



**HAL**  
open science

## **Arqueo 2.0. Renovación metodológica de la prospección arqueológica de zonas de montaña**

Carine Calastrenc, François Baleux, Nicolas Poirier, Christine Rendu, Pierre Campmajo, Nicolas Dobigeon, Muriel Llubes, Magali Philippe, Marie-Claude Bal, Nicolas Mellado, et al.

### ► To cite this version:

Carine Calastrenc, François Baleux, Nicolas Poirier, Christine Rendu, Pierre Campmajo, et al.. Arqueo 2.0. Renovación metodológica de la prospección arqueológica de zonas de montaña. *Treballs d'Arqueologia*, 2023, *Mètodes i tècniques per a l'arqueologia de muntanya: aplicacions en àmbits pirinencs*, 26, pp.95-109. 10.5565/rev/tda.153 . hal-04335772

**HAL Id: hal-04335772**

**<https://hal.science/hal-04335772>**

Submitted on 11 Dec 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Arqueo 2.0. Renovación metodológica de la prospección arqueológica de zonas de montaña

Carine Calastrenc<sup>1</sup>, François Baleux<sup>2</sup>, Nicolas Poirier<sup>2</sup>, Christine Rendu<sup>3</sup>, Pierre Campmajo<sup>2</sup>, Nicolas Dobigeon<sup>4</sup>, Nicolas Mellado<sup>5</sup>, Claire Marais-Sicre<sup>6</sup>, Marie-Claude Bal<sup>7</sup>, Magali Philippe<sup>7</sup>, Muriel Llubes<sup>8</sup>



© de las autoras

Recibido: 06/06/2023

Acceptado: 07/06/2023

## Resumen

Hicieron falta varias décadas de interacción y diálogo entre las ciencias humanas y las ciencias medioambientales, además de una serie de avances metodológicos, para que los espacios de altura fueran considerados algo más que inmutables y átonos. Sometidos a un cuestionamiento interdisciplinario integrado, revelan no una, sino muchas historias y dinámicas complejas. Historizar las zonas de montaña permite invertir el punto de vista global sobre las sociedades pirenaicas y reconsiderar los sistemas de valles. Es evidente que los equipos que participan en esta línea de investigación se enfrentan al problema de adquirir información primaria. Siendo requisito indispensable de toda investigación arqueológica, la prospección en alta montaña presenta especificidades propias y desafíos metodológicos particulares. Ahora es posible pensar en nuevos procedimientos de adquisición de información arqueológica basados en cinco grandes avances: la diversificación y miniaturización de los sensores, que permiten transportarlos en drones; la reducción significativa de los costes de adquisición de los vehículos aéreos; un entorno de vuelo cada vez más seguro; las herramientas de tratamiento de datos y el trabajo sobre la ergonomía informática, y la apertura de posibilidades que ofrece la inteligencia artificial, que permite prever posibilidades futuras para optimizar la detección de restos arqueológicos en entornos de gran altitud.

**Palabras clave:** arqueología de alta montaña; métodos no invasivos; prospección arqueológica

## Abstract. *Arqueo 2.0: New methods for archaeological surveys in mountain areas*

It took several decades of interaction and dialogue between human sciences and environmental sciences and a number of methodological advances for high altitude spaces to be considered as

1. CNRS. Laboratorio TRACES (UMR 5608) / FRAMESPA (UMR 5136). carine.calastrenc@cnrs.fr
2. CNRS. Laboratorio TRACES (UMR 5608). francois.blaeux@cnrs.fr; nicolas.poirier@cnrs.fr; pierre.campmajo@wanadoo.fr
3. CNRS. Laboratorio FRAMESPA (UMR 5136). christine.rendu@cnrs.fr
4. Toulouse INP. Laboratorio IRIT (UMR 5505). nicolas.dobigeons@toulouse-inp.fr
5. CNRS. Laboratorio INP (UMR 5505). nicolas.mellado@irit.fr
6. Universidad Paul Sabatier. Laboratorio CESBIO (UMR 5123). claire.marais-sicre@cesbio.cnrs.fr
7. Universidad de Toulouse-Jean Jaurès. Laboratorio GEODE (UMR 5602). marie.bal@univ-tlse2.fr; magali.philippe@univ-tlse2.fr
8. Universidad Paul Sabatier. Laboratorio GET (UMR 5563). muriel.llubes@get.omp.eu

something other than immutable and atonic. Subjected to integrated interdisciplinary analysis, they reveal not one but many complex histories and dynamics. Historicising mountain areas reverses the conventional view of Pyrenean societies, and offers a reconsideration of valley systems. It is clear that teams involved in this type of research face the problem of acquiring primary information. Archaeological prospection is an essential prerequisite for any archaeological research in the high mountains, with its own specific issues and particular methodological challenges. It is now possible to consider new procedures for acquiring archaeological information, based on five major advances: the diversification and miniaturisation of sensors, allowing them to be transported on drones; a significant reduction in the acquisition costs of aerial vehicles; an increasingly safe flight environment; data processing tools and work on computer ergonomics; and the opening up of possibilities offered by artificial intelligence, offering the promise of future possibilities for optimising the detection of archaeological remains in high-altitude environments.

**Keywords:** high mountain archaeology; non-invasive methods; archaeological survey

CALASTRENC, Carine et al. (2023). «Arqueo 2.0. Renovación metodológica de la prospección arqueológica de zonas de montaña». *Treballs d'Arqueologia*, 26, 95-109. DOI: 10.5565/rev/tda.153

## 1. Mejora de los métodos de prospección en la alta montaña

Las sociedades, los entornos y los ecosistemas de las zonas montañosas fueron excluidos durante mucho tiempo del escrutinio arqueológico, ya que se consideraban inmutables y atemporales. Hicieron falta tres décadas de interacción y diálogo entre las ciencias humanas y las ciencias naturales, así como una serie de avances metodológicos y técnicos, para que estos territorios fueran considerados de forma diferente. Hoy en día, sometidos a un cuestionamiento interdisciplinario integrado (Le Couédic et al., 2016; Rendu, 2021), estos espacios revelan poco a poco no una, sino muchas historias, mucho más largas y complejas de lo que se pensaba. El método de trabajo utilizado se basa en la adquisición de datos arqueológicos, históricos, etnológicos y paleo ambientales y en la articulación de las distintas se-

cuencias cronológicas. Estos datos revelan cambios en las economías de montaña, así como procesos de intensificación o formas originales de explotación extensiva.

Así, durante los últimos 30 años, los entornos de montaña europeos (Pirineos, Alpes, Cantabria, Cerdeña, Córcega, Sicilia, etc.) han proporcionado un marco innovador para la investigación sobre la dinámica de los métodos de gestión de recursos naturales y la evolución de los sistemas de pastoreo en zonas de montaña a largo plazo (lista no exhaustiva: Bal et al., 2010; García Casas, 2018; Gassiot, 2016; Gassiot et al., 2010, 2012, 2013, 2016; Guedon, 2006; Guillot, 2017; Le Couédic et al., 2014; Mocchi et al., 2005, 2008; Orengo, 2010; Palet et al., 2016; Saint-Sever et al., 2016; Reitmaier, 2010, 2013a, 2013b; Rendu y Campmajo, 1995; Rendu et al., 1995, 2005, 2006, 2009, 2012, 2015, 2016; Walsh et al., 2007, 2010; Walsh y Mocchi, 2011).

Los equipos que participan en estos programas parten de una base temática, epistemológica y metodológica común, que consiste en centrarse en «sectores objetivos» espacialmente restringidos donde se llevan a cabo estudios arqueológicos, medioambientales, históricos y etnológicos. Estos proyectos se basan en asociaciones colaborativas con servicios de patrimonio, autoridades locales, parques nacionales y regionales y reservas naturales. Los distintos grupos de investigación que participan en este trabajo se enfrentan también al problema de la adquisición de información primaria a través de la prospección.

En los últimos años se ha generalizado el uso de DGPS (Differential Global Position System) y el tratamiento de los datos en SIG (sistema de información geográfica) para capturar información sobre el terreno y optimizar el trabajo de prospección. Sin embargo, aún existen dos grandes obstáculos metodológicos.

- ¿Cómo superar el marco geográfico de una unidad de terreno como un pasto o una montaña para abordar arqueológicamente zonas más amplias y poder desarrollar así un verdadero enfoque diacrónico comparativo de las trayectorias de los territorios a la escala de cordilleras?
- ¿Cómo disponer de un inventario estadísticamente significativo y sólido que pueda incluir tanto las estructuras visibles en la superficie como las cubiertas por la vegetación, por los depósitos coluviales, las elaboradas con materiales precederos o destruidas por actividades humanas?

El objetivo del proyecto de investigación TAHMM (Teledetección Arqueoló-

gica en Alta y Media Montaña) es utilizar recursos técnicos y metodológicos no invasivos para optimizar los trabajos de detección arqueológica en alta montaña. Se usan desde imágenes obtenidas por satélite hasta análisis químicos del suelo, estableciendo un enfoque multidisciplinario y multitemporal a distintas escalas geográficas. Todos estos datos se implementan en una cadena de procesamiento que incluye inteligencia artificial. Este programa está dirigido por los laboratorios TRACES (UMR 5608) y FRAMESPA (UMR 5136). Además, se apoya en un consorcio que reúne arqueología, observación de la Tierra, informática, geofísica y química de los suelos (laboratorios TRACES, FRAMESPA, CESBIO, IRIT, CNES, GET y GEODE). Los miembros de este consorcio de investigación utilizan los equipos científicos de la plataforma técnica TIG-3D (teledetección, imagen, geomática, 3D) de los laboratorios ArchéoScience TRACES (UMR 5608) y GEODE (UMR 5602). El programa TAHMM cuenta con el apoyo financiero recurrente de la DRAC, el Parque Natural de Aulon, el Consejo Departamental de Altos Pirineos y el apoyo puntual de la ZA PYGAR y el Parque Nacional de los Pirineos.

## 2. Hacia un análisis no invasivo de los pastos de montaña

El programa TAHMM tiene fines principalmente metodológicos, pretende definir las mejores herramientas y procedimientos de tratamiento de datos para combinar varias fuentes de información en la misma zona de estudio. Se tiene previsto trabajar con una resolución espacial (tamaño de píxel), espectral (número de

bandas espectrales), radiométrica (sensibilidad del sensor) y temporal (repetibilidad de las adquisiciones) alta o muy alta.

El programa TAHMM tiene cuatro zonas de estudio. En las dos primeras se llevaron a cabo investigaciones que hoy en día son referentes para la arqueología de montaña. Se trata de la montaña de Enveitg, en la región de los Pirineos Orientales, donde se llevaron a cabo trabajos de investigación de 1985 a 2003 por Christine Rendu (DR CNRS, Laboratorio FRAMESPA – UMR 5136) y el equipo GRAC (Groupement de Recherche Archéologique de Cerdagne); y el pastizal de Anéou, en la región de los Pirineos Atlánticos, estudiado entre 2004 y 2011 (Calastrenc et al., 2004; Calastrenc y Le Couédic, 2005; Calastrenc y Le Couédic, 2006; Calastrenc et al., 2007). En las otras dos zonas no ha existido investigación arqueológica previa. Se trata del territorio de la Reserva Natural de Aulon y el sector de Liantran, en las estribaciones de Estaing, localizados en los Altos Pirineos.

Estas cuatro zonas de estudio se caracterizan por su heterogeneidad geográfica y medioambiental. La montaña de Enveitg, situada en la vertiente sur de los Pirineos, se caracteriza por el desarrollo de pequeñas zonas de pinar y la progresiva cobertura de los pastizales por retamas. El territorio de la Reserva Natural de Aulon se encuentra en la vertiente norte de los Pirineos, en un sector muy escarpado, y está marcado por una recuperación de la vegetación que ve crecer rododendros y enebros. En cuanto a *l'estive d'Anéou*, se trata de una vasta zona herbosa muy abierta hacia el este, situada al borde de la frontera franco-española de los Pirineos Atlánticos. Por último, el sector conocido como Liantran, en la comuna de Estaing, está cubierto en un 80% por un caos rocoso (figura 1).

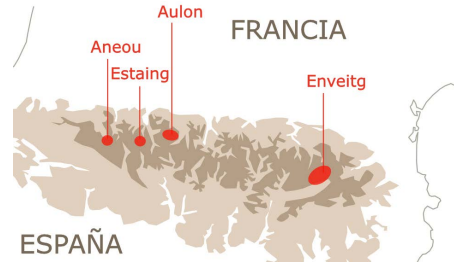


Figura 1. Localización de las zonas de trabajo del programa de investigación TAHMM (© C. Calastrenc, CNRS).

### 3. De la montaña a la molécula

Revisar los métodos de prospección exige considerar las herramientas disponibles que pueden utilizarse. Este programa optó por el uso de métodos no invasivos. Las técnicas escogidas fueron la teledetección por satélite y por dron, tecnología lidar por dron, fotogrametría por dron y por satélite, imágenes multispectrales por dron, termografía aérea por dron, georradar, sensor magnético y análisis químico del suelo por fluorescencia de rayos X. Todos estos dispositivos se utilizan a diferentes escalas (del territorio a la molécula química) (Calastrenc et al., 2018, 2019, 2020, 2021, 2022).

#### 3.1. Teledetección por satélite

En la actualidad, los arqueólogos utilizan principalmente imágenes de satélite para la fotointerpretación, lo que requiere mucho tiempo de análisis. Se centran sobre todo en objetos arqueológicos de gran tamaño. Como ejemplo de este tipo de aplicaciones, podríamos citar las fortificaciones de la antigua ciudad de Sagalassos, en Turquía (De Laet et al., 2009). Las imágenes por satélite se pueden utilizar también para el estudio de objetos ar-

queológicos aislados elaborados con materiales distintos a los del entorno, como los kurganes (tumbas) de las montañas Altai (Chen et al., 2021). También se han realizado trabajos en zonas de montaña sobre la detección automática o semiautomática de yacimientos arqueológicos relacionados con la ganadería mediante el tratamiento de imágenes por satélite. En la montaña Silvretta en Austria (Lambers y Zingman, 2013a, 2013b; Zingman et al., 2013a, 2013b, 2014, 2015, 2016) el equipo de investigación dirigido por Thomas Reitmaier trabajó en la detección semiautomática de estructuras pastorales a gran altitud. La aplicación de algoritmos de segmentación de imágenes y detección de formas permitió identificar estructuras sencillas, bien conservadas (muros elevados) y aisladas en zonas cubiertas de hierba. Sin embargo, estos investigadores se enfrentaron a un problema: la resolución espacial, radiométrica y espectral de las imágenes de satélite disponibles gratuitamente no era suficiente para realizar una identificación en detalle de posibles yacimientos arqueológicos.

Aún quedan varios obstáculos por superar para utilizar de forma rutinaria las imágenes por satélite en la arqueología de paisajes de alta montaña: ¿cómo identificar todas las estructuras arqueológicas en una zona de pasto determinada cuando los planos, los tamaños, los estados de conservación y las tasas de cobertura vegetal difieren? Para intentar responder a esta pregunta, los miembros del programa TAHMM se pusieron en contacto con el laboratorio Observación de la Tierra (Lab'OT) del CNES y, en particular, con Luc Lapierre, ingeniero de imágenes por satélite, y Olivier Queyruy, jefe del departamento Lab'OT, con el fin de establecer una colaboración en para abordar estos temas.

### 3.2. *Sobrevolando los pastos de montaña*

El uso de drones no solo posibilita disponer de una gama de sensores cada vez más amplia, sino que también permite obtener toda una serie de datos aplicables a la investigación arqueológica a los que antes era difícil acceder. Los UAV facilitan la realización de adquisiciones a altitudes inferiores a las de otras aeronaves (aviones, ultraligeros, etc.). Las imágenes obtenidas muestran entonces una resolución espacial mucho más fina, lo que permite leer mejor los indicadores de la presencia de artefactos. La utilización de vehículos aéreos no tripulados en arqueología para la identificación y la descripción de restos permite superar los límites actuales de detección. (Poirier et al., 2013, 2017). Dadas todas estas ventajas, los drones en arqueología son cada vez más habituales. Sin embargo, su uso suele limitarse a la fotografía documental o la fotogrametría. El tratamiento de los datos rara vez va más allá de la simple observación de la presencia o ausencia de restos en las ortofotografías. El programa TAHMM pretende aprovechar al máximo los datos de los distintos sensores TIG-3D (teledetección, imágenes, geomática, 3D) para la detección de elementos arqueológicos. Las técnicas utilizadas son las detalladas a continuación.

#### 3.2.1. *Fotogrametría*

Como en muchos trabajos de arqueología, la fotogrametría a partir de imágenes aéreas de drones se utiliza para obtener ortofotografías y modelos digitales del terreno (MDT) de detalle que apoyan la lectura, la descripción y el análisis de los restos arqueológicos. En el marco del programa de investigación TAHMM se han utilizado diversos métodos de visualización de MDT para afinar la identifica-

ción arqueológica (Kokalj y Somrak, 2019; Kokalj y Hesse, 2017; Zaksek et al., 2011). Actualmente se han probado 31 métodos de visualización, y algunos de ellos están totalmente integrados en una rutina de tratamiento, como el SLRM (Simple Local Relief Model) o el SVF (SkyView Factor).

### 3.2.2. Termografía

La técnica de disparo termográfico utilizada en el programa de investigación TAHMM se basa en las recomendaciones establecidas por los investigadores de los programas de investigación Archéodrone y REPERAGE (dir. Nicolas Poirier, CR CNRS, Laboratorio TRACES) (Poirier et al., 2017; Poirier, 2018, 2021). De forma general, se trata de realizar tomas cenitales durante la mayor amplitud térmica (figura 2). El procedimiento de tratamiento de imágenes térmicas desarrollado por los miembros del programa TAHMM fue objeto de un artículo publicado en 2019 en la revista *ArchéoSciences* (Calastrenc, 2019).

### 3.2.3. Imágenes multiespectrales

En septiembre de 2022 se llevaron a cabo las primeras adquisiciones multiespectrales. El objetivo era determinar las posibilidades del UAV Phantom 4 y obtener una visión general de los resultados. Los diferentes índices de vegetación probados para identificar el estrés hídrico de las plantas no resultaron eficaces. La época del año en que fueron adquiridas (septiembre) añadió un problema adicional, ya que la vegetación estaba en pleno crecimiento. El objetivo de estas primeras pruebas (figura 3) fue identificar todos los escollos, limitaciones y ventajas de este equipo para poder realizar adquisiciones eficaces y concluyentes al año si-

guiente. Los primeros tratamientos y observaciones indicaron que, en las zonas montañosas, en septiembre, el NDVI (índice de vegetación de diferencia normalizada) permite diferenciar las especies vegetales (rododendros, arándanos, enebros y musgos). Además, mostraban las partes secas de las plantas, lo que permitía identificar el espacio entre ellas.

### 3.2.4. Lidar

Los datos lidar son cada vez más habituales en arqueología. Un ejemplo de su aplicación lo encontramos en las investigaciones realizadas por Jean Pierre Toumazet en el Puy de Dôme (Toumazet et al., 2017) A partir de datos lidar adquiridos por avión se desarrolló un procedimiento de detección automática de infraestructuras pastorales que se caracterizaban por una huella espacial muy marcada, así como por presentar una forma simple y «estandarizada». Este trabajo se basó en la correspondencia de modelos y la clasificación orientada a objetos. La identificación de estructuras que mantienen una cierta elevación es fácil usando datos lidar adquiridos desde dron. Sin embargo, esto se complica cuando el terreno está cubierto de vegetación baja y leñosa, como el rododendro, el enebro, la retama o el arándano. En estos casos es necesario aplicar métodos de clasificación habituales, que solo permiten distinguir algunos elementos arquitectónicos ocultos bajo la vegetación (de 58 estructuras, 7, es decir, el 12% son identificables). En el marco del consorcio creado este año, se realizó un máster de seis meses bajo la supervisión conjunta de los laboratorios CESBIO, IRIT y TRACES (supervisado por Claire Marais-Sicre —CESBIO—, Nicolas Mellado —IRIT— y Carine Calastrenc —TRACES—). Este estudiante



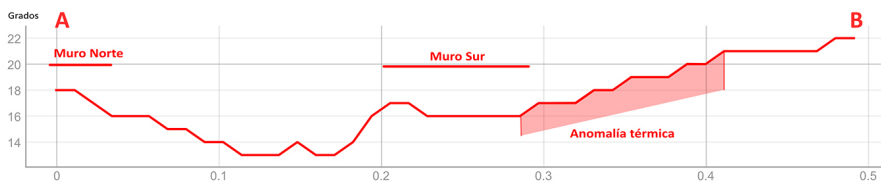
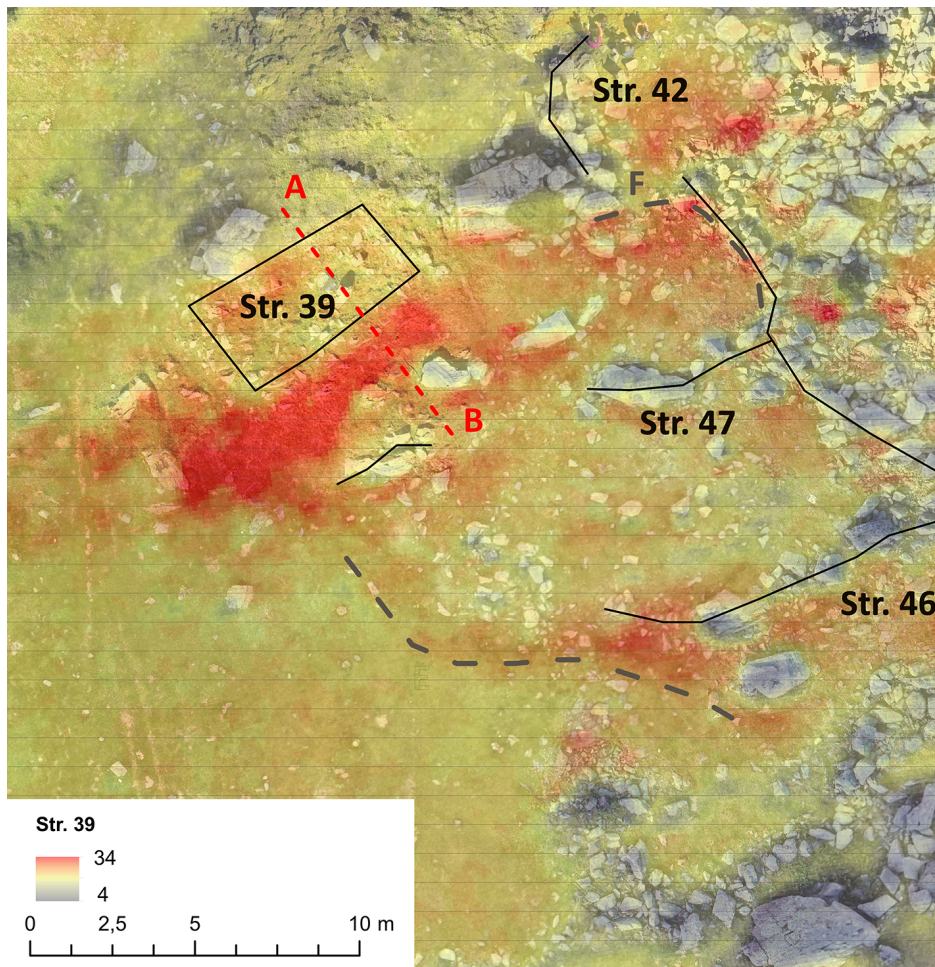
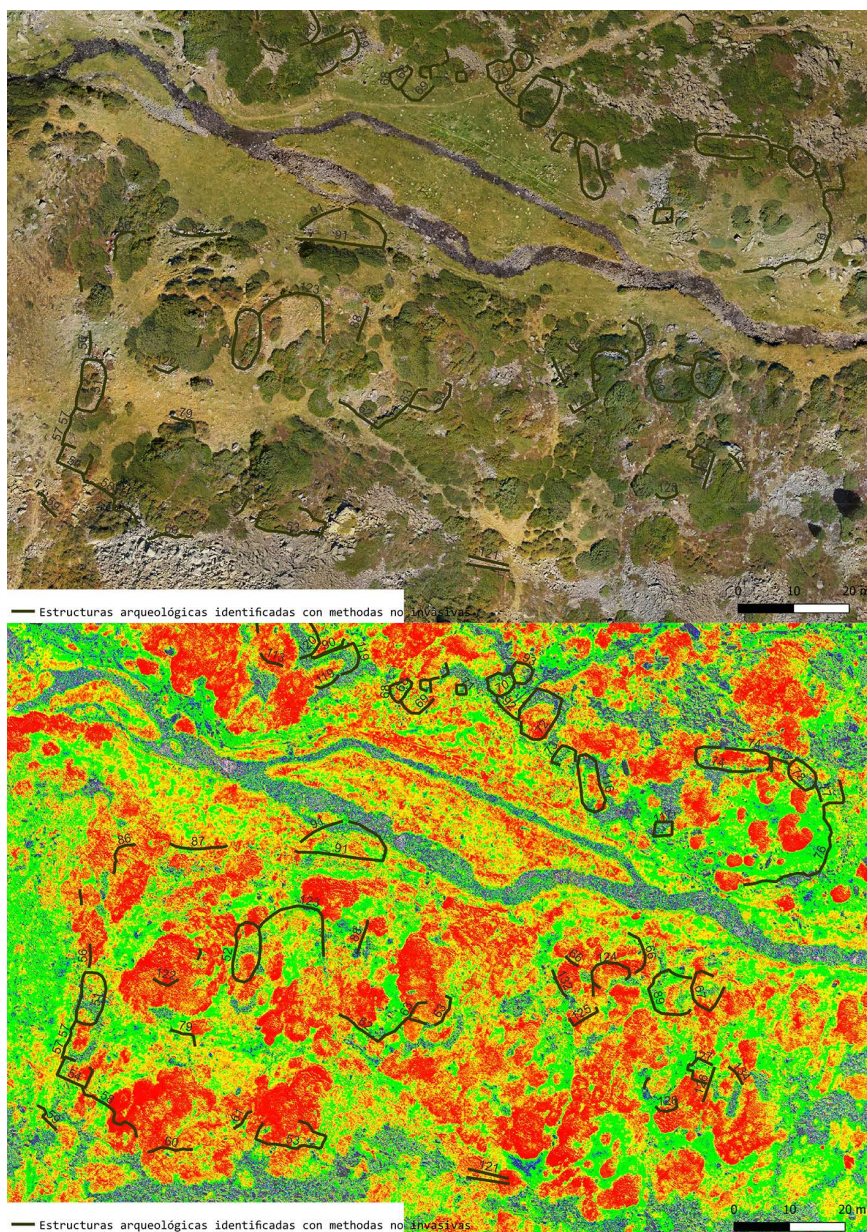


Figura 2. Estudio termográfico hecho con un dron del complejo pastoral compuesto por las estructuras n.º 95-103 y 155 (Reserva Natural de Aulon - Altos Pirineos) (© C. Calastrenc CNRS).





**Figura 3.** Estudio multispectral de una parte de un complejo pastoral (Reserva Natural de Aulon - Altos Pirineos). Arriba: estructuras arqueológicas visibles en las imágenes aéreas tomadas por el dron; abajo: localización de las estructuras arqueológicas en el cálculo NDVI realizados por el dron (© C. Calastrenc CNRS).

se encargará de definir un procedimiento de clasificación de puntos de suelo y vegetación leñosa, con el fin de obtener una detección arqueológica lo más completa posible.

### 3.3. Geofísica

Una vez identificadas las «anomalías» del terreno por métodos aéreos, se utilizan herramientas geofísicas terrestres (georradar y magnetómetro) para completar y afinar la identificación de las estructuras arqueológicas. El georradar proporciona una representación tridimensional de los contrastes de permitividades o conductividades encontrados por las ondas electromagnéticas emitidas y permite distinguir discontinuidades que pueden corresponder a estructuras arqueológicas. Esta herramienta fue utilizada por Ted Gracson en Laurrau (Pirineos Atlánticos) en el marco de las encuestas realizadas por Mélanie Le Couédic en 2014 (Le Couédic et al., 2014). Los resultados obtenidos en el estudio mencionado mostraron el potencial de aplicación de georradar, al revelar en algunos yacimientos anomalías que podrían corresponder a restos de construcciones enterradas. Complementando al georradar, el magnetómetro se utiliza para cartografiar anomalías magnéticas debidas a la presencia de objetos enterrados y/o de materiales que han sufrido una alteración térmica.

### 3.4. Detectar lo invisible

Por último, los análisis de espectrometría de fluorescencia de rayos X (FRX) se utilizan para determinar los elementos químicos que componen una muestra (Thirion-Merle, 2014). El objetivo es localizar zonas de estabulación del ganado que no

se materializan en elementos superficiales, debido a que sus estructuras estaban elaboradas con materiales perecederos. Los resultados de las prospecciones pedestres muestran a menudo una gran proporción de cabañas aisladas sin un recinto visible cercano. Sin embargo, estudios etnográficos (Krugger, 1935, 1939a, 1939b; Chevalier, 1954; Buisan, 1999, 2001, 2002; Ratio, 2001; Rendu, 2003a; Le Couédic, 2010) muestran que los corrales o cercados son importantes en el día a día de la actividad ganadera en los pastos de montaña. Permiten vigilar todo o parte del ganado por la noche, cuidarlo y, si es necesario, ordeñarlo. Las excavaciones arqueológicas del sector de La Padria en Enveitg, llevadas a cabo por Christine Rendu (Rendu, 2003a), demostraron que en el interior de los recintos podían realizarse actividades auxiliares que requerían chimeneas. El FRX, al identificar y cuantificar los elementos químicos presentes en el suelo, permite localizar, en superficie y en profundidad, las variaciones de los niveles de los elementos trazadores de los excrementos animales: fósforo (P), nitrógeno (N), magnesio (Mg), calcio (Ca), potasio (K) (Fardeau y Martínez, 1996; Bloor et al., 2012) y tener así una percepción de la movilidad de las zonas de estabulación en el tiempo y en el espacio.

## 4. Sondeos de verificación

La primera zona elegida para implementar el programa TAHMM fue el llano de Auloueilh, en la Reserva Natural de Aulon. La adquisición de datos requirió 8 días de trabajo de campo repartidos a lo largo de varios años (el motivo fue que el despliegue de los equipos se hizo progresivamente). A partir de los datos adquiri-

dos, fue posible identificar 157 estructuras arqueológicas. Todas estas estructuras presentaban diferentes estados de conservación, así como morfologías y asociaciones variables, atestiguando el largo uso de esta parte del pastizal de montaña. La aplicación de nuevos procedimientos de prospección arqueológica exige comprobar la validez de la identificación de las estructuras encontradas. Para ello es necesario realizar sondeos de validación. Así pues, en septiembre de 2021 se llevaron a cabo cuatro prospecciones arqueológicas para verificar las observaciones iniciales (estructuras 13, 39, 133 y 152) (Pl. 2). Todas fueron positivas y en cada estructura sondeada se identificaron muros y niveles de circulación.

## 5. Conclusiones

Las primeras pruebas realizadas en el marco del programa de investigación TAHMM demuestran que el uso combinado de equipos no invasivos es eficaz para la detección arqueológica en alta montaña. Los vehículos aéreos no tripulados pueden

utilizarse para obtener distintos tipos de datos (fotografía, termografía, imágenes multiespectrales, lidar) con una alta resolución espacial. El uso de equipos geofísicos proporciona una visión más detallada de determinadas estructuras total o parcialmente enterradas. Por último, el uso de un espectrómetro de rayos X parece muy prometedor para la detección de zonas de estacionamiento a gran altitud. Su uso ya permite obtener un inventario fino y preciso en un periodo de tiempo más corto que con las técnicas actuales. Pero la mayor contribución procede de la sinergia de estos dispositivos. El enfoque con múltiples fuentes permite multiplicar las observaciones, los ángulos de percepción y el análisis, además, da acceso a una visión más precisa de los objetos arqueológicos. El siguiente paso del proyecto será ir más allá de la observación individual de los datos. En este sentido, los investigadores e ingenieros que participan en el consorcio TAHMM tienen previsto empezar a trabajar en la aplicación e implementación de un enfoque integrado que implique el desarrollo de nuevos métodos de aprendizaje automático.

## Referencias bibliográficas

- BAL, M.-C.; RENDU, C.; RUAS, M.-P.; CAMPMAYO, P. (2010). «Paleosol charcoal: Reconstructing vegetation history in relation to agro-pastoral activities since the Neolithic. A case study in the Eastern French Pyrenees». *Journal of Archaeological Science*, 37, 785-1797.
- BLOOR, J.; JAY-ROBERT, P.; LE MORVAN, A.; FLEURANCE, G. (2012). «Déjections des herbivores domestiques au pâturage: Caractéristiques et rôle dans le fonctionnement des prairies». *INRAE Productions Animales*, 25 (1), 45-56.
- BUISAN, G. (1999). *Des cabanes et des Hommes: Vie pastorale dans les pyrénées*. Pau: Éditions Cairn.



- (2001). *Henri Fédacou raconte: La vie montagnarde dans un village des Pyrénées au début du siècle*. Pau: Éditions Cairn.
- (2002). *Hier en vallée de Campan: Vie montagnarde et communautaire d'un village des Pyrénées centrales*. Pau: Éditions Cairn.
- CALASTRENC, C.; BALEUX, F.; POIRIER, N.; RENDU, C. (2020). «Thermographie aéroportée par drone: Nouvelle procédure pour la détection archéologique en haute montagne». *ArcheoSciences: Revue d'Archéométrie*, 44 (1), 81-96. <<https://doi.org/10.4000/archeosciences.7426>>
- CALASTRENC, C.; BALEUX, F.; POIRIER, N.; RENDU, C.; PHILIPPE, M. (2018). *Programme Télédéttection Archéologique en Haute et Moyenne Montagne (T.A.H.M.M.) - Campagne 2018*, 205 p. Recuperado de <<https://hal.science/hal-02017472>>
- (2019). *Programme Télédéttection Archéologique en Haute et Moyenne Montagne (T.A.H.M.M.) - Campagne 2019*, 197 p. Recuperado de <<https://hal.science/hal-03263265>>.
- CALASTRENC, C.; CAMPMAJO, P.; POIRIER, N.; BALEUX, F.; RENDU, C.; BAL, M.-C. (2021). *Inspecter les zones d'altitude: Développement d'une méthode intégrée multi-source pour la prospection archéologique des terrains d'altitude - 2020-2021*, 208 p. Recuperado de <<https://hal.science/hal-03600298>>.
- CALASTRENC, C.; LE COUÉDIC, M. (2005). *Rapport de prospection-inventaire et de sondages archéologiques – campagne 2005 – Archéologie pastorale en vallée d'Ossau*. 2 tomos, 325 p. y 118 p.
- (2006). *Archéologie pastorale en vallée d'Ossau: Atelier 2 du PCR « Dynamiques sociales, spatiales et environnementales dans les Pyrénées centrales » – Rapport de sondages archéologiques et prospections – campagne 2006*, 203 p.
- CALASTRENC, C.; LE COUÉDIC, M.; BARGE, O.; BAL, M.-C. (2007). *Archéologie pastorale en vallée d'Ossau: Atelier 2 du PCR « Dynamiques sociales, spatiales et environnementales dans les Pyrénées centrales » – Rapport de sondages archéologiques et prospections – campagne 2007*, 216 p.
- CALASTRENC, C.; LE COUÉDIC, M.; RENDU, C. (2004). *Prospection inventaire - Archéologie pastorale en vallée d'Ossau 2004*. Recuperado de <<https://hal.science/hal-02020992>>.
- CALASTRENC, C.; POIRIER, N.; BALEUX, F.; RENDU, C.; BAL, M.-C. (2022). *Inspecter les zones d'altitude: Développement d'une méthode intégrée multi-source pour la prospection archéologique des terrains d'altitude*, 150 p.
- CHEN, F.; ZHOU, R.; VAN DE VOORDE, T.; CHEN, X.; BOURGEOIS, J.; GHEYLE, W.; GOOSSENS, R.; YANG, J.; XU, W. (2021). «Automatic detection of burial mounds (kurgans) in the Altai Mountains». *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 177, 217-237.
- CHEVALIER, M. (1954). «La vie humaine dans les Pyrénées ariégeoises». *L'information géographique*, 18 (2), 77-78.
- DE LAET, V.; LAMBERS, K. (2009). «Archaeological prospecting using high-resolution digital satellite imagery: Recent advances and future prospect». *Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology*, 9-17.
- DE LAET, V.; PAULISSEN, E.; MEULEMAN, K.; WÆLKENS, M. (2009). «Effects of image characteristics on the identification and extraction of archaeological features from Ikonos-2 and Quickbird-2 imagery: Case study Sagalassos (southwest Turkey)». *International Journal of Remote Sensing*, 30 (21), 5655-5668.
- FARDEAU, J.-C.; MARTINEZ, J. (1996). «Épandages de lisiers: Conséquences sur le phosphore biodisponible et sur la concentration de quelques cations dans la solution du sol». *Agronomie*, 16 (3), 153-166. EDP Sciences. Recuperado de <<https://hal.science/hal-00885784>>.
- FERDIÈRE, A.; FOURTEAU, A. M. (1979). «Gestion des archives du sol en milieu rural: Expérience de prospection systématique à Lion-en-Beauce (Loiret)». *Revue ArchéoScience*, 3, 67-96.
- GARCIA CASAS, D. (2018). *Arqueologia d'un territori d'alta muntanya del Pirineu Central: Persones, ramats i prats al llarg de la història al Parc Nacional d'Aigüestortes i Estany de Sant Maurici*. [Tesis doctoral]. Universitat Autònoma de Barcelona.

- GASSIOT, E. (ed.) (2016). *Arqueología del pastoralismo en el Parque Nacional d'Aigüestortes i Estany de Sant Maurici: Montañas humanizadas*. Organismo Autónomo Parques Nacionales.
- GASSIOT, E.; CLEMENTE CONTE, I.; MAZZUCCO, N.; GARCIA CASAS, D.; OBEA GÓMEZ, L.; RODRÍGUEZ ANTÓN, D. (2016). «Surface Surveying in High Mountain Areas. Is It Possible?: Some Methodological Considerations». *Quaternary International*, 402, 35-45.
- GASSIOT, E.; PELACHS, A.; BAL, M. C.; GARCIA, V.; JULIA, R.; PÉREZ, R.; RODRÍGUEZ, D.; ASTROU, A. Ch. (2010). «Dynamiques des activités anthropiques sur un milieu montagnard dans les Pyrénées occidentales catalanes durant la Préhistoire: Une approche multidisciplinaire». En: TZORTZIS, S.; DELESTRE, X. (dir.). *Archéologie de la montagne européenne*. Bibliothèque d'archéologie méditerranéenne et africaine, 4, 33-43.
- GASSIOT, E.; RODRÍGUEZ ANTÓN, D.; BURJACHS, F.; ANTOLÍN, F.; BALLESTEROS, A. (2012). «Poblamiento, explotación y entorno natural de los estados alpinos y subalpinos del Pirineo central durante la primera mitad del Holoceno». *Revista Cuaternario y Geomorfología*, 26 (3-4), 29-45.
- GASSIOT, E.; RODRÍGUEZ ANTÓN, D.; PÉLACHS, A.; PÉREZ OBIOL, R.; JULIÀ, R.; BAL, M. C. (2013). «La alta montaña durante la Prehistoria: 10 años de investigación en el Pirineo catalán occidental». *Prehistoria Alpina*, 261-281.
- GUEDON, F. (2006). *Occupation du sol et peuplement en montagne des origines aux temps modernes: Le Haut Lavedan*. [Tesis de doctorado]. Université de Toulouse.
- GUILLOT, F. (2017). *Rapport de sondages archéologiques [Soulcem - Auzat (09)] 2017: Pour une archéologie de la montagne*. Régie Patrimoines de la Communauté de Communes de la Haute-Ariège.
- KOKALJ, Ž.; HESSE, R. (2017). «Airborne laser scanning raster data visualization: A Guide to Good Practice». Ljubljana: Založba ZRC.  
<<https://doi.org/10.3986/9789612549848>>
- KOKALJ, Ž.; SOMRAK, M. (2019). «Why Not a Single Image?: Combining Visualizations to Facilitate Fieldwork and On-Screen Mapping». *Remote Sensing*, 11 (7), 747.  
<<https://doi.org/10.3390/rs11070747>>
- KRUGER, F. (1935). «Die Hochpyrenäen. B. Hirtenkultur». *Volkstum und Kultur der Romanen*, VIII, 1-103
- (1939a). *Die Hochpyrenäen, A.1. Landschaften, Haus u. Hof*. Hamburg: Hansischer Gildeverl.
- (1939b). *Die Hochpyrenäen, A.2. Landschaften, Haus u. Hof*. Hamburg: Hansischer Gildeverl.
- LAMBERS, K.; ZINGMAN, I. (2013a). «Towards detection of archaeological objects in high-resolution remotely sensed images: The Silvretta case study». *40th Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (Southampton, 26-30 March 2012)*. *Archaeology in the digital era*, II - e-papers.
- (2013b). «Texture segmentation as a first step towards archaeological object detection in high-resolution satellite images of the Silvretta Alps». *40th Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (Southampton - 26-30 Mars 2012)*. *Archaeological prospection*, II, 327-329. Viena: Austrian Academy of Science.
- LE COUÉDIC, M. (2010). *Les pratiques pastorales d'altitude dans une perspective ethnoarchéologique: Cabanes, troupeaux et territoires pastoraux pyrénéens dans la longue durée*. Sciences de l'Homme et Société. Université François-Rabelais de Tours.
- (2020). «Les cayolars et leur environnement (Pays Basque): Approche croisée entre histoire et archéologie». *Actualité de la recherche sur le pastoralisme. Séminaire TERRAE*. Toulouse, France.
- LE COUÉDIC, M.; CHAMPAGNE, A.; CONTAMINE, T.; COUGHLAN, M.; GRACSON, T.; HALEY, B. S. (2014). *Rapport de prospection et sondages, Larrau, Pyrénées-Atlantiques. Campagne 2014*. ITEM, EA 3002, Université de Pau et des Pays de l'Adour.
- LE COUÉDIC, M.; RENDU, C.; GARCIA CASA, D.; GASSIOT BALBE, E.; CALASTRENC C.; CLEMENTE CONTE, I.; FORTO, A.; GUILLOT, F.; NUNES, J.; PUJOL, F.; REY, J.; LANASPA, I.; CONTAMI-



- NE, T.; MAZZUCCO, N.; OBEA, L.; QUESADA, M.; RODRÍGUEZ, D. (2016). «Comparer et modéliser les sites, les territoires et les systèmes pastoraux pyrénéens dans la diachronie: Présentation et premiers résultats du projet collaboratif DEPART». En: DEBOFLE, P.; SANCHEZ, J.-C. (dir.). *Pays pyrénéens et environnement. Actes du 62e Congrès de la Fédération historique de Midi-Pyrénées, Bagnères-de-Bigorre (Hautes-Pyrénées), 12-13-14 juin 2015: 150e anniversaire de la Société Ramond (1865-2015) dans le cadre des commémorations nationales*, 321-338.
- MILLETT, M.; PASQUINUCCI, M.; TREMENT, F. (2000). «The comparison of surface and stratified artifact assemblages». *Non-destructive techniques applied to landscape archaeology: The Archaeology of Mediterranean Landscapes*, 4, 216-222.
- MOCCI, F.; PALET J.-M.; SEGARD, M.; TZORTZIS, S.; WALSH, K. (2005). «Peuplement, pastoralisme et modes d'exploitation de la moyenne et haute montagne depuis la Préhistoire dans le Parc National des Écrins». En: VERDUN, F.; BOUET, A. (dir.). *Territoires et paysages de l'âge du Fer au Moyen Âge: Mélanges offerts à Philippe Leveau*. Presses Universitaires de Bordeaux, 197-212. Collection Ausonius. Recuperado de <<https://shs.hal.science/halshs-00129518>>.
- MOCCI, F.; WALSH, K.; TALON, B.; TZORTZIS, S.; COURT-PICON, M. et al. (2008). «Structures pastorales d'altitude et paléoenvironnement: Alpes méridionales françaises du Néolithique final à l'âge du Bronze». En: JOSPIN, J.-P.; AVRIE T. *Premiers bergers des Alpes: De la préhistoire à l'Antiquité*. Gollion: Infolio Éditions, 92-101.
- ORENGO, H. (2010). *Arqueologia de un paisaje cultural pirenaico de alta montaña: Dinámicas de ocupación del valle del Madriu-Perafita-Claror (Andorra)*. [Tesis doctoral]. Tarragona: Universitat Rovira i Virgili. Institut Català d'Arqueologia Clàssica.
- PALET, J.-M.; GARCIA, A.; ORENGO, H.; POLONIO, T. (2016). «Occupacions ramaderes altimontanes a les capçaleres del Ter (Vall de Núria i Coma de Vaca, Querals): Resultats de les intervencions arqueològiques 2010-2015». *Tretzenes Jornades d'Arqueologia de les Comarques de Girona*. Banyoles, del 10 al 11 de junio de 2016. Banyoles: Generalitat de Catalunya, 67-75.
- POIRIER, N. (2010). *Un espace rural à la loupe: Paysage, peuplement et territoires en Berry de la Préhistoire à nos jours*. Tours: Presses Universitaires François-Rabelais. Perspectives Historiques.
- (2012). «Thermographie aéroportée». *Archéodrone*. Recuperado de <<https://blogs.univ-tlse2.fr/archeodrone/thermographie-aeroportee/>>.
- (2018). «Les défis d'une approche multisources des dynamiques d'occupation du sol: L'exemple de la vallée de la Garonne. Archéologie, Histoire et Analyse spatiale». *Dialogue interdisciplinaire sur la question des SIG archéologiques et historiques*, p. s/n. Lille.
- (2021). «Tracé LGV – REPÉRAGE (Recherches sur les Espaces, le Peuplement et les Réseaux Anciens de la Garonne)». [Noticia arqueológica]. *ADLFI. Archéologie de la France – Informations*. Recuperado de <<http://journals.openedition.org/adlfi/53422>>.
- POIRIER, N.; HAUTEFEUILLE, F.; CALASTRENC, C. (2013). «Low Altitude Thermal Survey by Means of an Automated Unmanned Aerial Vehicle for the Detection of Archaeological Buried Structures». *Archaeological Prospection*, 20 (4), 303-307.
- (2017). «L'utilisation des micro-drones pour la prospection archéologique à basse altitude». *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, 81-94.
- RATIO, R. (2001). *Adrien, le dernier berger des Pyrénées*. Pau: Éditions Cairn.
- REITMAIER, T. (2010). «Auf der Hut — Methodische Überlegungen zur prähistorischen Alpwirtschaft in der Schweiz». *ANISA: Verein für alpine Forschung*, 219-239.
- (2013a). «Alpine Archäologie in der Silvretta». *Archäologie Schweiz*, 36, 4-15.
- (2013b). «Silvretta Historica: Satellite-assisted Archaeological Survey in an Alpine Environment». *38th Annual Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology*. Granada, abril de 2010, 543-546.
- RENDU, C. (2000). «Fouiller des cabanes de bergers : pourquoi faire ?». *Études rurales*, 153-154, 151-176.

- (2003a). *La montagne d'Enveitg: Une estive pyrénéenne dans la longue durée*. Perpiñán: Trabucaire.
- (2003b). «Pistes et propositions pour une archéologie de l'estivage à partir d'une expérience dans les Pyrénées de l'Est: Dossier spécial sur les habitats et systèmes pastoraux d'altitude (Pyrénées, Alpes, Massif Central). L'occupation de la haute montagne, premiers acquis et perspectives (table ronde de Lattes, 30 janvier 2002)». *Archéologie du Midi Médiéval*, 21, 147-157.  
<<https://dx.doi.org/10.3406/amime.2003.1406>>
- (2003c). «Pour faire le portait d'une montagne: Ombres et lumières autour d'Enveitg (Cerdagne, Pyrénées-Orientales)». *Études rurales*, 9, 11-30.
- (2021). «La fabrique des espaces d'altitude: Un parcours pyrénéen entre pastoralisme et agriculture». *Habilitation à Diriger des Recherches*, 1 y 2. Paris.
- RENDU, C.; BAL, M.-C.; BILLE, E.; CALASTRENC, C.; CAMPMAJO, P.; CRABOL, D.; HARFOUCHE, R.; LE COUÉDIC, M.; PARENT, G.; POUPET, P.; RUAS, M.-P. (2005). *Rapport de PCR, PCR Cerdagne: Estivage et structuration sociale d'un espace montagnard*. SRA Languedoc-Roussillon, 129 p.
- RENDU, C.; BILLE, E.; CONESA, M.; CAMPMAJO, P.; CRABOL, D. (2009). «Margins and centers in the shaping of the Pyrenean slopes: Medieval dynamics within the long-term perspective». En: Klapste, J.; Sommer, P. (dir.). *Medieval rural settlement in marginal landscape: Ruralia VII*. Turnhout: Brepols, 235-251.
- RENDU, C.; CALASTRENC, C.; LE COUÉDIC, M.; BERDOY, A. (2016). *Estives d'Ossau: Sept milles ans de pastoralisme dans les Pyrénées*. Tolosa: Pas d'Oiseau.
- RENDU, C.; CALASTRENC, C.; LE COUÉDIC, M. (2006). *Archéologie pastorale en vallée d'Ossau, rapport final d'opération, campagne 2006, sondages et prospections*. Recuperado de <<https://shs.hal.science/halshs-00964699>>.
- RENDU, C.; CAMPMAJO, P. (1995). «Bergers et troupeaux de Cerdagne: Pastors i ramats de Cerdanya». *Musée de Cerdagne*, 75.
- RENDU, C.; CAMPMAJO, P.; CRABOL, D. (2012). «Étagement, saisonnalité et exploitation des ressources agro-pastorales en montagne à l'âge du bronze: Une possible "ferme d'altitude" à Enveig (Pyrénées-Orientales)». *Bulletin de l'Association pour la Recherche sur l'Âge du Bronze*, 58-61.
- RENDU, C.; CAMPMAJO, P.; DAVASSE, B.; GALOP, D. (1995). «Habitat, environnement et systèmes pastoraux en montagne: Acquis et perspectives de recherches à partir de l'étude du territoire d'Enveig». *X Colloqui Internacional d'Arqueologia de Puigcerdà*, 661-675.
- RENDU, C.; PASSARIUS, O.; CALASTRENC, C.; JULIA, R.; LLUBES, M.; ILLES, P.; CAMPMAJO, P.; JORDY, C.; CRABOL, D.; BILLE, E.; CONESA, M.; BOUSQUET, D.; LALLEMAND, V. (2015). «Reconstructing past terrace fields in the Pyrenees: Insights into land management and settlement from the Bronze Age to the Early Modern era at Vilalta (1650 masl, Cerdagne, France)». *Journal of field archaeology*, 40 (4), 1-20.
- SAINT SEVER, G.; REMINCOURT, M.; SOULA, F. (2016). *Fouille Archéologique de la Haille de Pout, Cirque de Troumouse, Gèdre (Hautes-Pyrénées)*. [Informe de investigación].
- THIRION-MERLE, V. (2014). «Spectrométrie de fluorescence X». En: *Circulation et provenance des matériaux dans les sociétés anciennes*. Éditions des archives contemporaines. Collection Sciences Archéologiques. Recuperado de <<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01393984>>.
- TREMENT, F. (2011). «La prospection au sol systématique». *Les Arvernes et leurs voisins du Massif Central à l'époque romaine: Une archéologie du développement des territoires*, 1, 51-96.
- TOUMAZET, J.-P.; VAUTIER, F.; ROUSSEL, E.; RASSAT, G.; DOUSTREYSSIER, B. (2017). «Automatic detection of complex archaeological grazing structures using airborne laser scanning data». *Journal of Archaeological Science: Reports*, 12, 569-579.  
<<https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2017.03.012>>

- WALSH, K.; COURT-PICON, M.; MOCCI, F.; SEGARD, M.; PALET MARTINEZ, J. M. (2007). «Occupation de la montagne et transformation des milieux dans les Alpes méridionales au cours de l'Âge du Bronze: Approche croisée des données palynologiques et archéologiques en Champsaur et Argentiérois (Hautes-Alpes, France)». En: MORDANT, C.; MAGNY, M. (dir.). *Environnements et cultures à l'Âge du Bronze en Europe occidentale*, 89-106.
- WALSH, K.; MOCCI, F. (2011). «Mobility in the Mountains: Late Third and Second Millennia Alpine Societies' Engagements with the High-Altitude Zones in the Southern French Alps». *European Journal of Archaeology*, 14 (1-2), 88-115.
- WALSH, K. J.; MOCCI, F. S.; BRESSY, C.; DELESTRE, X. (2010). «Les Ecrins, un territoire d'altitude dans le contexte des Alpes occidentales de la Préhistoire récente jusqu'à l'Âge du Bronze (Hautes-Alpes, France)». En: TZORTZIS, S.; DELESTRE, X. (eds.). *Archéologie de la Montagne Européenne*. Quétigny: Librairie Archéologique, 211-225.
- ZADORA-RIO, E. (1986). «Archéologie d'un espace rural: La genèse du parcellaire de la commune de Blou (Maine-et-Loire)». *Revue Géographique de l'Est*, 26 (3-4), 155-166.
- ZAKSEK, K.; OŠTIR, K.; KOKALJ, Ž. (2011). «Sky-View Factor as a Relief Visualization Technique». *Remote Sensing*, 3 (2), 398-415.
- ZINGMAN, I.; SAUPE, D.; LAMBERS, K. (2013a). «Automated search for livestock enclosures of rectangular shape in remotely sensed imagery». *Conférence Image and Signal Processing for Remote Sensing XIX*. Dresden.
- (2013b). «Detection of Texture and Isolated Features Using Alternating Morphological Filters». *11th International Symposium, ISMMUppsala (Sweden, May 27-29), Volume: Mathematical Morphology and Its Applications to Signal and Image Processing*, 440-451.
- (2014). «A morphological approach for distinguishing texture and individual features image». *Pattern Recognition Letters*, 47, 129-138.
- (2015). «Detection of incomplete enclosures of rectangular shape in remotely sensed images». *EARTHVISION 2015 IEEE/ISPRS Workshop «Looking from above: When Earth observation meets vision»*. Boston, 86-96.
- ZINGMAN, I.; SAUPE, D.; PENATTI, O.; LAMBERS, K. (2016). «Detection of Fragmented Rectangular Enclosures». *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54 (8), 4580-4593.

