Aplicaciones de la teledetección láser (LIDAR) en la caracterización y gestión del medio fluvial

FERNANDO MAGDALENO MAS (*) y ROBERTO MARTÍNEZ ROMERO (**)

RESUMEN Las últimas técnicas de teledetección existentes en el mercado han abierto la posibilidad de introducir mejoras en los trabajos de caracterización y gestión del medio fluvial. Es el caso de los sensores láser transportados desde plataformas aéreas, cuyas innovaciones tecnológicas suponen un gran incremento de la resolución horizontal, y sobre todo vertical, de las imágenes y datos resultantes. Estas técnicas, conocidas con el nombre genérico de LiDAR *(Light Detection and Ranging)* están ya siendo empleadas en la actualidad en multitud de aplicaciones relacionadas con la ingeniería civil, la creación de cartografía especializada, o la gestión del medio natural. Sin embargo, hasta la fecha, existen escasas referencias sobre la utilización de esta herramienta en la caracterización y gestión del medio fluvial. Este artículo repasa las principales características técnicas de la teledetección láser, la evolución sufrida por esta herramienta en los últimos años, y muy especialmente las aplicaciones que ofrece para el manejo de los sistemas fluviales. Se exponen, además, ejemplos prácticos de utilización de los datos LiDAR en el medio ribereño, en diferentes tramos y cauces, algunos de ellos pertenecientes a la cuenca del Ebro.

LIDAR APPLICATION IN THE CHARACTERIZATION AND MANAGEMENT OF FLUVIAL SYSTEMS

ABSTRACT *Recent advances in remote sensing may improve the characterization and management of fluvial environments. This is specially the case of airborne laser. Tehnological innovation in these sensors have widely improved the horizontal, and vertical resolution of data and images extracted from them. These techniques, generally known as LiDAR (Light Detection and Ranging) are being nowadays used in many fields related to civil engineering, thematic mapping and natural resources management. However, up to date, there are very few references on the application of this tool to the analysis and characterization of rivers. This paper reviews the main characteristics of remote sensing based on laser, the development of this technique in the last few years, and more specially, its applicability for the analyses of fluvial ecosystems. Real utilization of LiDAR data in river management is also shown, in different reaches and streams, some of them belonging to the Ebro basin in Spain.*

Palabras clave: LiDAR, Hidrología, Vegetación de ribera, Geomorfología fluvial.

1. INTRODUCCIÓN

El inicio del desarrollo de la tecnología LiDAR (*Ligth Detection and Ranging*) se remonta a la década de los 70, dentro de los programas de investigación llevados a cabo por la Agencia Espacial Estadounidense. Su elevado coste y sus limitadas posibilidades para la época frenaron durante años su utilización generalizada, pero pronto se pudo comprobar su elevado número de aplicaciones. La introducción de los Sistemas de Posicionamiento Global a finales de los 80 proporcionó la alta precisión posicional requerida para el uso del LiDAR de alta resolución. A la llegada de los sistemas GPS se le sumó la utilización de relojes ultra-precisos para la medida del tiempo de retorno del pulso láser, y las unidades de medida inercial (*Inertial Measurement Units* – IMU), que permiten el cálculo de los parámetros de orientación de los sensores láser (fig.1). La rápida evolución de estos componentes permitió finalmente el aumento de la resolución y fiabilidad de los sistemas LiDAR, y su utilización en un gran número de aplicaciones.

Un sistema LiDAR está basado en la emisión de pulsos de luz láser desde una plataforma aérea o terrestre. La medición precisa del tiempo de retorno de las porciones del pulso al sensor permite calcular la distancia que separa a éste de la superficie terrestre y de los objetos que existen sobre ella. Su funcionamiento es similar, por tanto, al de una estación total topográfica. Dado que la posición y orientación del sensor son conocidas para cada pulso emitido, cada señal de retorno tiene unas coordenadas tridimensionales únicas, lo cual permite la captura remota de la información topográfica.

La tecnología LiDAR se basa, en el uso de sensores activos, por lo que la captura de información no depende, como ocurre con otros sensores, de las condiciones meteorológicas, y además las misiones pueden realizarse durante la noche.

(*) Ingeniero de Montes. Área de Ingeniería Ambiental. Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas del CEDEX

(**) Ingeniero de Montes. U.D. Hidráulica e Hidrología. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Universidad Politécnica de Madrid..

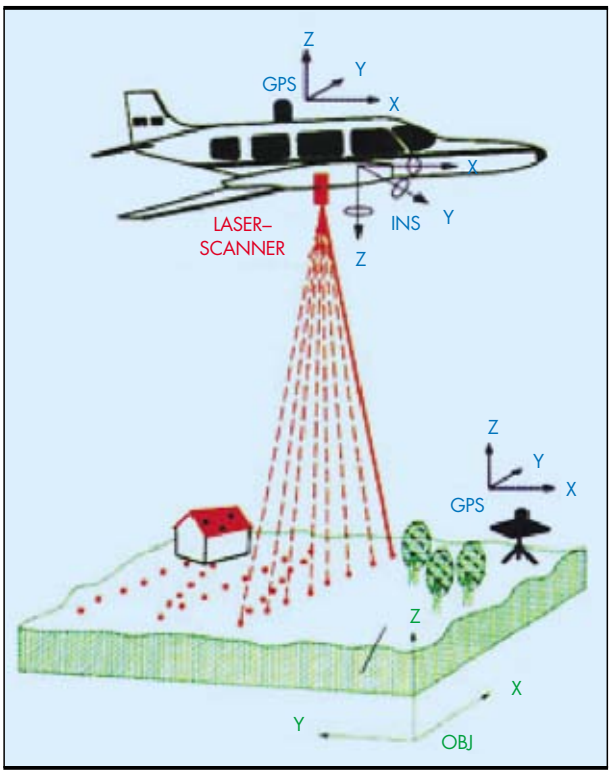

FIGURA 1. Esquema de vuelo de un sensor LiDAR (Fuente: NOAA).

Una vez realizado el vuelo sobre una región determinada, se procede al procesado de los datos obtenidos. Para ello, en primer lugar se lleva a cabo el filtrado de la información y la eliminación del ruido que contenga. Posteriormente, se realiza su corrección diferencial y el ensamblaje de las distintas pasadas realizadas. El post-procesado incluye una serie de operaciones que desembocan en la obtención de los modelos digitales topográficos. El tratamiento de los datos LiDAR permite la extracción de modelos digitales del terreno (MDT), modelos digitales de elevaciones (MDE), y modelos digitales de información intermedia. Los productos LiDAR cuentan con la ventaja de ser entregados, generalmente, en formatos fácilmente ejecutables mediante sistemas SIG y CAD (Renslow *et al.*, 2000).

Por lo que respecta a las principales aplicaciones LiDAR en el ámbito hidrológico-forestal, existen ya diversos trabajos que exploran las posibilidades de esta tecnología en dasometría e inventario forestal. Estos estudios han demostrado la capacidad de LiDAR para llevar a cabo mediciones de gran precisión de la altura media de copas (Magnussen & Boudevyn, 1998; Naesset, 1997), volúmenes de madera en zonas boscosas (Naesset, 1997; Nilsson, 1996), áreas basales (Lefsky *et al.*, 1997; Mean *et al.*, 1997) o biomasa (Lefsky *et al.*, 1997, 2001; Nelson, 1997). Otros trabajos han analizado la aplicación de LIDAR en el estudio del riesgo de avenidas (McArdle *et al.*, 1999), la modelización de poblaciones de aves (Davenport *et al.*, 2000), la aplicación de pesticidas (Walklate *et al.*, 1997), la clasificación de usos de suelo (Schreier *et al.*, 1985), etc. En cuanto a las aplicaciones en la gestión de sistemas fluviales, cabe destacar las siguientes (Hall *et al.*, 2005; Farid *et al.*, 2005a, 2005b; Fleece, 2002):

- Medida de la estructura y composición de la vegetación de ribera.
- Análisis de la geomorfología del cauce (medida de la pendiente, cálculo de la complejidad morfológica, rugosidad, perímetro mojado, profundidad del *thalweg*,...).
- Estudio de infraestructuras hidráulicas.
- Análisis de las interacciones cauce-sistema fluvial.
- Modelización hidrológica y sedimentaria.
- Estudio de indicadores del estado ecológico de los ríos.
- Análisis de procesos biológicos en el medio fluvial.
- Obtención de la red de drenaje.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 DATOS LIDAR DEL RÍO EBRO

El modelo digital de elevación ha sido cedido por la Confederación Hidrográfica del Ebro. El modelo se obtuvo a partir de 13 vuelos LiDAR realizados entre el 3 y 11 de octubre de 2003 con una resolución de paso de malla de 2x2 metros y una precisión de **±50 cm** en las coordenadas x e y, y de **±15 cm** en z. El sensor utilizado fue el denominado *Falcon II*, desarrollado por Toposys para adquirir datos tridimensionales de la superficie terrestre (tabla 1, fig.2). El método de medición para generar un modelo de elevaciones digital está basado en medidas activas de distancia por medio de un sensor láser, complementado por un GPS y un sistema de navegación inercial.

A partir del Modelo Digital del Terreno (MDT) original, conocido como DSM, se han desarrollado otros dos modelos.

Rango altura de vuelo	60-1600 m
Resolución	1,95 cm
Ancho de escaneo	14.3°
Ratio de escaneo	653 Hz
Ratio del pulso láser	83000 Hz
Ratio de medida efectiva	83000 per sec.
Longitud de onda	1560 nm
Distancia de seguridad visual	0,5 m
Velocidad vuelo min/max	36/300 km/h
Frecuencia del GPS	1 Hz
Rango de resolución	3 cm
Rango de precisión	1 cm
Precisión de elevación	< 15 cm
Precisión horizontal	-0.5‰ h
Temperatura de trabajo	0-40 ºC
Humedad	0-95% sin condensación
Dimensiones del sensor	47x53x53 cm
Peso del sensor	28 kg
Dimensiones del soporte de control	65x55x45 cm
Peso del soporte de control	40 kg
Coste del sensor	1,1 mill. USD

TABLA 1. Especificaciones del sensor Falcon II. (Fuente: Toposys.com y Baltsavias, 1999).

FIGURA 2. Sensor Falcon II.

Dichos modelos son el DTM y el modelo con batimetría. Este trabajo se basa, por tanto, en la utilización de los siguientes 3 modelos:

- **DSM (*Digital Surface Model*):** es el producto original y en él se representa la superficie del terreno, incluyendo tanto la vegetación como las edificaciones y otras estructuras que no constituyen la superficie del terreno propiamente dicha. En cuanto a lo que es propiamente el cauce del río, este modelo representa la cota de la lámina de agua correspondiente al caudal circulante en el momento del vuelo en el río Ebro (aproximadamente 70 m^3/s). Por lo tanto, el DSM no da idea alguna de la geometría del lecho del río.
- **DTM (*Digital Terrain Model*):** se calcula a partir del anterior. Al igual que ocurre para el DSM, no se representa el lecho del río, sino la superficie de la lámina de agua para el caudal circulante. Se diferencia del DSM en que, por medio de unos algoritmos automáticos de análisis basados en el cálculo de gradientes de altitud, se ha eliminado la vegetación, los edificios y los puentes, y se han sustituido por las cotas del terreno existente bajo los mismos.
- **Modelo con batimetría:** es una evolución del DTM. En éste tampoco se incluye ni la vegetación, ni los edificios, ni los puentes, pero se diferencia del anterior en que en el modelo con batimetría viene representada la geometría del lecho del río calculada a partir de interpolación de 419 perfiles batimétricos levantados a lo largo del río en un trabajo previo de campo.

Los datos utilizados no incorporan de forma automática, por tanto, un modelo batimétrico, pero existen otros sensores láser que sí incluyen esta posibilidad. Es el caso del sistema SHOALS (Scanning Hydrographic Operational LiDAR System) estadounidense, que utiliza longitudes de onda que habilitan la detección, por una parte de la superficie del agua y por otra de los fondos litorales y lechos fluviales. Este sistema LiDAR permite muestrear en un rango de profundidades de entre 0 y 40 m, aunque esta capacidad está muy relacionada con la turbidez del agua. De hecho, algunos autores señalan que el rendimiento óptimo de este sistema se produce a profundidades de entre dos y tres veces la profundidad del disco de Secchi (Guenther, 2000). Otros sistemas láser con fines básicamente batimétricos son EAARL (Experimental Advanced Airborne Research LiDAR), CHARTS (Compact Hydrographic Airborne Rapid Total Survey) o BATS (Bathimetric and Topographic Survey).

2.2. ORTOFOTOS DE APOYO A LOS DATOS LIDAR

Las ortofotos constituyen un complemento muy interesante para los modelos digitales. En este caso, se cuenta con imágenes de alta resolución en la que cada píxel se corresponde con una celda de 20x20 centímetros a tamaño real.

Las ortofotos fueron obtenidas a partir de cuatro vuelos fotogramétricos llevados a cabo durante los días 25 de septiembre de 2003, 4 y 5 de noviembre de 2003 y 10 de diciembre de 2003. Durante estos días el caudal circulante por el Ebro en Zaragoza se situaba en torno a los 200 m^3/s, por lo que la lámina de agua que aparece en las fotografías corresponde a este caudal.

Las ortofotos tienen formato *jpg* y vienen acompañadas de un fichero en formato *jgw* (archivo de referencia), que permite el correcto geoposicionamiento de cada fotografía.

2.3. PROCESADO INICIAL DE LOS DATOS

Todo el procesado de la información ha sido realizado con el software de distribución libre SEXTANTE, Sistema de Información Geográfica desarrollado por la Junta de Extremadura, que se puede descargar en http://sextante.sourceforge.net (tanto el manual como el programa).

El formato de los datos LiDAR se basaba en este caso en ficheros *grid* con formato *txt*. Para poder trabajar con ellos en el citado SIG, fue necesario realizar una conversión previa, de la extensión *txt*, a la extensión *asc* (ArcInfo Grid). Una vez realizada esta conversión, se estaba ya en disposición de trabajar y analizar los modelos, junto con las imágenes aéreas.

2.4. GENERACIÓN DE DTMS MEDIANTE DATOS LIDAR

Dado que los sistemas LiDAR no son capaces de distinguir *a priori* entre puntos que pertenecen realmente a la superficie terrestre y puntos pertenecientes a objetos que se encuentran sobre ella, la generación de DTMs mediante datos LiDAR exige la utilización de métodos capaces de agrupar los datos en estas dos categorías.

Existen distintos algoritmos capaces de extraer los modelos digitales del terreno de forma automática a partir de los datos LiDAR. Uno de los más habituales lleva a cabo la generación del modelo a través de una interpolación sobre una función adaptativa (*spline bilineal*) con una regularización basada en una aproximación por mínimos cuadrados. La etapa inicial (*spline step*) depende de la resolución planimétrica de los datos pre-filtrados. Posteriormente, una regularización de los datos evita las singularidades locales y globales en la aproximación por mínimos cuadrados (caso de zonas en las que faltan valores de observaciones) para asegurar así la regularidad de la superficie, al minimizar la curvatura en áreas vacías.

En la segunda etapa se llevaría a cabo la detección de los límites de los objetos como frontera entre dos regiones distintas, que presentan una altura significativamente distinta en un pequeño cambio de posición horizontal. El desarrollo del algoritmo en esta etapa de detección de límites se ve dificultada por la irregularidad de la distribución de las observaciones. Por ello, se vuelve a recurrir a funciones adaptativas de tipo bilinear y bicúbico y a regularizaciones por mínimos cuadrados. La regularización de las superficies se suele realizar a través de la minimización de su gradiente y curvatura para las dos superficies en contacto (en la imagen). Para evitar las distintas incertidumbres finales que se pueden presentar en la detección precisa de los bordes de los objetos, se suele recurrir al signo de los residuos, que aporta la información necesaria sobre la situación exacta de los bor-

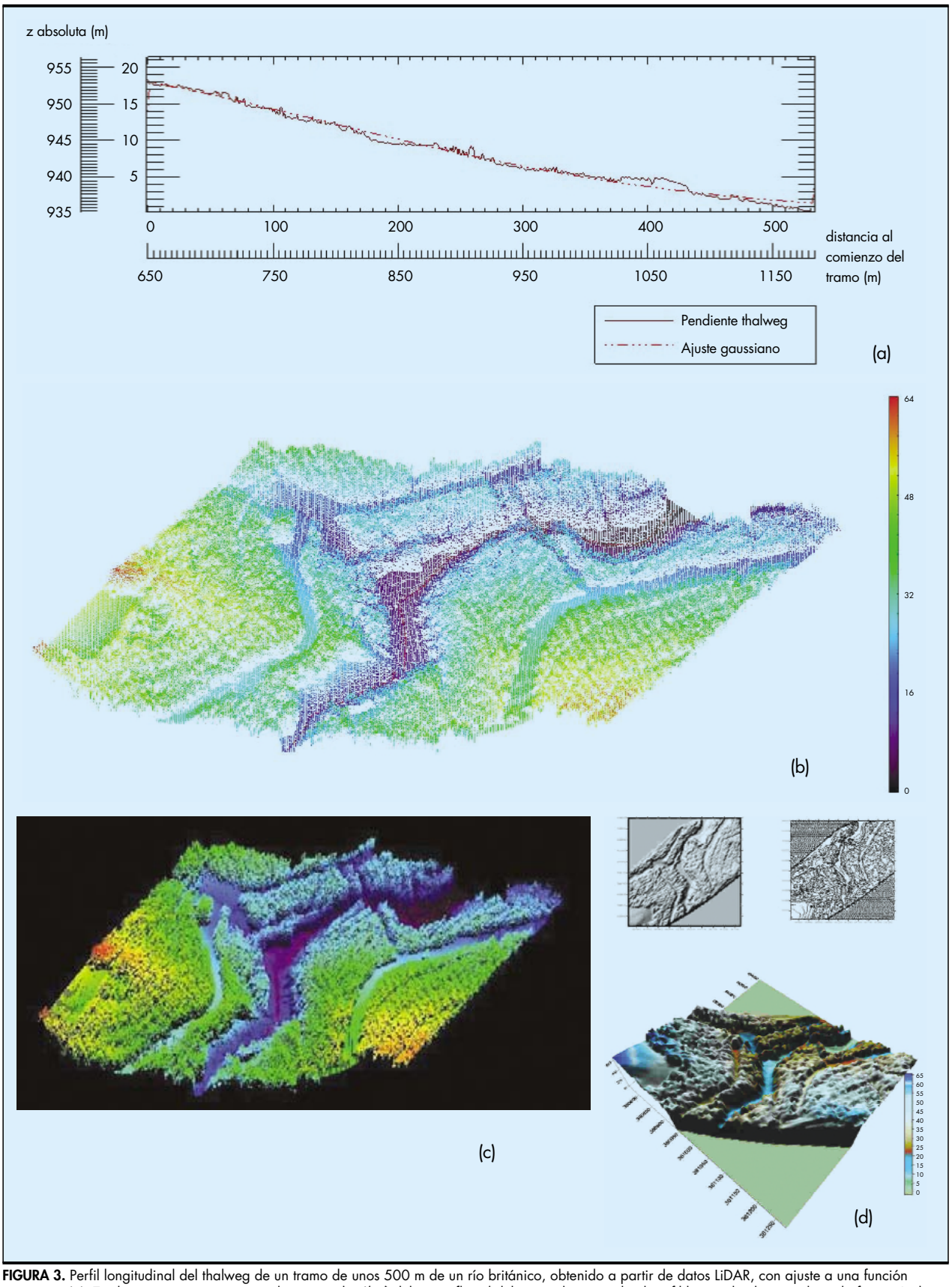

FIGURA 3. Perfil longitudinal del thalweg de un tramo de unos 500 m de un río británico, obtenido a partir de datos LiDAR, con ajuste a una función gaussiana (*a*). También se muestran vistas tridimensionales (*b-d*) del tramo fluvial del que se ha extraído el perfil longitudinal mostrado en la figura. La línea roja muestra el *thalweg* del río. (Fuente: elaboración propia - Datos cedidos por: *Forest Research Agency - Forestry Commission, UK).*

des en la superficie generada a partir de la función de interpolación empleada.

En cualquier caso, para llevar a cabo la creación de un modelo digital de elevaciones, los datos LiDAR tienen que ser interpolados sobre una malla en la que cada celda contenga un valor de elevación. Con el fin de mantener la mayor cantidad de información topográfica posible, el tamaño de la celda de la malla debe equipararse al menor espaciamiento de los puntos introducidos. Entre otros, los algoritmos de interpolación más utilizados son el krigeado, la triangulación y el método de distancia inversa.

3. APLICACIONES DE LIDAR EN LA GESTIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL MEDIO FLUVIAL

Dentro de las aplicaciones generales de LiDAR en el ámbito ribereño expuestas con anterioridad, se ha considerado oportuno destacar las siguientes:

3.1. APLICACIÓN DE LIDAR EN LA ESTIMACIÓN DEL PERFIL LONGITUDINAL DE UN RÍO

El perfil longitudinal de un cauce (*thalweg profile*) ha venido siendo utilizado durante años para analizar su gradiente, y como forma de determinar la potencia hidráulica y el transporte sedimentario que se producen en el mismo. El perfil longitudinal se construye mediante la medida de la elevación del lecho del cauce, en sucesivas secciones, tomando como referencia el punto más bajo de cada una de ellas. Lo más habitual es que los trabajos de campo incluyan la medición, en estas secciones, tanto de la elevación del lecho como del propio calado del río, las dimensiones de las barras de sedimentos o el tamaño de los materiales presentes en el cauce. En estas campañas, es preciso diseñar con anterioridad un espaciamiento entre secciones que permita analizar con garantías los elementos físicos que son objeto del trabajo. Gerstein (2005) recoge espaciamientos desde 30 cm, en ríos pequeños en los que es necesaria una gran precisión, hasta 30 m, en ríos de bajo gradiente. En función del nivel de precisión requerido y las características hidromorfológicas del cauce, es posible utilizar diversas metodologías de obtención de los perfiles, desde las más sencillas de tipo manual hasta las que incorporan equipos más o menos avanzados (estaciones totales, niveles láser,...). Harrelson *et al.* (1994) y Ramos (1996) exponen los diferentes procedimientos existentes hasta la fecha para la obtención de los perfiles longitudinales. En el caso de proyectos y actuaciones locales, estos autores recomiendan la extensión de la medida del perfil longitudinal en una longitud, como mínimo, de 20 veces la anchura de *bankfull*.

En muchas ocasiones, los perfiles longitudinales descritos para la definición del gradiente de un cauce no permiten la extracción de las características topográficas del lecho. Un perfil longitudinal preciso permitiría, sin embargo, una caracterización detallada de la morfología del cauce, incluyendo la estructura de rápidos y remansos, la rugosidad del cauce y el conjunto de formas del lecho. Esta información resulta de gran interés también desde un punto de vista ecológico, puesto que una elevada heterogeneidad en las elevaciones del lecho suele venir acompañada de una alta diversidad de hábitats.

La utilización de los datos LiDAR permite obtener perfiles longitudinales del cauce, de forma continua a lo largo del tramo de estudio, y con una precisión elevada. La aplicación de esta técnica en el estudio del gradiente de un río reduce los elevados costes que genera el desarrollo de campañas de campo, y homogeneiza de manera notable los resultados obtenidos, al no ser dependiente de la calidad de las mediciones realizadas en el terreno, factor éste que suele generar una elevada varianza en las observaciones realizadas. La generación de perfiles longitudinales en los programas de tratamiento de la información LiDAR permite realizar asimismo, de forma sencilla, ajustes de los puntos obtenidos a funciones matemáticas diversas, filtrados y suavizados de la red de puntos, y la utilización conjunta de coordenadas relativas y absolutas (fig.3). Trabajos recientes muestran la posibilidad de aplicación de los datos LiDAR en el estudio de la potencia hidráulica del río (Worthy, 2005), o en la clasificación y caracterización de la red fluvial (por ejemplo, en las estimaciones necesarias para la realización de las clasificaciones fluviales de Rosgen).

3.2. APLICACIÓN DE LIDAR EN EL ANÁLISIS DE LA MICROTOPOGRAFÍA FLUVIAL

La influencia de la microtopografía del cauce y su entorno sobre el ecosistema fluvial es muy elevada, debido sobre todo a su relación con la estructura y composición de la vegetación de ribera. La microtopografía o microrrelieve de un cauce es un elemento descriptivo de su configuración superficial y de su rugosidad, en un rango de escalas milimétricas a métricas (fig.4). Esta microtopografía influye de manera notable en el balance hídrico de estas zonas, afectando al equilibrio hidromorfológico del cauce, y modificando las condiciones ecológicas de diversos elementos del medio, entre ellos, como se ha expuesto, y de manera muy particular, las de la vegetación de ribera. La microtopografía de una cuenca tiene una relación directa, además, con los flujos de materia y energía que se desarrollan en ella. En el caso de la llanura de inundación de un río, el microrrelieve es responsable de su conectividad con el cauce, y del mantenimiento de relaciones tróficas en el conjunto del sistema fluvial. Existen diversas técnicas disponibles en la actualidad para la caracterización de la microtopografía de un suelo. Entre ellos, cabe destacar los métodos de contacto y los métodos telemétricos.

La tecnología LiDAR permite analizar, de manera efectiva, la microtopografía de los ecosistemas fluviales, y estudiar su interacción con diferentes componentes de los

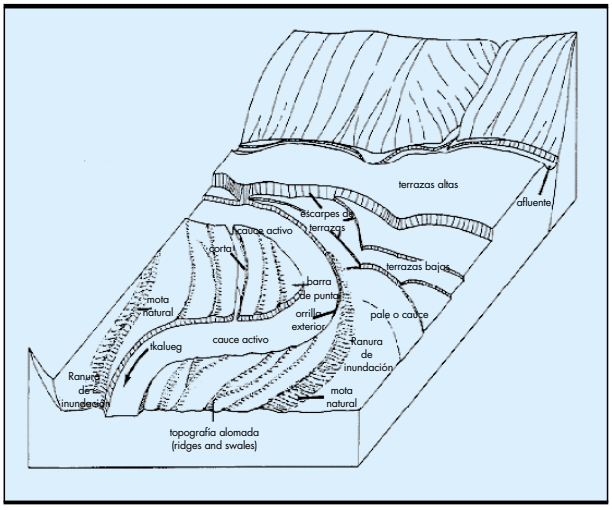

FIGURA 4. Variabilidad geomorfológica de un cauce aluvial (Adaptado de: USGS, 1994).

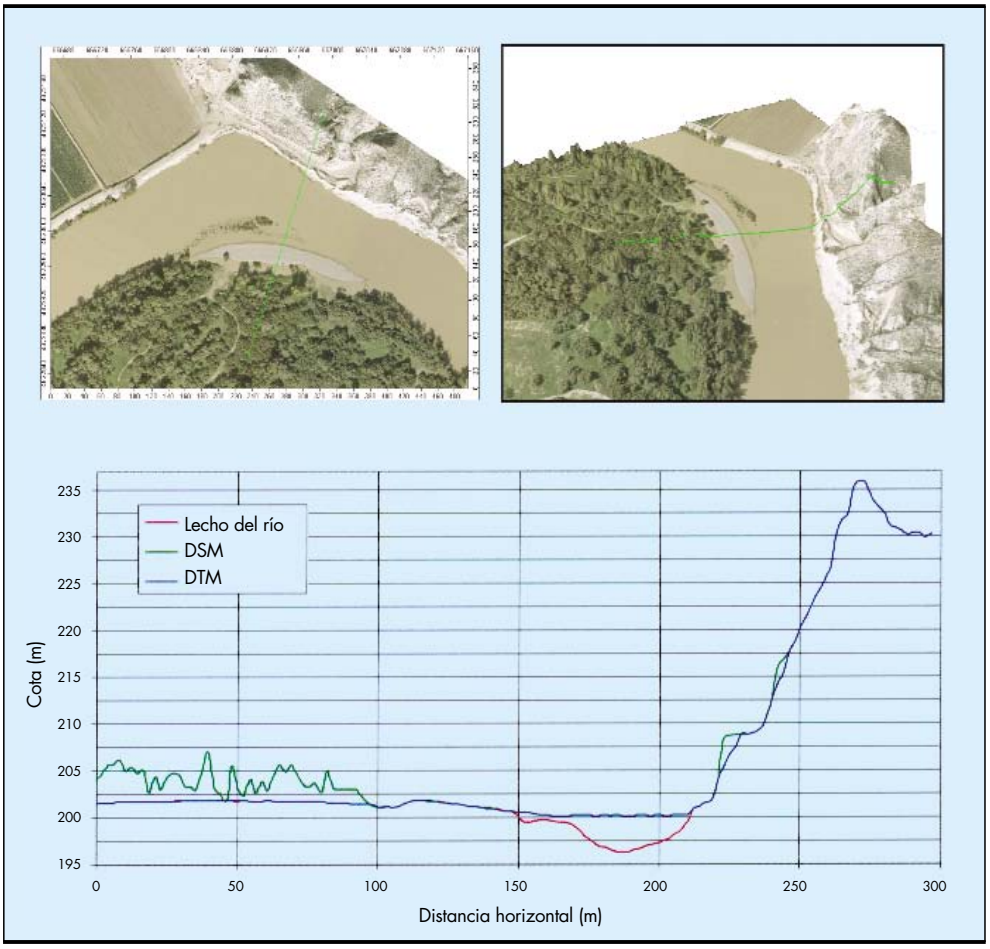

FIGURA 5. Obtención de la estructura de secciones transversales en el río Ebro (Fuente: elaboración propia).

mismos. En el caso de la vegetación riparia, las figuras 5 y 6 muestran ejemplos de la obtención de secciones transversales y de vistas tridimensionales del cauce, mediante las cuales es posible analizar la relación de la microtopografía con la estructura y composición del bosque.

Los modelos digitales generados a partir de los datos LiDAR permiten también analizar la distribución, a lo largo de la llanura de inundación, de las zonas de acumulación de agua. Estas zonas tienen una gran importancia ecológica, al ser puntos de acumulación de las sustancias orgánicas arra-

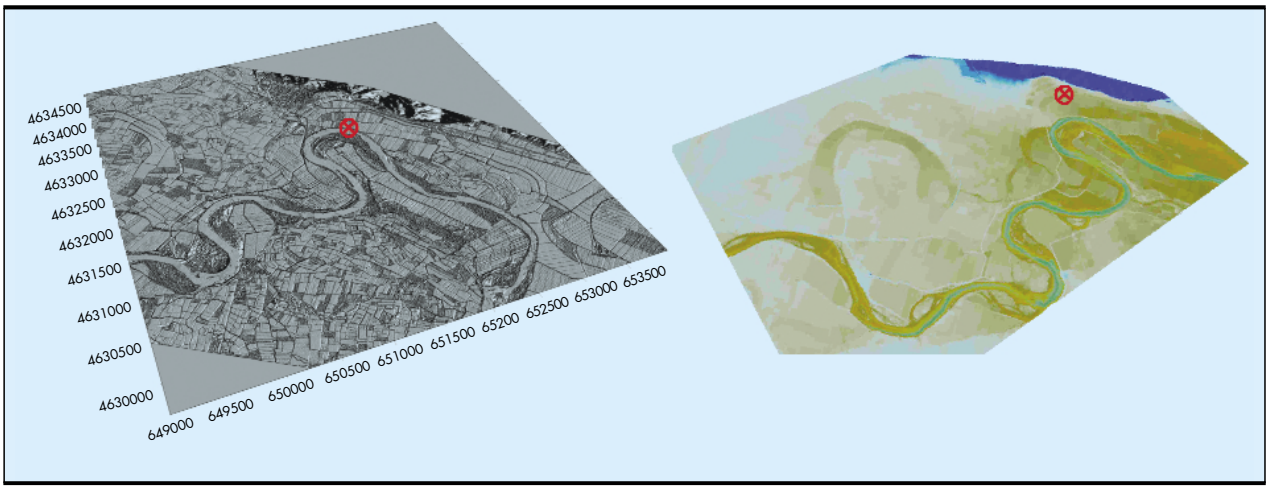

FIGURA 6. Estudio de la microtopografía del cauce en un tramo meandriforme del río Ebro mediante diversas representaciones tridimensionales (Fuente: elaboración propia).

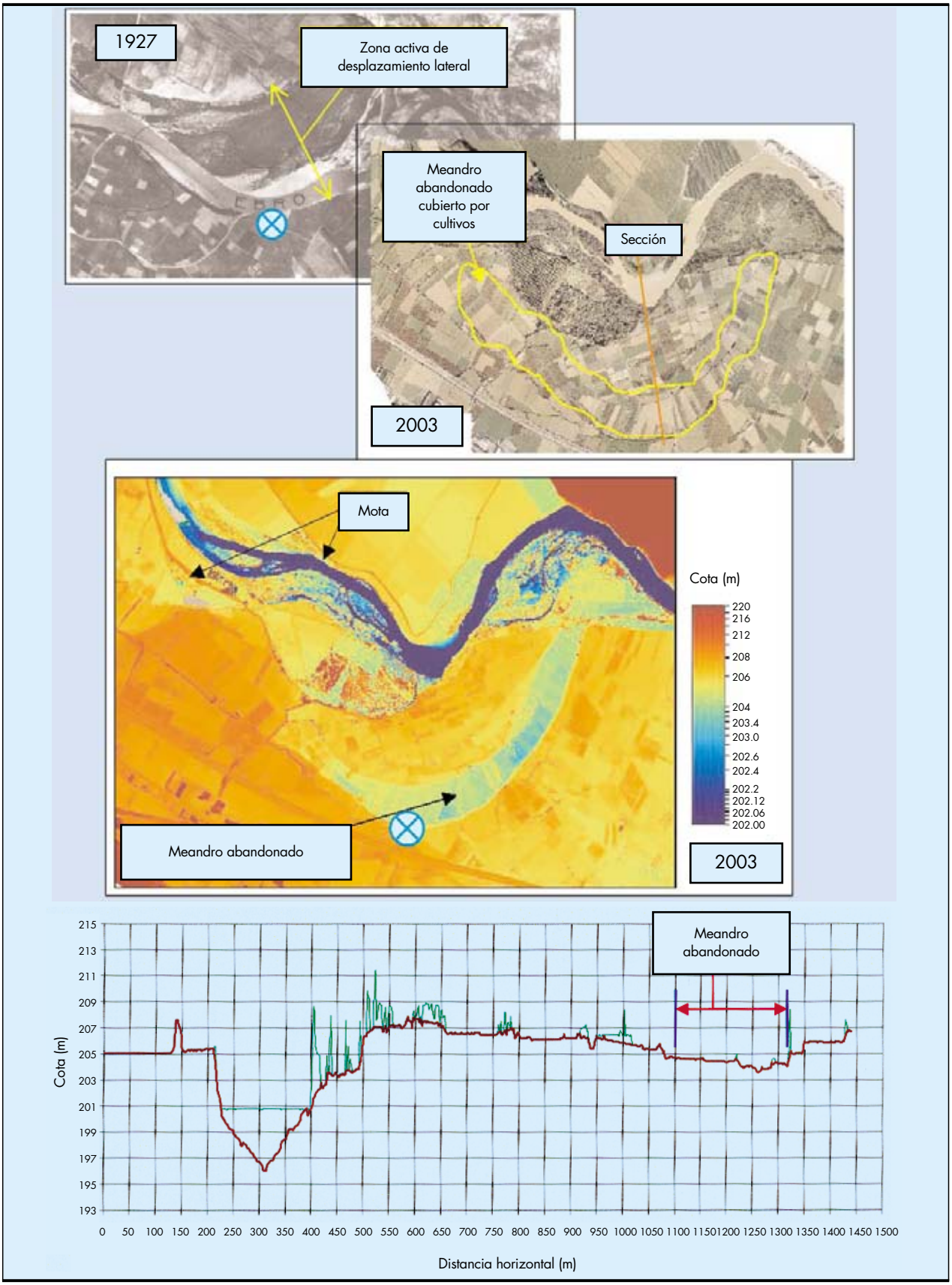

FIGURA 7. Estudio de la evolución de meandros abandonados (Fuente: elaboración propia). El rango de cotas en la figura c se encuentra representado en una escala logarítmica.

stradas por el agua tras el paso de las avenidas. Estas condiciones las convierten en espacios de especial interés desde el punto de vista de la diversidad biológica. Éste es el caso de los brazos abandonados por el río como consecuencia de su dinámica natural y de las modificaciones artificiales en el régimen hidrológico. En el caso del Ebro, se ha constatado la posibilidad de estudiar la distribución de estas zonas, y de conocer sus características topográficas (fig.7). Generalmente, los meandros y brazos abandonados se encuentran cubiertos en la actualidad por cultivos agrícolas. Al tratarse de zonas con topografía deprimida, en ocasiones se ha procedido al relleno parcial de las mismas y la instalación de barras artificiales de áridos (motas), para evitar su inundación temporal durante el paso de avenidas. Gracias a la

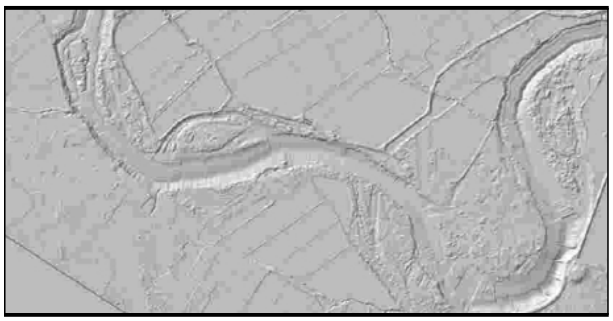

FIGURA 8. Aplicación de LiDAR en el análisis del desarrollo de islas y barras de sedimentación (Fuente: elaboración propia).

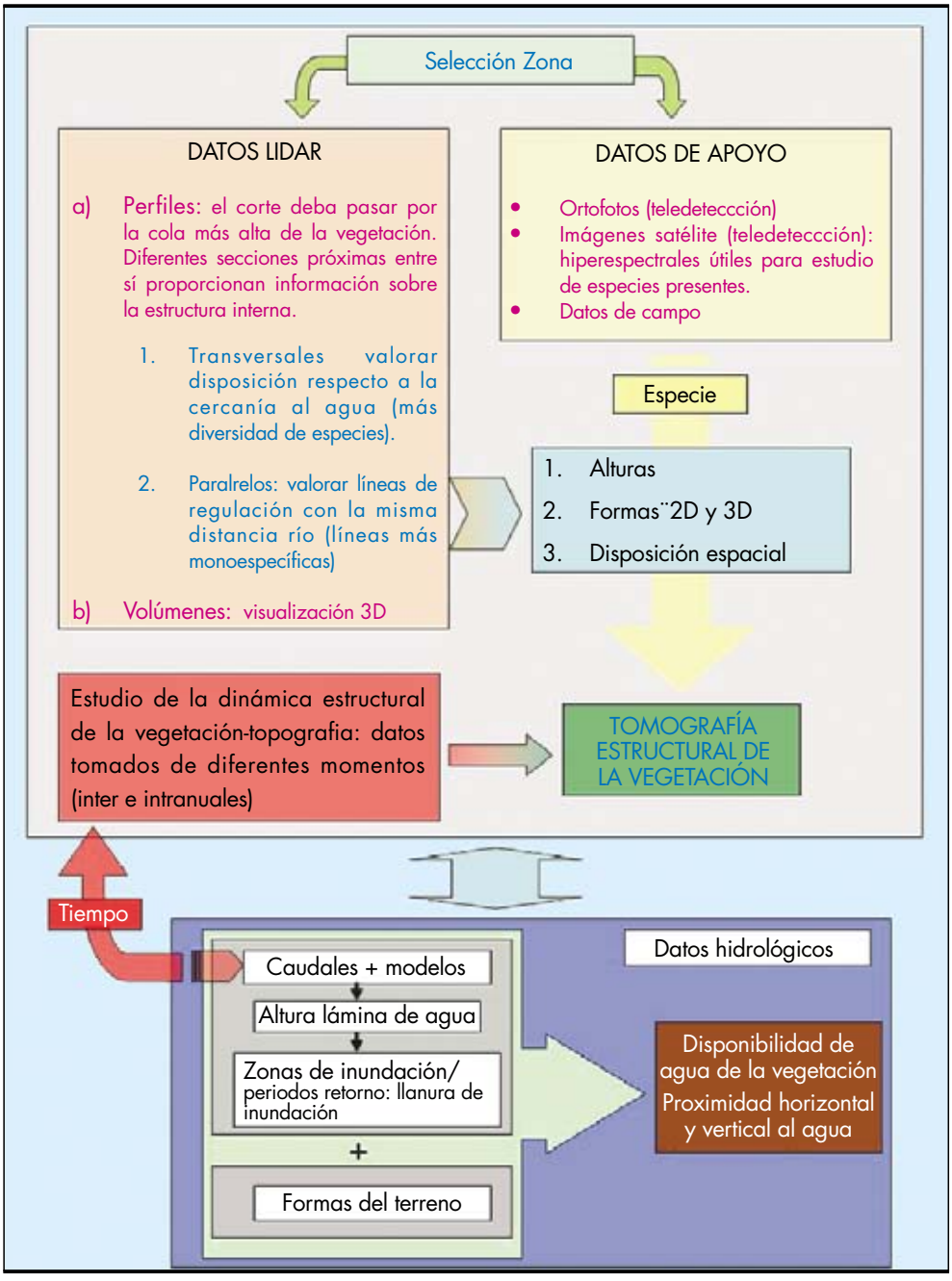

FIGURA 9. Esquema operativo de valoración de la estructura de la vegetación riparia (Fuente: elaboración propia).

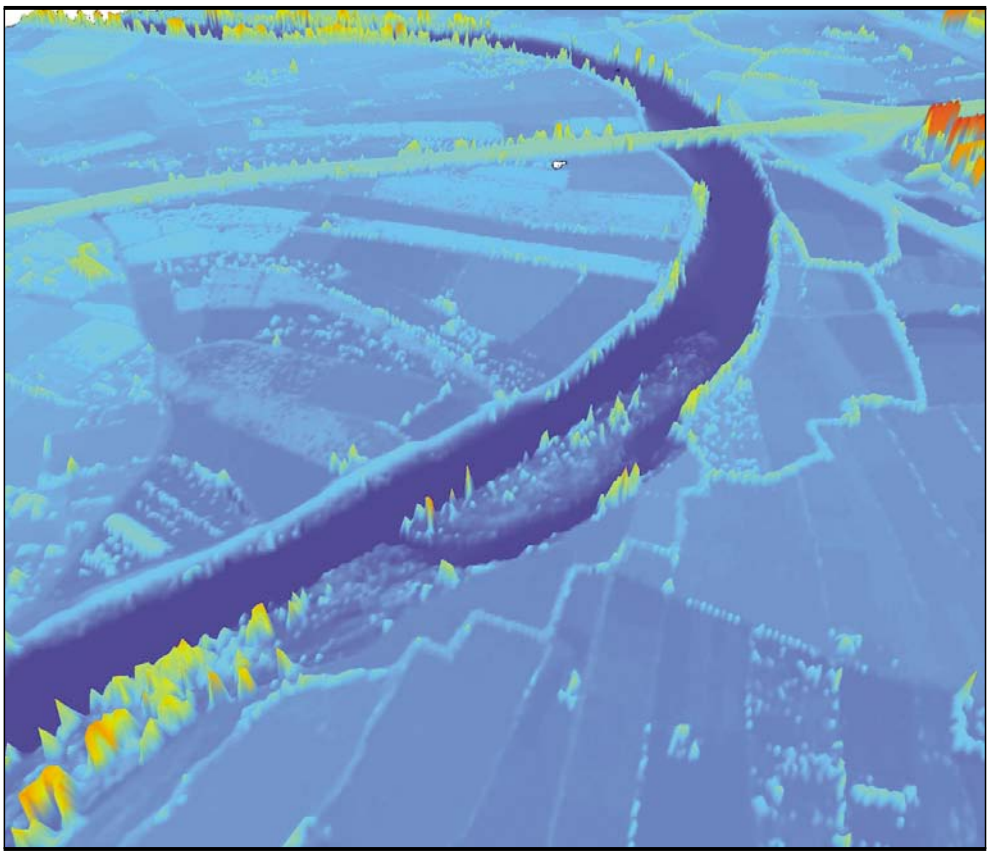

FIGURA 10. Vista de las formaciones vegetales edafohigrófilas y climatófilas existentes en un tramo del río Ebro. (Fuente: elaboración propia).

gran sensibilidad métrica del eje vertical que proporciona LiDAR, es posible realizar una detallada cartografía de estas zonas. Por esta misma razón, LiDAR puede convertirse a medio plazo en una herramienta de gran utilidad para el análisis y establecimiento del dominio público hidráulico.

Por lo que respecta al estudio del balance sedimentario, LiDAR permite realizar también estimaciones detalladas de la acumulación de sedimentos en barras e islas a lo largo del cauce, y de los procesos erosivos desarrollados en él (fig.8).

3.3. APLICACIÓN DE LIDAR EN EL ANÁLISIS DE LA VEGETACIÓN DE RIBERA

La aplicación de los datos LiDAR en el análisis de la vegetación riparia abre un nuevo horizonte en la gestión de estas comunidades. La aplicación del láser en la gestión forestal está sufriendo, como se ha expuesto con anterioridad, una rápida evolución. La utilización de LiDAR en las labores de inventario y ordenación forestal se extiende a gran velocidad en la mayor parte de los países desarrollados, y está también empezando a utilizarse con diversos fines en la selvicultura tropical. Estas aplicaciones, por su objetivo básicamente comercial, se basan en la obtención de los volúmenes maderables de zonas con grandes superficies forestales o de zonas que cuentan con especies de alto valor industrial.

Sin embargo, esta tendencia ha abierto el camino para la utilización de los datos LiDAR en la gestión no comercial de los bosques, y entre ellos, de los bosques de ribera. En el caso de la vegetación de ribera, el objetivo último no es la obtención de los inventarios dasocráticos, sino el estudio de la estructura y composición de las comunidades vegetales, y el análisis de su funcionamiento, evolución y relación con otros componentes físicos del medio fluvial (fig.9).

La vegetación de ribera tiene, como elemento distintivo frente a otras comunidades vegetales, una notable dependencia edafo-higrófila. La conexión con el agua es la que permite verdaderamente el asentamiento de estas formaciones en el medio fluvial, y la que motiva la distribución de las especies que las componen. Es, por tanto, el régimen hidrológico el elemento básico que, con su variabilidad natural intra e interanual define el hidro-período de las especies vegetales de ribera. La topografía del medio fluvial influye también, en buena medida, en la estructura y composición del bosque de ribera, ya que su relación con la hidrología explica las características hidrológicas de un tramo determinado (fig.10). Las imágenes obtenidas a partir de los datos

FIGURA 11. Aplicación de LiDAR en el estudio del sombreado de la vegetación riparia sobre el cauce (Fuente: elaboración propia).

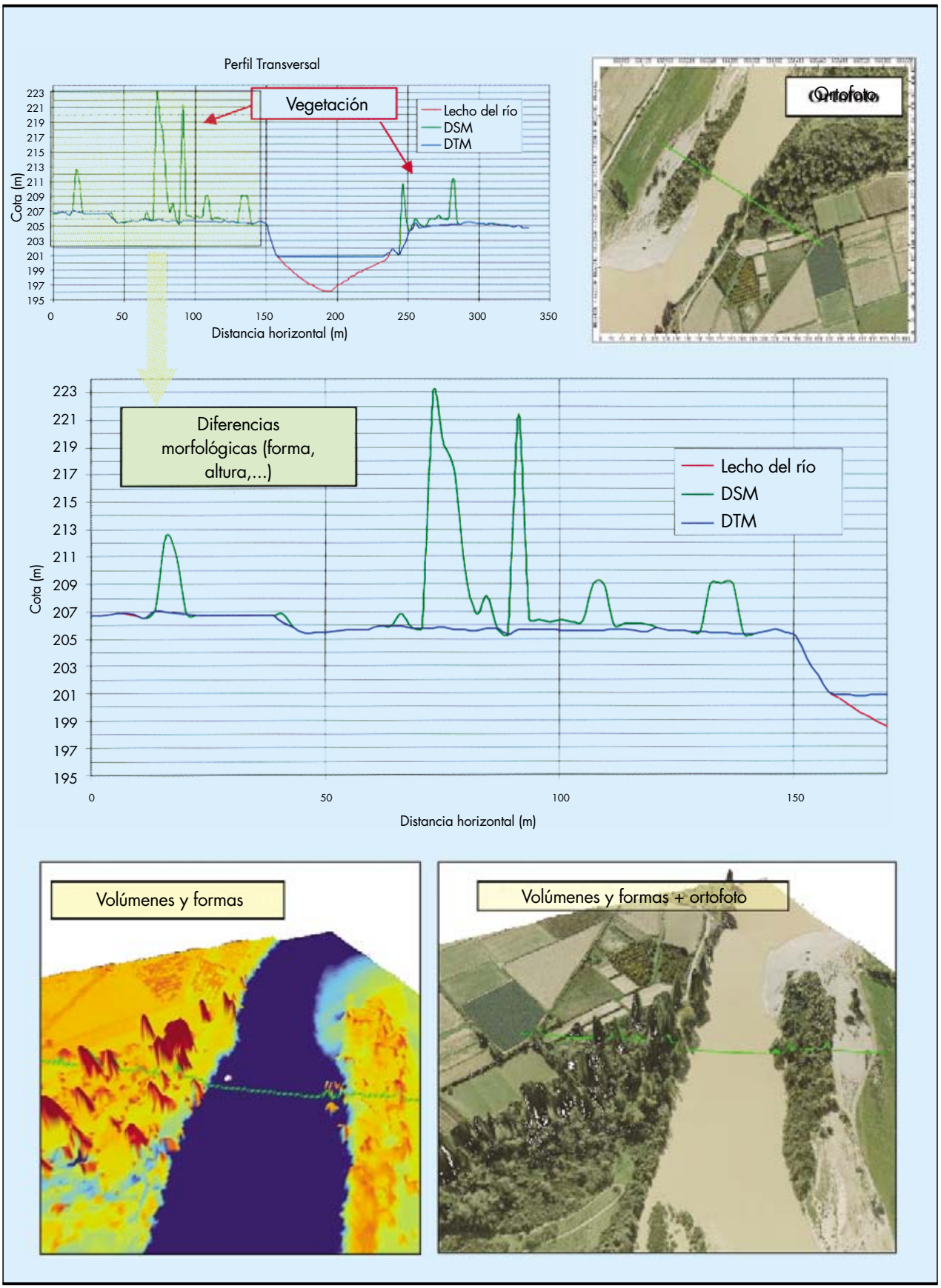

FIGURA 12. Aplicación de LiDAR al estudio de la estructura de la vegetación riparia de un tramo del río Ebro. (Fuente: elaboración propia).

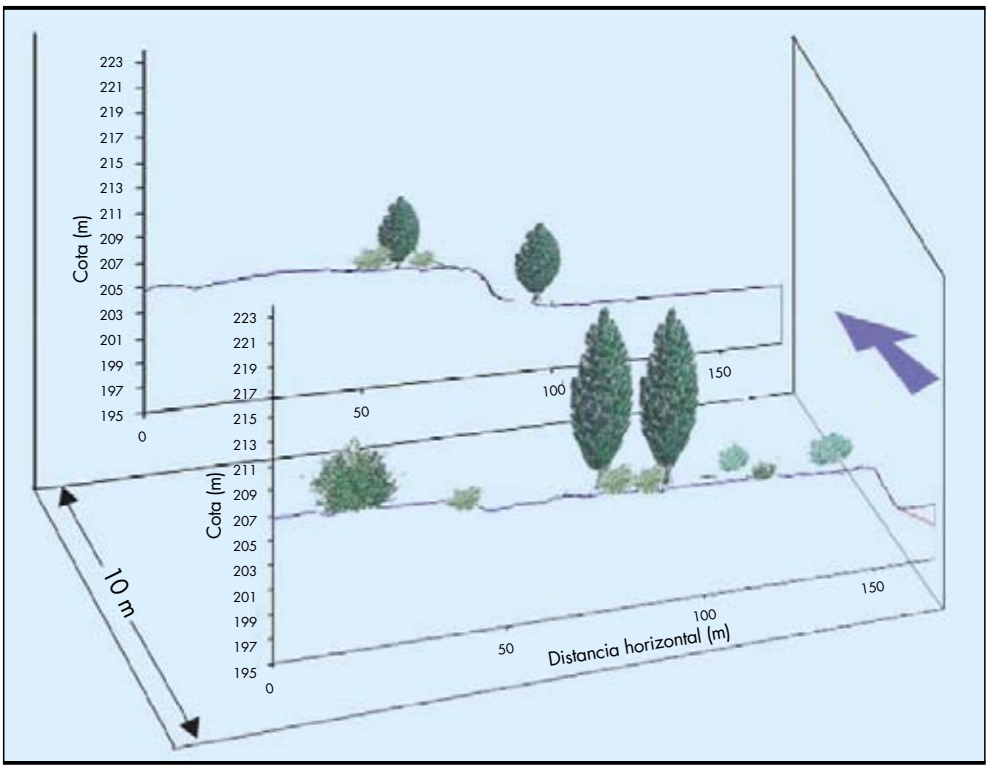

FIGURA 13. Análisis mediante secciones sucesivas de la estructura y composición de la vegetación de ribera. Los ejemplares, identificados por sus características morfológicas y con el apoyo de ortofotos se han representado de forma simulada pie a pie. (Fuente: elaboración propia).

LiDAR permiten también analizar la relación existente entre las formaciones vegetales de ribera y el resto de comunidades vegetales. En la fig.10 puede observarse también la distribución de los setos vegetales existentes entre las parcelas agrícolas de la vega del Ebro, y su conectividad con los bosques de ribera. Asimismo, puede estudiarse la distribución y composición de diferentes rodales de especies leñosas a lo largo y ancho de la llanura de inundación del río.

La posibilidad de generación de cartografía de detalle de la geomorfología fluvial mediante LiDAR, y las aplicaciones que su utilización presenta desde el punto de vista del estudio específico de las comunidades vegetales hace viable el uso de los datos LiDAR en la gestión y caracterización de los bosques de ribera. En el ejemplo de la fig.12, se puede observar como la zona de topografía más baja de la margen izquierda acoge un rodal de vegetación riparia, compuesto por ejemplares de *Salix* y *Populus*, mientras que el pie arbóreo existente en el extremo izquierdo, en una zona desconectada del nivel freático, corresponde a una especie climatófila (no riparia). La importancia del hidroperíodo para la regeneración y crecimiento de las especies ripícolas explica la existencia, únicamente en la zona en que aún existe conexión de la vegetación con el nivel freático, de ejemplares de dichos géneros. Igualmente, es posible observar cómo las características anatómicas y fisiológicas de las especies explican la distribución de las mismas dentro de la ripisilva.

El estudio de la composición de estas comunidades puede realizarse a partir de criterios morfométricos, que en función de la calidad de la información y de la existencia o no de ortofotografías de detalle puede extenderse hasta realizar inventarios específicos pie a pie de estas zonas (fig.13). En algunas ocasiones, los datos LiDAR pueden complementarse también con aplicaciones del láser terrestre, apoyo de video desde plataformas aéreas (MacKinnon, 2001), inventarios de campo, etc.

El análisis de la estructura de la vegetación riparia y de su relación con las características físicas del medio fluvial puede llevarse a cabo mediante la realización sistemática y automatizada de perfiles y transectos (fig.13, fig.14). El diseño del inventario, y la determinación de la longitud y distancia entre estos perfiles dependerá de las características del sensor láser, de la densidad y variabilidad específica del bosque, y del objetivo final del trabajo de caracterización.

Otra aplicación de la utilización de los datos LiDAR es la clasificación de la vegetación de ribera a partir de criterios de altura y textura. La textura se define en este tipo de análisis como la frecuencia de cambios de tonalidad en la imagen, y determina la rugosidad visual de la imagen. Existen hasta doce procedimientos distintos para realizar clasificaciones de imágenes según su textura.

A la vista de los trabajos realizados en este sentido (MacKinnon, 2001), la utilización de los porcentajes de texturas parece mostrar mayor precisión que la de los correspondientes a alturas. La existencia de determinados arbustos de gran porte puede producir confusiones con ejemplares arbóreos, pero no ocurre así cuando se utiliza el criterio textural. Estos análisis pueden ayudar en la gestión de la zona húmeda, y en el estudio de las características del ecosistema. Una vez realizada la generación de las diferentes texturas, se puede llevar a cabo el procesado de los datos mediante diferentes visores, para obtener el perfil del humedal.

El análisis de la vegetación de ribera y el estudio de su relación con el ecosistema fluvial y con los elementos de origen antrópico del territorio abre asimismo la puerta a la utilización de los datos LiDAR en trabajos de paisajismo y restauración fluvial.

El empleo de datos LiDAR permite, asimismo, el análisis de diferentes aspectos ecológicos del medio fluvial, relacionados con la vegetación de ribera, como el porcentaje de sombreado del cauce (fig.11), o la entrada de restos vegetales en

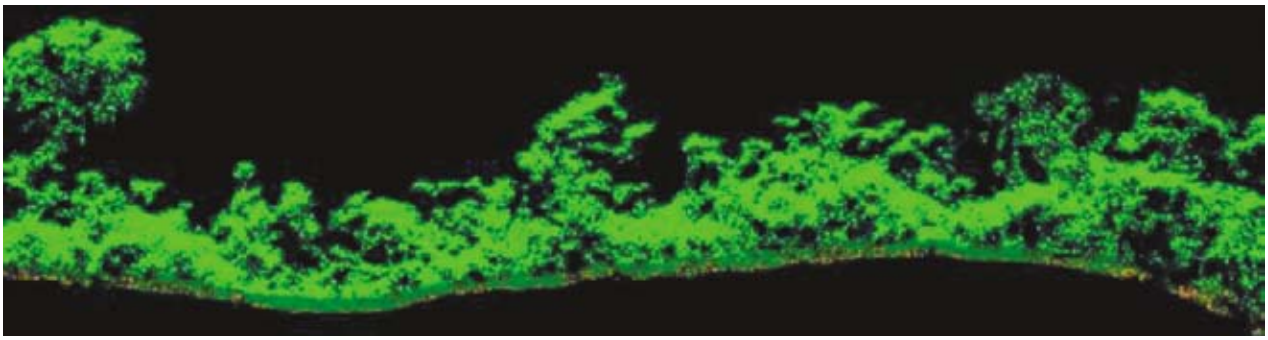

FIGURA 14. Estructura de un bosque húmedo analizado mediante LIDAR (Fuente: Lefsky et al., 2002).

el cauce (Fleece, 2002). También abre nuevas posibilidades para el estudio de la distribución de especies exóticas en los cauces (Hall *et al.*, 2005), o para la gestión de plantaciones forestales en las llanuras de inundación.

3.4. APLICACIÓN DE LIDAR EN TRAMOS FLUVIALES URBANOS Y OBRAS HIDRAÚLICAS

Los modelos digitales generados a partir de los datos LiDAR tienen un amplio abanico de posibilidades desde el punto de vista de la gestión de los tramos urbanos. Desde hace unos años, estos modelos se vienen usando para la generación de cartografía de inundaciones, mediante su combinación con programas de simulación hidráulica.

Por esta razón, las simulaciones realizadas para avenidas con diferentes periodos de retorno suponen un notable avance para la planificación urbanística, dado que la resolución y fiabilidad de estas simulaciones permite incrementar la seguridad de las previsiones y optimizar el proceso de planificación. Por otra parte, el cartografiado mediante láser de los tramos fluviales en entornos urbanos ofrece también posibilidades para la realización de proyectos de ingeniería en el entorno o en el propio medio fluvial. La utilización de sensores LiDAR habilitados para la realización de batimetrías abre un nuevo horizonte para la obtención de modelos digitales de los lechos fluviales. En la actualidad, el cartografiado del lecho de ríos con calados importantes, o con condiciones difíciles para la realización de mediciones exige la intervención de equipos numerosos y especializados, y la utilización de un amplio número de materiales de apoyo. Todo ello redunda en el encarecimiento de los proyectos, y en la obtención de modelos de menor fiabilidad y detalle.

La fig.15 ofrece un ejemplo de generación de cartografía de gran resolución a partir de datos LiDAR, sobre el río Ebro a su paso por la ciudad de Zaragoza. En esta figura se puede observar la calidad tanto del modelo del terreno como del modelo de elevaciones generado, que permiten una buena caracterización de los principales elementos de índole humana que jalonan el cauce.

Otras aplicaciones que se desprenden de la generación de este tipo de imágenes es la realización de mapas específicos de infiltración y acumulación en el conjunto de las zonas de ocupación humana, que pueden ser de mucha utilidad en el dimensionamiento y gestión de las redes de saneamiento.

FIGURA 15. Cartografiado tridimensional mediante datos LiDAR y ortofoto aérea de un tramo urbano del río Ebro (Fuente: elaboración propia).

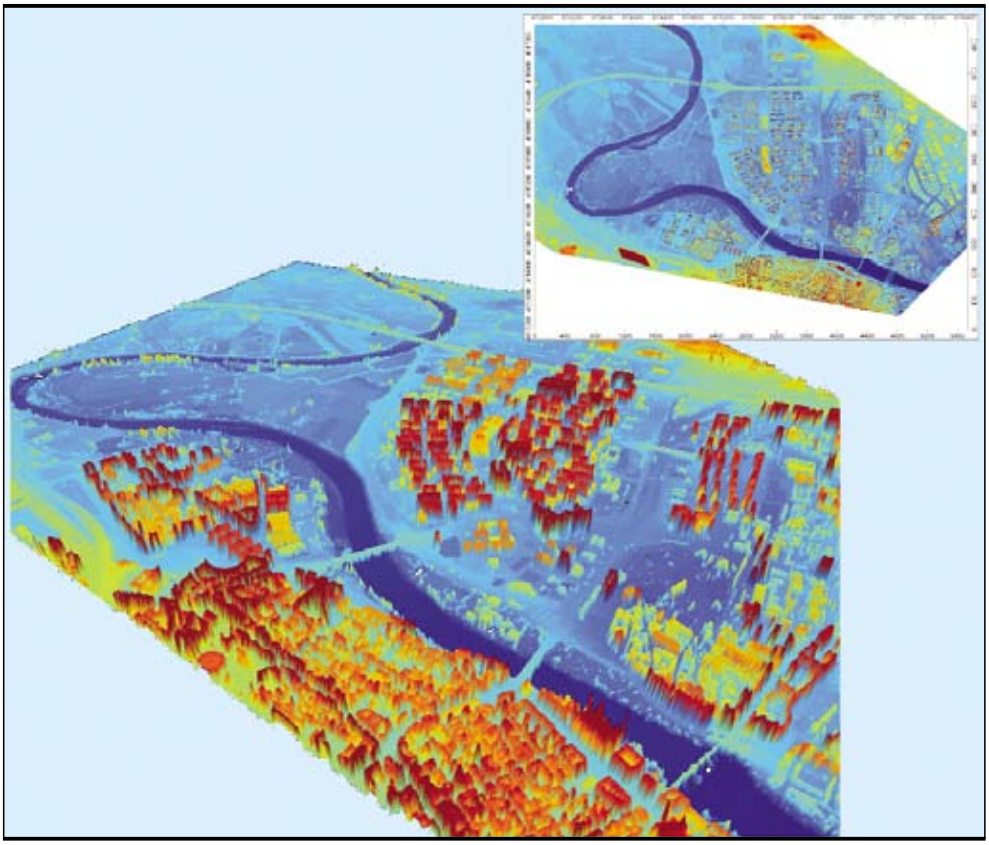

FIGURA 16. Generación de modelos digitales del terreno y de elevaciones del río Ebro a su paso por Zaragoza. En la parte inferior de la imagen pueden observarse algunas de las edificaciones del centro histórico de la ciudad. (Fuente: elaboración propia).

En la actualidad, la tecnología LiDAR sobre plataformas aéreas empieza ya a combinarse con aplicaciones terrestres, permitiendo la generación de modelos de gran detalle del alzado y perfil de obras civiles, edificios y otras construcciones (fig.16, fig.17).

3.5. APLICACIÓN DE LIDAR EN EL ANÁLISIS DE CUENCAS

Existen otras muchas aplicaciones de LiDAR en el ámbito de la gestión de cuencas hidrográficas, casi todas ellas basadas en la elevada resolución de las imágenes generadas a partir de esta técnica de teledetección (fig.18). Entre estas aplicaciones

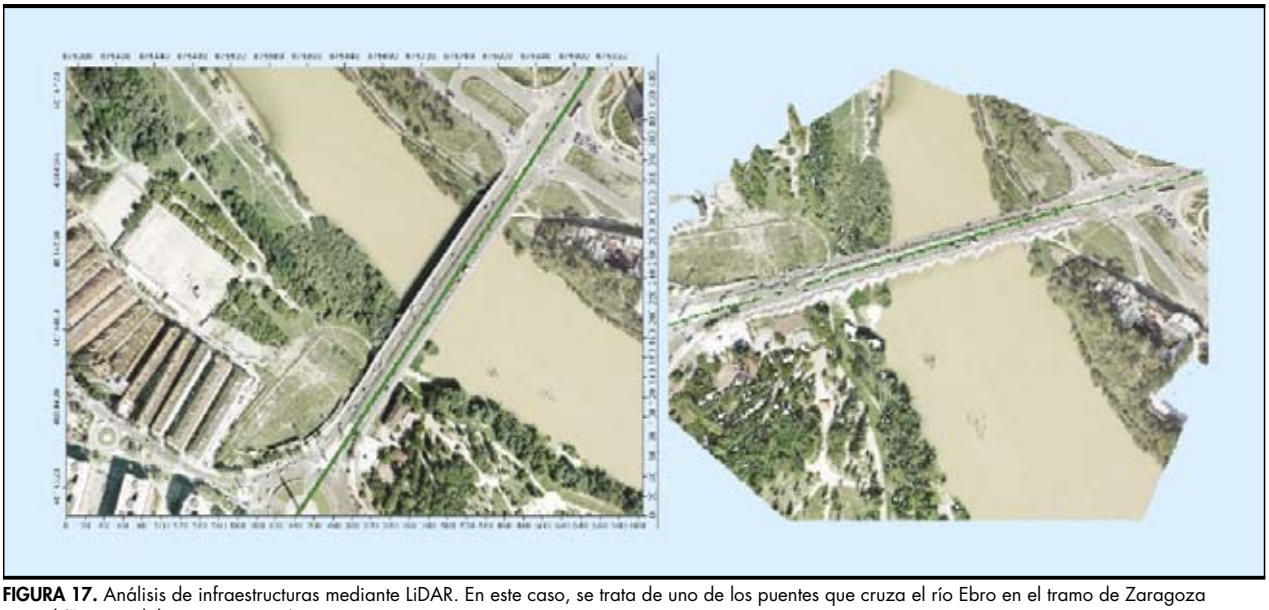

FIGURA 17. Análisis de infraestructuras mediante LiDAR. En este caso, se trata de uno de los puentes que cruza el río Ebro en el tramo de Zaragoza capital (Fuente: elaboración propia).

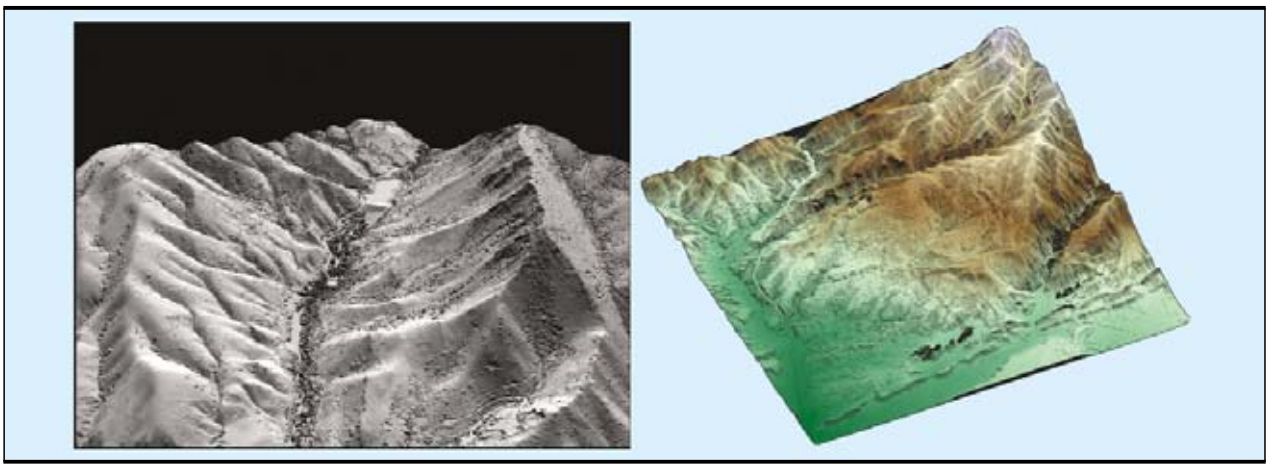

FIGURA 18. Modelos digitales creados para la gestión de cuencas hidrográficas a partir de datos LiDAR (Fuente: Merrick & Co.).

cabe destacar, por su relación con los procesos físicos y ecológicos propios de los sistemas fluviales, el análisis de los procesos erosivos y sedimentarios (movimientos en ladera, erosión laminar, análisis torrencial, etc.), los estudios hidrológico-forestales, la investigación de los procesos edafológicos, o el análisis general del ciclo hidrológico en cuencas y subcuencas.

4. COSTE DE LOS DATOS LIDAR

El coste medio de los datos de puntos *x, y, z* obtenidos a través de los sistemas LiDAR varía aproximadamente entre los 1.000 y 2.000 USD por milla cuadrada (~ 3,20 – 6,40 /ha) para espaciamientos de 2-3 metros (Fuente: *NOAA Coastal Service Center*). Este coste incluye los gastos del vuelo, captura, post-procesado y entrega. Los costes generales varían en función del tamaño del proyecto, espaciamiento horizontal (densidad de puntos) y ubicación del proyecto. El valor indicado no incluye la obtención de productos adicionales (DEMs, DTMs, curvas de nivel, etc.), los requerimientos de precisión específicos o las restricciones debidas a licencias de algún tipo. En cualquier caso, estos datos dependen enormemente en función de la referencia elegida, por lo que deben tomarse con todas las salvedades.

5. CONCLUSIONES. VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LA UTILIZACIÓN DE DATOS LIDAR EN LA GESTIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL MEDIO FLUVIAL

Las principales ventajas de la utilización de LiDAR como tecnología de muestreo y captura de información territorial son las siguientes:

- todos los datos se registran numéricamente;
- el láser es un sensor activo por lo que no requiere condiciones de radiación solar específicas, ni siquiera la luz del día;
- es una tecnología de muestreo aérea, por lo que la información es recogida rápidamente y con precisión, y no necesita soporte terrestre;
- el procesado automático permite aumentar la velocidad de realización de los análisis;
- la alta precisión de los datos recogidos permite usarlos en planificación y en trabajos detallados de ingeniería;
- proporciona datos en áreas de difícil acceso o de ambiente sensible;
- al tratarse de datos digitales pueden ser utilizados en muchos paquetes informáticos, y empleados para generar vistas muy distintas;
- el post-espaciado de los datos de elevaciones generados en LiDAR es considerablemente más denso que en los métodos tradicionales;
- permite cartografiar atributos lineales y estrechos, incluyendo el diseño, planificación y cartografiado de carreteras, la planificación y diseño de los corredores y de las propias torres de líneas eléctricas, el análisis de la erosión costera, el manejo de estas zonas, el análisis de los recursos hídricos, el manejo de redes de tuberías, etc;
- facilita la obtención de cartografía de la superficie terrestre en áreas vegetadas o forestadas, dado que un solo pulso es capaz de penetrar entre la vegetación y alcanzar la tierra;
- los datos de elevaciones obtenidos con LiDAR resultan notablemente más baratos que los obtenidos con los métodos tradicionales, especialmente cuando el post-procesado automático se utiliza para generar modelos de datos de elevaciones de la superficie terrestre.

Entre los principales inconvenientes y limitaciones de la utilización de los datos LiDAR cabe destacar los siguientes:

- Los datos digitales de elevaciones obtenidos a partir de cualquier método, incluyendo LiDAR, no son perfectos. LiDAR no puede delinear con precisión los límites de cursos de agua, líneas de costa o aristas naturales visibles en imágenes fotográficas. La precisión está siempre limitada por los errores inherentes al GPS de a bordo y al sistema IMU. Además, al requerirse procesado manual, las líneas de nivel generadas en LiDAR no están normalmente hidro-corregidas para asegurar el paso del flujo en los modelos de elevaciones. Por otra parte, las curvas de nivel generadas automáticamente a partir de datos LiDAR pueden dar lugar a una descripción de las redes de drenaje algo distinta a la obtenida mediante técnicas fotogramétricas manuales.
- Por otra parte, y pese a las opciones descritas con anterioridad para eliminar estos problemas, LiDAR tiene aún dificultades para cartografiar superficies cubiertas por vegetación muy densa. Los pulsos se pueden diseminar y reflejar en el interior de la vegetación motivando variaciones y errores en las elevaciones obtenidas.

- La mayor parte de los láser LiDAR utilizan, como se ha comentado, radiación perteneciente al infrarrojo cercano. Algunos materiales y superficies, tales como el agua o el asfalto, absorben la longitud de onda correspondiente a esta banda del espectro y provocan que las señales de retorno puedan ser escasas o inexistentes.
- Finalmente, es preciso destacar que LiDAR puede dar lugar a archivos de datos de gran tamaño.

6. AGRADECIMIENTOS

Los datos LiDAR utilizados para la redacción de este trabajo han sido proporcionados, como se ha indicado a lo largo del texto, por la Confederación Hidrográfica del Ebro (Ministerio de Medio Ambiente), y por la Forestry Commission del Reino Unido. A ambos Organismos debemos agradecer las facilidades dadas para la utilización de esta información, y el interés mostrado en la realización de este trabajo. También debemos agradecer a Silvia Merino de Miguel, profesora de la Unidad Docente de Topografía de la E.U.I.T. Forestal (Universidad Politécnica de Madrid), su ayuda y colaboración durante el desarrollo de esta investigación.

7. REFERENCIAS

Baltsavias, A. 1999. Airborne laser scanning: existing systems and firms and other resources, *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 54: 164–198.

Davenport, I.J., Bradbury, R.B., Anderson, G.Q.A., Hayman, G.R.F., Krebs, J.R., Mason, D.C., Wilson, J.D., Veck, N.J. 2000. Improving bird population models using airborne remote sensing. *International Journal of Remote Sensing* 21: 2705-2717.

Farid, A., Goodrich, D., Sorooshian, S. 2005a. *Using airborne LIDAR data to determine old vs. young cottonwood trees in the riparian corridor of the San Pedro River*. US Department of Agriculture. Agricultural Research Station.

Farid, A., Goodrich, D., Sorooshian, S. 2005b. *Riparian vegetation classification from LIDAR data with an emphasis on cottonwood trees*. US Department of Agriculture. Agricultural Research Station.

Fleece, W.C. 2002. *Modeling the delivery of large wood to streams with light detection and ranging (LIDAR) data*. USDA Forest Service Gen. Tech. Rep. PSW-GTR-181.

Gerstein, J.M. 2005. *Monitoring the Effectiveness of Instream Habitat Restoration*. University of California, Center for Forestry, Berkeley, CA. 45 pp.

Guenther, G.C., Cunningham, A.G., LaRocque, P.E., Reid, D.J. 2000. Meeting the accuracy challenge in airborne LiDAR bathymetry. In: *Proc. 20th EARSeL Symposium: Workshop on LiDAR Remote Sensing of Land and Sea*. Dresden, Germany, European Association of Remote Sensing Laboratories, pp. 23.

Hall, R.K., Watkins, R., Moore, S.B., Gregory, S.J., Heggem, D.T., Jones, K.B., Kaufmann, P. 2005. *Quantifying stream structural physical habitat attributes using LIDAR and hyperspectral imagery*. US Environmental Protection Agency.

Harrelson, C.C., Rawlins, C.L., Potyondy, J.P. 1994. *Stream Channel Reference Sites: An Illustrated Guide to Field Technique*. Fort Collins, Colorado, United State Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station. GTRRM-245. 61 pages.

Lefsky, M., Cohen, W.B., Acker, S.A., Spies, T.A., Parker, G.G., Harding, D. 1997. LIDAR remote sensing of forest canopy structure and related biophysical parameters at the H.J. Andrews experimental forest, Oregon, USA. In: Greer, J.D. (ed.): *Natural resources management using remote sensing and GIS*. Washington, DC, American Society of Photogrammetry and Remote Sensing.

Lefsky, M.A., Cohen, W.B., Harding, D.J., Parker, G.G., Acker, S.A. and Gower, S.T. 2001. Lidar remote sensing of aboveground biomass in three biomes. In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, Volume XXXIV, Part 3/W4, Commission III, Annapolis, Maryland, 22-24 October, 155-160.

Lefsky, M.A., Cohen, W.B., Harding, D.J., Parker, G.G., Acker, S.A., Gower, S.T.. 2002. Lidar remote sensing of aboveground biomass in three biomes. *Global Ecology and Biogeography* 11(5): 393-400.

MacKinnon, F. 2001. *Wetland Application of LIDAR Data: Analysis of Vegetation Types and Heights in Wetlands.* [Disponible en:] http://agrg.cogs.ns.ca/publications/reports/lidar_wetlands.pdf

Magnussen, S. & Boudewyn, P. 1998. Derivations of stand heights from airborne laser scanner data with canopy-based quantile estimators. *Canadian Journal of Forest Research* 28: 1016-1031.

McArdle, S.S., Farrington, G., Rubinstein, I. 1999. A preliminary comparison of flood risk mapping using integrated remote sensing technology to aerial photography. In: *Proceedings of the Fourth International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition*, Ottawa, Ontario, 21-24 June.

Means, J.E., Acker, S.A., Harding, D.J., Blair, B.J., Lefsky, M.A., Cohen, W.B., Harmon, M.E., McKee, W.A. 1999. Use of large-footprint scanning airborne LIDAR to estimate forest stand characteristics in the western Cascades of Oregon. *Remote Sensing of the Environment* 67: 298-308.

Naesset, E. 1997. Estimating timber volume of forest stands using airborne laser scanner data. *Remote Sensing of Environment* 61: 246-253.

Nelson, R. 1997. Modeling forest canopy heights: the effects of canopy shade. *Remote Sensing of Environment* 60: 327-334.

Nilsson, M. 1996. Estimation of tree heights and stand volume using an airborne LIDAR system. *Remote Sensing of Environment* 56: 1-7.

Ramos, C. 1996. *Quantification of Stream Channel Morphological Features: Recommended Procedures for Use in Watershed Analysis and TFW Ambient Monitoring*. Northwest Indian Fisheries Commission. TFW-AM9-96-006.

Renslow, M., Greenfield, P., Guay, T. 2000. *Evaluation of multi-return LIDAR for forestry applications*. US Department of Agriculture Forest Service – Engineering. Remote Sensing Applications Center. Report RSAC-2060/4810-LSP-0001-RPT1.

Schreier, H., Lougheed, J., Tucker, C., Leckie, D. 1985. Automated measurements of terrain reflection and height variations using an airborne infrared laser system. *International Journal of Remote Sensing* 6: 101-113.

USGS (Interagency Floodplain Management Review Committee). 1994. *Sharing the challenge: floodplain management into the 21st century*. Washington D.C.

Walklate, P.J., Richardson, G.M., Baker, D.E., Richards, P.A., Cross, J.V. 1997. Short-range LiDAR measurement of top fruit tree canopies for pesticide applications research in the UK. *Proceedings of SPIE - Advances in Laser Remote Sensing for Terrestrial and Oceanographic Applications*, Orlando, Florida, 21-22 April, 143-151.

Worthy, M. 2005. High-resolution total stream power estimates for the Cotton River, Namadgi National Park, Australian Capital Territory. In: Roach, I.C. (ed.): *Regolith 2005 – Ten years of CRC LEME*, pp. 338-343.