

BORRADOR

CAPÍTULO III.3.- LiDAR: TOPOGRAFÍA ARQUEOLÓGICA AL DESCUBIERTO

Elia Quirós equiros@unex.es, Laura Fragoso-Campón laurafragoso@unex.es

Universidad de Extremadura.

Escuela Politécnica de Cáceres.

1.-INTRODUCCIÓN

LiDAR (Light Detection And Ranging) es una tecnología de detección remota relativamente nueva que nos permite adquirir entidades en 3D. Es una técnica de teledetección que utiliza la luz de láser para obtener una muestra densa de la superficie de la tierra con mediciones de x, y, z.

LiDAR es un sensor óptico activo que emite y recibe un pulso láser. El reflejo del láser del objetivo lo detectan y analizan los receptores, que registran el tiempo exacto desde que el pulso láser dejó el sistema hasta cuando regresó para calcular la distancia entre el sensor y el objetivo. Dicha distancia, combinada con la información posicional (GPS e INS) se transforma en coordenadas tridimensionales reales del objetivo en el espacio.

$$\text{Distancia} = \frac{\text{Velocidad de la luz} \times \text{tiempo transcurrido}}{2}$$

La longitud de onda utilizada para el láser que constituye el sistema LiDAR puede variar entre luz infrarroja, ultravioleta, visible, según el objetivo al que vaya dirigido: investigación atmosférica y meteorológica, topografía, etc.

La mayoría de los sistemas LiDAR usados en mediciones de distancias cortas y medias, de altimetría, utilizan una longitud de onda de 1.064 nm (infrarrojo cercano). Cuando se intenta medir la profundidad oceánica, batimetría, se emplean láseres con longitud de onda de 532 nm (láser verde).

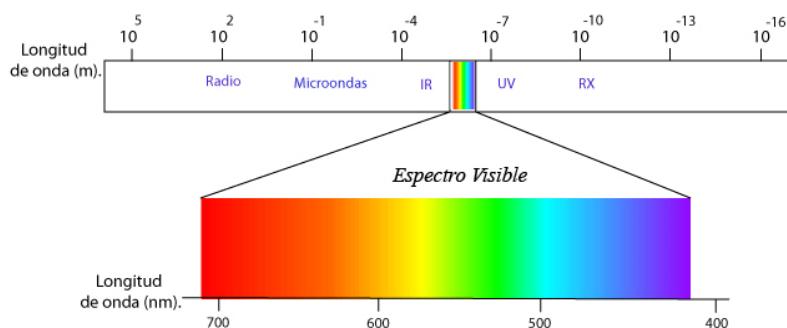


Figura 1. Espectro electromagnético

La tecnología de LiDAR ha evolucionado para convertirse en una fuente común de datos geográficos. Cada punto LiDAR puede tener atributos adicionales como intensidad, códigos de clase y los valores de color RGB o del Infrarrojo.

Los pulsos láser emitidos desde un sistema LiDAR se reflejan desde objetos sobre y por encima de la superficie del suelo: vegetación, edificios, etc. Un pulso láser emitido puede regresar al sensor LiDAR como uno o muchos retornos. Cualquier pulso láser emitido, que encuentre varias superficies en las que reflejar a medida que viaja hacia el suelo, se divide en tantos retornos como superficies reflectoras haya encontrado (ESRI, 2011).

El primer pulso láser devuelto es el más importante y se asociará con la entidad más grande encontrada como una copa de árbol o la parte superior de un edificio. Este primer retorno también puede representar el suelo, en cuyo caso el sistema LiDAR solo detectará un retorno.

Varios retornos pueden detectar las elevaciones de varios objetos dentro de la huella láser de un pulso láser saliente (Figura 2). Los retornos intermedios, en general, se utilizan para estudiar la estructura de la vegetación, y el último retorno para elaborar los Modelos Digitales de Elevaciones (MDE) que reflejan la elevación del suelo desnudo(ESRI, 2011).



Figura 2. Distintos retornos del sistema LiDAR en función del terreno en el que se reflejen

Esta facilidad para separar los distintos retornos del pulso LiDAR y de poder extraer sólo las devoluciones del suelo desnudo es la característica más significativa por la que esta fuente de datos ha adquirido tanta importancia en arqueología. De este modo, se pueden estudiar cambios en el microrrelieve de zonas arqueológicas, eliminando toda la información de la vegetación.

Antes de la aparición de estos sistemas, se empleaba la teledetección y la fotogrametría para la identificación de zonas arqueológicas y cartografiar sus características. Pero hasta la aparición de la tecnología LiDAR ninguna de estas tecnologías nos permitió "ver a través de los árboles"(A. F. Chase et al., 2011). La aplicación del LiDAR, está generando un cambio fundamental en la arqueología y tiene el potencial de transformar la investigación en las zonas forestales en todo el mundo (A. F. Chase, Chase, Fisher, Leisz, & Weishampel, 2012).

La inclusión de la tecnología LiDAR ha supuesto un cambio muy significativo, más allá de la posibilidad estudiar el suelo desnudo. Mlekuž (2013) indicó que a partir de los datos LiDAR se puede apreciar la multiplicidad y riqueza de cosas pasadas, rastros de actividades y tareas pasadas, humanas y no humanas, materializados en un paisaje. El LiDAR no se limita

a los "significativos", rasgos aislados del paisaje. Todos los espacios están completamente incorporados a la zona circundante; su forma, la dimensión, el contexto y la estructura son el resultado de interacciones complejas y duraderas con un paisaje cambiante. Por lo tanto, los datos LiDAR nos obligan a tratar los datos como parte integral del paisaje. (Mlekuž, 2013).

El grado en que los datos del LIDAR han formado parte del conjunto de herramientas arqueológicas varía según la región. Hace más de dos decenios, los arqueólogos europeos comenzaron a incorporar las adquisiciones LiDAR en proyectos de arqueología del paisaje y de gestión del patrimonio, coincidiendo con el creciente interés de las políticas en materia de paisajes y sostenibilidad a escala nacional y de la Unión Europea. (Cohen, Klassen, & Evans, 2020). Más concretamente en nuestro país, fue en el año 2009, con el nacimiento del proyecto PNOA-LiDAR cuando se comenzó a cubrir todo el territorio de España (en un ciclo de 6 años) mediante nubes de puntos obtenidas mediante sensores LiDAR aerotransportados. La densidad de puntos de la primera cobertura fue de 0,5 puntos/m² y la segunda cobertura ya está siendo mejorada dicha resolución para conseguir entre 0,5 y 4 puntos/m².

A pesar de que la resolución de 0,5 puntos/m² parece poco apropiada para detectar cambios sutiles en el microrrelieve, existen algunos trabajos que han sido capaces de detectar estructuras arqueológicas enterradas a partir de datos LiDAR de baja densidad del PNOA tales como Monterroso-Checa (2019), en el que se muestra que también es posible recuperar el relieve y la geomorfología de los períodos romano y medieval enterrados a varios metros de profundidad en nuestras ciudades históricas. Este es también el caso de Ramírez Galán (2020) en el que se localizaron las estructuras medievales tempranas en la colina de Malvecino mediante el análisis de fotografías aéreas y LiDAR del PNOA, y el de Costa-García, Fonte, & Gago Mariño (2019) que también utiliza dichas fuentes de información para aumentar el conocimiento de la presencia militar romana en Galicia y el norte de Portugal.

Sin embargo, una tendencia reciente es la creciente implementación en los vehículos aéreos no tripulados (UAVs) de técnicas como el LiDAR de baja altitud. Su utilización soluciona en primera instancia la baja resolución en la densidad de puntos del LiDAR del PNOA. Así podemos encontrar trabajos con densidad de 20 puntos/m² en A. F. Chase et al. (2011), de 22 puntos/m² en Risbøl and Gustavsen (2018), de 25 puntos/m² en Masini et al. (2018) o incluso de 170 puntos/m² en Risbøl and Gustavsen (2018).

No obstante, la mejora sustancial del empleo de LiDAR con UAVs no solo consiste en el aumento de la resolución, sino también en la capacidad de penetración en la vegetación. La mayor cercanía entre el sensor y el suelo, asegura que el láser regresa desde la superficie real del suelo y no desde la parte superior de la vegetación baja (Risbøl & Gustavsen, 2018).

El principal objetivo de este capítulo es la aplicación de la tecnología LiDAR implementada en UAV para analizar con mayor detalle la micro-topografía del terreno, incluso bajo vegetación densa, a fin de definir la geometría de los asentamientos en el yacimiento de Villasviejas del Tamuja. Además, se estudiarán los contornos de los recintos amurallados, se identificarán obras de fortificación, de definirá la geometría de la arquitectura defensiva y se delimitarán los espacios habitados del castro de Villasviejas. Con todo ello, se podrá realizar una interpretación de restos arqueológicos a partir de la micro-topografía derivada de la nube de puntos LiDAR.

2.-CASO DE ESTUDIO

En el caso de Villasviejas, la topografía es abrupta y, la densa vegetación que cubre la zona, dificulta el reconocimiento de elementos esenciales del castro, por tanto, la aplicación de esa tecnología, ha sido de gran ayuda en la definición de la geometría urbana del asentamiento.

Más concretamente, en la zona de trabajo, la mayor parte de los restos arqueológicos se sitúan bajo vegetación densa y como se ha mencionado anteriormente, las técnicas de fotogrametría convencionales no resuelven esta situación, ya que no pueden salvar dicha vegetación.

Por ejemplo, en muchos tramos del recinto (Figura 3) la espesa vegetación impide identificar y documentar los lienzos de muralla que afloran en superficie.



Figura 3. Detalle muralla bajo vegetación.

Esta característica, hace de Villasviejas un lugar idóneo para la utilización de datos LiDAR en el estudio de definición la geometría de los asentamientos en el yacimiento.

3.- METODOLOGÍA

La metodología empleada en este trabajo ha sido la indicada en la Figura 4.

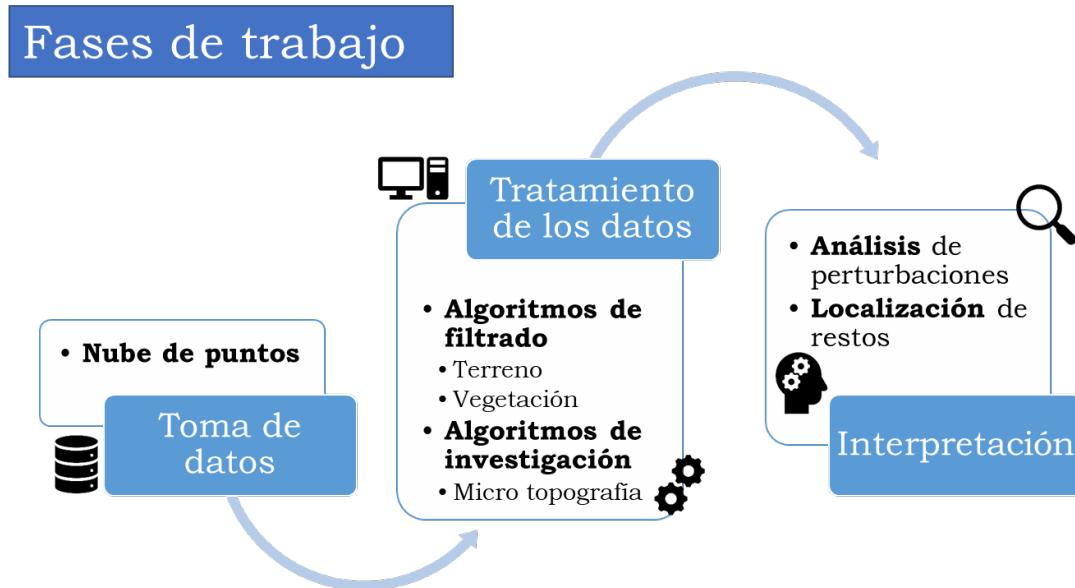


Figura 4. Fases del trabajo.

En primer lugar, se adquirieron los datos mediante un vuelo LiDAR. La nube de puntos fue tratada en dos fases diferentes, de tal manera que primero se procedió a un filtrado para eliminar la vegetación y trabajar sólo con el suelo desnudo y posteriormente, se emplearon algoritmos de investigación para detectar los cambios en la micro-topografía. Finalmente, con estos datos se procedió a una interpretación en el que se analizaron las perturbaciones locales más características y se localizaron las estructuras.

3.1. TOMA DE DATOS

Los datos LiDAR fueron adquiridos en mayo de 2018 usando un UAV de 6 brazos modelo DJI-M600 PRO con gran estabilidad de vuelo y equipado con un sensor LiDAR "Scout" (Figura 5).



(a)



(b)

Figura 5. (a) UAV DJI-M600Pro y (b) sensor LiDAR "The Scout".

Con el fin de asegurar una densa cobertura de puntos en toda la zona estudiada, se realizaron dos vuelos a unos 40 m sobre el nivel del suelo. Se pudo obtener una densidad de puntos mínima de 100 puntos/m² como resultado de la combinación de esa altura de vuelo y una velocidad de 5 m/s. Los datos LiDAR adquiridos en el vuelo se agruparon en dos nubes de puntos, como se muestra en la Figura 6.

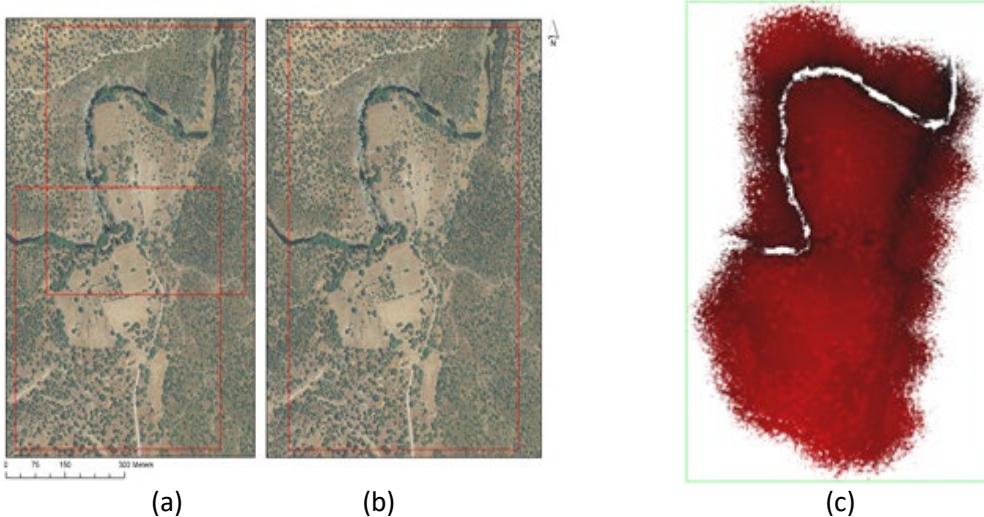


Figura 6: Datos LiDAR del área que representan (a) la extensión de las dos nubes de puntos (norte y sur) originalmente adquiridas del área estudiada, (b) la extensión de la nube de puntos fusionada, (c) la visualización de la nube de puntos utilizando Lasview de LAStools

Las nubes de puntos fueron analizadas por los algoritmos implementados tanto en el software de LAStools (Rapidlasso GmbH, 2013) -donde sólo se utilizó el algoritmos de libre acceso- como en el de FUSION (McGaughey, 2009). Los pasos del procesamiento fueron los siguientes.

Primero se analizaron las estadísticas de las dos nubes de puntos derivadas del vuelo LiDAR con LASinfo de LAStools. Las nubes de puntos del norte y del sur (Figura 6a) mostraron una

densidad media de puntos de unos 205 puntos/m² y 286 puntos/m² cada una con una distancia media entre ellas de 0,07 m y 0,06 m respectivamente. Una vez agrupadas en el software FUSION (Figura 6b), la densidad media final de puntos fue de unos 280 puntos/m² con una distancia media entre ellas de 0,06 m.

La densidad de puntos por metro cuadrado es una de las características fundamentales de los datos LiDAR, siendo la diferencia fundamental en la capacidad de detección de las estructuras en cuestión. Aunque, como ya hemos visto anteriormente, existen algunos trabajos realizados con el LiDAR del PNOA, en los que se han detectado estructuras completamente enterradas en terrenos utilizados para el cultivo con movimiento de tierra (Monterroso-Checa, 2017), la densidad estándar de esta fuente de datos hubiera sido insuficiente en este trabajo para la definición de la geometría de los asentamientos en el yacimiento, tal y como se puede apreciar en la Figura 7.

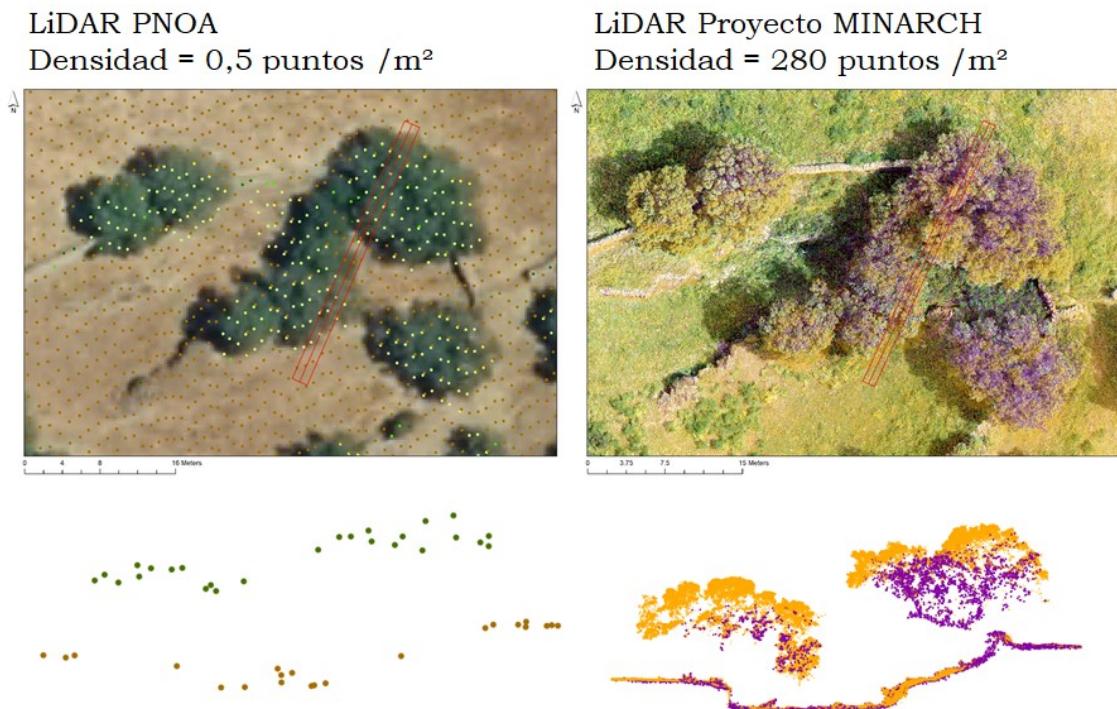


Figura 7: Comparativa de la densidad de puntos en los datos LiDAR de (a) LiDAR del PNOA con 0.5 puntos/m² y (b) LiDAR del trabajo con 280 puntos/m².

3.2. ALGORITMOS DE FILTRADO

En segundo lugar, la nube de puntos fusionados del LiDAR se procesó en el software FUSION (McGaughey, 2009). De esta forma se extrajeron los retornos del terreno de la nube de puntos aplicando la herramienta *GroundFilter*.

Como se indica en McGaughey (2016) el algoritmo *GroundFilter* se implementa como un proceso iterativo. En el primer paso, se calcula una superficie con pesos iguales para todos los puntos LiDAR. Esto da como resultado una superficie que se encuentra entre el verdadero suelo y la superficie de la cubierta. Es más probable que los puntos del terreno estén por debajo de la superficie y los puntos de vegetación por encima de la superficie. La

distancia y la dirección a la superficie se utiliza para calcular los pesos de cada punto LiDAR utilizando la siguiente función de peso:

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

Los parámetros a y b determinan la inclinación de la función de peso. El valor de desplazamiento, g , determina a qué puntos se asigna el valor de peso máximo de 1,0. El parámetro de desplazamiento sobre el terreno, w , se utiliza para establecer un límite superior para que los puntos tengan un efecto sobre la superficie intermedia.

Para asegurar que se eliminara la mayor parte de los retornos de vegetación, se realizaron varios escenarios con los valores apropiados de los parámetros de la función de peso. Por último, se seleccionó el mejor escenario en el que los valores fueron los indicados en la Tabla 1.

Tabla 1: Parámetros de la función de peso y el valor de cada uno de ellos en el mejor escenario estudiado.

Parámetro	Descripción	Valor para el mejor escenario
cz	El tamaño de la célula utilizada para los modelos de superficie intermedia en el algoritmo <i>GroundFilter</i>	0,5 m
a	Valor para el parámetro a de la ecuación de la función de peso	1
b	Valor para el parámetro b de la ecuación de la función de peso	4
g	Valor para el parámetro g de la ecuación de la función de peso	-1 m
w	Valor para el parámetro w de la ecuación de la función de peso	1.05 m

Después de la iteración final, los puntos de suelo desnudo se seleccionan usando la superficie intermedia final. Todos los puntos con elevaciones que satisfagan las dos primeras condiciones de la función de peso, son considerados como puntos de suelo desnudo (McGaughey, 2016).

La nube de puntos filtrada correspondiente al suelo desnudo se utilizó para generar un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) utilizando la herramienta *GridSurfaceCreate*, que calcula las elevaciones de la celda utilizando la elevación promedio de todos los puntos dentro de la celda. Además, también se creó un Modelo Digital de Superficie (MDS) utilizando la herramienta *CanopyModel*, que crea un modelo de elevaciones del dosel arbóreo utilizando la nube de puntos LiDAR y asigna a cada píxel la elevación del mayor

retorno. Se utilizó una resolución espacial de 0,15 m de tamaño de píxel tanto para el MDE como para el MDS.

En algunas ubicaciones del DEM, se detectó algo de ruido, principalmente en las áreas con mayor pendiente cerca del río Tamuja. Por lo tanto, se realizó un filtro aritmético de suavizado (paso bajo) para eliminar el ruido y reducir los valores extremos con un filtro de 3 x 3 píxeles.

3.3. ALGORITMOS DE INVESTIGACIÓN

Por último, se llevó a cabo un proceso de Modelo Simple de Relieve Local (SLRM) debido a que se ha demostrado que es una de las mejores herramientas para la prospección arqueológica de datos LiDAR (Hesse, 2010). Dicho algoritmo parte de la premisa de que los rasgos arqueológicos son generalmente de una escala mucho más pequeña que las formas del terreno en el que se encuentran (Kokalj & Hesse, 2017). El SLRM estudia la diferencia entre el DEM original y un DEM de eliminación de tendencias derivado y es el resultado de un procedimiento que separa los rasgos locales de pequeña escala de los de gran escala. Se basa en la premisa de que las características topográficas de los elementos arqueológicos son generalmente de menor escala que las del terreno en el que se encuentran ocultas (Hesse, 2010). La ventana de análisis se va moviendo sobre cada celda o píxel del MDE para analizar la diferencia entre la elevación media alrededor de una celda y la elevación de la propia celda. Esta técnica no hace cambios significativos en el relieve, de modo que sólo las pequeñas variaciones del paisaje son visibles (A. S. Chase, Chase, & Chase, 2017).

Para este cálculo se utilizó la caja de herramientas de visualización de relieve ZRC SAZU. Como se indica en Kokalj and Hesse (2017), el nivel de suavizado se define por el tamaño del núcleo del filtro de paso bajo, donde un núcleo más pequeño expone características más pequeñas y viceversa. **En este trabajo, el radio para la evaluación de la tendencia fue de 20 píxeles.**

3.4. INTERPRETACIÓN

Con la base sólida del SLRM generado a partir del MDE del suelo desnudo, se procedió a realizar un análisis de cambios en el microrrelieve que pudieran sugerir el rastro de algún elemento constructivo que definiera la geometría de la arquitectura defensiva y delimitarán los espacios habitados del castro.

Los análisis llevados a cabo se centraron principalmente en la zona oeste del recinto B, ya que es la zona en la que el SLRM produjo cambios en el microrrelieve más llamativos.

4.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. TOMA DE DATOS

La primera característica notable de la nube de puntos resultante de la toma de datos fue su gran densidad de puntos.

Como se ha comentado anteriormente, existen multitud de trabajos a nivel nacional que emplean los datos LiDAR del IGN para identificar exitosamente estructuras arqueológicas. Sin embargo, la densidad de puntos parece poco adecuada para detectar pequeñas variaciones.

En nuestro trabajo hemos conseguido una resolución de 280 puntos/m² que, no solo es incomparablemente mejor que la del PNOA, sino que supera también con creces las resoluciones de trabajos de esta última década.

4.2. ALGORITMOS DE FILTRADO

En primera instancia se procesó la nube de puntos LiDAR con todos sus puntos, elaborándose un MDS con resolución de 0,15 m (Figura 8).

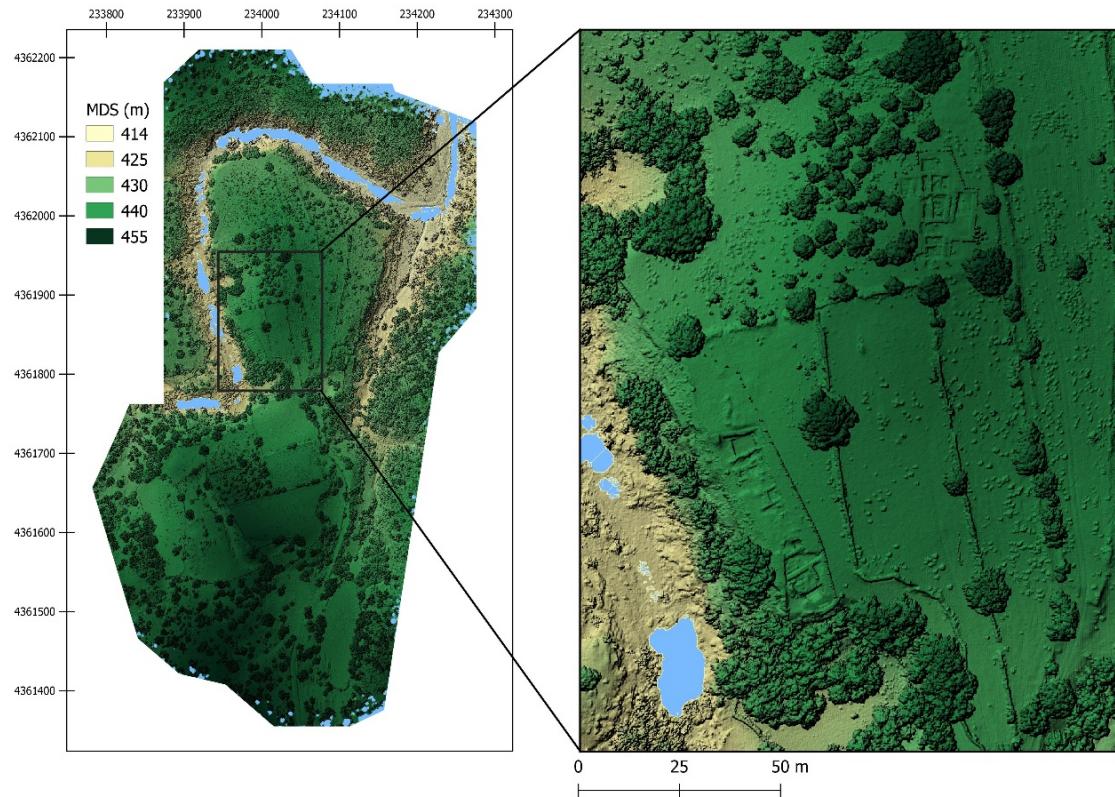


Figura 8: Modelo Digital de Superficie (MDS) en el que se puede apreciar el detalle de las dos zonas del yacimiento excavadas con anterioridad en el recinto A.

A partir del MDS, se elaboró un MDE (Figura 9) con tamaño de píxel también de 0,15 m que representa la morfología del suelo desnudo una vez filtrados los puntos de vegetación de la nube de puntos LiDAR.

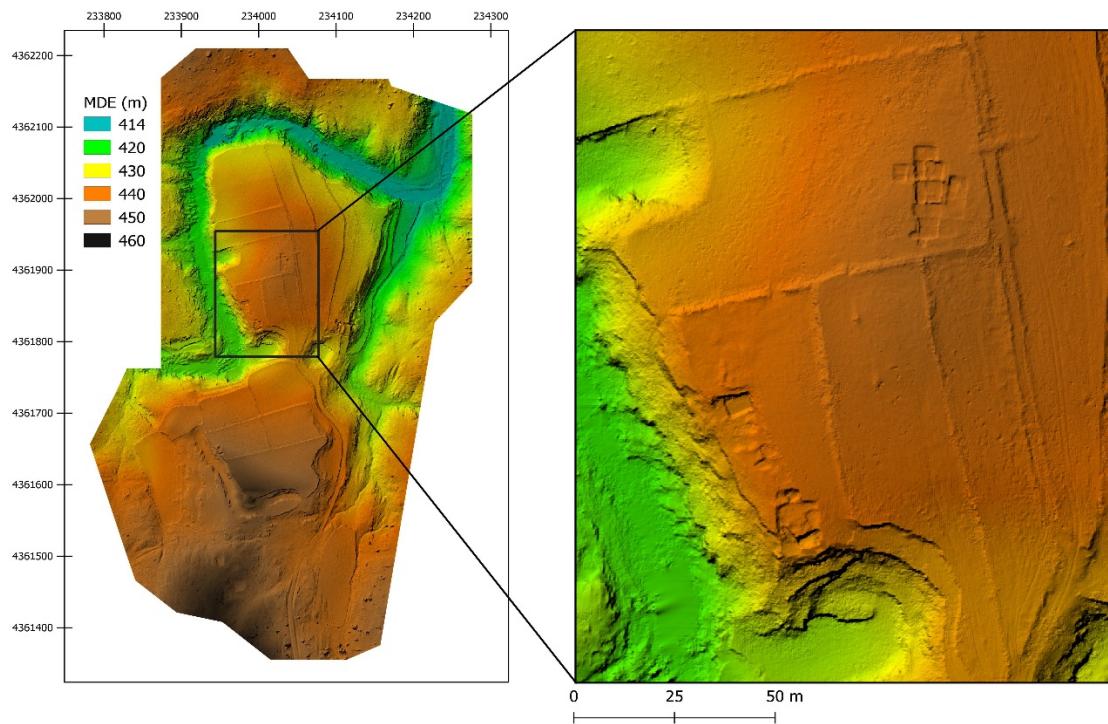


Figura 9: Modelo Digital de Elevaciones (MDE) del suelo desnudo en el que se puede apreciar el detalle de las dos zonas del yacimiento excavadas con anterioridad en el recinto A.

En primer lugar, es notable la diferencia entre el MDS y el MDE del suelo desnudo, sobre todo en las zonas en las que se ha eliminado la vegetación. Este es el caso de la zona sur del recinto A, en el que se puede apreciar de manera más clara las dimensiones y disposición estratégica de los fosos que separan ambos recintos.

Centrándonos en el método de filtrado y eliminación de la vegetación, existen en la literatura diversos métodos probados científicamente. Desde el punto de vista tecnológico, mediante el uso de enfoques subjetivos y objetivos, los diversos modelos derivados del filtrado han de ser probados para evaluar su capacidad de estudiar la micro-topografía del sitio de interés (Masini et al., 2018). También, por tanto, el éxito o fracaso del algoritmo de filtrado dependerá en gran medida de la cantidad de vegetación y otras características particulares de la zona de trabajo. Por lo tanto, es importante saber las diferencias entre los métodos, tanto de filtrado como de interpolación y los resultados que producen y, también cuando un método determinado puede ser mejor que otro para responder a una cuestión de investigación particular (Luo et al., 2019). En algunos trabajos se ha evaluado la exactitud de los diversos filtros que se suelen aplicar en arqueología con LiDAR, llegando a la conclusión de que cuanto menor sea la densidad de puntos, peor será el rendimiento de todos los filtros. Esto hace que el procesamiento de datos de baja densidad sea mucho más exigente (Štular & Lozić, 2020). En nuestro caso, a pesar de que la densidad de puntos fuera muy elevada, se efectuó un exhaustivo análisis de los distintos escenarios reproducidos por los distintos filtros, para asegurar un MDE adecuado para ser procesado en la siguiente fase de investigación.

4.3. ALGORITMOS DE INVESTIGACIÓN

El propósito de esta fase del trabajo fue la de obtener, de toda la zona, un ráster SLM (Figura 10) que realzara los cambios en la micro-topografía y así poder proceder con mayor garantía a la fase final de interpretación de los resultados.

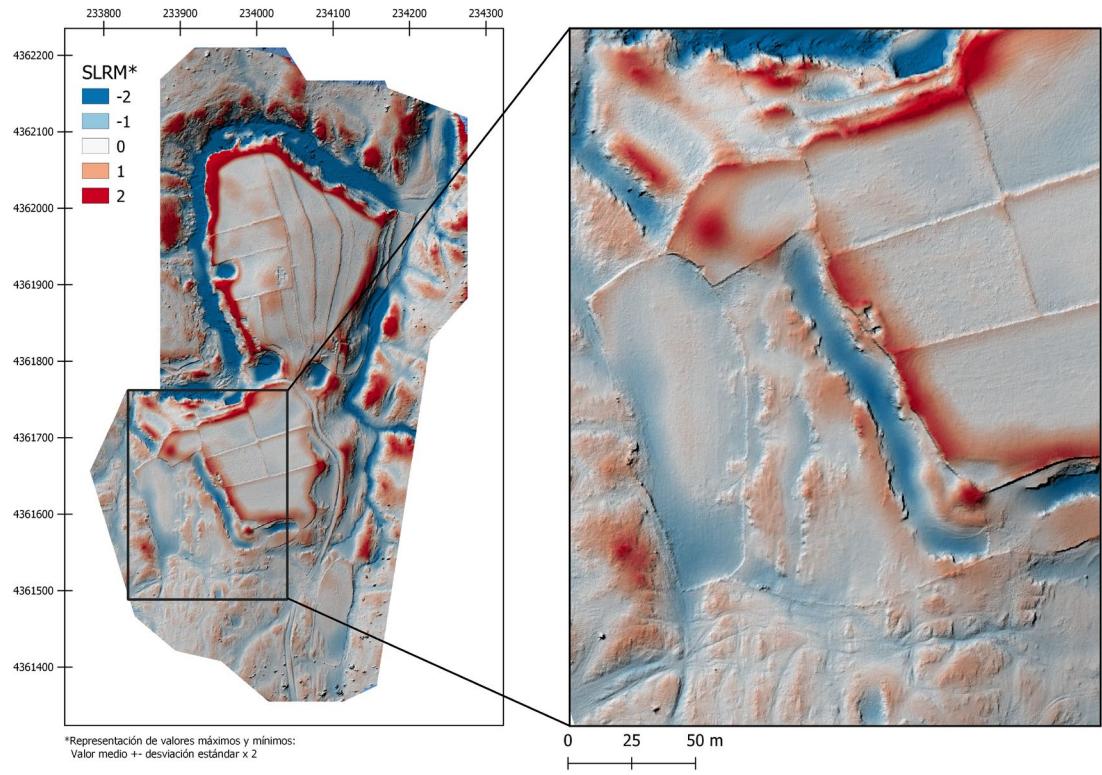


Figura 10: SLM.

Tal y como se aprecia en la figura 11, dichos cambios en el microrrelieve, generado por el SLM, se hacen mucho más prominentes que los que se pueden apreciar en el MDE del suelo desnudo. Esta característica los convierte entonces en una herramienta muy objetiva a la hora de la interpretación.

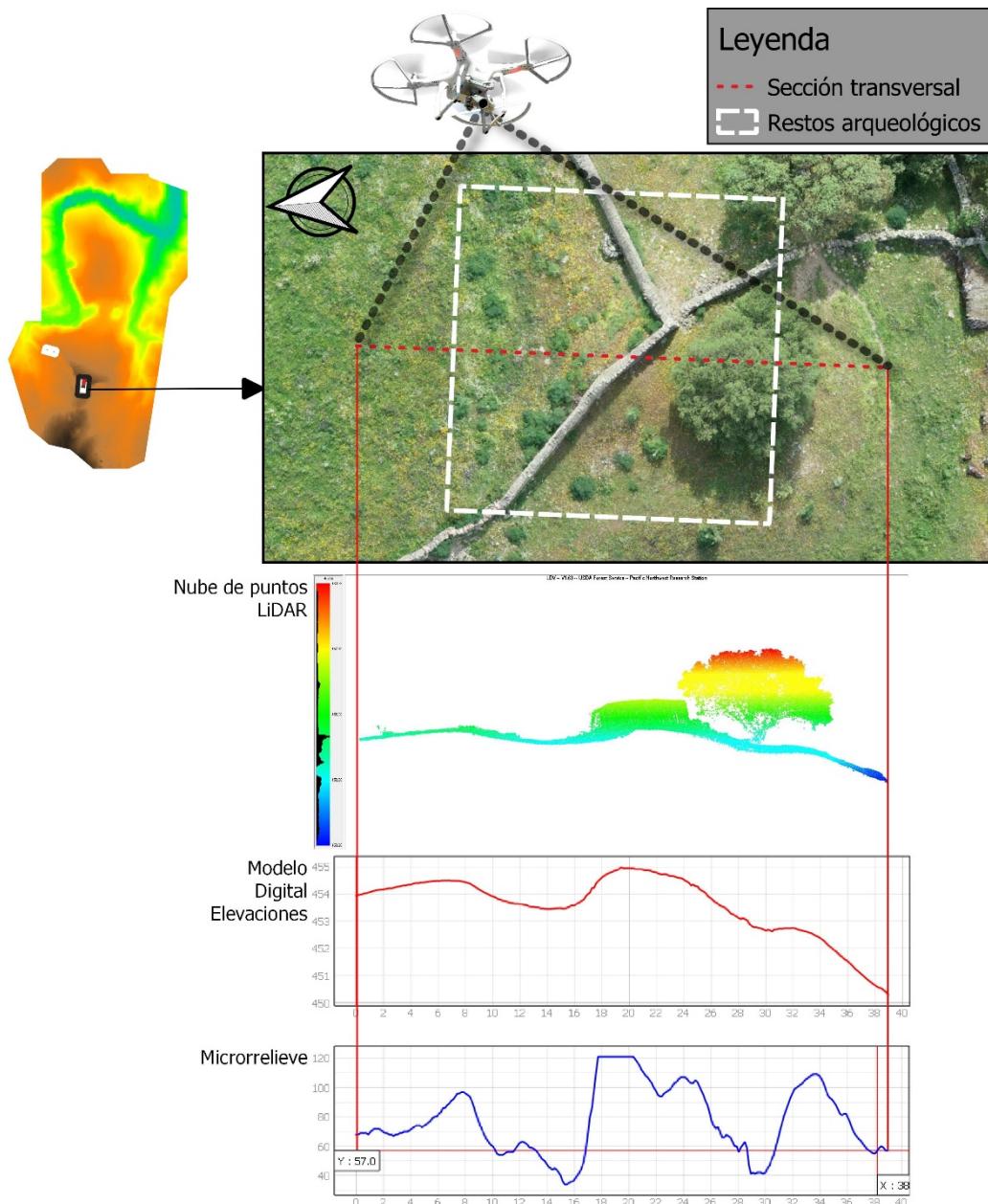


Figura 11: Comparativa en un perfil del recinto B de la nube de puntos LiDAR, el MDE del suelo desnudo y el microrrelieve generado por la herramienta SLM.

Son muchos los trabajos que emplean este tipo de técnicas para realizar los cambios y así detectar las estructuras arqueológicas enterradas. Así, en Moyes & Montgomery (2019) se identificaron anomalías topográficas negativas dentro de cada cuadrícula mediante el análisis del valor del índice LRM identificando cientos de posibles aperturas de cuevas en la Reserva Forestal de Chiquibul, desde grandes sumideros hasta pequeñas fisuras. O en Thompson (2020) 580 posibles plazuelas Mayas Clásicas fueron identificadas usando el sistema SLM.

4.4. INTERPRETACIÓN

Con la base sólida y fehaciente de los resultados del SLMR y con el contraste de informaciones de otras prospecciones llevadas a cabo en la zona, se procedió a la interpretación de los resultados.

En primer lugar, tal y como se aprecia en la Figura 11 el relieve la zona oeste del recinto B posee unas características de relieve que fueron interpretadas al detalle. Para ello, la elaboración del SLMR (Figura 12 (c)) fue una herramienta crucial para el análisis de ciertas anomalías que en la ortofotografía del PNOA (Figura 12 (a)) eran inapreciables, no pasando tan desapercibidos el caso del MDE del suelo desnudo (Figura 11 (b)). Tras un estudio exhaustivo de dicho SLMR se consideraron las zonas marcadas en la Figura 11 (d) para ser analizadas en mayor profundidad.

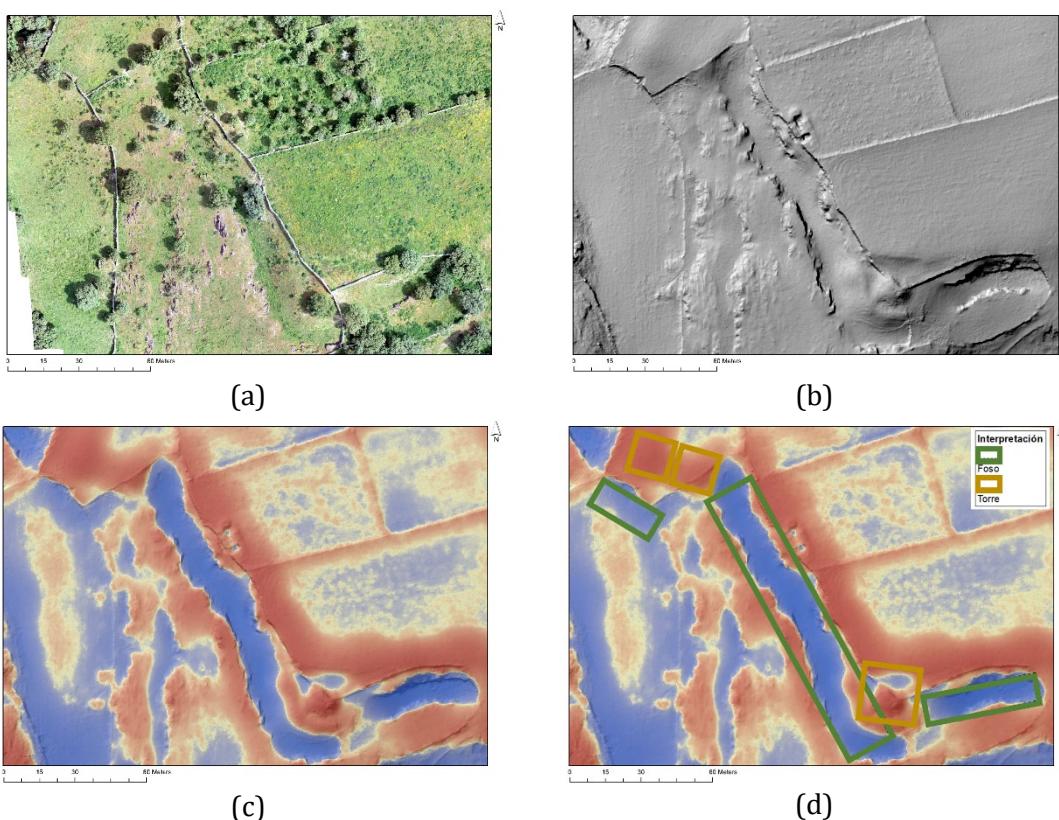


Figura 12: Interpretación de zonas con características destacables en el microrrelieve. (a) imagen de ortofoto del PNOA, (b) MDE del suelo desnudo, (c) SLMR y (d) zonas susceptibles de interpretación con fosos y prominencias realizados por el SLMR.

Analizando con detalle la figura 12 (d) se pueden apreciar los distintos fosos que rodean la muralla en tono verde y las prominencias de distintas torres resaltados en amarillo. De forma general se puede apreciar la estructura defensiva esta zona del castro formada por la combinación de fosos que anteceden a la muralla y la refuerzan. También se puede apreciar la disposición de las torres que flanquean los ángulos de esa zona oeste del recinto B.

Adentrandonos más en el microrrelieve del torreón suroeste, se puede apreciar en la Figura 13, dos microprominencias de forma cuadrada y separadas por una zona de menor elevación que puede hacer pensar que es la entrada en dirección noroeste del recinto B.

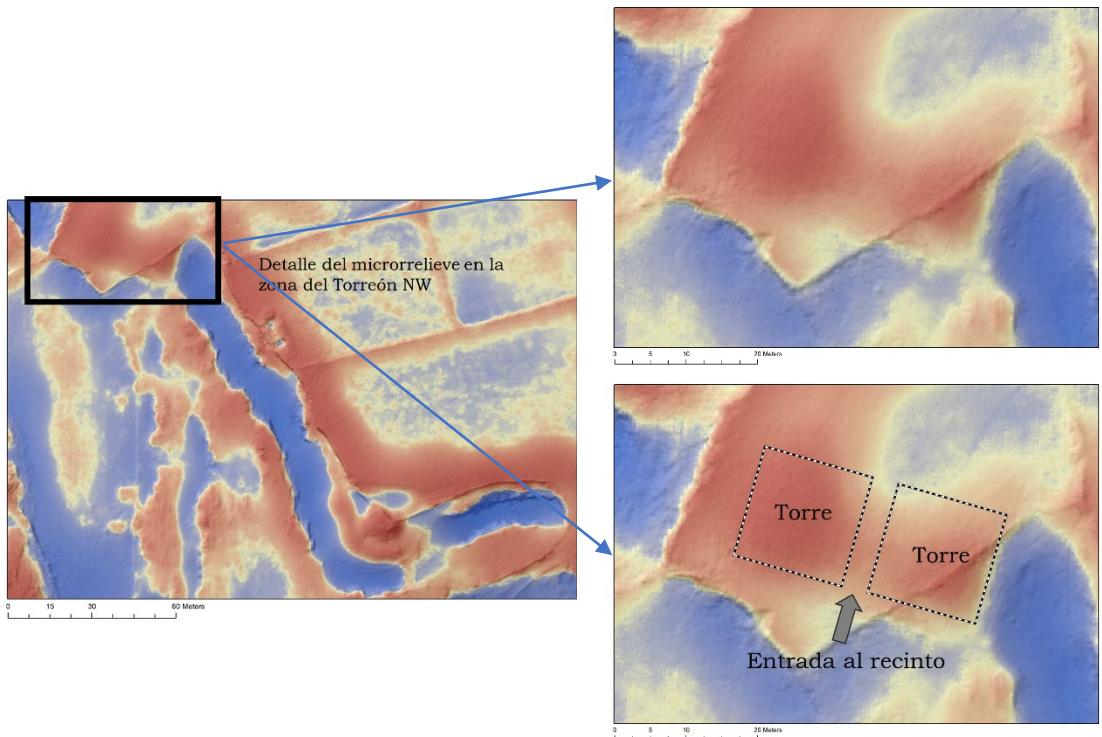


Figura 13: Interpretación del microrelieve del torreón noroeste del recinto B.

Otra zona muy característica que ha sido destacada por el SRLM son las perturbaciones en el microrelieve de la zona más suroeste del recinto B (Figura 14), que reflejan lo que podría ser el conjunto original de la muralla, torre y foso. También se aprecian alteraciones del microrelieve que podrían ser indicios de un nuevo foso en el interior de la muralla asociado a la reutilización de la torre.

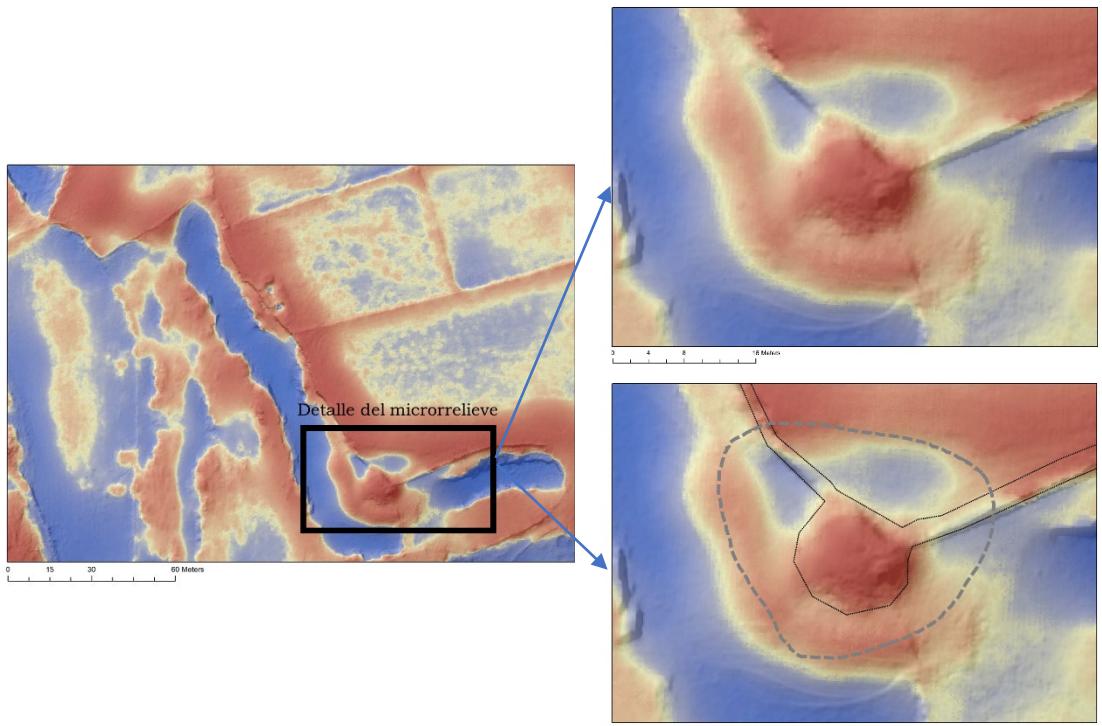


Figura 14: Interpretación del microrelieve del torreón sur del recinto B.

En cuanto al contraste de los resultados con otras fuentes de información derivadas del resto de prospecciones, en el caso del torreón noroeste del recinto B (Figura 15), se aprecia una correspondencia muy acusada entre los resultados de la teledetección y la posición de la prominencia detectada por el LiDAR. Además, la localización e incluso dirección de la entrada al recinto deducida de la interpretación del SLMR ha sido plenamente constatada por la excavación posterior en la que se confirmó la coincidencia de las tres prospecciones.

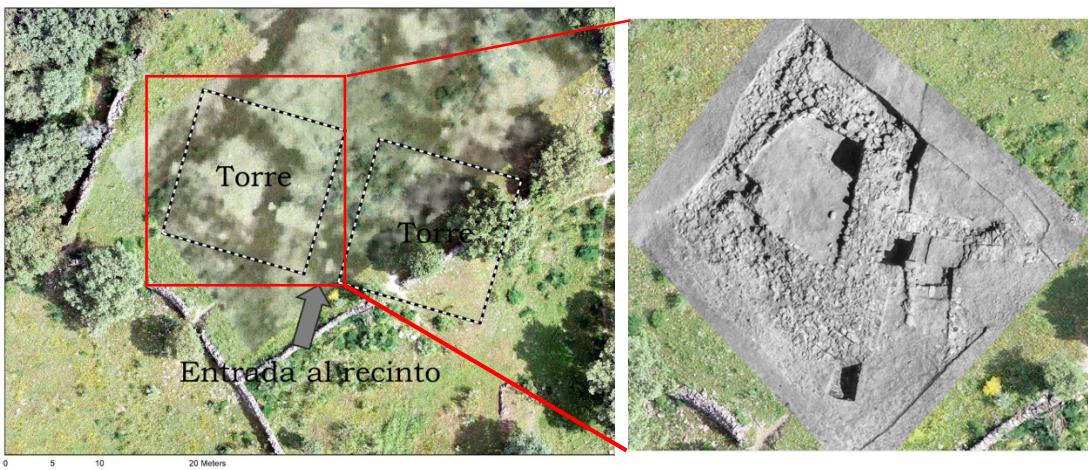


Figura 15: correspondencia entre los resultados de la teledetección, el microrrelieve evidenciado con LiDAR y la excavación posterior en torreón noroeste del recinto B.

En definitiva, cabe destacar que la combinación de los distintos métodos de prospección no invasiva, han ayudado en gran manera a la interpretación de la disposición general del castro. Se puede apreciar en la Figura 16 la combinación de la prospección geomagnética y el resultado del SLMR aborda de manera conjunta la comprensión urbanística del castro, agrupando la definición de la geometría de la arquitectura defensiva con la delimitación de los espacios habitados. De este modo, a pesar de que el estudio del microrrelieve sea per sé un análisis local, nos ayuda en gran manera a estudiar de forma más profunda y global la dimensión, el contexto y la estructura del castro en todo su conjunto.

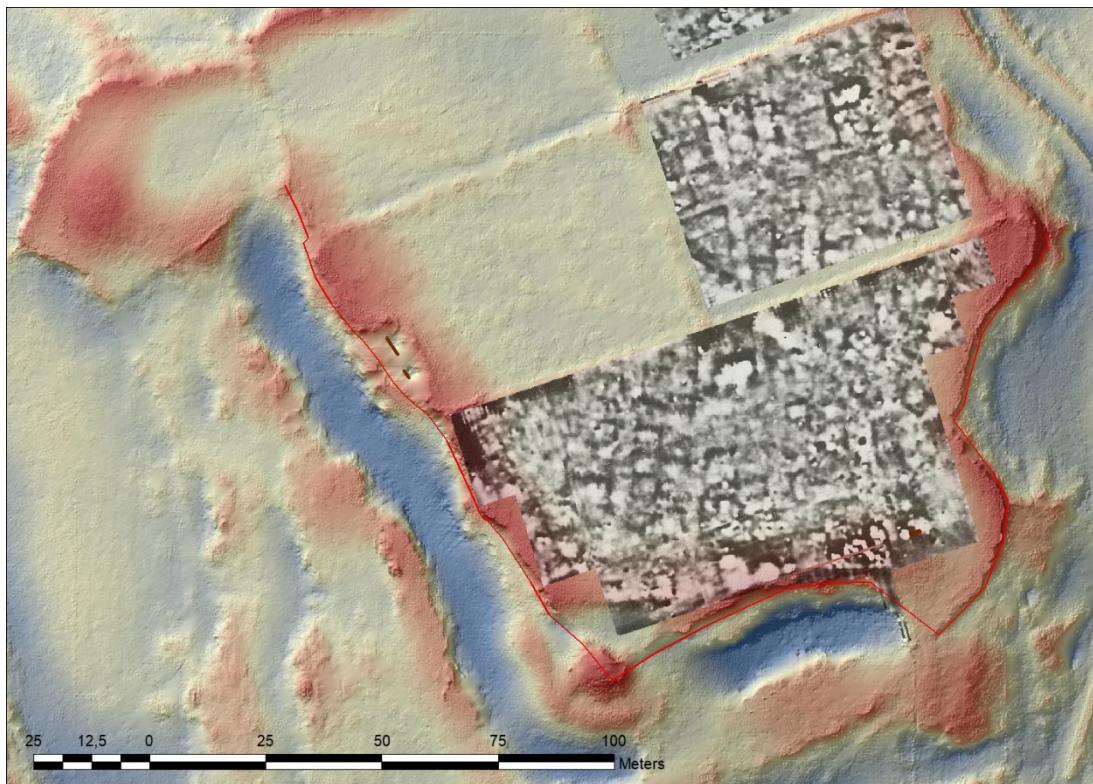


Figura 16: Combinación del análisis del microrrelieve con las prospecciones geomagnéticas en el recinto B.

Finalmente, gracias a la gran definición del MDE del suelo desnudo, se pudo elaborar una maqueta 3D (Figura 17) que ha sido empleada como herramienta de difusión y comunicación.

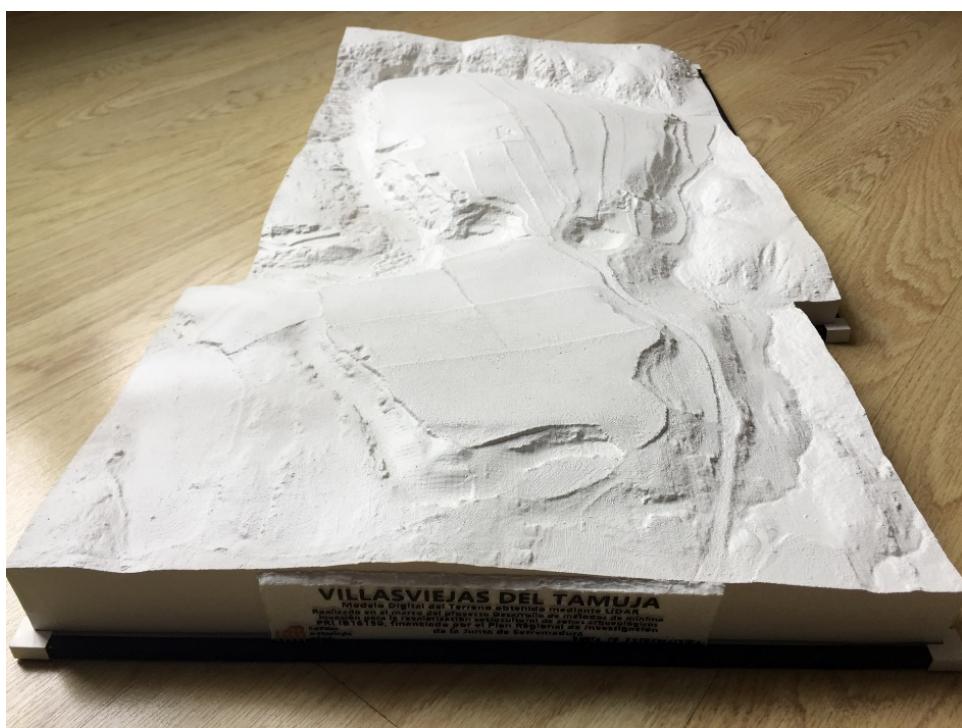


Figura 17: Maqueta 3D del castro.

5. CONCLUSIONES

En este capítulo, se ha abordado la aplicación de la tecnología LiDAR implementada en UAV para analizar con mayor detalle la micro-topografía del terreno, con fin de definir la geometría de los asentamientos en el yacimiento de Villasviejas del Tamuja.

El vuelo LiDAR de alta definición, a baja altura y con una gran densidad de puntos ha sido crucial en la delimitación del suelo desnudo, factor clave en este trabajo. Según afirman Risbøl & Gustavsen (2018) volar a baja altitud da como resultado una mejor capacidad de penetración en la vegetación y, por consiguiente, mejores posibilidades de filtrar los datos en los puntos de vegetación y de suelo desnudo.

Una vez filtrada la vegetación y estudiando en profundidad el microrrelieve mostrado por el MDE del suelo desnudo, se han podido delimitar los contornos de los recintos amurallados, identificando las obras de fortificación. Dicha identificación ha servido, junto con la combinación con otras técnicas de prospección llevadas a cabo en el castro, para la definición de geometría de la arquitectura defensiva: los muros, fosos, torres, etc., y para delimitación de espacios habitados.

Aunque la interpretación humana de los datos derivados de fuentes LiDAR jamás será relevada, sí existen investigaciones actualmente que tratan de detectar automáticamente los cambios en el microrrelieve, por ejemplo, mediante redes neuronales (Bundzel et al., 2020). Dichos estudios ayudarán en gran medida a la interpretación del microrrelieve, ya que cuanto más exactas sean las localizaciones y geometrías de los cambios, mejor será la interpretación que se pueda hacer de ellas, tanto de forma aislada como en el conjunto del paisaje.

6.- REFERENCIAS

- Bundzel, Marek, Jaščur, Miroslav, Kováč, Milan, Lieskovský, Tibor, Sinčák, Peter, & Tkáčik, Tomáš. (2020). Semantic Segmentation of Airborne LiDAR Data in Maya Archaeology. *Remote Sensing*, 12(22), 3685.
- Cohen, Anna, Klassen, Sarah, & Evans, Damian. (2020). Ethics in Archaeological Lidar. *Journal of Computer Applications in Archaeology*, 3(1), 76-91. doi: 10.5334/jcaa.48
- Costa-García, José Manuel, Fonte, João, & Gago Mariño, Manuel. (2019). The reassessment of the Roman military presence in Galicia and Northern Portugal through digital tools: archaeological diversity and historical problems.
- Chase, Adrian SZ, Chase, Diane Z, & Chase, Arlen F. (2017). LiDAR for archaeological research and the study of historical landscapes *Sensing the Past* (pp. 89-100): Springer.
- Chase, Arlen F., Chase, Diane Z., Fisher, Christopher T., Leisz, Stephen J., & Weishampel, John F. (2012). Geospatial revolution and remote sensing LiDAR in Mesoamerican archaeology. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(32), 12916-12921. doi: 10.1073/pnas.1205198109
- Chase, Arlen F., Chase, Diane Z., Weishampel, John F., Drake, Jason B., Shrestha, Ramesh L., Slatton, K. Clint, . . . Carter, William E. (2011). Airborne LiDAR, archaeology, and the ancient Maya landscape at Caracol, Belize. *Journal of Archaeological Science*, 38(2), 387-398. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jas.2010.09.018>
- ESRI. (2011). Documentation Manual. Redlands, CA: Release 10.
- Hesse, R. (2010). LiDAR-derived local relief models-a new tool for archaeological prospection. *Archaeological Prospection*, 17(2), 67-72. doi: 10.1002/arp.374
- Kokalj, Žiga, & Hesse, Ralf. (2017). *Airborne laser scanning raster data visualization: a guide to good practice* (Vol. 14): Založba ZRC.

- Luo, Lei, Wang, Xinyuan, Guo, Huadong, Lasaponara, Rosa, Zong, Xin, Masini, Nicola, . . . Yao, Ya. (2019). Airborne and spaceborne remote sensing for archaeological and cultural heritage applications: A review of the century (1907–2017). *Remote Sensing of Environment*, 232, 111280. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111280>
- Masini, Nicola, Gizzi, Fabrizio Terenzio, Biscione, Marilisa, Fundone, Vincenzo, Sedile, Michele, Sileo, Maria, . . . Lasaponara, Rosa. (2018). Medieval archaeology under the canopy with lidar. the (re) discovery of a medieval fortified settlement in southern Italy. *Remote sensing*, 10(10), 1598.
- McGaughey, Robert J. (2009). FUSION/LDV: Software for LIDAR data analysis and visualization. *US Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station: Seattle, WA, USA*, 123(2).
- McGaughey, Robert J. (2016). Manual of FUSION/LDV: software for LIDAR data analysis and visualization. *United State, Department of Agriculture, Forest services, research station*.
- Mlekuž, Dimitrij. (2013). Skin deep: LiDAR and good practice of landscape archaeology *Good Practice in Archaeological Diagnostics* (pp. 113-129): Springer.
- Monterroso-Checa, Antonio. (2017). Remote sensing and archaeology from Spanish LiDAR-PNOA: identifying the amphitheatre of the roman city of Torreparedones (Córdoba-Andalucía-Spain).
- Monterroso-Checa, Antonio. (2019). Geoarchaeological Characterisation of Sites of Iberian and Roman Cordoba Using LiDAR Data Acquisitions. *Geosciences*, 9(5), 205.
- Moyes, Holley, & Montgomery, Shane. (2019). Locating cave entrances using lidar-derived local relief modeling. *Geosciences*, 9(2), 98.
- Ramírez Galán, Mario. (2020). If the archaeological context is missing: the use of LiDAR prospection to uncover features at the medieval Christian position on Malvecino Hill (Alcalá de Henares, Spain). *Archaeological Prospection*, n/a(n/a). doi: <https://doi.org/10.1002/arp.1791>
- Rapidlasso GmbH. (2013). LAStools Rapid LiDAR Processing. Gilching, Germany. Retrieved from <http://www.rapidlasso.com>
- Risbøl, Ole, & Gustavsen, Lars. (2018). LiDAR from drones employed for mapping archaeology – Potential, benefits and challenges. *Archaeological Prospection*, 25(4), 329-338. doi: <https://doi.org/10.1002/arp.1712>
- Štular, Benjamin, & Ložić, Edisa. (2020). Comparison of Filters for Archaeology-Specific Ground Extraction from Airborne LiDAR Point Clouds. *Remote Sensing*, 12(18), 3025.
- Thompson, Amy E. (2020). Detecting Classic Maya Settlements with Lidar-Derived Relief Visualizations. *Remote Sensing*, 12(17), 2838.