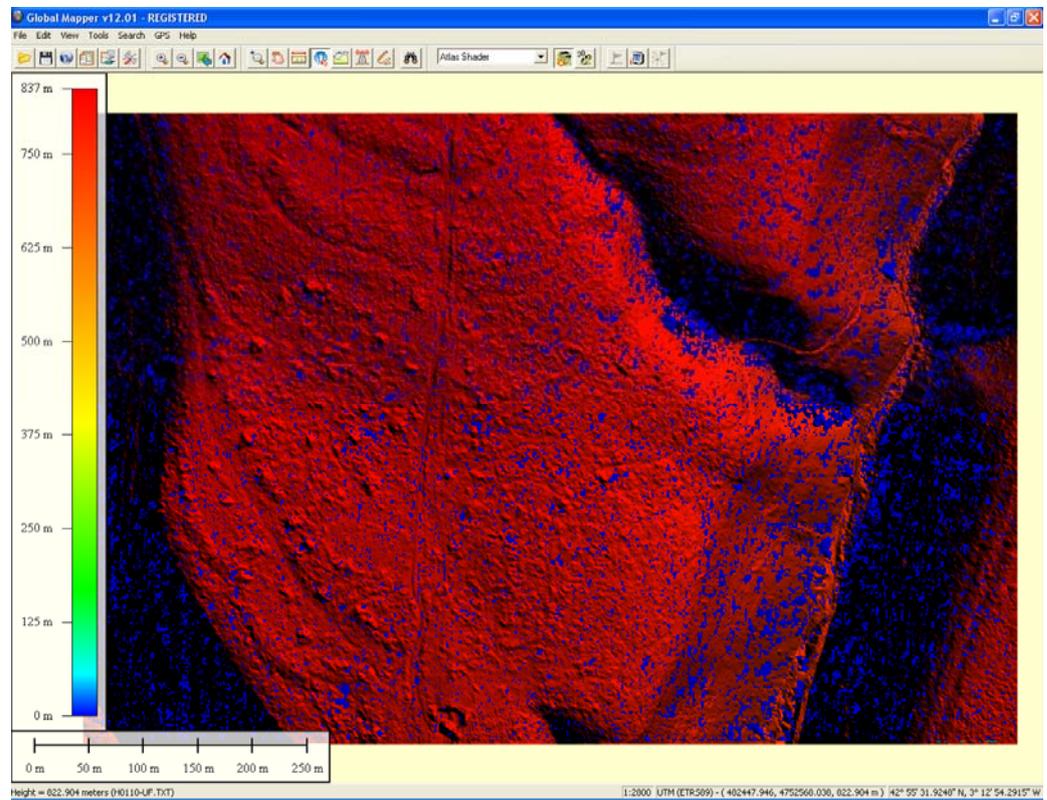


Imagen35: Comparativo modelos. Distorsión alturas. Global Mapper.

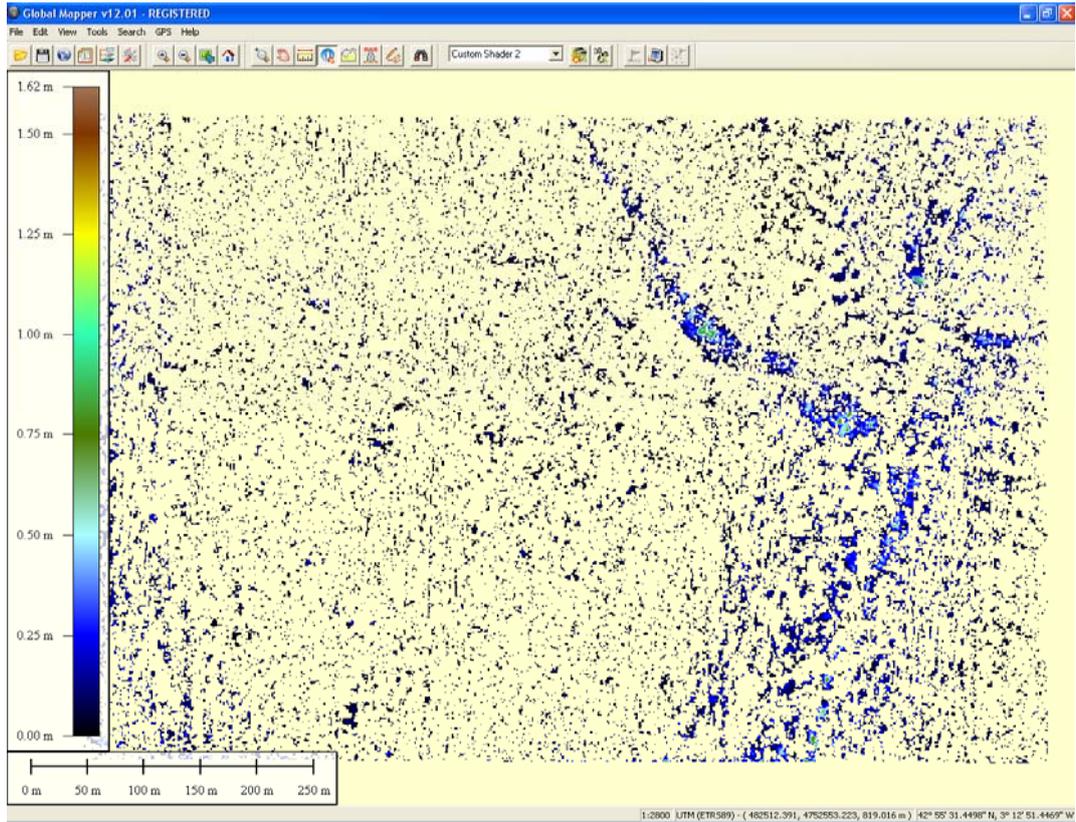
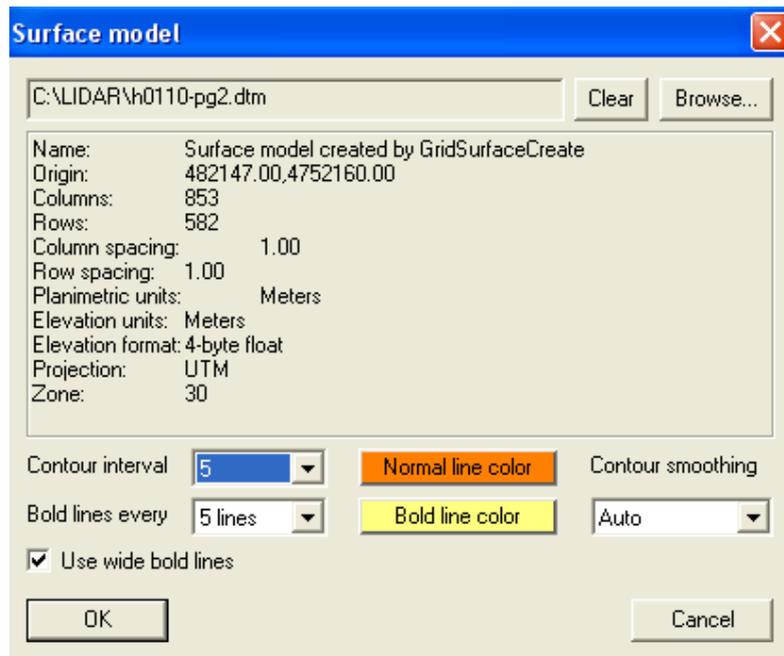


Imagen36: Comparativo modelos. Global Mapper.

Vemos como en la zona de la vaguada es donde se aprecian las mayores discrepancias. Hecho que por otro lado era de prever al ser la zona donde las pendientes son más acusadas. Por el contrario en la zona llana las diferencias no



superan los 25 cm.

Llegados a este punto, y con los distintos modelos generados y comparados, adoptaremos como modelo patrón de “suelo desnudo” el generado considerando el filtrado previo, llamado h0110-pg2.dtm. El siguiente paso en FUSION es la carga del modelo de superficie y la



definición de las curvas de nivel, para lo cual actuaremos sobre el menú izquierdo en “Bare earth...”

Permitiéndonos modificar la equidistancia de la curvas y determinar las directoras. La imagen final quedará:

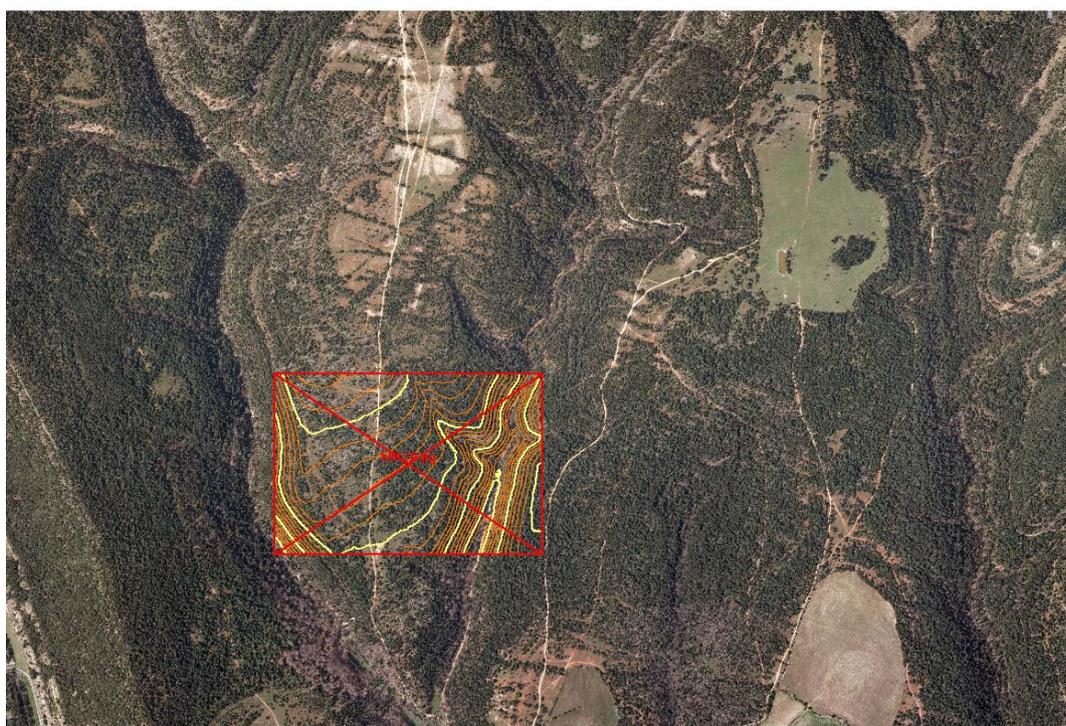
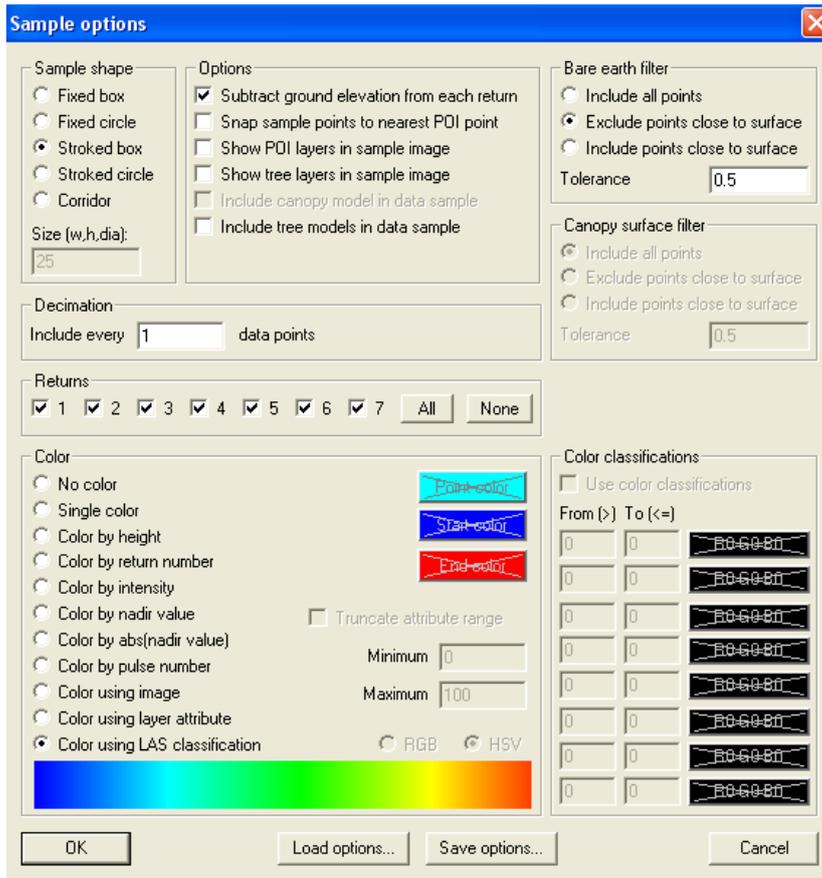


Imagen37: Curvas de nivel en FUSION.

Queda como opción final una vez generado y volcado el modelo digital, explorar otras posibilidades de visualización del software, y es la aplicación LDV, que permite de forma automática realizar operaciones entre superficies, estudiando las coberturas vegetales, y generando los modelos digitales de cubierta vegetal, utilizados para dasometría en el ámbito de la ingeniería forestal. Las opciones de visualización se encuentran en el menú lateral “Sample options”, permitiendo obtener, visiones 3D del modelo con la posibilidad de definir anaglyfos y como en el caso que se muestra, cortar el modelo en un plano XZ, según los parámetros de la imagen.



Hemos definido el modelo de “suelo desnudo” filtrando previamente la información y usando la potencialidad del software para tal fin. Queda por definir el de vegetación para compararlo con el ofrecido por la agencia vasca.

Imagen38: Opciones visualización modelos. FUSION.

Seguiremos idéntico procedimiento que en el caso anterior.

La imagen inferior muestra el visualizador de los datos LIDAR, LDV, que permite analizar tridimensionalmente la información, con una plano de corte a una cota dada.



Imagen39: Opciones de corte en LDV. FUSION.

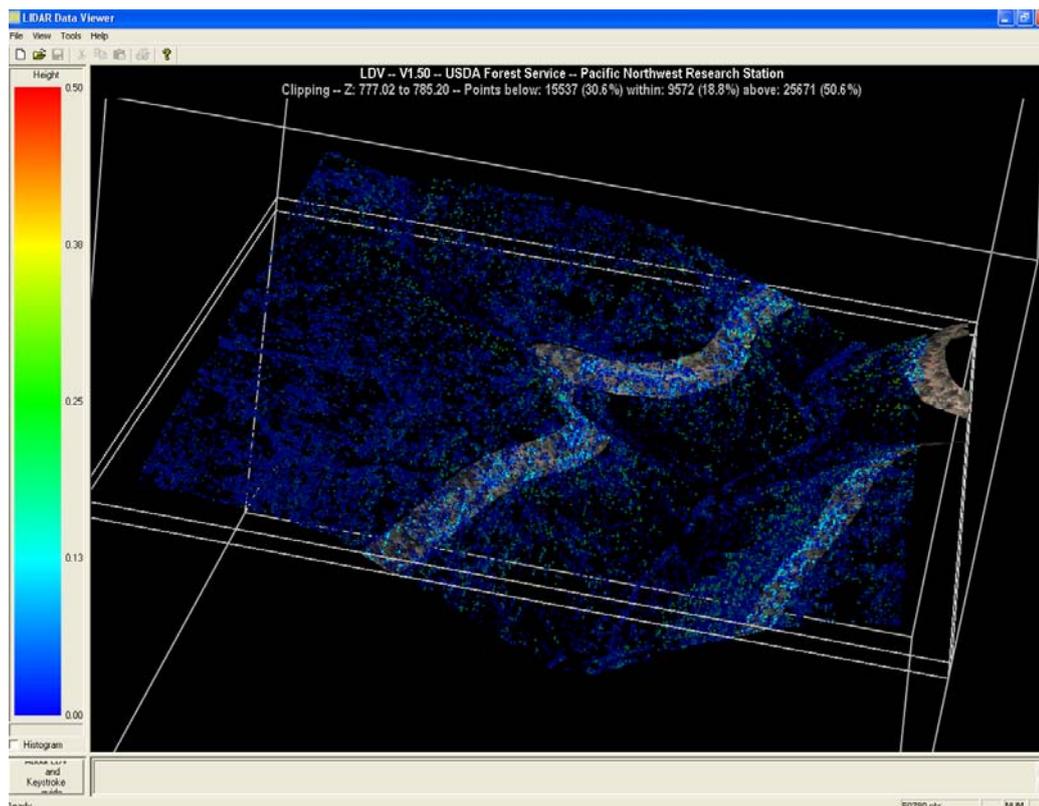


Imagen40: Resultado visualización cortes en LDV. FUSION.

Modelo de Cubierta Vegetal

Si siguiéramos el procedimiento explicado hasta ahora podríamos de igual forma obtener el modelo de cubierta; solo sería necesario establecer el conjunto de clases a considerar en la formación del MDC. Por ejemplo el suelo y la vegetación baja, el suelo y la media o la totalidad de ellas, quedando como resultado los que se visualizan a continuación a partir de su carga en el LDV.

El primer caso es la combinación entre el suelo desnudo y la vegetación baja. Como es posible ver apenas es visible la afección, y más cuando se funde con la imagen de referencia. La imagen inferior permite observar la leve rugosidad generada por la vegetación arbustiva.

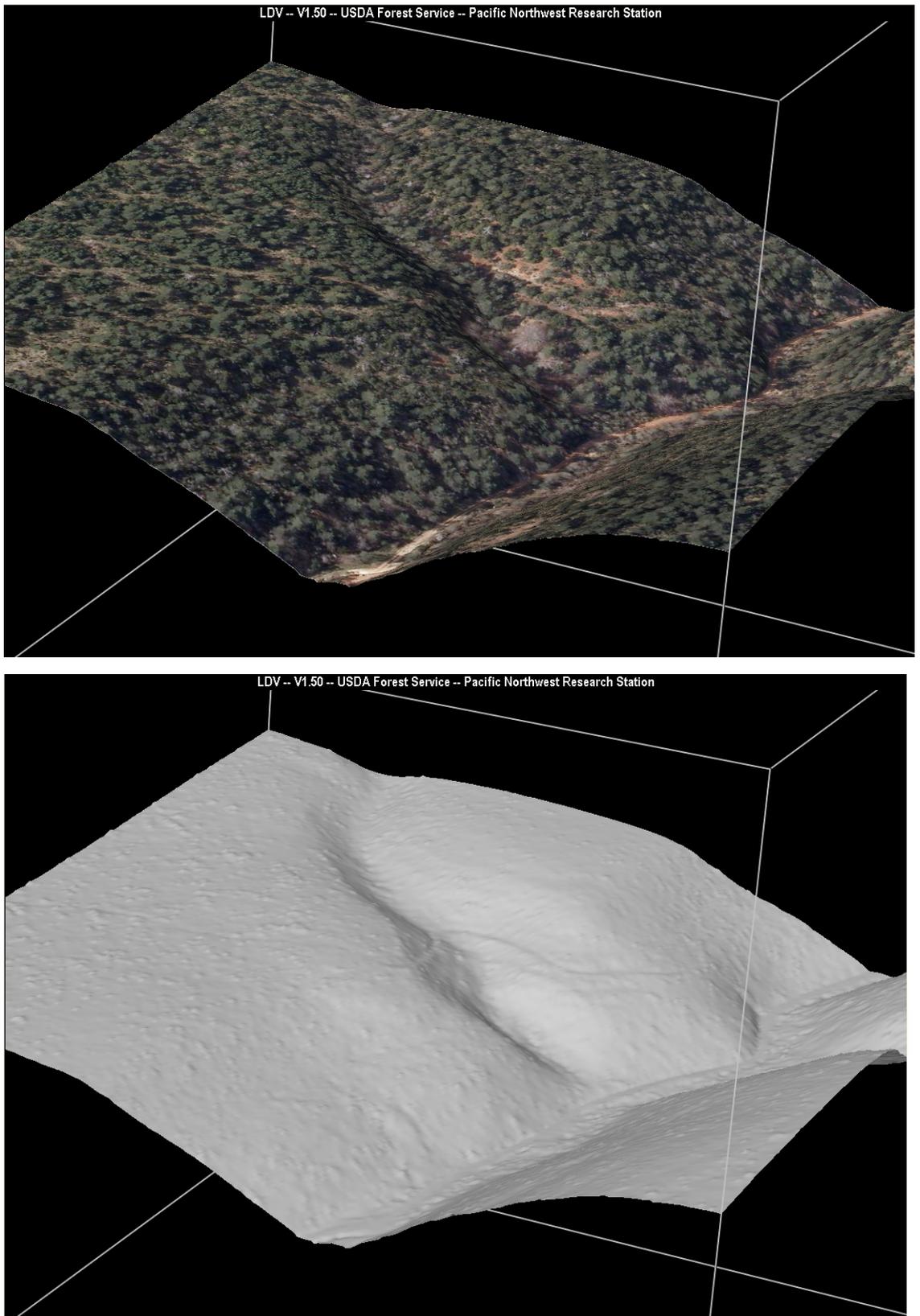


Imagen41: Visualización modelos de cubierta vegetal y ortofotos en LDV. FUSION.

Las imágenes siguientes, muestran la misma vista con la vegetación arbórea como protagonista.

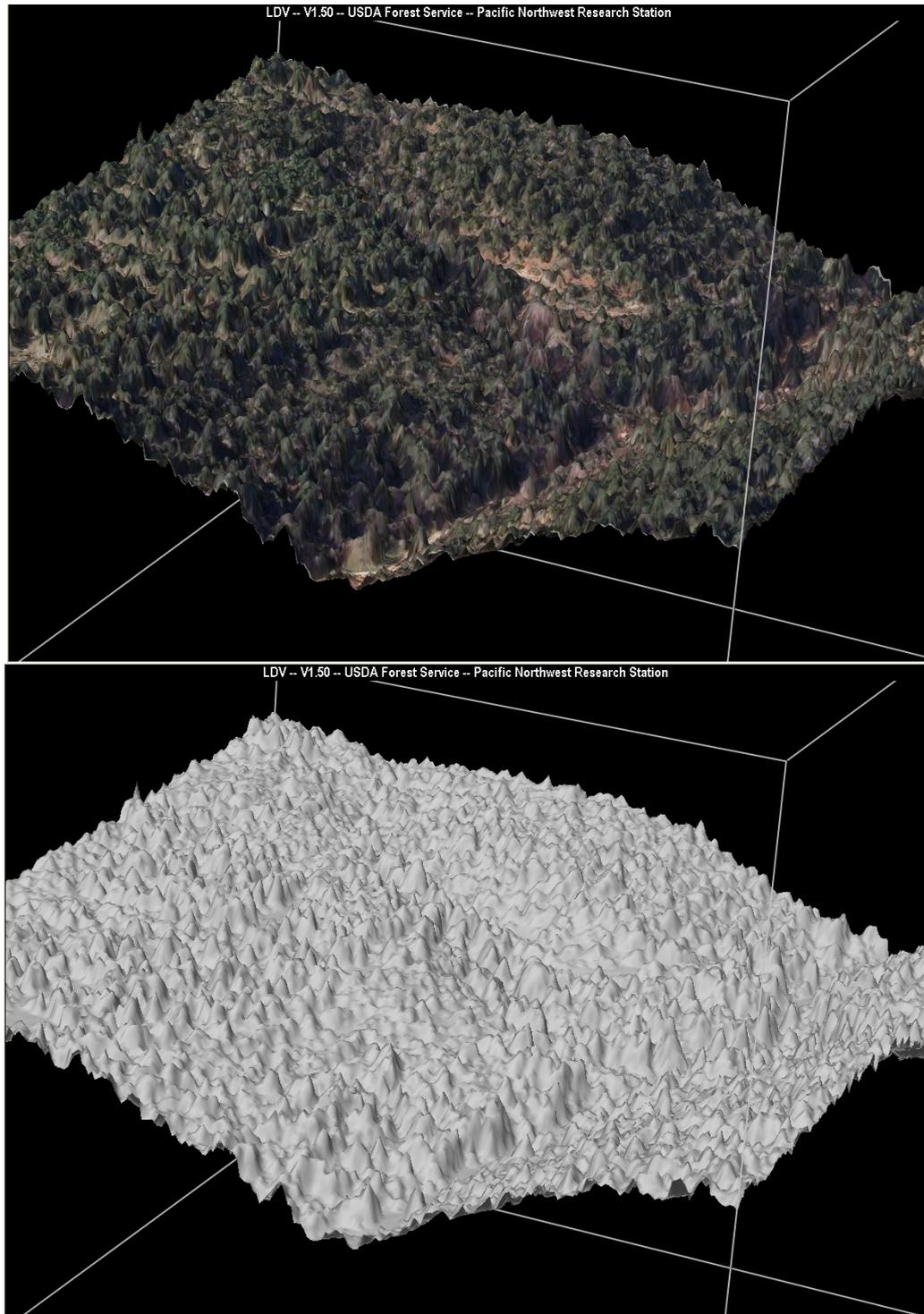


Imagen42: Visualización modelos de cubierta vegetal y ortofotos considerando vegetación arbórea en LDV. FUSION.

Y en este caso adoptando el modelo del CAPV.

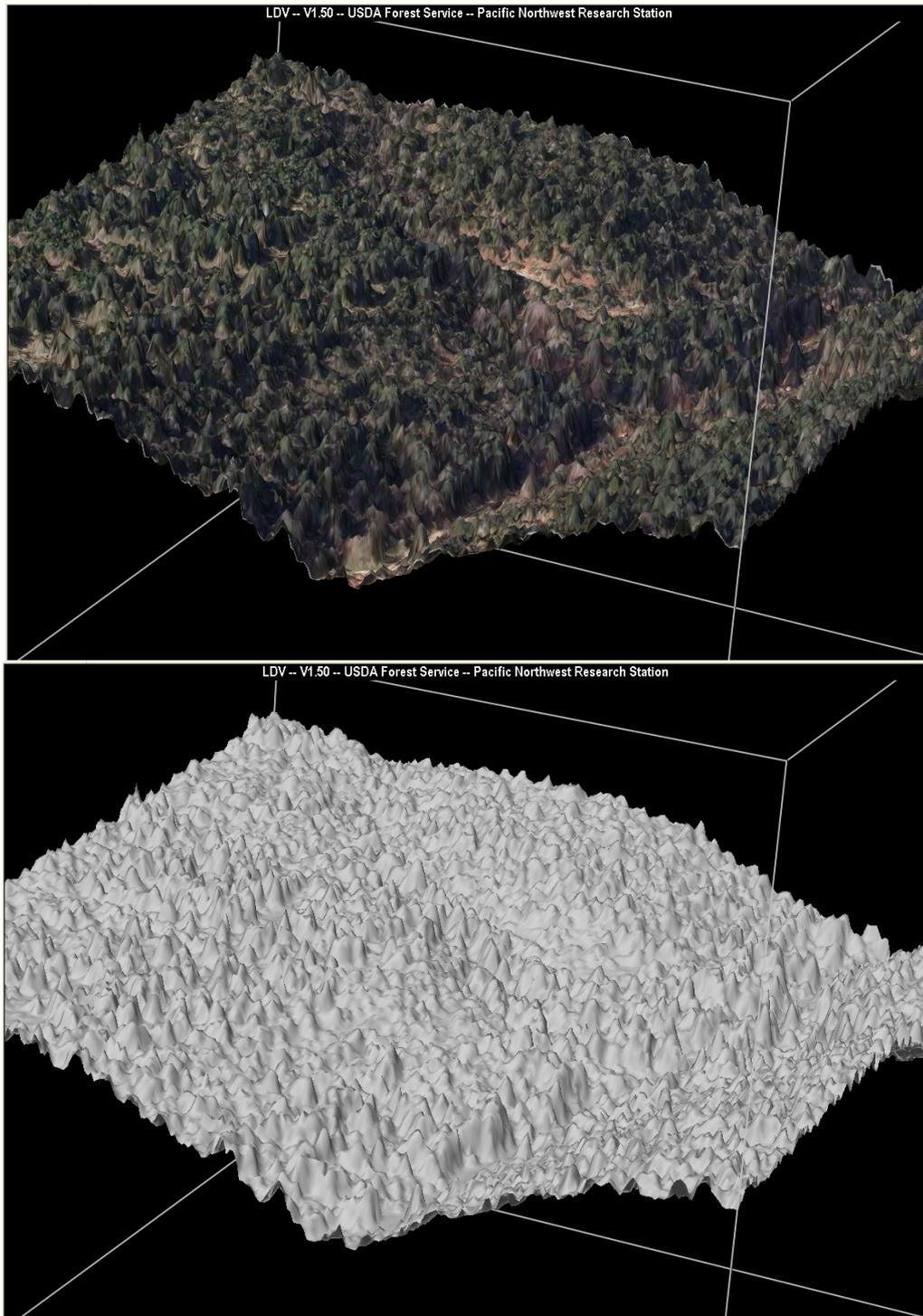
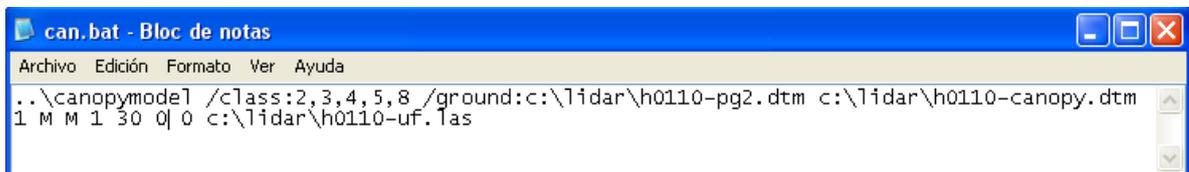


Imagen43: Visualización modelos de cubierta vegetal y ortofotos a partir del MDEV de la CAPV en LDV. FUSION.

La diferencia es notoria. La CAPV, al definir su MDEV adopta como clase formadora ésta última. Al volcar este modelo en LDV, vemos su equivalencia con el definido por nosotros, en la imagen 42.

Sin embargo FUSION, ofrece otra posibilidad de generación de este tipo de modelos dado el enfoque forestal del software. Entre las distintas rutinas de DOS que implementa, se encuentra “Canopymodel”, que de forma similar a “GridSurfaceCreate” permite generar un modelo de cubiertas de vegetación. La singularidad se encuentra en el algoritmo definido, ya que asigna la cota del retorno más alto de cada celda en su centro. La sintaxis es análoga a la ya mostrada con “GridSurfaceCreate”:



```

can.bat - Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
..\canopymodel /class:2,3,4,5,8 /ground:c:\lidar\h0110-pg2.dtm c:\lidar\h0110-canopy.dtm
1 M M 1 30 0| 0 c:\lidar\h0110-uf.tas

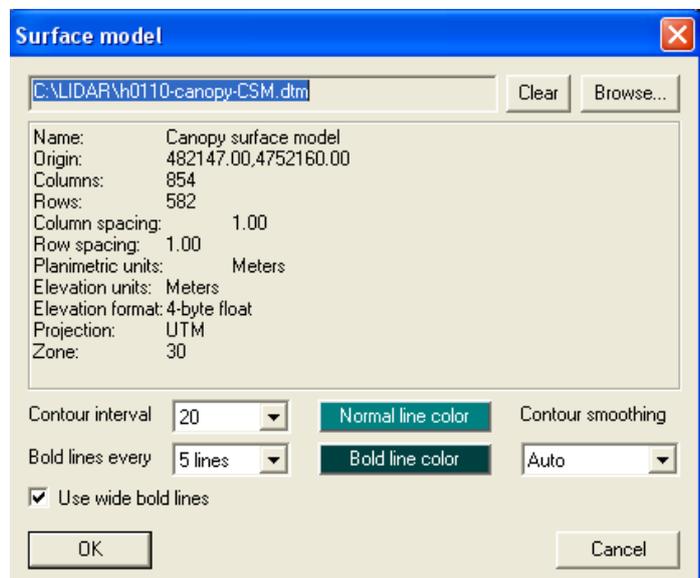
```

En este caso para poder utilizar las potencialidades del programa será necesario cargarlo desde el menú izquierdo, donde de forma análoga al modelo de “suelo desnudo”, definiremos sus características.



Ahora seleccionaremos la zona a analizar para poder visualizarla en LDV. Abierta esta aplicación,

veremos los datos LIDAR y cargaremos la superficie de cubierta, encontrando una diferencia en la presentación al mostrarla con un mallado verde.



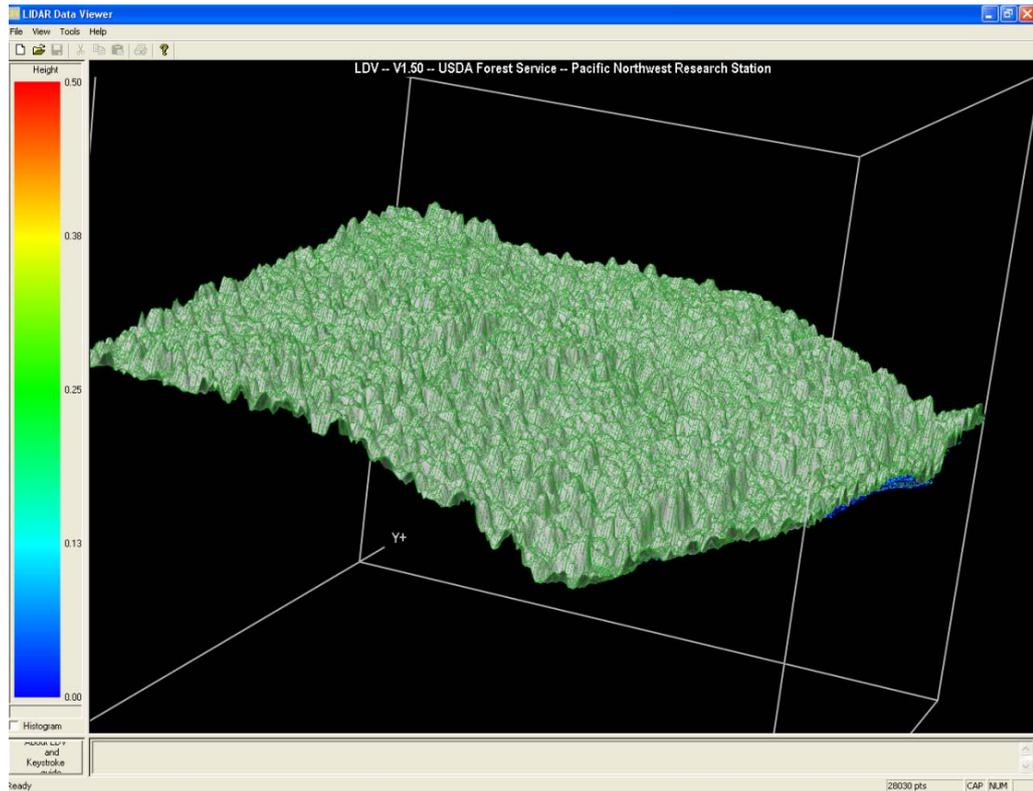
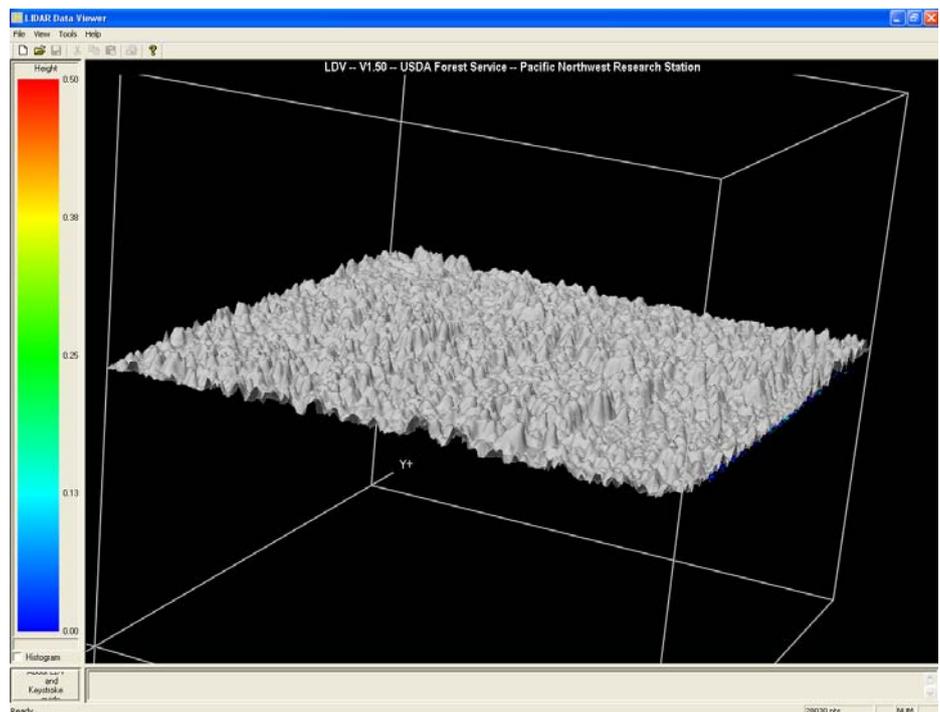


Imagen44: Visualización modelos de cubierta vegetal desde Canopy model en LDV. FUSION

Es interesante explorar otra posibilidad del programa y es la obtención del modelo “normalizado” respecto al modelo de suelo desnudo, se consigue si activamos el switch “ground”, como vemos en el bloc de notas anterior. De esta forma se muestra el modelo de cubierta sobre superficie plana.

Imagen45:
Visualización modelos de cubierta vegetal sobre superficie plana en LDV. FUSION



capítulo IV

METODOLOGÍA

INTRODUCCIÓN.

A lo largo del documento se ha mostrado el contexto general donde se desarrolla el trabajo, así como las principales herramientas utilizadas en su consecución con justificación de su uso. La multiplicidad normativa y su falta de concreción en algunos casos en referencia a las características de la información cartográfica, lleva a recurrir a los pliegos de bases de concursos para obtener las exigencias mínimas de estos. La irrupción de los LIDAR, ha supuesto un revulsivo muy notable, que en las próximas fechas se concretará con la posibilidad de acceder de forma libre y gratuita online a los datos provenientes del proyecto PNOA. Este hecho supondrá un verdadero empuje en la mejora de los procesos y de en el aumento de la eficiencia de los modelos numéricos de simulación, puesto que los modelos digitales de precisión estarán al alcance de cualquiera. Tal es el caso por su exigencia técnica, el que nos encontramos al tener que clasificar y elaborar los correspondientes planes de emergencia de las balsas existentes en nuestro país, por imperativo legal.

Hasta este momento, no existe trabajo alguno que intente determinar las necesidades básicas de la información de partida en la elaboración de estos estudios, ya que todo el esfuerzo de trabajo en los últimos años se ha enfocado al mundo de la presa y no al de la balsa, que como se señaló presenta singularidades muy notorias. La correcta

definición de un modelo digital de elevaciones, en cualquiera de sus variantes, y de alta resolución es necesario, más si cabe, cuando los procesos de colapso en este tipo de infraestructuras están sometidos a mayor incertidumbre que en el caso de las presas, y a lo que se suma su típico enclave, fuera de cauce y en ocasiones lejos de zonas de drenaje natural, por lo que en las primeras fases de la rotura la incertidumbre asociada a la ocupación de terrenos y a la definición correcta de la onda de avenida queda más puesta de manifiesto. Para responder a esta serie de interrogantes se desarrollarán las siguientes fases que responden a lo indicado inicialmente en la propuesta de proyecto.

FASES DEL TRABAJO

Como se ha venido indicando, el proceso de clasificación queda perfectamente delimitado en la Guía Técnica sobre Clasificación de Presas en Función del Riesgo Potencial del año 1.996. La especial situación de este tipo de obras fuera de cauce, justifica elegir un único escenario de rotura sin la concurrencia de la avenida, correspondiente al tipificado en la Guía como nº1.

Dado el objeto del estudio, donde la calidad de las fuentes cartográficas condicionará el resultado de la simulación, será necesario obtener distintos modelos digitales de elevación bien partiendo de cartografías convencionales editadas por los organismos correspondientes, o bien por los ofrecidos por las administraciones públicas, que se compararan con los obtenidos en base a vuelos LIDAR..

Las fases en que podríamos estructurar el trabajo serían cuatro:

1ª.- Obtención-recuperación de los DEM:

- Convencional
- LIDAR (año 2.008)

2ª.- Implementación del modelo de rotura en base a software de simulación de aguas someras, con los distintos DEM obtenidos en la fase anterior. Aplicación de la metodología de clasificación exigida.

3ª.- Análisis de resultados. Comparativa de inundabilidades. Apoyo de SIG.

4ª.- Establecimiento de conclusiones.

El limitado acceso a los datos, principalmente el vuelo LIDAR, obliga a acudir a fuentes de libre distribución, que en la actualidad se circunscriben a Euzkadi y Murcia, eligiendo la primera por proximidad con la escuela. Se implementará el modelo sobre las balsas proyectadas en la “Infraestructura hidráulica de la red en alta de la zona regable de Valles Alaveses (zona 4)”, de 2.009.

ÁMBITO DE ACTUACIÓN

La información que se muestra a continuación está extractada del pliego de bases para la Contratación de Servicios de Consultoría y Asistencia Técnica para la redacción del “Proyecto de Mejora y Modernización del Regadío de la Zona Regable de Valles alaveses (Zonas 1,2,3,6,7 y 8), de acuaEbro, de noviembre de 2.009.

El estudio se ha realizado partiendo de la información suministrada por el “Proyecto de desarrollo constructivo de la infraestructura hidráulica de la red en alta de la zona regable de Valles Alaveses (Zona 4)”, redactado en abril de 2.003, y en cuya zona nº4 de Valles Alaveses, situada al Noroeste de la Comarca “Valles Alaveses”, se encuentra la Balsa de Pozalao, en la meseta de Gumianos, entre el Bco. de Pozalao al oeste y el de Fuente al este, sendos tributarios del río Omecillo, que a su vez es afluente del Ebro por su margen izquierda.

Esta zona nº4, comprende los terrenos de ambas márgenes del río Omecillo, entre Bóveda y Villanañe, sus valles laterales, en la margen izquierda, el de Valluerca – Quintanilla y Acebedo – Basabe – Pinedo; y en la margen derecha, los de Quejo,

Nograro y Barrio; además, se incluyen las fincas altas de la margen izquierda del río Omecillo, y del Valle del Ebro, situadas en Bachicabo.



Imagen46: Zona de estudio. Visor GeoEuzkadi.

En esta Zona las Comunidades de Regantes, en la mayoría de los casos, utilizan un sistema de riego por aspersión por tubería móvil, mediante la detracción de caudales a pie de parcela durante el período estival, único período en que se produce el riego, ya que los cultivos de invierno (principalmente cereales) tienen cubiertas sus necesidades hídricas con las precipitaciones, sin ser necesarios riegos de apoyo.

Durante el período estival (de 1 de julio a 30 de septiembre) los agricultores extraen el agua directamente de los ríos mediante equipos de bombeo accionados generalmente mediante sus propios tractores. Los caudales circulantes, en numerosas ocasiones, son insuficientes o nulos.

Las infraestructuras de regulación y conducción proyectadas permitirán una mayor eficiencia en el uso de los recursos de agua y evitarán la detracción de los mismos en la época estival. Se trata de captar, respetando los caudales ecológicos, caudales sobrantes otoñales, invernales y primaverales y almacenarlos en las infraestructuras de regulación proyectadas al efecto (presa de El Molino, en el arroyo del Valle, y cuatro balsas de almacenamiento de caudales de los arroyos de Pozalao, Cascajo, Vallejo de San Juan y Valdelagua).

Al llegar el período estival de riegos, los caudales necesarios para satisfacer las necesidades hídricas de los cultivos se suministran desde la presa y balsas a través de dos redes principales y las correspondientes redes de distribución, evitándose las detracciones directas del río Omecillo, cuyos caudales medioambientales se garantizan desde el embalse de El Molino.

Características de las obras

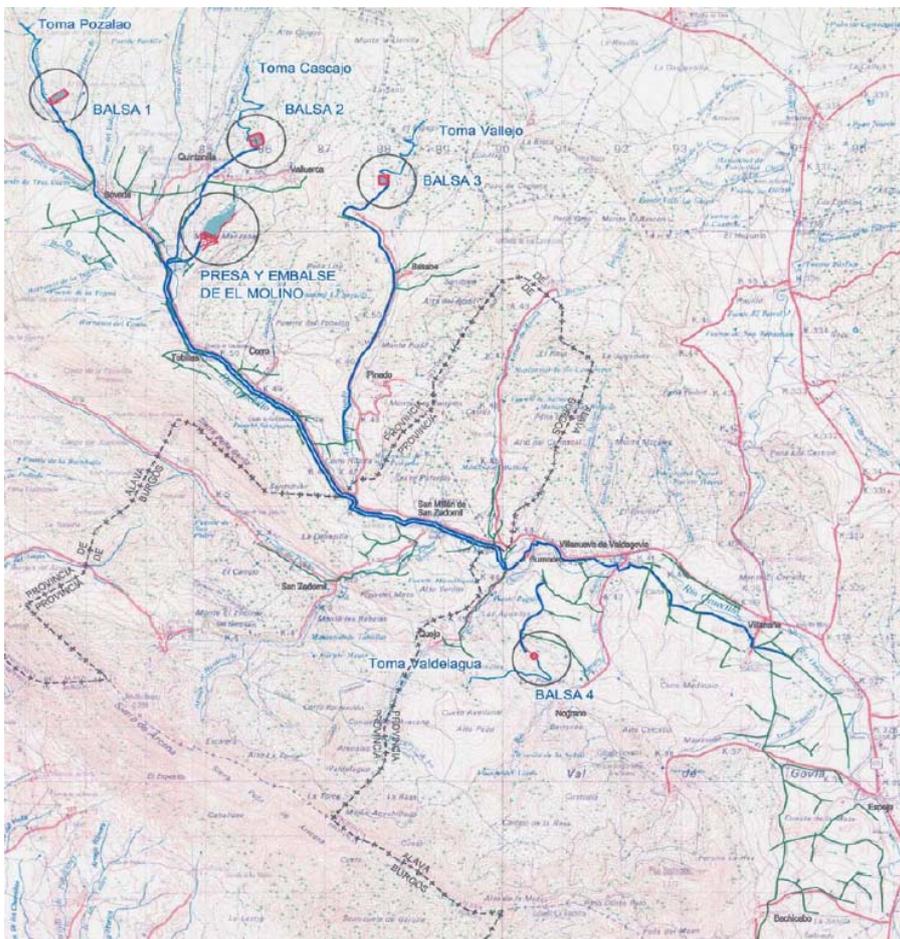
Este amplio proyecto comprende además de la Balsa de Pozalao, actualmente en construcción, según se puede ver en la imagen siguiente, procedente del vuelo fotogramétrico de este año, las siguientes obras:

Imagen47: Balsa de Pozalao actualmente en construcción. Vuelo 2011. Visor GeoEuzkadi.



Construcción de la infraestructura hidráulica de una red “en alta” para el suministro en estiaje a unas 1.910 ha de la Zona 4 (“Alto Omecillo”) y colindantes de la comarca denominada “Valles Alaveses”. La citada red contará con la regulación, en el embalse de El Molino, de los caudales del arroyo del Valle, afluente de cabecera del río Omecillo, así como la que se derivará de la construcción de una serie de balsas de retención de avenidas de los arroyos de cabecera que conforman el citado río.

La red de tuberías “en alta” estará dotada de una conducción principal, desde el embalse de El Molino, de unos 16 km, de diámetro variable entre 700 y 500 mm en fundición, cuatro conducciones principales, en fundición y PVC, desde las Balsas de Pozalao, Cascajo, Vallejo de San Juan y Valdeagua, de unos 23,5 km y diámetros entre 150 y 500 mm y las correspondientes conexiones desde las captaciones a las Balsas, en una longitud total de 8 km, en fundición dúctil y diámetros variables entre 150 mm



y 400 mm. El esquema funcional se muestra en la imagen siguiente, donde se puede observar la situación de la obra objeto de estudio en la esquina superior izquierda, denominada “Balsa 1”.

Imagen48: Esquema
funcional actuación
general.

Descripción de la balsa

En el conjunto de la actuación la balsa objeto de estudio es la única rectangular, siendo las otras tres cuadradas. Los taludes son 2H:1V tanto en los terraplenes como en los desmontes. En el conjunto total de las cuatro balsas el volumen de excavación es muy superior al de terraplén. El excedente se utilizará en el cuerpo de presa del embalse del Molino.

Se deja un resguardo de 0,5 m entre la lámina de agua, a la cota del N.M.N., y la coronación. El camino de coronación tiene una anchura de 4 m.

La impermeabilización de las balsas queda garantizada con una lámina de P.E.A.D. de 1,5 mm de espesor que se apoya sobre una lámina de geotextil de 350 gr/m². El drenaje del fondo está formado por una serie de tubos de P.V.C. ranurados embebidos en un relleno granular. Todos estos tubos llegan hasta una arqueta de la que se evacua el agua por medio de un tubo de hormigón de 400 mm de diámetro.

Las balsas contarán con un aliviadero en torre junto al que se construirá la toma-desagüe de fondo. La altura del aliviadero es de 6,8 m en la balsa del barranco de Pozalao y de 5,25 m en las otras tres. El agua que se vierte por el interior del aliviadero se evacua mediante dos tuberías de fundición de 300 mm de diámetro embebidas en hormigón en masa. A la salida de éstas hay una estructura disipadora de energía compartida con los desagües de fondo.

La estructura de toma-desagüe de fondo es común para ambos usos (toma y desagüe de fondo), y depende del accionamiento de las válvulas situadas en la caseta anexa a la balsa, que el agua se vierta a una vaguada o que se distribuya por las conducciones del sistema de riego. Las tuberías que sacan el agua de la balsa son de fundición y de 400 mm de diámetro y están embebidas en hormigón en masa.

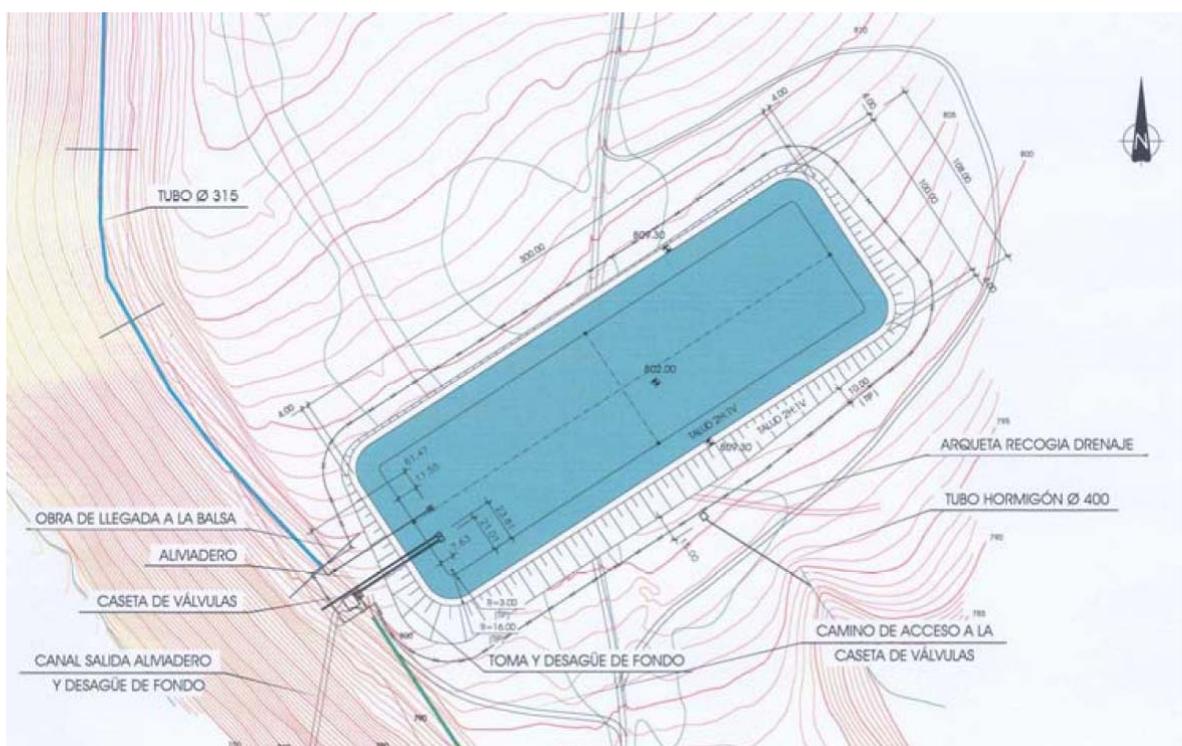
Éstas llegan a la caseta de válvulas y allí se bifurcan hacia el sistema de riego o hacia el desagüe. Antes de conectar con el sistema de riego hay dos válvulas Bureau y después una pieza pantalón que une las dos tuberías en una sola.

Las tuberías que sirven de desagüe cuentan con una válvula de mariposa cada una. Para evitar que el vertido sea muy erosivo se coloca una estructura disipadora de energía en forma de codo contra la que chocará el chorro de agua.

La ficha técnica describe las características principales de la balsa:

AZUD	
Cota fondo azud toma:	810,00 m.s.n.m.
Cota vertido azud toma:	811,50 m.s.n.m.
CONDUCCIÓN	
Diámetro conducción:	315 mm
Material:	PVC
Longitud:	1.875 m
BALSA	
Dimensiones:	300 m x 100 m
Taludes:	2H:1V
Aliviadero:	2 Ø300 mm
Tomas-desagües:	2 Ø400 mm
Cota camino coronación balsa:	809,30 m.s.n.m.
Cota lámina de agua N.M.N.:	808,80 m.s.n.m.
Cota fondo de la balsa:	802,00 m.s.n.m.
Volumen excavación:	73.770 m ³
Volumen terraplenes:	48.208 m ³
Volumen útil:	165.000 m ³

Imagen49: Planta general balsa..



MODELOS DIGITALES DE ELEVACIÓN

Se justificaba en las fases del trabajo que el acceso actualmente de forma libre a datos LIDAR, solo se encontraba disponible en dos comunidades autónomas, optando por el País Vasco por su cercanía.

El análisis de la información ofrecida permitía poder rebasar la primera fase, al obtener directamente desde la web los distintos modelos ya procesados y centrarse en su tratamiento para poder ser cargados de forma correcta en el software de simulación numérica descrito en el capítulo III, IBER. No obstante, y dado el alcance del Máster y de las nuevas aplicaciones también de libre distribución analizadas, FUSION, se ha obtenido uno de ellos que ha permitido comprobar la bondad de los resultados respecto a los ofrecidos ya procesados por la administración. Se le ha llamado MDS-LIDAR.

La CAPV, en su página web, GeoEuzkadi ofrece lo siguiente:

MDE 1mx1m procedentes del LIDAR de Álava y Bizkaia 2008

Diferentes versiones de los Modelos Digitales de Elevaciones (MDE) generados a partir del procesado de la nube de puntos LIDAR:

- » MDT: Modelo Digital del Terreno
- » MDEH: Modelo Digital de Elevaciones para Hidrografía (MDT sin puentes y con edificios)
- » MDEV: Modelo Digital de Elevaciones de Vegetación (MDT con vegetación)
- » MDSO: Modelos Digitales de Superficies para las Ortofotos (MDT sin edificios y con puentes)

Sistema de Referencia ETRS89. Altitud en cotas ortométricas en base al modelo de geoide IBERGEO95.
Actualmente se está procesando la información de Vuelo LIDAR del Territorio Histórico de Gipuzkoa, que se estima estará disponible para finales del año 2010. Se pretende entonces referenciar todos los productos con el nuevo modelo de geoide EGM08_RED NAP.

Responsable - Contacto
[Departamento de Medio Ambiente, Planificación Territorial, Agricultura y Pesca](#)

Descarga FTP: <ftp://ftp.geo.euskadi.net/lidar>

*Imagen50:
Oferta MDE de
la CAPV.*

MDT 5mx5m

Modelos Digitales del Terreno de los años 2002-2009.
Procedentes hasta 2007 por estereocorrelación y/o actualización estereoscópica de los vuelos fotogramétricos. A partir de 2008 procedentes de los datos LIDAR.
Sólo disponible para la descarga la última actualización.

Responsable - Contacto
[Departamento de Medio Ambiente, Planificación Territorial, Agricultura y Pesca](#)

[Visor](#) - Descarga FTP: <ftp://ftp.geo.euskadi.net/cartografia>



Los dos conjuntos de datos ofrecidos responden a los objetivos planteados. Por un lado modelos digitales procedentes de datos LIDAR y por otro, modelos digitales procedentes de técnicas fotogramétricas clásicas.

En total se ha trabajado con 6 modelos distintos a los que se les ha procesado eliminando información, mediante un simple filtrado para obtener, conjuntamente a los 5 tipos distintos de mallado analizado, un global de 70 modelos de los que se ofrecen resultados en el correspondiente anexo.

PROCEDENCIA LIDAR

TIPO	GRID	MALLA	TIPO	GRID	MALLA	TIPO	GRID	MALLA	TIPO	GRID	MALLA		
MODELO	INICIO	mín-máx	MODEL O	INICI O	mín- máx	MODEL O	INICI O	mín- máx	MODEL O	INICI O	mín- máx		
MDEH	1X1	2-20	MDS	1X1	2-20	MDT	1X1	2-20	MDS-LIDAR	1X1	2-20		
	2X2			2X2			2X2			2X2			
	5X5			5X5			5X5			5X5			
	1X1	3-50		1X1	3-50		1X1	3-50		1X1	3-50	1X1	3-50
	2X2			2X2			2X2			2X2			
	5X5			5X5			5X5			5X5			
	1X1	5-50		1X1	5-50		1X1	5-50		1X1	5-50	1X1	5-50
	2X2			2X2			2X2			2X2			
	5X5			5X5			5X5			5X5			
	1X1	10-50		1X1	10-50		1X1	10-50		1X1	10-50	1X1	10-50
	2X2			2X2			2X2			2X2			
	5X5			5X5			5X5			5X5			
	1X1	20-50		1X1	20-50		1X1	20-50		1X1	20-50	1X1	20-50
	2X2			2X2			2X2			2X2			
	5X5			5X5			5X5			5X5			

PROCEDENCIA FOTOGRAMETRÍA

TIPO	GRID	MALLADO	TIPO	GRID	MALLADO
MODELO	INICIO	mín-máx	MODELO	INICIO	mín-máx
MDT2007	2-20	2-20	MDT2009	2-20	2-20
	3-50	3-50		3-50	3-50
	5-50	5-50		5-50	5-50
	10-50	10-50		10-50	10-50
	20-50	20-50		20-50	20-50

La calidad de los datos LIDAR ofertados responde a los estándares exigidos por la administración y mostrados en los pliegos de bases indicados en el capítulo I, tal y como reseña el informe de calidad de la empresa adjudicataria de los vuelos, AZIMUT, S.A. y que se reproduce a continuación:

INFORME DE VUELO: LIDAR BIZKAIA

Los principales parámetros de ejecución del vuelo LIDAR de BIZKAIA son los siguientes:

Fechas de Vuelo

El vuelo se realizó entre los días 8 y 13 de febrero de 2008.

Sistema Lidar (componentes)

Lite Mapper 5600

Sistema de Navegación: CCNS-4 de IGI

GPS: NovAtel OEM-4-G2 (Internal) 4-G2-L1/L2...2Hz

INS: AeroControl IID. Frecuencia de registro: 256 Hz

Los parámetros de configuración del Lidar para el siguiente proyecto se muestran en la tabla adjunta.

Characteristics	Value
Scanangle	60 °
Pulse Repetition Rate (PRR)	120,000 Hz
eff. Measurement Rate	80,000 Hz
Beam divergence	0.5 mrad
Facets	4
Ground Speed	110 km

Tabla 1: parámetros configuración LIDAR.

Densidad de puntos

Densidad media planificada de 2.5 puntos por metro cuadrado.

Altitud sobre el terreno

900 m, con incrementos de variación de 600 metros.

Distancia entre líneas de vuelo

450 m

Recubrimiento transversal

60%

Corredor de línea de barrido en el terreno

1.039 m

Ángulo de la toma

60° (ÁNGULO COMPLETO).

Velocidad de la aeronave

56.6 m/s

Gap Límite

60 m

Estaciones de referencia

Como estaciones de referencia se han empleado las integradas dentro de la red GPS de Euskadi y dos estaciones GPS adicionales TRIMBLE 5700, centradas en el área del proyecto, con una frecuencia de registro de 2 Hz.

Para el filtrado se ha utilizado como herramienta auxiliar GlobalMapper, que ha permitido abrir los ficheros ASCII ofrecidos por la CAPV y exportarlos a formatos XYZ, indicando el grid requerido de los datos, que en nuestro caso ha sido, 1x1, 2x2 y 5x5, que quiere decir que escoge información cada metro, cada dos o cada cinco.

capítulo V

RESULTADOS

SIMULACIÓN HIDRÁULICA

La implementación correcta de las metodologías descritas en las guías técnicas de clasificación de presas y de elaboración de planes de emergencia, requieren la consideración de distintos escenarios de rotura. En nuestro caso y puesto que el objetivo no era cuantificador, sino más bien cualificador, se ha optado por plantear el escenario 1 de rotura sin avenida.

Las metodologías ad-hoc exigen el análisis del tiempo y forma de la brecha generadora del colapso estructural, atendiendo a modelos más o menos complejos y dado el alcance de este trabajo, acorde a la calidad de los datos de partida. Ello ha llevado a determinar el hidrograma de rotura, utilizando simulaciones numéricas específicas y desarrolladas por la “National Weather Service” americana, y concretadas en el software Gui BREACH, en su versión 1.00.07-20-2010.



Este software se basa en los estudios de Fread de finales de los 80 y cuyo “abstract” se reproduce a continuación:

BREACH: AN EROSION MODEL FOR EARTHEN DAM FAILURES by D.L. Fread₁
July 1988 (Revision 1, August 1991)

ABSTRACT. A physically based mathematical model (BREACH) to predict the breach characteristics (size, time of formation) and the discharge hydrograph emanating from a breached earthen dam is presented. The earthen dam may be man-made or naturally formed by a landslide. The model is developed by coupling the conservation of mass of the reservoir inflow, spillway outflow, and breach outflow with the sediment transport capacity of the unsteady uniform flow along an erosion-formed breached channel. The bottom slope of the breach is assumed to be essentially that of the downstream face of the dam. The growth of the breach channel is dependent on the dam's material properties (D_{50} size, unit weight, friction angle, cohesive strength). The model considers the possible existence of the following complexities: 1) core material having properties which differ from those of the outer portions of the dam; 2) the necessity of forming an eroded ditch along the downstream face of the dam prior to the actual breach formation by the overtopping water; 3) the downstream face of the dam can have a grass cover or be composed of a material of larger grain size than the outer portion of the dam; 4) enlargement of the breach through the mechanism of one or more sudden structural collapses due to the hydrostatic pressure force exceeding the resisting shear and cohesive forces; 5) enlargement of the breach width by slope stability theory; 6) initiation of the breach via piping with subsequent progression to a free surface breach flow; and 7) erosion transport can be for either noncohesive (granular) materials or cohesive (clay) materials. The outflow hydrograph is obtained through a time-stepping iterative solution that requires only a few seconds for computation on a mainframe computer. The model is not subject to numerical stability or convergence difficulties. The model's predictions are compared with observations of a piping failure of the man-made Teton Dam in Idaho, the piping failure of the man-made Lawn Lake Dam in Colorado, and a breached landslide-formed dam in Peru. Also, the model has been used to predict possible downstream flooding from a potential breach of the landslide blockage of Spirit Lake in the aftermath of the eruption of Mount St. Helens in Washington. Model sensitivity to numerical parameters is minimal; however, it is sensitive to the internal friction angle of the dam's material and the extent of grass cover when simulating man-made dams and to the cohesive strength of the material composing landslideformed dams.

Los resultados del programa permiten obtener el hidrograma de salida producido por el colapso del dique de cierre y que sin ánimo de ser exhaustivo, ya que se aleja del objeto de este estudio queda reflejado en el siguiente sumario gráfico:

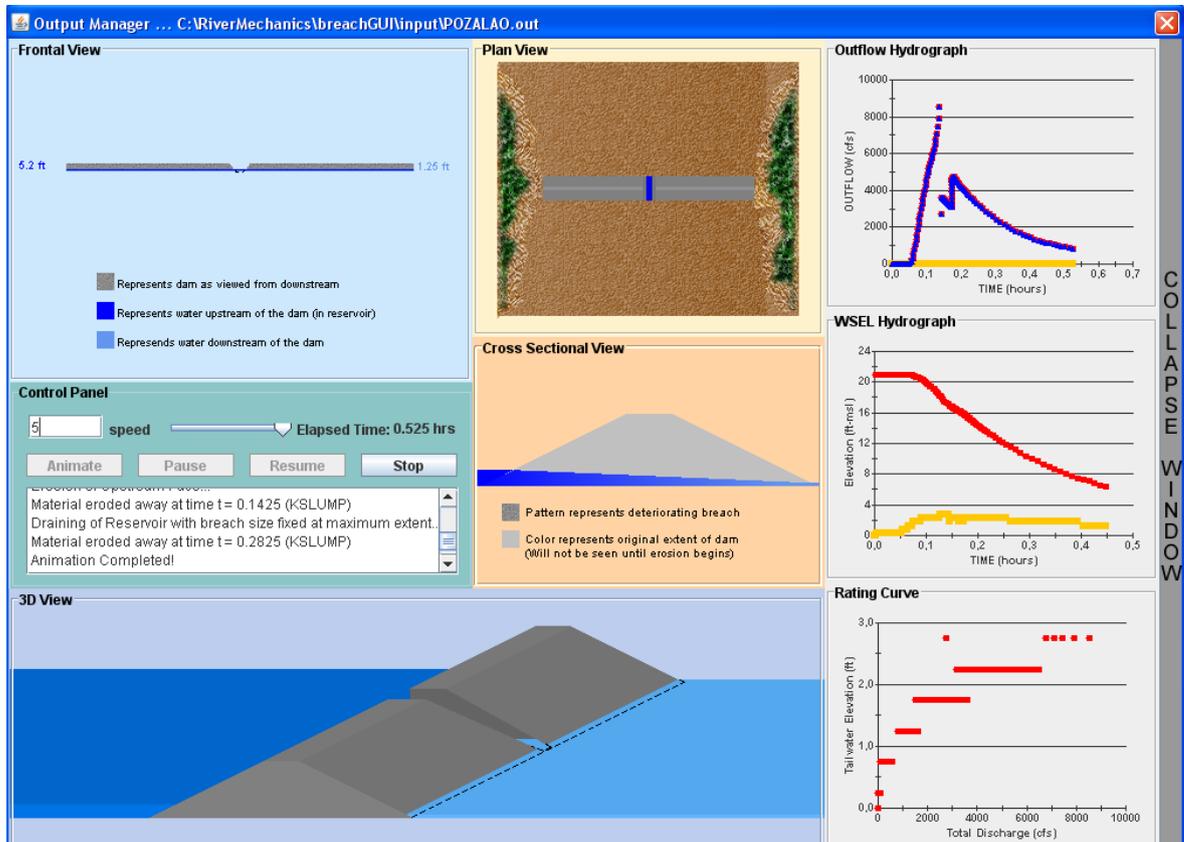


Imagen51: Salidas gráficas de resultados de Breach GUI..

Este estudio permite concluir el tiempo de simulación que queda estipulado en 2400 s y el caudal máximo del hidrograma en 238.5 m³/s.

En cuanto a los resultados obtenidos por la simulación con IBER y dado el volumen de información generada por los 70 modelos, más de 100 Gbytes, se ha estructurado como sigue y quedando definida por la tabla resumen adjunta.

Dado que los requisitos cartográficos de riesgo se concretan en velocidades y calados, cuando estos superan, bien 1m/s, bien 1m o cuando su multiplicación sea mayor que 0.5 m²/s, se ha optado por analizar estos datos. Puesto que el MDE puede influir y mucho en la coherencia de los valores obtenidos, se han analizado dos secciones distintas del cauce, aguas arriba del municipio de Bóveda y en el propio pueblo, con el

objeto de estudiar las variaciones de llegada del hidrograma de avenida por motivos del MDE. Así mismo se han delimitado las áreas de inundación para analizar sus variaciones.

Finalmente y considerando como óptimo el MDEH se han comparado los resultados de todas las simulaciones de modo que puedan obtenerse conclusiones respecto a cuál es el modelo más acorde a este tipo de estudios y cuál debe ser su configuración.

Las páginas siguientes muestran un conjunto de tablas resumen de los resultados obtenidos, siendo las cuatro primeras las correspondientes a los procedentes de MDE a partir de LIDAR y las dos finales las de los métodos clásicos.

MDE procedente de LIDAR

MDEH

Modelo digital de elevación específico para simulaciones hidráulicas, que no contempla vegetación.

TIPO	GRIDA	MALLADO	SEC01R		SEC01H		SEC02R		SEC02H		LLEGADA-HIDROGRAMA-SEC-02R		AREA-INUNDADA			
			CALADO	MEDIA	DESV. TIP.	CALADO	MEDIA	DESV. TIP.	sR	MEDIA	DESV. TIP.	m2	MEDIA	DESV. TIP.		
MDEH	1X1	2-20	1.12	1.13	0.05	2.56	2.64	0.30	920	947	23	157698	165425	7463		
			1.19			2.38									960	165983
			1.09			2.97									960	172593
	1X1	3-50	1.05	1.11	0.07	2.59	2.67	0.13	930	943	12	166882	163947	3858		
			1.18			2.60									950	165382
			1.10			2.82									950	159577
	1X1	5-50	1.05	1.11	0.07	2.58	2.67	0.13	930	940	10	167142	164251	3904		
			1.18			2.61									940	165801
			1.09			2.81									950	159810
	1X1	10-50	1.01	1.15	0.12	2.52	2.61	0.10	920	933	12	157080	163647	6505		
			1.24			2.59									940	170088
			1.19			2.71									940	163774
	1X1	20-50	1.04	1.03	0.02	1.76	1.89	0.47	940	923	15	168039	170003	3964		
			1.05			1.49									920	174566
			1.01			2.41									910	167405

MDS

Modelo digital de superficies. Considera vegetación.

TIPO	GRID	MALLADO	SEC01		SEC02		LLEGADA-HIDROGRAMA-SEC-02	AREA-INUNDADA		
			CALADO	MEDIA	CALADO	MEDIA		m ²	DESV-TIP	
MDS	1X1	2-20	1.21	1.14	0.22	2.24	1130	1123	144065	3129
			1.32			2.04			141113	
			0.90			2.30			147368	
	1X1	3-50	1.33	1.26	0.30	1.95	1110	1117	143495	1102
			1.51			1.90			143972	
			0.93			2.46			145597	
	1X1	5-50	1.25	1.23	0.29	1.97	1150	1130	146086	1843
			1.51			1.90			143564	
			0.93			2.47			147152	
	1X1	10-50	1.17	1.14	0.15	2.04	1130	1107	147232	3766
			1.28			1.87			146336	
			0.98			2.37			153261	
	1X1	20-50	1.07	1.09	0.12	1.29	1120	1127	163073	1014
			1.22			1.65			165100	
			0.98			1.45			164157	

MDT

Modelo digital de terreno. Similar al MDEH.

TIPO	GRID	MALLADO	SEC01		SEC02		LLEGADA-HIDROGRAMA-SEC-02			AREA-INUNDADA		
			CALADO	MEDIA	DESV. TIP	CALADO	MEDIA	DESV. TIP	m2	MEDIA	DESV. TIP	
MDT	1X1	2-20	1.16	1.14	0.02	1.57	913	6	153875	159346	6388	
	2X2		1.13			1.44			157798			
	5X5		1.14			1.48			166366			
	1X1	3-50	1.14	1.08	0.08	1.48	917	6	158510	157252	4534	
	2X2		1.12			1.46			161025			
	5X5		0.99			1.51			152222			
	1X1	5-50	1.15	1.09	0.09	1.49	913	6	160111	157423	5038	
	2X2		1.13			1.48			160547			
	5X5		0.98			1.51			151611			
	1X1	10-50	1.06	1.10	0.11	1.49	917	6	165415	159934	4770	
	2X2		1.02			1.56			157661			
	5X5		1.23			1.58			156725			
	1X1	20-50	0.99	0.93	0.10	1.57	957	21	172418	169867	10528	
	2X2		0.81			1.29			158297			
	5X5		0.99			1.21			178858			

MDS-LIDAR

Modelo digital de superficie procesado en este estudio a partir de los datos LIDAR.

TIPO	GRIDA	MALLADO	SEC01		SEC02		LLEGADA-HIDROGRAMA-SEC-02			AREA-INUNDADA				
			CALADO	MEDIA	DESV. TIP.	CALADO	MEDIA	DESV. TIP.	m	MEDIA	DESV. TIP.			
MDS-LIDAR	1X1	2-20	1.36	1.38	0.10	1.95	1.97	1170	1157	81	151640	154365	2697	
	2X2		1.30			1.94					1070			154420
	5X5		1.49			2.03					1230			157034
	1X1	3-50	1.28	1.34	0.16	1.97	1.93	1160	1153	6	148444	150004	2514	
	2X2		1.23			2.09					1150			148663
	5X5		1.52			1.72					1150			152904
	1X1	5-50	1.30	1.32	0.11	1.97	2.01	1170	1160	10	149691	152246	2722	
	2X2		1.22			2.05					1160			155109
	5X5		1.44			2.00					1150			151937
	1X1	10-50	1.22	1.29	0.08	1.82	1.81	1130	1140	26	151555	156402	4197	
	2X2		1.26			1.79					1120			158791
	5X5		1.38			1.82					1170			158859
	1X1	20-50	0.90	1.04	0.21	1.67	1.54	1010	1033	49	169603	168163	1305	
	2X2		0.93			1.38					1000			167059
	5X5		1.28			1.56					1090			167827

MDE procedente de fotogrametría

MDT-2007

Modelo digital del terreno por estereocorrelación a partir de vuelo fotogramétrico.

TIPO	GRID	MALLADO	SEC01		SEC02		LLEGADA-HIDROGRAMA-SEC-02			AREA-INUNDADA		
			CALADO	MEDIA	CALADO	MEDIA	DESV. TIP.	s	MEDIA	DESV. TIP.	m ²	MEDIA
MDT2007	2-20	2-20	1.22	1.22	1.56	1.56	1000	1000	1000.00	143102	143102	143102.00
	3-50	3-50	1.05	1.05	1.60	1.60	1020	1020	1020.00	140096	140096	140096.00
	5-50	5-50	1.20	1.20	1.57	1.57	1010	1010	1010.00	140589	140589	140589.00
	10-50	10-50	1.03	1.03	1.52	1.52	1010	1010	1010.00	161533	161533	161533.00
	20-50	20-50	1.00	1.00	1.31	1.31	1020	1020	1020.00	171093	171093	171093.00

MDT-2009

Modelo digital del terreno procedente de LIDAR, peo con malla de 5x5.

TIPO	GRID	MALLADO	SEC01		SEC02		LLEGADA-HIDROGRAMA-SEC-02			AREA-INUNDADA	
			CALADO	MEDIA	CALADO	MEDIA	DES. TIP.	DES. TIP.	DES. TIP.	MEDIA	m2
MDT2009	2-20	2-20	1.22	1.22	1.41	1.41	920	920.00	920.00	153980	153980.00
	3-50	3-50	1.08	1.08	1.48	1.48	910	910.00	910.00	157258	157258.00
	5-50	5-50	1.08	1.08	1.48	1.48	930	930.00	930.00	158080	158080.00
	10-50	10-50	1.04	1.04	1.56	1.56	920	920.00	920.00	164771	164771.00
	20-50	20-50	1.09	1.09	1.64	1.64	970	970.00	970.00	172067	172067.00

Relaciones entre modelos

Se muestra en la tabla siguiente considerando el MDEH como patrón las relaciones entre los valores obtenidos, con objeto de definir su idoneidad en simulaciones hidráulicas de roturas de balsas.

		RATIOS S/ MODELO BASE MDEH 1X1 2-20							
		PROPIO MODELO		ENTRE MODELOS LIDAR		PROPIO MODELO		ENTRE MODELOS LIDAR	
TIPO		SEC01	SEC02	SEC01	SEC02	HIDRO	AREA	HIDRO	AREA
MODELO		CALADO	CALADO	CALADO	CALADO	s	m2	s	m2
MDEH		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
		0.98	1.01	1.00	1.00	1.00	0.99	1.00	0.99
		0.98	1.01	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99	0.99
		1.01	0.99	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99	0.99
		0.91	0.72	1.00	1.00	0.98	1.03	0.98	1.03
MDS		1.00	1.00	1.01	0.83	1.00	1.00	1.19	0.87
		1.10	0.96	1.13	0.79	0.99	1.00	1.18	0.87
		1.08	0.96	1.11	0.79	1.01	1.01	1.19	0.88
		1.00	0.95	1.00	0.80	0.99	1.03	1.17	0.90
		0.95	0.67	1.05	0.78	1.00	1.14	1.19	0.99

MDT	1.00	1.00	1.01	0.57	1.00	1.00	0.96	0.96
	0.95	0.99	0.98	0.56	1.00	0.99	0.97	0.95
	0.95	1.00	0.98	0.56	1.00	0.99	0.96	0.95
	0.97	1.03	0.96	0.59	1.00	1.00	0.97	0.97
	0.81	0.91	0.90	0.72	1.05	1.07	1.01	1.03
MDS-LIDAR	1.00	1.00	1.22	0.75	1.00	1.00	1.22	0.93
	0.97	0.98	1.21	0.72	1.00	0.97	1.22	0.91
	0.95	1.02	1.19	0.75	1.00	0.99	1.23	0.92
	0.93	0.92	1.12	0.69	0.99	1.01	1.20	0.95
	0.75	0.78	1.00	0.81	0.89	1.09	1.09	1.02
MDT2007	1.00	1.00	1.08	0.59	1.00	1.00	1.06	0.87
	0.86	1.03	0.95	0.60	1.02	0.98	1.08	0.85
	0.98	1.01	1.08	0.59	1.01	0.98	1.07	0.86
	0.84	0.97	0.90	0.58	1.01	1.13	1.08	0.99
	0.82	0.84	0.97	0.69	1.02	1.20	1.10	1.01
MDT2009	1.00	1.00	1.08	0.53	1.00	1.00	0.97	0.93
	0.89	1.05	0.97	0.55	0.99	1.02	0.96	0.96
	0.89	1.05	0.98	0.56	1.01	1.03	0.99	0.96
	0.85	1.11	0.91	0.60	1.00	1.07	0.99	1.01
	0.89	1.16	1.05	0.87	1.05	1.12	1.05	1.01

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La multiplicidad de variables y datos finales obtenidos no debe desorientarnos del objetivo marcado. Podrán jugar un papel importante en futuros desarrollos, aunque en este momento interesa filtrar toda la información recabada para obtener conclusiones que satisfagan las perspectivas creadas.

Los pliegos a los que nos hemos remitido durante todo el documento centran la utilización de solo dos modelos en los procesos de análisis hidráulico, el de terreno y el de superficie. Esto permite adoptar como patrón los resultados devueltos por el MDEH, en su máxima expresión, es decir, considerando filtro de 1x1 y mallados tupidos de 2-20.

Se observa en las tablas como en primer lugar en los resultados obtenidos no existe apenas influencia del filtrado inicial, demostrándose por una RMSE baja, así como por unos porcentajes de mayoración o minoración inferiores al 1%. Singular es la sección dos, donde debido a la modificación producida en la evolución del calado por la llegada del hidrograma, hay que recordar que se encuentra al final de la zona de estudio, los errores aumentan, aún sin ser de consideración. En cuanto a los tiempos de llegada son sensiblemente menores a los provocados por el MDS, dato por otro lado previsible, al considerar superficies NURBS distintas y de mayor relieve en el segundo caso. Estos tiempos pueden considerarse medios entre el MDS y el MDT.

Se muestra más displicente el modelo de mallado más ligero, siendo en la sección dos donde muestra su faceta menos robusta, con errores considerables.

En cuanto a recursos necesarios y avanzando las conclusiones los modelos de filtro 2x2, mejoran los tiempos de proceso y no revisten cambios sustanciales en los resultados.

Pasando al modelo digital de superficies, muestra su no idoneidad para ser usado en términos de cartografía de riesgos, al contemplar mayores tiempos de llegada y como era de prever RMSE mucho más elevados, que muestran la fuerte influencia que el

proceso de filtrado genera en los resultados finales. En cuanto a los tiempos de recorrido suponen un 20% más que ya da una visión de su falta de enfoque en estos estudios.

En el caso de los modelos digitales del terreno, su carácter genérico permiten darle nuestra confianza, que aunque los valores obtenidos minoran los del MDEH, principalmente en la segunda sección, con variaciones cercanas al metro de altura por defecto, podrían ser representativos, a falta de la fase de calibración y modelización de cualquier proceso de simulación. Los tiempos de llegada siguen siendo más pequeños, que puestos a considerar el criterio de riesgo, están del lado de la seguridad. Las áreas inundadas muestran grandes variaciones de RMSE debido principalmente al aumento del filtrado, por otro lado previsible al contemplar menor información el modelo digital. El modelo de mayor filtrado también ofrece grandes variaciones en otras variables como calado o tiempos, dentro del propio modelo llegando al 20%. en el caso de compararlo con los resultados del MDEH, dan valores cercanos al 41% más bajos, que nos llevan a reconsiderar la posibilidad de ser usado en estas aplicaciones.

La respuesta que podemos observar en el modelo digital de superficies procesado en este trabajo no se aleja de los resultados del adquirido en la CAPV, mejorando sustancialmente su error, pero aumentando los tiempos de llegada del hidrograma.

En cuanto a las ratios con MDEH, son análogas a las observadas en el MDS procedente de GeoEuzkadi, siendo inferiores en cualquier caso los valores de la segunda sección en un 25%, alterándose poco las áreas inundables.

Finalmente nos encontraremos con los modelos procedentes de técnicas más clásicas, los del año 2007 y del 2009. Se observa en ambos, como el mallado más tupido centra la seguridad al maximizar calados, las variaciones en cuanto a los otros mallados no son sustanciales ni en la primera ni en la segunda sección con variaciones del orden del 10%. A medida que aumentas la escala como el caso de 2007, con un MDT a 1:10000, los datos de propagación aumentan, no influyendo en la del 2009, al estar procesada en base a LIDAR. Curiosamente donde no hay variaciones sustanciales respecto a lo observado en MDEH es en las áreas ocupadas donde el +-10-15%.

capítulo VI

CONCLUSIONES

CONSECUCCIÓN DE OBJETIVOS

Al comenzar con este estudio nos planteamos objetivos abarcables, pero eso sí con perspectivas de trabajo notables, como así ha sido al completar este proyecto.

A medida que se iban desarrollan los trabajos se matizaba el alcance y se desarrollaban nuevos enfoques. Podemos por tanto afirmar que los resultados obtenidos clarifican notablemente la implementación de los modelos de simulación hidráulica en procesos de colapso de balsas, adoptando cartografías base LIDAR de alta resolución.

El estudio justifica la adopción de la tipología de modelo y configuración que sin comprometer recursos es capaz por un lado, de ofrecer resultados fiables y por otro, de cumplimentar sobradamente las exigencias normativas dispuestas para ello.

Entre el conjunto de modelos digitales de elevación analizados, y en cuanto a su filtrado inicial y configuración de mallado, el MDEH ofrece resultados que responden a las expectativas planteadas, siendo una grid inicial de 2x2 suficiente tanto en la cartografía de riesgos como en el análisis posterior alfanumérico de los datos obtenidos.

En cuanto al mallado soluciones de 3-50 pueden ser suficientes para mejorar la respuesta del modelo IBER, en caso de grandes ficheros cartografía.

Como objetivo colateral podemos añadir el conocimiento de nuevo software de procesado de datos LIDAR.

Se han descrito pormenorizadamente las posibilidades que ofrece el software de libre distribución FUSION/LDV en cuanto al manejo de datos LIDAR con objeto de obtener modelos digitales de elevación. Eliminado el sesgo del programa, enfocado a ingeniería forestal, se ha podido constatar la facilidad de manejo de los comandos, asociados a rutinas DOS, y la gran variedad de éstas que posee, así como las definidas exclusivamente para conocer la calidad de los datos de partida y establecer mecanismos de corrección y filtrado, siempre con la idea de obtener el mejor resultado posible. Dejando claro, que no se han analizado las principales opciones del programa, asociadas a aprovechamientos forestales por alejarse del objetivo final del estudio.

En cuanto a los resultados que se han descrito no ofrecen excesivas discrepancias con los servidos por la CAPV. El aprovechamiento de otros software de presentación de mapas, como es GlobalMapper, en su versión 12.01, ha permitido la comprobación rápida de esta cuestión. Gracias a este programa conjuntamente a las rutinas del propio FUSION, se ha constatado la pequeña diferencia en cuanto a cota que presentan, y que a efectos de simulación hidráulica no es determinante. Las herramientas de filtrado son muy potentes, permitiendo una correcta limpieza de "outliers", y una preparación adecuada de los ficheros base para definir el modelo de referencia de suelo desnudo, punto de partida de la simulación hidráulica.

En otro orden de cosas, las posibilidades de intercambio de ficheros y utilidades de conversión entre múltiples formatos le dotan de funcionalidad, aquella que pierde con la necesidad de trabajar en DOS., como por ejemplo poder volcar coberturas shape, como puntos de interés para analizar interrelaciones entre modelos. Las herramientas de medida, que permiten establecer alturas de cobertura arbolada, son muy adecuadas para el fin que persigue y que pueden reenfocarse, en el caso de estudio de cauces con estructuras de paso.

En suma estamos frente a un software que aunque limitado, ofrece opciones verdaderamente interesantes para trabajar con ficheros LIDAR, preprocesados y clasificados, cuyo uso en múltiples disciplinas va siendo una realidad más extendida, y que demandan de aplicaciones cuya curva de aprendizaje se asuma fácilmente y a coste cero.

capítulo VII

BIBLIOGRAFÍA

REFERENCIAS

Axelsson, P. (1999). "Processing of laser scanner data; algorithms and applications". ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing vol. 54(2-3): pg.138-147.

Baltsavias, E. P. (1999a). "Airborne laser scanning: basic relations and formulas". ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing vol. 54(1): pg.199-214.

Baltsavias, E. P. (1999b). "Airborne laser scanning: existing systems and firms and other resources". ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing vol. 54(1): pg.164-198.

Baltsavias, E. P. (1999c). "A comparison between Photogrammetry and Laser Scanning". ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing vol. 54(2-3): pg.83-94.

C. Pfeifer, N. (2001). "Airborne Laser Scanning and derivation of Digital Terrain Models".

Proceedings 5th conference on optical 3D measurement techniques, Viena, Austria: 8 pg. Carrillo, E., Ferrero, E., Alonso-Andicoberry, L. M., Basanta, A., Martin, A., López Rodas, V., Costas,

Cobby, D. M., Mason, D. C., Davenport, I. J. (2001). "Image processing of airborne scanning laser altimetry data for improved river flood modelling". ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing vol. 56(2): pg.121-138.

Crombaghs, M., Oude, S., Brügelmann, R., de Min, E. (2002). "Assessing height precision of laser altimetry DEMs". International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing Volume:XXXIV; Part 3A. ISPRS Comision III, WG III/3, 9-13/09/2002, Graz, Austria: 6 pg

Crosetto, M. (2002). "Calibration and validation of SAR interferometry for DEM generation". ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing vol. 57(3): pg.213-227.

Elmqvist, M., Jungert, E., Lantz, F., Persson, A., Söderman, U. (2001). "Terrain modelling and analysis using laser scanner data". International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing vol. XXXIV(3/W4, Annapolis): pg.219-226.

Felicísimo, A. M. (1994). "Parametric statistical method for error detection in digital elevation models". ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing vol. 49(4): pg.29-33.

Felicísimo, A. M. (1999). "Modelos Digitales del Terreno". [En línea]. Departamento de Ingeniería de los Recursos Naturales y Medio Ambiente. Universidad de Vigo. Dirección:

<http://www.etsimo.uniovi.es/~feli/index2.html> Accedido: 02/08/2005.

Maune, D. F. (2001). "Digital Elevation Model Technologies and Applications: The DEM Users Manual", Bethesda (Md.): American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, ISBN: 157083-064-9: 539pg.

Peng, M. H., Shih, T. Y. (2006). "Error assessment in two Lidar-derived TIN Datasets". Photogrammetric Engineering & Remote Sensing vol. 72(8): pg.933-947

Sithole, G., Vosselman, G. (2004). "Experimental comparison of filter algorithms for bare-Earth extraction from airborne laser scanning point clouds". ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing vol. 59(1): pg.85-101.

ANEXO DE RESULTADOS
