

# MORFOGÉNESIS DE LAS LAGUNAS GLACIARES DE LAS SIERRAS DE GUADARRAMA Y GREDOS (SISTEMA CENTRAL IBÉRICO)

## *Morphogenesis of the glacial lakes of the Sierras de Guadarrama and Gredos (Iberian Central System)*

Manuel Toro<sup>1\*</sup>, Ignacio Granados<sup>2</sup>, Antonio Camacho<sup>3</sup>, Carlos Montes<sup>4</sup>, Marc Oliva<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX (MITMA-MITERD), Madrid, 28005, España.

<sup>2</sup> Centro de Investigación, Seguimiento y Evaluación. Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama, Rascafría, 28740, España.

<sup>3</sup> Instituto Cavanilles de Biodiversidad y Biología Evolutiva (ICBiBE), Universitat de València, Paterna, 46980, España.

<sup>4</sup> Departamento de Ecología, Universidad Autónoma de Madrid, Madrid, 28049, España.

<sup>5</sup> Departamento de Geografía, Universitat de Barcelona, Barcelona, 08001, España.

Identificador ORCID de los autores y e-mail

Manuel Toro: <https://orcid.org/0000-0002-4860-7229>. E-mail: [manuel.toro@cedex.es](mailto:manuel.toro@cedex.es)

Ignacio Granados: <https://orcid.org/0000-0002-8669-6613>. E-mail: [Ignacio.granados@pnsg.es](mailto:Ignacio.granados@pnsg.es)

Antonio Camacho: <https://orcid.org/0000-0003-0841-2010>. E-mail: [antonio.camacho@uv.es](mailto:antonio.camacho@uv.es)

Carlos Montes: <https://orcid.org/0000-0002-5233-0576>. E-mail: [Carlos.montes@uam.es](mailto:Carlos.montes@uam.es)

Marc Oliva: <https://orcid.org/0000-0001-6521-6388>. E-mail: [oliva\\_marc@yahoo.com](mailto:oliva_marc@yahoo.com)

\*Autor corresponsal: [manuel.toro@cedex.es](mailto:manuel.toro@cedex.es)

**Recibido:** 10-01-2023. **Aceptado:** 11-02-2023. **Fecha de publicación on-line:** 25-08-2023

**Citation/Cómo citar este artículo:** Toro, M., Granados, I., Camacho, A., Montes, C., Oliva M., (2023). Morfogénesis de las lagunas glaciares de las sierras de Guadarrama y Gredos (sistema Central ibérico). *Pirineos*, 178 e076. <https://doi.org/10.3989/pirineos.2023.178002>

**RESUMEN:** La dinámica geomorfológica glacial y periglacial modeló intensamente el relieve de las montañas de las sierras de Guadarrama y Gredos durante el Pleistoceno, dando lugar a los principales sistemas lagunares de alta montaña del sistema Central ibérico en España. Aunque estas lagunas comparten un origen glacial común, presentan características morfo genéticas diferentes en función de la acción de los hielos y su edad de deglaciación. En este trabajo se realiza por primera vez una clasificación tipológica individualizada de la morfogénesis glacial de las cubetas de los sistemas lacustres del sistema Central ibérico. Para la caracterización y definición de los tipos se han utilizado variables morfométricas de las cubetas lacustres y topográficas del entorno, datos geomorfológicos de trabajos previos de otros autores y clasificaciones tipológicas de lagos de origen glacial establecidas en otros ámbitos con diferentes escalas geográficas. Sobre un conjunto de 26 lagunas, en su mayoría con superficies > 0,5 ha y profundidades máximas > 0,5 m, repartidas en la sierra de Guadarrama (macizo de Peñalara) y en la sierra de Gredos (macizo Central de Gredos, sierra del Barco y sierra de Béjar) se han definido 9 tipos morfo genéticos que representan la diversidad geomorfológica de su origen

glaciar. Se han clasificado en dos grupos genéticos por su origen común: de hoya, generados por la acción directa de sobreexcavación de los hielos, y morrénicas, formados por el represamiento de las aguas producido por los materiales erosionados, transportados y depositados por los glaciares. El primero comprende 7 tipos: hoya-circo sensu estricto (s.s.), hoya-circo con morrena, hoya-valle s.s., hoya-valle en rosario, hoya-valle lateral, hoya-ombligo y hoya-fluvial. El segundo incluye 2 tipos: morrénica s.s. e intermorrénica. La ubicación en nichos colgados o circos en las cabeceras, zonas bajas, depresiones laterales o ejes fluviales de los valles, la presencia de umbrales y estrechamientos rocosos del terreno, las pendientes y orientaciones del entorno, o la existencia de cordones morrénicos únicos o múltiples, son algunas de las variables principales que diferencian los tipos establecidos. Algunas lagunas han perdido su condición natural al haber sido represadas para usos hidroeléctricos y de regadío, en especial, las de tipología genética de hoya-valle.

**PALABRAS CLAVE:** Tipología de lagos; lagos glaciares; geomorfología glaciar; sistema Central ibérico; sierra de Guadarrama; sierra de Gredos.

**ABSTRACT:** Glacial and periglacial geomorphological dynamics intensely shaped the relief of the mountains of the Guadarrama and Gredos ranges during the Pleistocene, giving rise to the main high mountain lakes systems of the Iberian Central System in Spain. Although these lakes share a common glacial origin, they have different morphogenetic characteristics depending on the action of ice and its retreat in the past. In this work, for the first time, an individualised typological classification of the glacial morphogenesis of the lake basins of the Central Iberian System is carried out. For the characterisation and definition of the types, we have used morphometric variables of the lake basins and the topography of the surrounding area, geomorphological data from previous works by other authors and typological classifications of glacial lakes established in other areas at different geographical scales. On a set of 26 lakes, most of them with surface areas > 0.5 ha and maximum depths > 0.5 m, distributed in the Sierra de Guadarrama (Peñalara massif) and in the Sierra de Gredos (Central massif of Gredos, Sierra del Barco and Sierra de Béjar), 9 morphogenetic types were defined, representing the geomorphological diversity of their glacial origin. They have been classified into two genetic groups based on their origin: « hole », generated by the direct action of glacial over-deepening, and « morainic », formed by the damming of the water produced by the materials eroded, transported and deposited by glaciers. The first one includes 7 types: hole-cirque in the strict sense (s.s.), hole-cirque with moraine, hole-valley s.s., hole-valley in rosary, hole-valley lateral, hole-niche and hole-fluvial. The second group includes 2 types: moraine s.s. and intermoraine. The location in hanging niches or cirques at the headwaters, low areas, lateral depressions or fluvial axes of the valleys, the presence of rocky thresholds and narrowing of the terrain, the slopes and relief configuration, or the existence of single or multiple moraine ridges, are some of the main variables that differentiate these types. Some lakes have lost their natural condition as they have been dammed for hydroelectric and irrigation purposes, especially those of the hole-valley genetic typology.

**KEYWORDS:** lake typology; glacial lakes, glacial geomorphology; Iberian Central System; sierra de Guadarrama; sierra de Gredos.

## 1. Introducción

La morfometría actual de los lagos es consecuencia de los procesos geomorfológicos que han formado y modelado sus cuencas y cubetas lacustres, y junto con la topografía de su entorno, determina aspectos topoclimáticos actuales como su altitud, orientación, la radiación solar recibida, el viento que incide en la lámina de agua, la tasa de renovación o los procesos de erosión y sedimentación. Además, la morfometría juega un papel decisivo en gran parte de los procesos físicos, químicos y biológicos de la masa de agua, condicionando el desarrollo de las comunidades biológicas que alberga, y por ello, su estudio es necesario para comprender su funcionamiento y su estructura, y conocer los flujos de materia y energía (Håkanson, 2004, 2005; Wetzel, 2001; Wetzel & Likens, 1991). La descripción y caracterización morfométrica de los lagos ha de ir estrechamente ligada a su estudio morfogenéti-

co, con el fin de comprender su origen y evolución en el tiempo, interpretar mejor su dinámica actual, y predecir su evolución futura, muy dependiente del clima y sus efectos en los procesos geomorfológicos y ecológicos en sus cuencas.

El glaciario ha sido y es uno de los principales agentes exógenos modeladores del relieve, y esta relevancia se evidencia en el hecho de que, a escala global, aproximadamente el 70 % de todos los lagos existentes tiene su génesis ligada a la última glaciación pleistocena (Löffler, 2003). La mayoría de las clasificaciones existentes de los lagos basadas en su origen incluyen en uno o varios tipos los lagos de origen glaciar, ajustándose la mayoría de ellas a una primera clasificación más detallada establecida para todos los lagos, donde se consideran 11 grandes tipos genéticos (Hutchinson, 1957). El tipo denominado *Lagos formados por la actividad glaciar* comprende 20 subtipos agrupados en 4 grandes grupos en función de su

relación con la acción de los hielos: a) lagos formados en contacto directo con el hielo glaciar (sobre o bajo el hielo, o represados por él o sus morrenas aún en contacto); b) lagos en cuencas rocosas, formados por la acción erosiva del hielo tras su retirada; c) lagos por represamiento de las morrenas terminales o de retroceso de los hielos; y d) lagos en cuencas de deriva del hielo glaciar, formados por morrenas de fondo en zonas planas, fusión de bloques de hielo embebidos en zonas de depósitos (*kettle lakes*), excavación de túneles subglaciares o descongelamiento del permafrost. A su vez, algunos de los 20 subtipos se subdividen hasta alcanzar un total de 34 específicos de origen glaciar. Muchos de estos tipos genéticos están asociados a la actividad presente de aparatos glaciares, en los que el hielo actúa a modo de presa originando lagos en la desembocadura de valles laterales o bien creando depresiones que almacenan agua sobre el propio glaciar, agrupándose en lo que se denominan lagos proglaciares y supraglaciares respectivamente (Carrivick & Tweed, 2013; Otto, 2019). Sin embargo, la mayoría de los lagos de origen glaciar distribuidos por los sistemas montañosos del planeta no están asociados a la presencia actual de los hielos, y su clasificación genética responde habitualmente sólo a dos de los cuatro grandes grupos comunes definidos por Hutchinson (1957) y otros autores (Fairbridge, 1968; Löffler, 2003; Wetzel, 2001), formados como consecuencia de la acción erosiva de los hielos en el pasado: lagos formados por la sobreexcavación del terreno y lagos formados por un represamiento de origen morrénico. Estos son los dos grupos principales que encontramos en el ámbito de la península ibérica.

El primer grupo, los lagos formados por la acción directa del glaciar que excava y erosiona el material de un sustrato rocoso fracturado e intensamente meteorizado por la dinámica periglacial, originando depresiones que son ocupadas por las aguas, comprende tres tipos generales: a) *Ice-scour lakes*, según denominación de Hutchinson (1957), que incluiría los formados en zonas de relieve más o menos plano ocupadas por glaciares de meseta o pequeños campos de hielo. Estos lagos, generalmente de pequeño tamaño, se formaron en las depresiones estructurales asociadas a la fracturación del sustrato rocoso, en zonas más débiles o erosionables, y muchas de ellas presentan pequeñas cuencas endorreicas no formando parte de redes de drenaje preexistentes; b) los *lagos de circo*, formados en anfiteatros rocosos localizados en las cabeceras de los valles, donde se producía la principal acumulación de hielo y formación de los aparatos glaciares; y c) los *lagos de valle*, originados por el discurrir de los glaciares a lo largo de los valles, en los que se iban formando depresiones por sobreexcavación, generalmente asociadas a umbrales morfoestructurales, escalones rocosos más resistentes o estrechamientos de los valles, constituyendo en ocasiones lo que se denominan *lagos en rosario* o *paternóster lakes* (Haritashya *et al.*, 2011; Hutchinson, 1957; Löffler, 2003; Margalef, 1983; Wetzel, 2001), cuando se disponen varios lagos en cadena. Dentro del tipo de lagos de circo, Hutchinson (1957) define en su clasificación tipológica una variante que denomina *The cirque stairway*, que se

correspondería con la formación de lagos, generalmente de pequeño tamaño, en circos ubicados en el mismo valle a diferente nivel como resultado del gradual retroceso del glaciar hacia la cabecera de los circos.

En el segundo grupo, los lagos de origen morrénico, se distinguen habitualmente tres tipos (Yao *et al.*, 2018): a) los formados por el represamiento de una *morrena terminal* en el valle principal; b) los que se originan por represamiento de las aguas en valles laterales, bien por las *morrenas laterales* del valle principal o por pequeñas morrenas terminales de tributarios glaciares laterales al glaciar principal; y c) los localizados en depresiones sobre las propias morrenas o entre varios arcos morrénicos (*lagos intermorrénicos*). Estos últimos, en ocasiones podrían deberse a depresiones sobre los arcos morrénicos originadas por la fusión de bloques de hielo atrapados o arrastrados en la morrena, lo que constituiría una variedad de los denominados *kettle lakes* (Easterbrook, 1999; Hutchinson, 1957).

La localización de los sistemas lacustres de alta montaña en la península ibérica se halla estrechamente ligada al último ciclo pleistoceno (Oliva *et al.*, 2019). En este periodo se desarrolló una dinámica glaciar que generó cubetas de sobreexcavación, morrenas, etc., que tras la deglaciación propiciaron la formación de numerosos complejos de lagos y humedales de alta montaña que persisten en la actualidad en los siguientes sistemas montañosos: cordillera Cantábrica, Pirineos, macizo Galaico-Leonés, sistema Ibérico, sistema Central ibérico y cordillera Penibética (Sierra Nevada) (Casado & Montes, 1995; Pascual Martínez *et al.*, 2000). Su formación, además, viene condicionada por otros factores que varían a escala de cuencas, como son las redes de fracturas y fallas, así como el grado de alteración preglaciar, que favorece la erosión de los hielos cuando éstos se expanden y contribuye a ensanchar valles, circos y la formación de cubetas de sobreexcavación. Estos ecosistemas acuáticos de carácter alpino abarcan tanto lagos profundos como lagunas más someras, charcas y trampales o turberas, muchos de ellos representando diferentes etapas de la evolución natural de colmatación de las cubetas lacustres (Casado & Montes, 1995). El modelado glaciar en la península ibérica se localizó principalmente por encima de los 1.800-2.000 m s.n.m., pero alcanzó también cotas inferiores a los 1.000 m en los valles de algunos sistemas montañosos (principalmente del NO ibérico) por los que descendieron los aparatos glaciares de mayores dimensiones (de Pisón & Otero, 1992; Oliva *et al.*, 2022). Pascual Martínez *et al.* (2000) inventariaron 1.738 láminas de agua de alta montaña en una revisión y actualización de los datos del Inventario de lagos y humedales de España (ILHE) (Montes, 1995), considerando todas las representadas en la cartografía 1:50.000 del IGN sin restricciones de tamaño, abarcando masas de agua asociadas a la actividad glaciar desde los 1.100 m de altitud en la cordillera Cantábrica hasta 2.800 m en Sierra Nevada.

En el sistema Central ibérico, el glaciario y el periglaciario modelaron las montañas más intensamente en las sierras de Guadarrama, Somosierra y Gredos en

España, y en la Serra da Estrela en Portugal (Oliva *et al.*, 2022). En estos macizos se ubican los principales sistemas lagunares de alta montaña de esta cordillera (Figura 1) (de Pedraza, 2005; de Pedraza & López, 1980; Sanz Herráiz, 1988; Vieira, 2006). En las montañas ibéricas, el último ciclo glaciario se caracterizó por varios periodos de avance y retroceso, con una máxima expansión de los hielos que en el sistema Central ibérico aconteció durante la fase de mayor extensión global de los hielos de la última glaciación, conocida como Last Glacial Maximum (LGM), entre 26 y 19 ka; (Clark *et al.*, 2009), mientras que en otras montañas ibéricas los glaciares alcanzaron su máximo volumen con anterioridad, como en el macizo Galaico-Leonés o sectores de Pirineos (entre 60 y 30 ka) (Oliva *et al.*, 2019). En el caso de las sierras de Guadarrama y Gredos, los hielos glaciares comenzaron a retroceder durante el LGM, con un avance en torno a 17-16 ka, posterior retroceso en 15-14 ka, y un reavance en torno a 12 ka, para desaparecer por completo en torno a ~10-11 ka (Carrasco *et al.*, 2022a, 2022b; de Marcos *et al.*, 2022; de Pedraza & López, 1980; Palacios *et al.*, 2012a, 2012b; Pedraza *et al.*, 2013; Vieira & Palacios, 2010). Las lagunas y humedales se fueron formando al llenarse con el agua de fusión y precipitación los cuencos excavados por los hielos, y por su retención por las morrenas laterales o frontales que actuaron como presas naturales (Toro & Granados, 2001).

En la península ibérica son escasos los sistemas montañosos en los que se ha abordado una clasificación de los lagos por su génesis. La mayoría de los estudios existentes que incluyen una caracterización o descripción morfológica y limnológica de conjuntos lacustres no contemplan una clasificación individual de todas las masas de agua en función de su morfogénesis glaciario (Boavida & Gliwicz, 1996; Castillo, 2009; Castillo *et al.*, 2005; del Castillo, 2003; Fernández & García, 1987; Morales & Negro, 2021; Paiva, 2016; Sánchez-España *et al.*, 2019; Velasco *et al.*, 1999, 2005). Únicamente existe esta información individualizada para complejos lacustres localizados en dos sistemas montañosos del centro y noroeste peninsular, y en un sector de Sierra Nevada. Fuentes-Pérez *et al.* (2015) describen el origen glaciario de los lagos y lagunas de alta montaña de Palencia y León (cordillera Cantábrica), clasificándolos en tres tipos generales: circo glaciario, yuxtaglaciario y por transfluencia glaciario, quedando incluidos en el primero gran parte de los tipos considerados en las clasificaciones más comunes, como son los lagos de circo, de valle y parte de los morrénicos. Los del tipo yuxtaglaciario incluirían únicamente los lagos o lagunas de tipo morrénico originados por la obstrucción de un valle lateral del glaciario principal por una morrena lateral, y los de transfluencia glaciario comprenderían otro grupo de lagos morrénicos formados al desbordar un glaciario fuera de su valle por collados o zonas de menor altitud y crear cordones morrénicos en la vertiente opuesta que retendrían las aguas. Vega *et al.* (1992) asignan un origen geológico a las lagunas de las sierras Segundera y Cabrera (macizo Galaico-Leonés), agrupándolas en dos tipos principales. Uno por acumulación de materia-

les morrénicos, que incluye tres subtipos: frontal, lateral y de fondo; y otro por erosión glaciario con dos subtipos: de valle o circo, y de fondo cerrado por diaclasas o por morrenas. Toro & Granados (2001) clasifican 21 lagunas de la sierra de Gredos en 4 tipos genéticos: de circo, de hoyas o fondo de valle, de morrena y fluvial, poniendo de manifiesto la gran diversidad ecológica de estos ecosistemas lacustres como consecuencia de su variabilidad morfológica, muy ligada a su tipología genética. Finalmente, en el sector occidental de Sierra Nevada, Díaz-Hernández & Herrera-Martínez (2021) presentan una clasificación de las masas de agua según diferentes patrones de formación que incluyen tres causas: la actividad paleoglaciario, que dividen en dos únicos subtipos, por sobreexcavación y represamiento morrénico (72% de las masas); procesos geomorfológicos posteriores asociados a la inestabilidad del terreno (flujo de derrubios y desprendimientos, 25%); y un tercer origen menos definido, ligado a la actividad humana (3%).

El valor ecológico de estos ecosistemas lacustres alpinos ibéricos es incuestionable, tanto por constituir islas biogeográficas de carácter borealpino en un entorno de clima mediterráneo o de transición con el clima atlántico, como por su papel como sensores regionales de cambios globales gracias a su ubicación remota y sus condiciones generalmente prístinas (Battarbee, 2005; Catalan *et al.*, 2006; Medina-Sánchez *et al.*, 2022), funcionando sus cubetas lacustres como depósitos de un valioso registro paleoambiental conservado en sus sedimentos (Catalan *et al.*, 2002; Granados & Toro, 2000; Moser *et al.*, 2019; Pérez-Martínez *et al.*, 2022; Robles *et al.*, 2000; Sánchez-López *et al.*, 2016). Constituyen, además, un importante patrimonio hidrológico científico y educativo (Cruz *et al.*, 2014).

El objetivo de este trabajo es abordar, por primera vez, la clasificación tipológica de la morfogénesis glaciario de las cubetas lacustres de alta montaña existentes en el sistema Central ibérico, considerando las sierras de Guadarrama y Gredos, basada en el desarrollo y evolución en el tiempo de los hielos glaciares y en su acción de erosión y sedimentación sobre el terreno. Además, se aportan nuevos conocimientos sobre la diversidad geomorfológica y paisajística de estas montañas y su singularidad en el entorno ibérico, necesarios para mejorar y dirigir las actuaciones de gestión y conservación de estos ambientes únicos de la alta montaña peninsular (Muñoz *et al.*, 2022).

## 2. Zona de estudio

El sistema Central ibérico se formó por la actuación de la orogenia alpina sobre un zócalo hercínico, y está formado por varios macizos que, a lo largo de 500 km en dirección ENE-WSW, separan las cuencas del Duero en la meseta norte y del Tajo en la meseta sur (Figura 1). En general, presenta una litología silícica metamórfica y granítica, dominando las rocas metamórficas en la sierra de Guadarrama, y plutónicas en las sierras de Gredos, Francia, Gata y Serra da Estrela (Aparicio & Cacho, 1987). La

mayor altitud del sistema Central ibérico se alcanza en el pico Almanzor (2.592 m) en el macizo Central de Gredos, siendo la cota más alta de la sierra de Guadarrama el pico Peñalara (2.428 m). El término sierra de Gredos, en sentido amplio, engloba una serie de sierras o macizos que se han considerado de forma individual en este trabajo, y en los que se localizan estas manifestaciones lacustres de carácter alpino: macizo Central de Gredos, sierra del Barco y sierra de Béjar. En la sierra de Guadarrama, las lagunas y humedales del macizo de Peñalara constituyen el único complejo lacustre de origen glaciar.

El modelado glaciar en algunos sectores de las sierras de Guadarrama y Gredos respondió a un modelo de *glaciar de meseta o campo de hielo*, especialmente en la sierra de Béjar, donde los hielos desbordaban hacia los valles periféricos en los que se formaban glaciares de circo, de valle o de ladera (Carrasco *et al.*, 2022a; de Pedraza, 2005). En la Serra da Estrela, este glaciario de meseta fue predominante, alimentando varias lenguas de valle (Vieira, 2006; Vieira & Woronko, 2022), formándose cubetas lacustres en la extensa superficie rocosa culminante o en las cabeceras de los valles glaciares (Paiva, 2016). Sin embargo, en las sierras de Guadarrama y Gredos todas las manifestaciones lacustres existentes deben principalmente su origen a la acción de los hielos encajados en esos valles: en el caso de la sierra de Gredos, llegaron a descender lenguas glaciares de hasta 10,5 km de longitud, alcanzando una altitud mínima de 1.200 m (Carrasco *et al.*, 2022a).

El sistema Central constituye una isla climática de carácter alpino en el centro de la península Ibérica, de clima predominantemente mediterráneo. Presenta un importante gradiente de influencia continental WSW-ENE que disminuye en las sierras más cercanas al océano Atlántico, donde el efecto de las masas de aire húmedo genera una precipitación más elevada respecto a las sierras más continentales situadas hacia el NE (Durán *et al.*, 2013). Todas las lagunas de estas montañas se localizan en una región climática denominada *Eurosiberiana de media-alta montaña* (Ruiz-Labourdette *et al.*, 2011). Debido a la ausencia de estaciones meteorológicas en la zona de alta montaña del sistema Central, excepto la ubicada en el puerto de Navacerrada a 1.890 m (sierra de Guadarrama), Ruiz-Labourdette *et al.* (2011) realizaron una modelización estimando la precipitación media anual para los sectores donde se ubican las lagunas estudiadas en el sistema Central: 1.340 mm en la sierra de Guadarrama, 1.454 mm en el macizo Central de Gredos, 1.581 mm en la sierra del Barco y 1.558 mm en la sierra de Béjar. La temperatura media anual modelizada muestra también un gradiente WSW-ENE. Las sierras de Gredos, situadas más al oeste en una subregión de carácter oceánico, presentan un valor de 6,4 °C (1.353-2.592 m s.n.m.), mientras que, hacia el este de la cordillera, en la sierra de Guadarrama, en una subregión de tipo interior más continental, la temperatura media anual sería de 5,9 °C (1.424-2.430 m s.n.m.). Altitudinalmente, las lagunas se encuentran en los pisos bioclimáticos oromediterráneo y criomediterráneo, cuyas cuencas presentan una cubierta vegetal formada prin-

cipalmente por piornos (*Cytisus balansae*) en el primero, y por prados de carácter alpino y vegetación hidrófila (ej. *Nardus stricta*) en el segundo, con un porcentaje más elevado de cobertura de roca y suelos desnudos muy minerales cuanto mayor es la altitud.

### 3. Metodología

#### 3.1. Selección de las lagunas

La selección de las lagunas de alta montaña en las sierras de Guadarrama y Gredos se ha realizado de acuerdo con tres criterios que deben cumplirse:

- Hallarse representadas en la cartografía 1:25.000 del IGN.
- Superficie de la lámina de agua > 0,5 ha y/o profundidad máxima > 0,5 m.
- Formación de una cubierta de hielo invernal >1 mes de duración.

Los datos geográficos de cada laguna (latitud, longitud, altitud) y topográficos (delimitación y orientación de las lagunas y sus cuencas) se han obtenido analizando la cartografía 1:25.000, las ortofotos digitales (resolución 0,25 m) y el modelo digital del terreno (MDT) con resolución de 5x5 m, del Instituto Geográfico Nacional (IGN) (<http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/>), con el software ArcGIS® (Desktop 10.5, 1995-2016, ESRI). Los productos del IGN utilizados han sido los siguientes:

- MDT05 2010 CC-BY 4.0 <https://www.scne.es/>
- BTN25 2006-2019 CC-BY 4.0 <https://www.ign.es/>
- OrtoPNOA 2021 CC-BY 4.0 <https://www.scne.es/>

La localización y representación de las lagunas en las imágenes aéreas se ha realizado utilizando el visor 3D de Google Earth® 2022 CNES/Airbus (Image Landsat/Copernicus. Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEB-CO) con imágenes tomadas el 10/09/2020 y descargadas el 27/08/2022.

#### 3.2. Orientación de las lagunas

Para determinar el valor de la orientación de cada laguna y su entorno topográfico se ha calculado la dirección de brújula predominante a la que apuntan las pendientes de cada celda 5x5 m de la cuenca en el entorno de cada laguna, obtenidas con la herramienta Orientación de Spatial Analyst de ArcGIS® (<https://pro.arcgis.com/es/pro-app/2.8/tool-reference/spatial-analyst/aspect.htm>), que genera un mapa de orientaciones sobre el MDT de igual resolución. A diferencia de Křížek *et al.* (2012), que determina la orientación de la totalidad de los circos glaciares, en este trabajo se ha calculado sólo para las lagunas y su entorno inmediato, que juega un papel

importante en aspectos topoclimáticos como la insolación o la dirección de los vientos sobre la lámina de agua, o la forma de la cubeta lacustre. Las figuras del Anexo 1 (A1a - A1x) muestran las zonas consideradas en cada laguna y su cuenca para calcular la orientación, así como el eje que la indica. No se ha utilizado tampoco el criterio de considerar la dirección de la longitud máxima de la laguna, como sugiere del Castillo (2003), ya que en algunas tipologías genéticas esta dirección puede ser perpendicular a la orientación del entorno topográfico por la estructura y geomorfología en su ubicación.

### 3.3. Variables morfométricas

Los parámetros morfométricos del área de cada laguna y su cuenca, la profundidad máxima y volumen, se han obtenido utilizando diversas funciones básicas de Spatial Analyst de ArcGIS® sobre los mapas batimétricos de cada laguna y la cartografía digital y ortofotos del IGN.

### 3.4 Caracterización tipológica

La terminología, definición y características asignadas a los tipos de génesis glaciar establecidos para las lagunas de alta montaña del sistema Central ibérico (Figura 1), así como la decisión de incluir cada laguna en un tipo concreto, están basados en la información aportada por estudios previos que podrían agruparse en dos clases: i) Geomorfológicos: son trabajos realizados en el sistema Central ibérico, en los que se describen aspectos concretos de la geomorfología glaciar de las sierras, valles o de las zonas concretas en las que se ubican las lagunas; ii) Tipológicos: comprende estudios en los que se han realizado clasificaciones tipológicas de lagos de origen glaciar con diverso nivel de detalle y criterios de clasificación. En la medida de lo posible, se ha procurado utilizar la terminología ya

existente compartida por el mayor número de trabajos y adoptar los tipos descritos, tanto generales como los más específicos. Se incluyen en este grupo los estudios realizados que incluyen una tipología más general de algunas lagunas del sistema Central ibérico. A lo largo de la descripción y caracterización de los tipos en los resultados se detalla la información concreta de estas referencias bibliográficas que ha sido utilizada en cada caso para definir el tipo y adoptar la decisión de inclusión o no de cada una de las lagunas.

## 4. Resultados y discusión

### 4.1. Lagunas seleccionadas para el estudio: datos geográficos y morfométricos

Las mayores elevaciones del sistema Central ibérico en las sierras de Guadarrama y Gredos, en las que el glaciario cuaternario tuvo su mayor actividad, se disponen principalmente en una única alineación montañosa ENE-WSW, al igual que sucede en el sistema Ibérico o en Sierra Nevada. Esta característica las diferencia de otros sistemas montañosos de la península ibérica como los Pirineos o la cordillera Cantábrica, en los que existen diferentes líneas de cumbres de alta montaña separadas por depresiones o valles, o como en el macizo Galaico-Leonés y en la Serra da Estrela, donde la actividad glaciar se desarrolló en forma de domo o casquete de hielo (de Pisón & Otero, 1992). Este modelado glaciar ceñido a una única alineación montañosa ha determinado la existencia de un número reducido de manifestaciones lacustres, limitado tanto por la extensión espacial en sólo dos vertientes, como por la estrecha franja altitudinal en la que pudieron desarrollarse los aparatos glaciares.

La Tabla 1 recoge los datos geográficos y morfométricos básicos de las lagunas. La Figura 2 muestra la

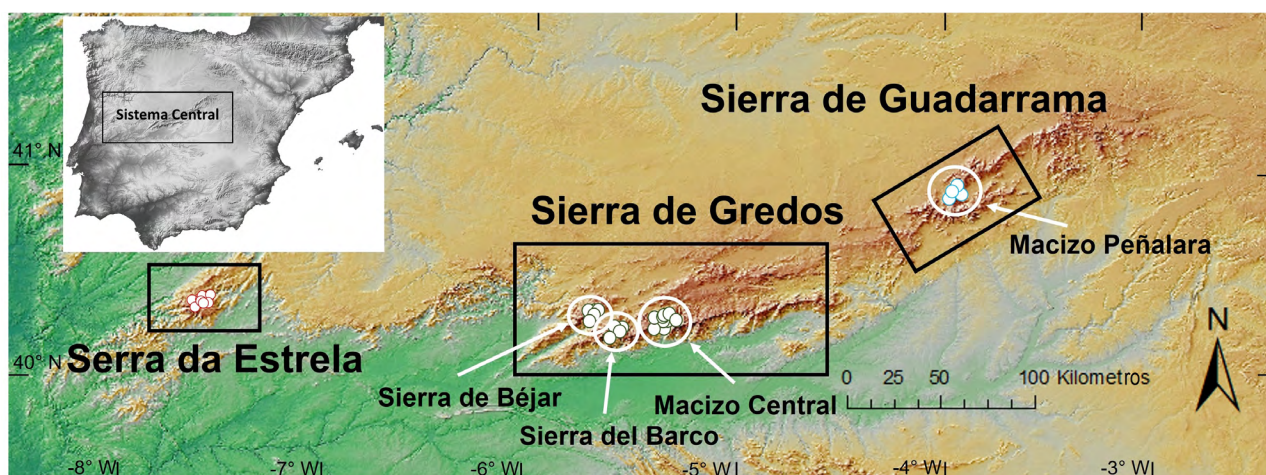


Figura 1. Localización de los sistemas lacustres de alta montaña en las sierras del sistema Central ibérico (coordenadas en grados decimales, ETRS89).

Figure 1. Location of the high mountain lake systems in the mountains of the Iberian Central System (coordinates in decimal degrees, ETRS89).

Tabla 1. Datos geográficos, morfométricos y tipología genética glaciar de las lagunas de las sierras de Guadarrama y Gredos (sistema Central ibérico).

Table 1. Geographical and morphometric data, and glacial genetic typology of lakes in the Sierras de Guadarrama and Gredos (Iberian Central System).

Nº	LAGUNA	Morfogénesis glaciar	Latitud	Longitud	Altitud m	Orient.	Área cuenca m <sup>2</sup>	Área laguna m <sup>2</sup>	Prof. máxima m	Volumen laguna m <sup>3</sup>
			UTM-ETRS89							
<i>Sierra de Guadarrama</i>										
1	Pájaros	Morrénica s.s.	4523686	420125	2170,0	ESE	48163	5061	0,5	995
2	Claveles	Morrénica s.s.	4522725	420251	2119,0	SE	82054	7236	2,6	7605
3	Chica	Intermorrénica	4520866	419758	1959,0	NW	23007	1230	1,8	838
4	Peñalara	Hoya-circo con morrena	4521436	419282	2018,1	SE	476976	6771	5,1	14930
<i>Macizo Central de Gredos</i>										
5	Cura	Morrénica s.s.	4461627	315757	1758,0	N	38621	3712	0,7	905
6	Grande de Gredos	Hoya-valle s.s.	4458467	306424	1938,4	N	3376755	74692	6,7	165162
7	Huertos	Hoya-valle lateral	4458643	306260	1938,7	N	114985	6269	0,8	2439
8	Gargantón	Hoya-fluvial	4459388	305303	2084,0	NNE	1021138	2127	1,5	1103
9	Cervunal	Intermorrénica	4462791	305389	1815,0	ESE	58910	5937	1,0	2902
10	Bajera	Hoya-valle en rosario	4460318	304400	2071,0	NNE	1286974	9460	4,6	16534
11	Brincalobitos	Hoya-valle en rosario	4460218	304403	2072,0	NNE	1150911	1014	3,4	1326
12	Mediana	Hoya-valle en rosario	4460043	304300	2097,0	NNE	1037089	3187	2,5	4474
13	Galana	Hoya-valle en rosario	4459897	304186	2100,0	NNE	976952	15724	8,1	62018
14	Cimera	Hoya-circo	4459503	303957	2103,0	NNE	741633	46609	10,5	227373
15	Gutre	Hoya-ombligo	4459190	304310	2300,0	NW	42307	1000	3,1	1121
16	Majalaescoba	Hoya-fluvial	4461434	304114	1829,0	N	3873500	2885	1,2	1063
17	Lagunilla	Hoya-valle lateral	4461915	303420	1914,0	NNE	65965	6587	1,7	5524
<i>Sierra del Barco</i>										
18	Nava	Hoya-circo	4456373	280992	1951,0	NNE	659997	47930	11,0	213749
19	Caballeros	Hoya-circo con morrena	4455129	279720	2023,5	ESE	616992	22417	5,2	63892
20	Cuadrada	Hoya-ombligo	4455536	278644	2078,5	NW	410806	7437	4,2	15695
21	Barco	Hoya-valle s.s.	4456661	278503	1788,5	N	3733913	107391	14,8	535377
<i>Sierra de Béjar</i>										
22	Duque	Hoya-valle s.s.	4464881	271626	1599,6	ENE	7481760	233127	21,5	1881619
23	Negra	Hoya-ombligo	4464081	269602	2078,5	N	19225	2245	2,1	2373
24	Trampal 3	Hoya-valle en rosario	4465725	269522	2023,0	ENE	1979336	68483	20,8	659896
25	Trampal 2	Hoya-valle en rosario	4465544	269162	2112,0	ENE	696098	12733	4,3	31889
26	Trampal 1	Hoya-valle en rosario	4465630	268839	2126,3	ENE	491198	6445	2,9	8887

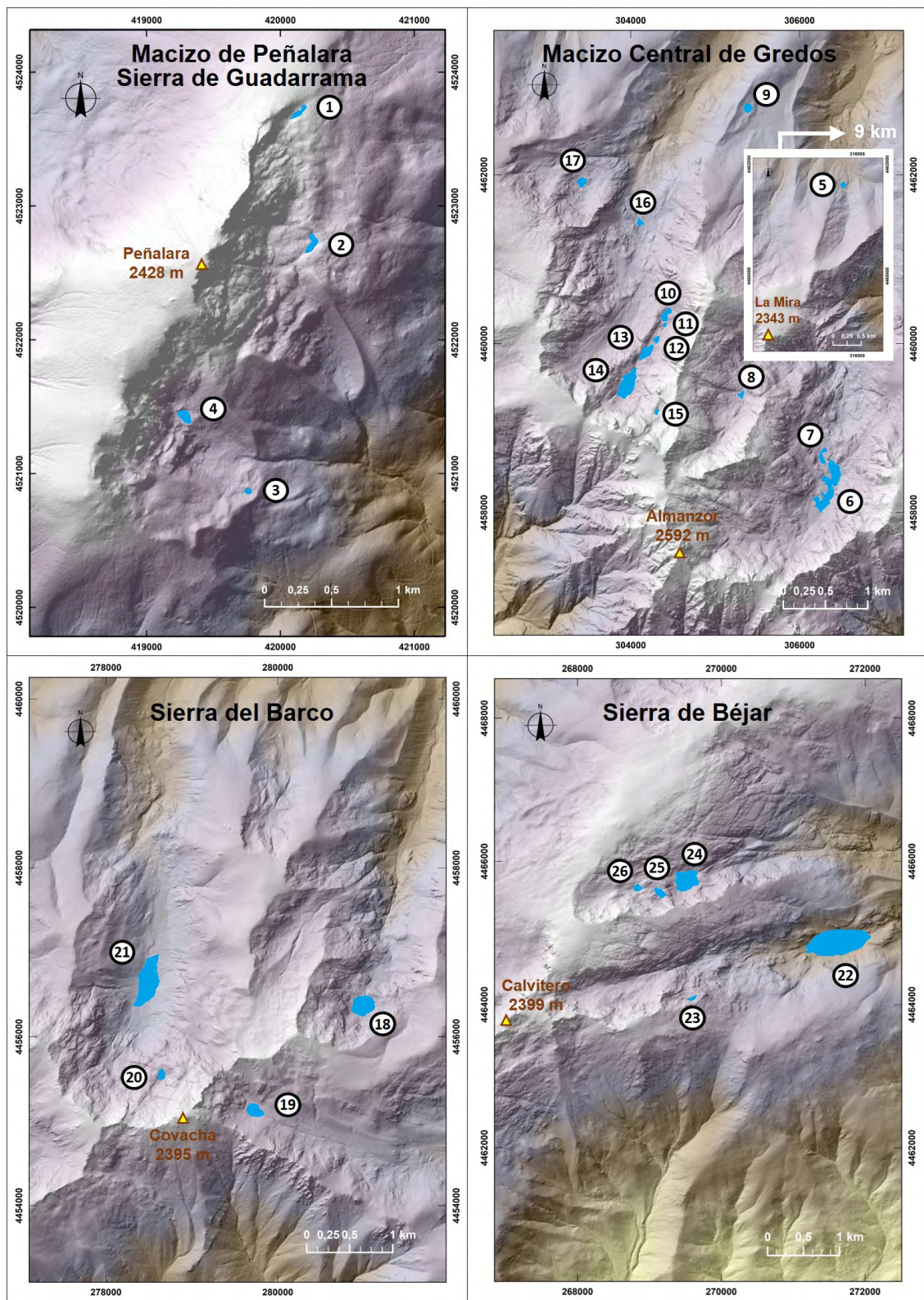


Figura 2. Ubicación de las lagunas estudiadas en las diferentes sierras del sistema Central ibérico en España (sistema de coordenadas: ETRS\_1989\_UTM\_Zone\_30N). La numeración de las lagunas corresponde a la lista de la Tabla 1.

Figure 2. Location of the studied lakes in the different massifs of the Iberian Central System in Spain (coordinate system: ETRS\_1989\_UTM\_Zone\_30N). The numbering of the lakes corresponds to the list in Table 1.



ubicación de las lagunas sobre el MDT de los circos y cabeceras de valles de cada macizo que fueron glaciadas durante el Pleistoceno superior. En la sierra de Guadarrama se han identificado 4 lagunas: Pájaros, Claveles, Chica y Peñalara; en el macizo Central de Gredos 13 lagunas: Cura, Grande de Gredos, Huertos, Gargantón, Cervunal, Bajera, Brincalobitos, Mediana, Galana, Cimera, Gutre, Majalaescoba y Lagunilla; en la sierra del Barco 4 lagunas: Nava, Caballeros, Cuadrada y Barco; y en la sierra de Béjar 5 lagunas: Duque, Negra, Trampal 1, Trampal 2 y Trampal 3. Algunas de estas lagunas presentan otros nombres de uso local, cuya toponimia es recogida por Toro & Granados (2001).

#### 4.2 Orientación de las lagunas y su entorno

Las lagunas de la sierra de Gredos se encuentran en su vertiente norte, donde se localizaron la mayoría de los aparatos glaciares, discurriendo por valles más extensos y de menor pendiente que los de la vertiente sur, ya que la meseta norte (cuenca del Duero) presenta una mayor altitud media que la sur (cuenca del Tajo). En la Tabla 1 y Figura 3 se muestran las orientaciones de las lagunas, cuyas variaciones dentro de la componente general de cada una de las cuatro sierras consideradas se deben a la topografía local, consecuencia del modelado glaciar y de la estructura geológica. Por el contrario, en la sierra de Guadarrama los aparatos glaciares se desarrollaron con una orientación inusual al SE, localizándose las principales lagunas y humedales en las laderas de solana del macizo de Peñalara. La acción del viento predominante de componente W y

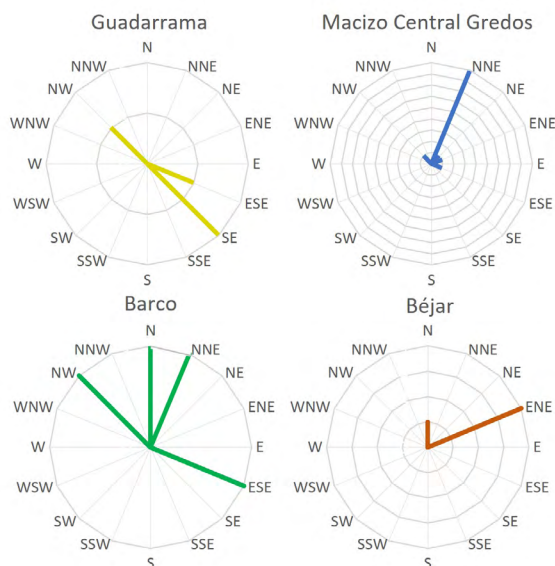


Figura 3. Orientación del entorno topográfico de las lagunas del sistema Central ibérico (sierras de Guadarrama y Gredos). Las circunferencias indican el número de lagunas.

Figure 3. Aspect of the topographical setting of the lakes of the Iberian Central System (Guadarrama and Gredos mountains). The circles indicate the number of lakes.

NW en el Cuaternario actuaba sobre una línea de cumbres de relieve relativamente horizontal, barriendo la nieve y acumulándola en las vertientes de sotavento del macizo, orientadas al SE, propiciando la formación y el desarrollo de pequeños glaciares de ladera y de circo (Pedraza *et al.*, 2019; Sanz Herráiz, 1977, 1998).

#### 4.3 Tipología morfofenética de las lagunas glaciares

La diversidad de las lagunas ha permitido definir dos grandes grupos: de *hoya* y *morrénica*. El grupo de *hoya* incluye todos aquellos tipos originados por la acción directa de sobreexcavación de los hielos; la adopción de este término se debe a su uso común en toda la bibliografía y toponimia empleada en estas montañas. El grupo *morrénica* comprende los tipos formados por el efecto de represamiento producido por los materiales erosionados, arrastrados y depositados por los hielos. Por tanto, cada uno de estos dos grupos incluye varios tipos, en los que se encuadran todas las lagunas consideradas en este trabajo, constituyendo un total de 9 tipos. A cada tipo se le ha asignado un código secuencial formado por 2 letras comunes a todos, *LG* (*Lago Glaciar*), y un número por orden secuencial de descripción en el apartado.

##### 4.3.1 Grupo morfofenético de *hoya*

Dentro de este grupo se han definido cuatro subgrupos:

- a. **Hoya-circo:** incluye dos tipos. Uno (LG1) de lagunas formadas por sobreexcavación de los hielos en circos glaciares situados en las cabeceras de los valles, rodeadas de fuertes pendientes o paredes y crestas rocosas en todo su perímetro excepto en la orientación del desagüe (Yao *et al.*, 2018), y con entradas de agua únicamente difusas o por pequeños torrentes o cascadas. Un segundo tipo (LG2) se debe a la acción conjunta de represamiento del umbral rocoso de la hoya junto con materiales morrénicos acumulados sobre éste durante el retroceso de los hielos (Hutchinson, 1957). Según describen Díaz-Hernández & Herrera-Martínez (2021) en las lagunas de Sierra Nevada, este represamiento mixto se habría producido durante épocas de actividad glaciar mínima en las que la acción de los hielos estaba confinada en los circos de las cabeceras de los valles.

##### Tipo LG1. Hoya-circo s.s. (*sensu stricto*)

- *Laguna Cimera:* se localiza en el macizo Central de Gredos (Figuras 4 y 5), en el circo colgado de las Cinco Lagunas en la cabecera del paleoglaciar del Pinar, siendo la primera por su ubicación en la cabecera del valle y la más elevada (2.103 m) y grande de este grupo de lagunas (10,5 m de profundidad máxima, 4,66 ha y 0,227 hm<sup>3</sup>). Es la única laguna

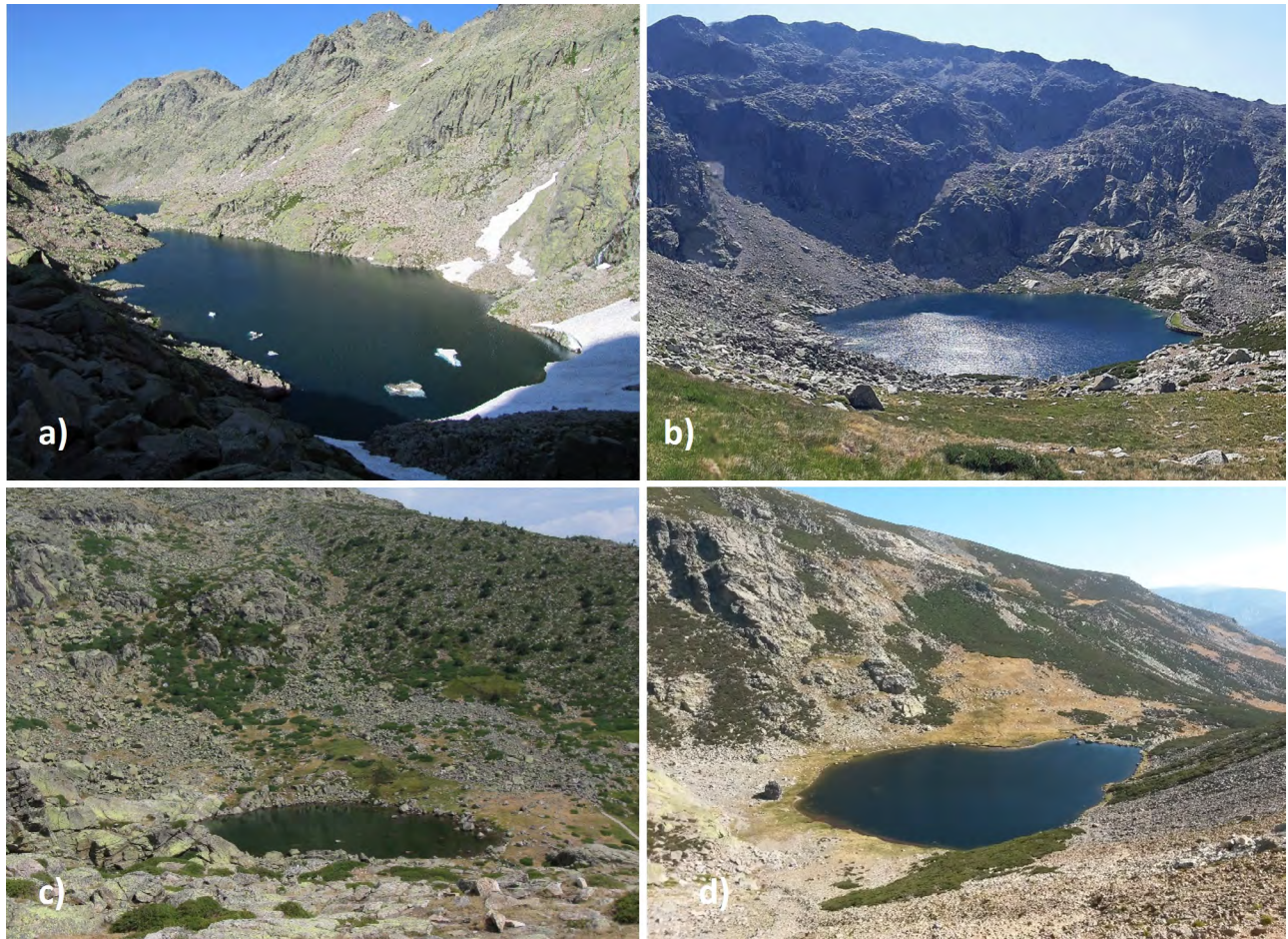


Figura 4. a) laguna Cimera; b) laguna de la Nava; c) laguna de Peñalara; d) laguna de los Caballeros.  
 Figure 4. a) lake Cimera; b) lake Nava; c) lake Peñalara; d) lake Caballeros.

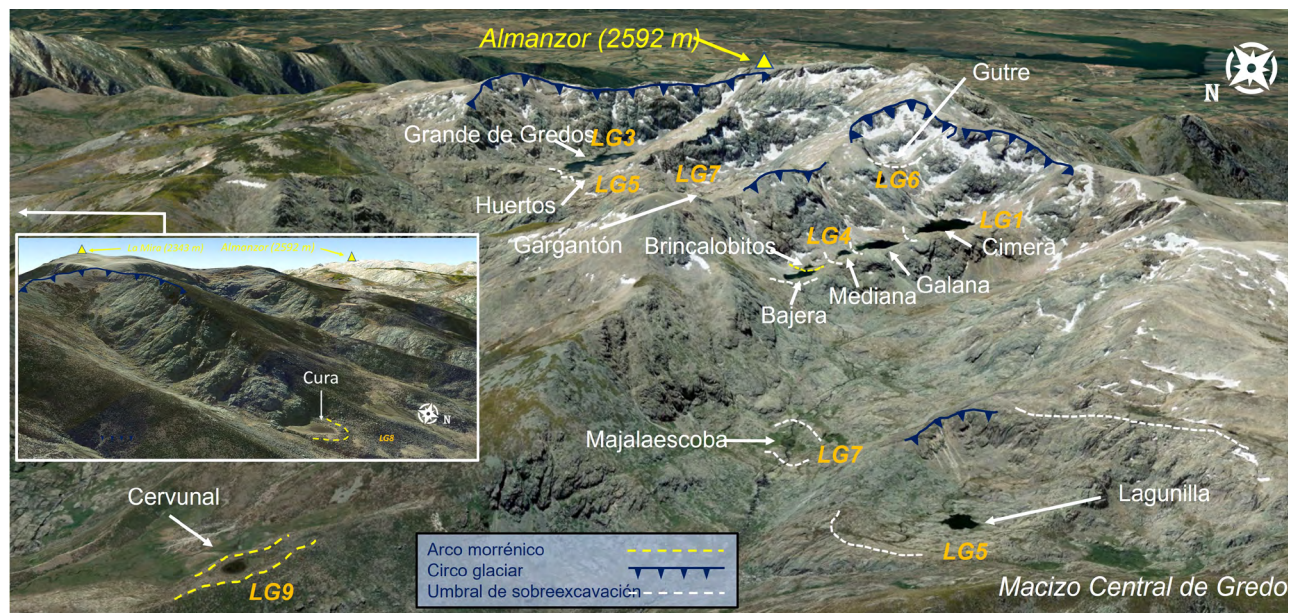


Figura 5. Ubicación y tipología morfogénica glaciar de las lagunas del macizo Central de Gredos.  
 Figure 5. Location and glacial typology of lakes in Central Gredos Massif.



Figura 6. Ubicación y tipología morfo-genética glaciar de las lagunas del macizo de Peñalara (sierra de Guadarrama).  
 Figure 6. Location and glacial typology of lakes in Peñalara Massif (Sierra de Guadarrama).



Figura 7. Ubicación y tipología morfo-genética glaciar de las lagunas de la sierra del Barco (Gredos).  
 Figure 7. Location and glacial typology of lakes in Sierra del Barco (Gredos mountains).

que ocupa el primer rellano morfoestructural de los tres que forman este gran circo colgado (de Pedraza & López, 1980), estando separado por un umbral con estrechamiento rocoso del siguiente rellano en el que se localiza la laguna Galana, con un desnivel de apenas 3 m entre ambas lagunas. Aunque forma parte del *rosario* de las Cinco Lagunas, se ha dado preferencia a sus características de *hoya-circo* para su catalogación genética ya que sus entradas de agua son difusas y se halla rodeada de elevadas paredes rocosas en casi todo su perímetro. Palacios

*et al.* (2012a) han establecido una cronología de la deglaciación en la base de este circo de 12,8 ka.

- *Laguna de la Nava*: se localiza en el llamado “Corral del diablo”, un circo bien definido del paleoglacial de la Nava en la sierra del Barco (Figuras 4 y 7) (de Pedraza y López, 1980), formándose su cubeta por sobreexcavación del hielo en una hoya previa a un escalón rocoso. Su profundidad máxima (11 m), volumen (0,213 hm<sup>3</sup>) y superficie (4,7 ha) actuales, entre los mayores de todas las lagunas estudiadas, son superiores a los originales, ya que fue repre-

sada a principios del siglo XX. Se desconocen las dimensiones y la orografía del entorno del cierre de la hoya previos al represamiento.

#### Tipo LG2. Hoya-circo con morrena

- *Laguna de Peñalara*: es la laguna más grande de la sierra de Guadarrama, localizada en el circo de Peñalara (Figuras 4 y 6). Su cubeta, con 5,1 m de profundidad máxima y 0,015 hm<sup>3</sup> de volumen, se originó por la sobreexcavación del hielo previa a un escalón, favoreciendo el embalsamiento de agua una morrena frontal formada sobre el umbral rocoso al retroceder los hielos (Carrasco *et al.*, 2022b; Sanz Herráiz, 1977). La deglaciación en el umbral que cierra esta laguna se debió dar durante las fases finales de la deglaciación, posiblemente en torno a 14-15 ka (Carrasco *et al.*, 2022b; de Marcos *et al.*, 2022). Estos materiales morrénicos sufrieron una importante erosión por la presión turística y del ganado en las décadas de los 70 y 80 del pasado siglo, desapareciendo hasta 80 cm de suelo en algunas zonas, provocándose la ampliación de la zona del desagüe y amenazando con descender el umbral del cierre morrénico hasta el nivel de la lámina de agua embalsada (Toro, 2007). Actualmente esta zona se encuentra estabilizada gracias a los trabajos de restauración llevados a cabo por la Consejería de Medio Ambiente de la Comunidad de Madrid (Granados *et al.*, 2006; Vielva *et al.*, 2004).
- *Laguna de los Caballeros*: se formó por la sobreexcavación del hielo en el circo de la cabecera del paleoglaciario de valle de los Caballeros, en la sierra del Barco (Figuras 4 y 7), en una hoya de un rellano sobre cuyo umbral exterior se formó un acúmulo morrénico frontal, favoreciendo la retención de agua por represamiento (de Pedraza y López, 1980). Tiene una profundidad máxima de 5,2 m, una superficie de 2,24 ha y un volumen de 0,064 hm<sup>3</sup>. Se encuentra orientada al ESE, a diferencia de la mayoría de las lagunas de la sierra de Gredos, debido a la orientación del paleoglaciario en su cabecera, condicionado por la fracturación del terreno.

**b. Hoya-valle:** lagunas formadas en rellanos de las cabeceras o zonas medias de los valles, en los que los umbrales de salida de amplios circos glaciares, grandes escalones por la fracturación de la roca o estrechamientos del valle, provocaban una intensificación de la erosión basal del roquedo por el efecto del paso de los hielos con la consecuente sobreexcavación glaciario. A diferencia de las lagunas del grupo *Hoya-circo*, no se encuentran cerradas por laderas o paredes pendientes en casi todo su perímetro, sino que generalmente presentan la entrada de un curso de agua siguiendo el eje del valle principal. Este tributario, en ocasiones, genera un pequeño delta o acumulación de materiales en su entrada. Este grupo comprende tres tipos: uno

(LG3) de lagunas aisladas, con un tributario fluvial y formadas por una o más cubetas; otro (LG4) de lagunas dispuestas *en rosario (paternóster)* (de Pedraza y López, 1980; Hutchinson, 1957; Margalef, 1983); y un tercero (LG5) de lagunas aisladas, pero con entradas difusas de agua, formadas en depresiones adyacentes al eje o curso principal de drenaje del valle.

#### Tipo LG3. Hoya-valle s.s.

- *Laguna Grande de Gredos*: el paleoglaciario de Gredos, en el macizo Central de Gredos (Figuras 5 y 8), fue un típico glaciario de valle que sobreexcavó una hoya escalonada delimitada por un umbral rocoso en el amplio circo de Gredos (de Pedraza & López, 1980). Originó dos cubetas que hoy constituyen la laguna Grande de Gredos, siendo más somera la cubeta meridional (4,0 m) al funcionar como una trampa de sedimentos que disminuye la llegada de materiales a la cubeta septentrional (6,7 m). La deglaciación en el umbral que cierra la cubeta lacustre se ha establecido en  $16,2 \pm 1,5$  ka (Carrasco *et al.*, 2022a). Presenta un perímetro muy extenso (3,17 km) y sinuoso debido a la orografía rocosa fracturada del fondo relativamente extenso y plano del valle, con una alternancia de zonas prominentes que resistieron mejor el poder abrasivo de los hielos y depresiones y líneas de fracturación donde la erosión y la sedimentación de materiales fue mayor. Es una de las lagunas más grandes en estado natural del sistema Central (7,47 ha y 1,65 hm<sup>3</sup>).
- *Laguna del Barco*: se formó por la acción de los hielos del paleoglaciario de valle del Barco o la Vega, en la sierra del Barco (Figuras 7 y 8), por sobreexcavación en una zona alargada del valle de una hoya previa a un gran umbral rocoso, y donde también se producía la acumulación de materiales detríticos arrastrados por los hielos (de Pedraza & López, 1980). En la zona del valle situada al pie del umbral que cierra la laguna, Alcalá Reygosa *et al.* (2019) establecen una fecha de deglaciación de  $18,0 \pm 1,8$  ka. Los aportes sedimentarios que llegan a la cubeta forman un pequeño delta en su cabecera. Se halla represada desde la década de 1920, lo que aumentó su profundidad máxima hasta los 14,8 m, una superficie de 10,7 ha y un volumen de 0,53 hm<sup>3</sup>; no se dispone de datos de sus dimensiones originales ni de la orografía original de la zona que cerraba la laguna.
- *Laguna del Duque*: situada en uno de los valles del paleoglaciario del Duque-Trampal, en la sierra de Béjar (Figuras 8 y 9), es la laguna situada a menor altitud y de mayores dimensiones del sistema Central ibérico, si bien ello es debido principalmente al efecto de su represamiento para la explotación hidroeléctrica en 1919 (Hidroeléctrica de Navarra, 1919). La construcción de una presa de 15 m de altura aumentó su volumen y superficie original



Figura 8. a) laguna Grande de Gredos; b) laguna del Barco; c) laguna del Duque.  
 Figure 8. a) lake Grande de Gredos; b) lake Barco; c) lake Duque.

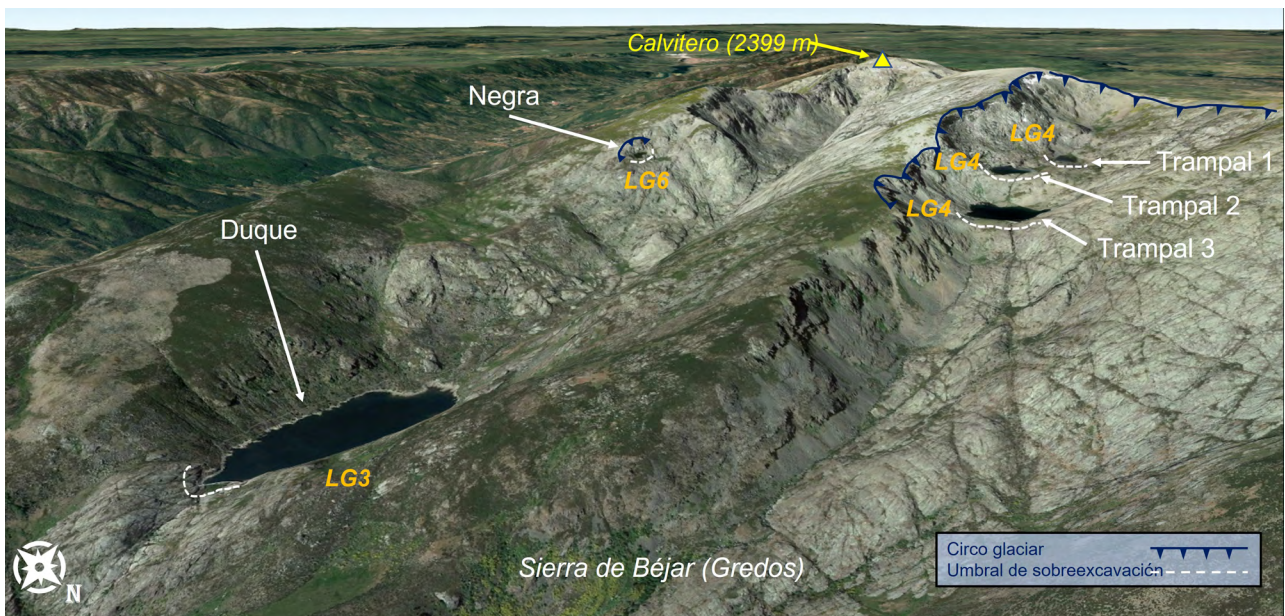


Figura 9. Ubicación y tipología morfofenética glaciar de las lagunas de la sierra de Béjar (Gredos).  
 Figure 9. Location and glacial typology of lakes in Sierra de Béjar (Gredos mountains).



Figura 10. a) Rosario de Cinco Lagunas; b) laguna Galana; c) laguna Mediana; d) lagunas Bajera (izda.) y Brincalobitos (dcha.); e) laguna El Trampal 1; f) laguna El Trampal 2; g) laguna El Trampal 3.

Figure 10. a) Paternoster Cinco Lagunas; b) lake Galana; c) lake Mediana; d) lakes Bajera (left) and Brincalobitos (right); e) lake El Trampal 1; f) lake El Trampal 2; g) lake El Trampal 3.

notablemente, alcanzando en la actualidad una profundidad máxima de 21,5 m, una superficie de 23,3 ha y un volumen de 1,88 hm<sup>3</sup>. Su formación a tan baja altitud (1.600 m) probablemente estuvo ligada no sólo a la sobreexcavación por el glaciar del lecho del valle antes del último escalón rocoso del mismo, sino también al efecto de represamiento de una morrena terminal de retroceso del glaciar (Carandell, 1924), si bien no se conocen sus dimensiones ni la orografía del cierre de la cubeta originales, que fueron probablemente muy alterados con la construcción de la presa. En la entrada a la laguna del tributario principal se ha formado un delta de materiales arrastrados por este tributario.

#### Tipo LG4. Hoya-valle en rosario

- *Laguna Galana*: es la segunda del grupo denominado circo de Cinco Lagunas (2.100 m), en el macizo Central de Gredos, rosario (*paternóster*) de lagunas que discurre en un eje N-S (Figuras 5 y 10). Se ubica en el segundo rellano de este circo, separado de los otros dos por umbrales o escalones rocosos (de Pedraza & López, 1980), siendo más estrecho el superior que la separa de la laguna Cimera, lo que debió aumentar la capacidad erosiva del glaciar al avanzar sobre este segundo rellano. Es la segunda en dimensiones de este grupo, con una profundidad de 8,1 m, una superficie de 1,57 ha y un volumen de 0,062 hm<sup>3</sup>.
- *Laguna Mediana*: tercera del grupo de las Cinco Lagunas (2.097 m) (Figura 10), se halla en el segundo rellano del circo, apenas 3 m por debajo de la laguna Galana. Es más somera (2,5 m) y pequeña (0,32 ha y 4.473 m<sup>3</sup>) probablemente debido a su situación en una zona más amplia del circo donde el poder erosivo del glaciar pudo disminuir antes de superar el umbral rocoso que delimita esta hoya en su extremo inferior, más abierto que el anterior entre las lagunas Cimera y Galana.
- *Laguna Brincalobitos*: se localiza en el tercer rellano del valle colgado de las Cinco Lagunas (Figura 10), en cuarto lugar (2.072 m), al pie del umbral sobre el que se sitúa la laguna Mediana, 25 m más arriba. Su profundidad máxima es de 3,4 m y sus dimensiones son muy pequeñas (0,1 ha y 2.326 m<sup>3</sup>), estando a 15 m de distancia y 1 m más alta que la siguiente laguna, la Bajera, de la que le separa un arco de derrubios de naturaleza morrénica.
- *Laguna Bajera*: es la más baja de las Cinco Lagunas (2071 m) (Figura 10), localizándose antes del último escalón que cierra este valle colgado, y cuya salida cae al valle principal del paleoglaciar del Pinar por una fuerte pendiente en un desnivel de 130 m. Al igual que en el caso de la laguna Grande de Gredos, este rellano presenta dos cubetas de sobreexcavación, siendo algo más profunda la norte (4,6 m), quizás debido a la existencia de un pequeño umbral más resistente entre ambas, favoreciendo que la cubeta sur (3 m) retenga una mayor parte de los sedimentos que llegan a la laguna. Tiene una superficie de 0,94 ha y un volumen de 0,016 hm<sup>3</sup>.
- *Laguna El Trampal 1*: con una génesis similar al grupo de las Cinco Lagunas, forma junto con las otras dos lagunas del Trampal un rosario (*paternóster*) de lagunas en una sucesión de rellanos existentes en la cabecera de uno de los dos valles que ocupó el paleoglaciar del Duque-Trampal (Carrasco *et al.*, 2013), en la sierra de Béjar (Figuras 9 y 10). Es la más alta (2.126 m) y de menor tamaño de las tres lagunas (0,64 ha y 8.887 m<sup>3</sup>). Presenta en la zona de entrada de su tributario una zona plana de prados hidroturbosos, cuya pendiente se prolonga dentro de la laguna hasta la zona donde la profundidad descende más bruscamente (2,9 m), rellenando la zona que en su día debió extenderse la cubeta original tras la retirada de los hielos.
- *Laguna El Trampal 2*: es la segunda del rosario de lagunas del Trampal en altitud (2.112 m) y dimensiones (1,27 ha y 0,032 hm<sup>3</sup>) (Figura 10), y está separada de la anterior por un pequeño umbral rocoso pulido por la acción glaciar con un desnivel entre ambas de 12 m. Con una profundidad máxima de 4,3 m, al igual que Trampal 1 también muestra una zona de prados encharcados en la entrada del arroyo a la laguna.
- *Laguna El Trampal 3*: es la más grande (6,8 ha y 0,66 hm<sup>3</sup>) y profunda (20,8 m) de las tres lagunas del Trampal y la situada a menor altitud (2.023 m) (Figura 10), tras salvar los hielos la fuerte pendiente de 100 m de desnivel que la separa del rellano morfoestructural de la segunda laguna del rosario. Este condicionante morfoestructural pudo favorecer una mayor potencia erosiva de los hielos que generaron esta cubeta lacustre de mayor tamaño. Fue represada a comienzos del siglo XX aprovechando el cordón morrénico frontal que propició su origen junto con el estrecho umbral rocoso que cierra el último escalón estructural de las lagunas del Trampal (Carandell, 1924). No se han encontrado datos de sus dimensiones originales ni de las características orográficas del cierre de la hoya.

#### Tipo LG5. Hoya-valle lateral

- *Laguna de los Huertos*: adyacente a la laguna Grande de Gredos, es una laguna muy somera (0,8 m) que inunda con carácter temporal dos depresiones del terreno separadas por un estrecho, originadas por la sobreexcavación del hielo en el borde del umbral que delimita el denominado Circo de Gredos (Figuras 5 y 11), y que se encontrarían actualmente en un avanzado estado de colmatación. Vierte sus aguas a la laguna Grande por un pequeño curso de agua de unos 8 m de longitud y un desnivel de apenas 30 cm. Si bien su origen está ligado al de la laguna

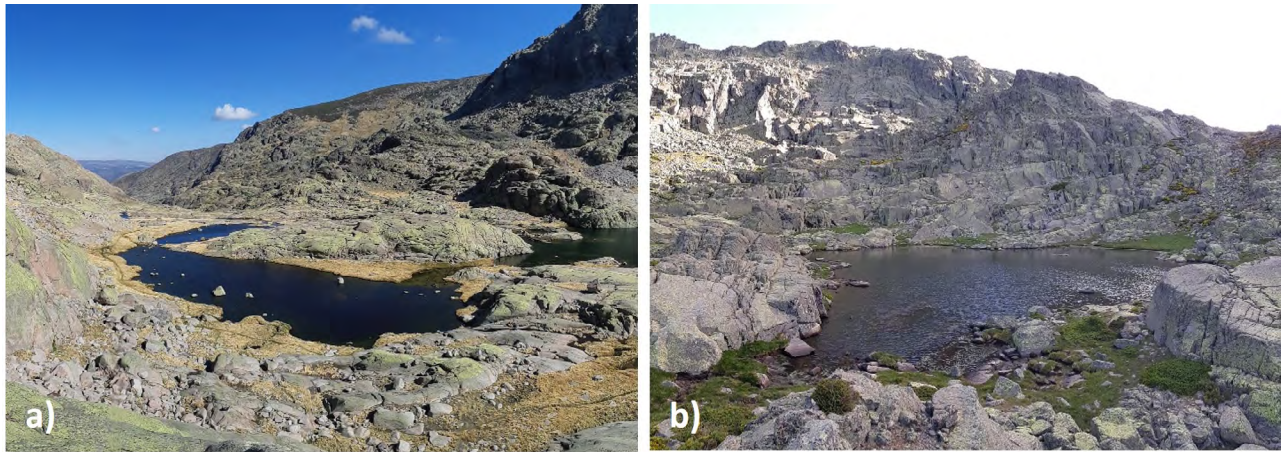


Figura 11. a) laguna de los Huertos; b) Lagunilla.  
 Figure 11. a) lake Los Huertos; b) lake Lagunilla.

Grande, su cuenca es de pequeño tamaño al estar situada en un lateral del eje fluvial del valle, estando alimentada de forma difusa. En algunos mapas topográficos (ej. IGN 1:25.000) aparece unida a la laguna Grande de Gredos como una única unidad lacustre, probablemente debido a la cercanía y la escasa diferencia de altitud, no habiéndose tratado hasta la actualidad en la bibliografía existente como una entidad lacustre independiente a pesar de sus dimensiones; aunque de volumen pequeño (2.439 m<sup>3</sup>), con 0,62 ha es la decimosexta en superficie de las 26 inventariadas en este trabajo.

- *Lagunilla*: se sitúa en una amplia hoya formada por varios ombligos o depresiones escalonadas en el llamado circo de las Lagunillas (de Pedraza & López, 1980), originado por el paleoglaciador de Los Lobos o Las Lagunillas, un compartimento del paleoglaciador del Pinar (macizo Central de Gredos) (Figuras 5 y 11). Tiene un volumen pequeño (5.524 m<sup>3</sup>) y una profundidad relativamente somera (1,7 m) para su extensión (0,66 ha), quizás por estar localizada en una zona amplia lateral del valle, donde la sobreexcavación de los hielos no debió ser tan intensa. Recibe sus aportes hídricos de forma difusa procedentes de una cuenca relativamente pequeña.

**c. Hoya-ombligo (Tipo LG6. Hoya-ombligo):** Son lagunas de pequeño tamaño y poco profundas, formadas en depresiones de las cabeceras de los valles en pequeños hombros, nichos o circos glaciares colgados (de Pedraza & López, 1980), o en pequeños rellanos pulidos por la acción glaciador. En estas zonas probablemente perduraron y desaparecieron los últimos vestigios de los hielos en estas montañas, tal y como apuntan Palacios *et al.* (2012a) para la zona de la cabecera del valle del Pinar en la sierra de Gredos, donde habrían persistido pequeños glaciares de nicho hasta hace ~10 ka, y que coinciden topográficamente con áreas en las que actualmente se acumulan y perduran más las nieves durante el invierno (observa-

ciones de los autores). Se alimentan principalmente de aguas de fusión de neveros o pequeños arroyos de carácter difuso, y generalmente presentan formas semilunares adaptadas al contorno del borde inferior del hombro o nicho glaciador. Este tipo podría tener una cierta correspondencia con la variante tipológica de lagos de valle que Hutchinson (1957) denomina *The cirque stairway*.

- *Laguna del Gutre*: ubicada en el macizo Central de Gredos (Figuras 12 y 5), es la laguna más alta del sistema Central ibérico (2.300 m), y se sitúa en la cabecera del paleoglaciador del Pinar, en un pequeño nicho glaciador colgado sobre la Hoya de Cinco Lagunas (Figura 12), hacia donde caían los hielos en cascada salvando un desnivel de 200 m (de Pedraza & López, 1980). Carrasco *et al.* (2022a) proporcionan una fecha de deglaciación para la cabecera de este nicho glaciador de 10,2 ka. Se trata de una laguna de pequeñas dimensiones (0,1 ha y 1.121 m<sup>3</sup>), aunque con una profundidad relativamente grande para su tamaño (3,1 m). No presenta un desagüe superficial, drenándose los excedentes de sus aguas a través de los derrubios de origen glaciador y periglaciador que cierran parte del nicho en el que se localiza hacia un pequeño torrente en cascada que vierte a la laguna Cimera.
- *Laguna Cuadrada*: su cubeta se formó en una hoya excavada por el hielo en un pequeño rellano de un circo colgado en la cabecera del paleoglaciador de valle del Barco o la Vega, en la sierra del Barco (Figuras 7 y 12). Es relativamente grande (0,7 ha y 0,015 hm<sup>3</sup>) y profunda (4,2 m) para esta tipología. Habitualmente no desagua superficialmente, excepto cuando alcanza un nivel extraordinario durante el deshielo o por eventos de grandes precipitaciones.
- *Laguna Negra*: formada en una pequeña hoya de sobreexcavación por el hielo, en el seno de un nicho glaciador colgado en un lateral del va-



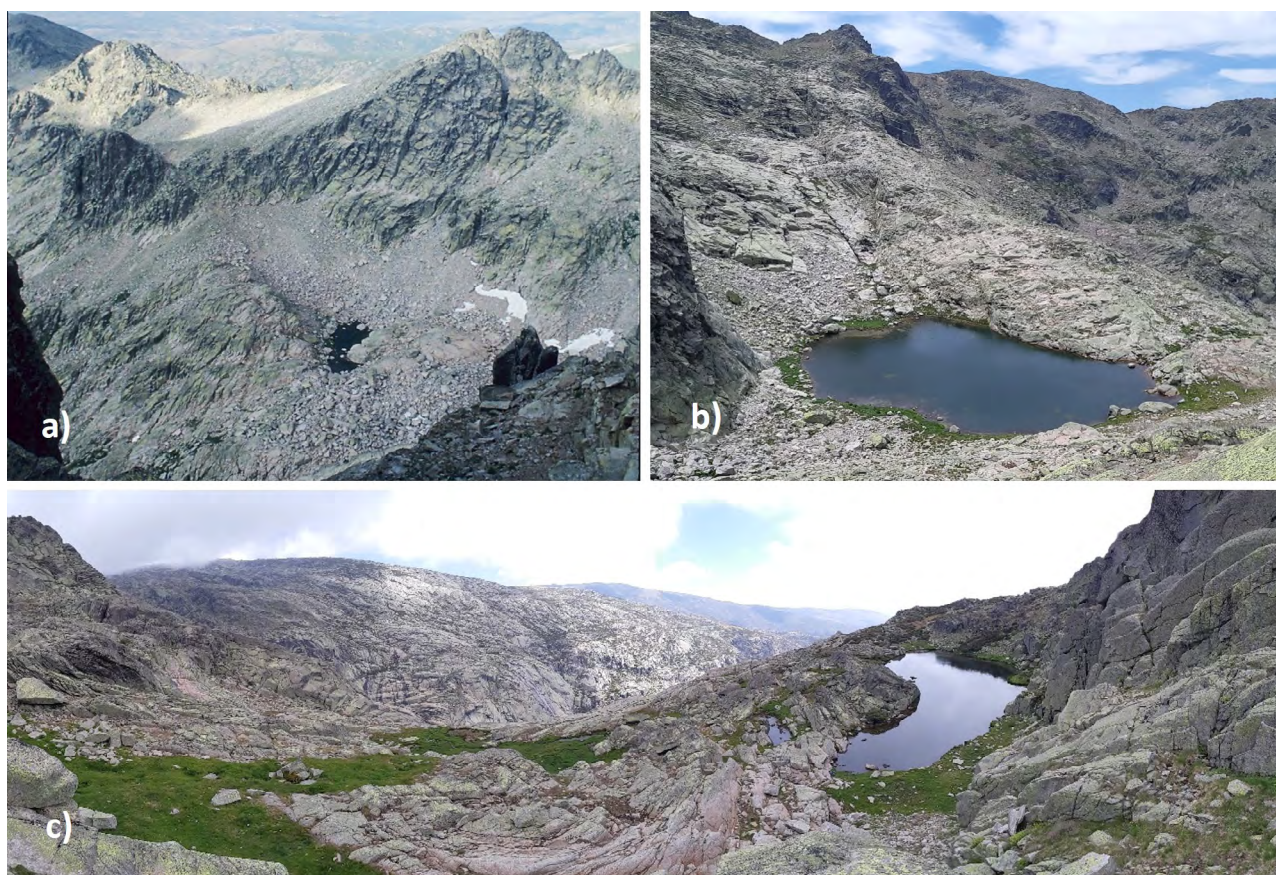


Figura 12. a) laguna del Gutre; b) laguna Cuadrada; c) laguna Negra.  
 Figure 12. a) lake Gutre; b) lake Cuadrada; c) lake Negra.

Ile del paleoglaciador del Duque, en la sierra de Béjar (Figuras 9 y 12). Tiene poca profundidad (2,1 m) y tamaño (0,22 ha y 2.373 m<sup>3</sup>). Al igual que la Cuadrada, solo desagua superficialmente cuando el nivel del agua asciende de forma pronunciada.

**d. Hoya-fluvial (Tipo LG7. Hoya-fluvial):** Son lagunas que se localizan en rellanos o escalones de escasa pendiente en los ejes fluviales actuales de las cabecezas de valle, en pequeñas depresiones u hoyas originadas por la actividad glaciaria, y que posteriormente han sido intensamente retrabajados por la acción fluvial. Ello les ha configurado una disposición alargada estructuradas por la red superficial de drenaje. Están alimentadas por arroyos permanentes de cierta entidad, por lo que presentan cubetas de contorno irregular y muy colmatadas por los materiales arrastrados por la dinámica aluvial, que pierde capacidad de transporte en estas zonas llanas y de flujo más lento y laminar. Al tener cuencas relativamente grandes y poco volumen, tienen tasas de renovación muy altas, lo que las sitúa muy afines a las características ecológicas de los sistemas lóticos.

- *Laguna de Majalaescoba*: formada en un amplio rellano morfoestructural excavado por los hielos en la zona baja de la cabecera del valle principal del paleoglaciador del Pinar (macizo Central de Gredos) (Figuras 5 y 13). Con una superficie de 0,29 ha, se ubica en una hoya con escasa pendiente, rodeada de prados y zonas encharcadas (de Pedraza & López, 1980) (Figura 13), y presenta una escasa profundidad (1,2 m) debido a la acumulación y sedimentación de materiales a lo largo del tiempo. Su tasa de renovación es elevada ya que tiene poco volumen (1.063 m<sup>3</sup>) y recibe un elevado aporte hídrico de una gran cuenca (la segunda más grande de todas las lagunas).
- *Laguna del Gargantón*: se localiza en el macizo Central de Gredos (Figuras 5 y 13), en el circo del Gargantón, un compartimento lateral del paleoglaciador de Gredos, en una de las hoyas escalonadas separadas por umbrales rocosos y excavada por los hielos (de Pedraza & López, 1980) (Figura 13). Con un entorno topográfico de menor amplitud y menor tamaño de cuenca que la de Majalaescoba, también presenta algunos pequeños prados y zonas encharcadas en sus alrededores, propiciadas por la acumulación

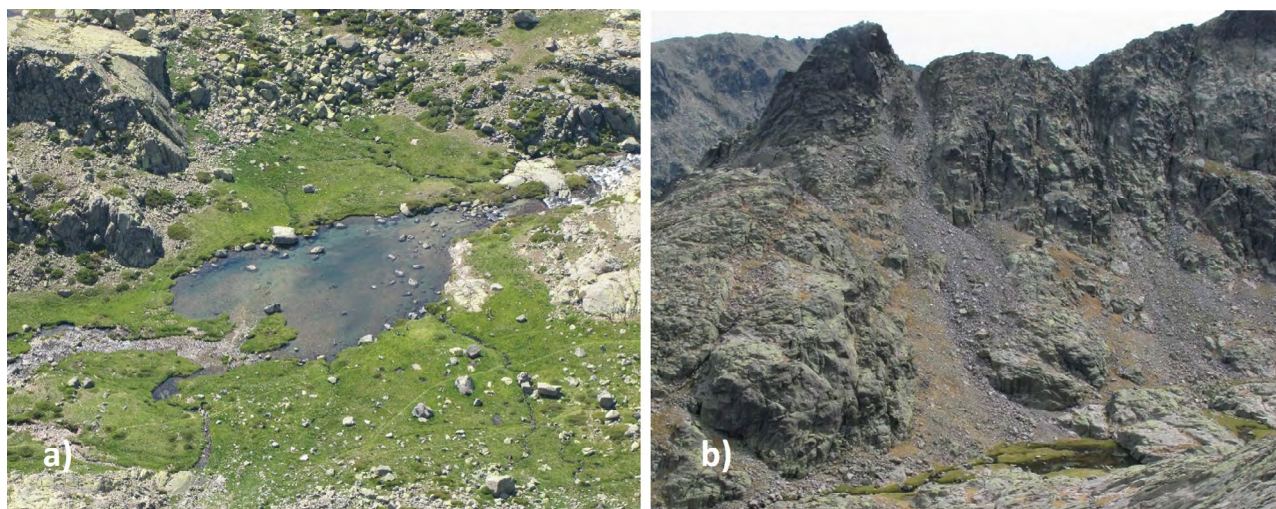


Figura 13. a) laguna de Majalaescoba; b) laguna del Gargantón.  
*Figure 13. a) lake Majalaescoba; b) lake Gargantón.*



Figura 14. a) laguna de los Pájaros; b) laguna del Cura; c) laguna de los Claveles.  
*Figure 14. a) lake Pájaros; b) lake Cura; c) lake Claveles.*

y sedimentación de materiales en pequeñas depresiones con escasa pendiente. Tiene una tasa de renovación elevada por su pequeño tamaño (1,5 m de profundidad máxima, 0,21 ha y 1.103 m<sup>3</sup>) y su cuenca relativamente extensa.

#### 4.3.2 Grupo morfogénico morrénicas

En el sistema Central ibérico no existen actualmente grandes arcos o estructuras morrénicas frontales que funcionen como presas formando grandes lagos como ocurre

en otros sistemas montañosos (ej. Pirineos). No obstante, hay numerosas zonas hidroturbosas o con prados encharcados, algunas muy extensas, confinadas en fondos de valles por morrenas terminales o en zonas llanas colgadas entre los umbrales rocosos por cordones morrénicos laterales, que en su día constituyeron lagunas y que hoy se hallan colmatadas (Campos *et al.*, 2018; Muñoz *et al.*, 1995). Las lagunas de este grupo, de pequeño tamaño, se localizan principalmente en zonas de crestas morrénicas, algunas laterales, y que en ocasiones presentan otros arcos paralelos secundarios o de menor entidad que generan depresiones intra- o intermorrénicas (Pedraza *et al.*, 2013) en cuyas cubetas endorreicas se acumula únicamente el agua de fusión de la nieve o de la escorrentía difusa de sus pequeñas cuencas. Salvo excepciones, tienen formas muy redondeadas. Debido al carácter permeable de este tipo de sustrato, la mayoría de estas lagunas muestran un régimen hidrológico temporal al no tener grandes cuencas que proporcionen un aporte continuo de agua.

Dentro de este grupo se han definido dos subgrupos:

**a. Morrénica s.s.:** son lagunas formadas por el represamiento de un único arco morrénico, presentando formas generalmente adaptadas al perímetro del arco (alargadas o semilunares) o subcirculares.

*Tipo LG8. Morrénica s.s.*

- *Laguna de los Pájaros:* es la segunda laguna a mayor altitud (2.170 m) del sistema Central ibérico, y se ubica en la sierra de Guadarrama, en una zona del macizo de Peñalara de relieve poco escarpado y suave (Figuras 6 y 14). Se habría originado por la dinámica periglacial de vertiente, que habría dismantelado una loma morrénica muy antigua y erosionada, y represado la laguna (Obermaier & Carandell, 1926). Carrasco *et al.* (2022b) aportan una fecha de deglaciación para la loma morrénica

de 16 ka. A pesar de su escaso volumen (995 m<sup>3</sup>) y profundidad (0,5 m), es la única de este tipo de régimen hidrológico permanente, ya que se localiza sobre un sustrato más impermeable de depósitos finos y compactados, y recibe un pequeño aporte continuo de agua de un manantial existente en su pequeña cuenca. Con una superficie de 0.5 ha, muestra una forma alargada muy característica, similar a una suela de zapato.

- *Laguna del Cura:* se localiza a 1.758 m de altitud en la zona oriental del macizo Central de Gredos (Figura 5), en el interior de un arco morrénico frontal originado por el paleoglacial de la Covacha (Figura 14), un glaciar de tipo ladera (de Pedraza & López, 1980). Es de carácter temporal, aunque permanece más tiempo el agua a comienzos del verano que en el resto de las lagunas temporales de tipo morrénico, tal vez debido a la presencia de un sustrato con una matriz más abundante de materiales finos. Tiene un volumen pequeño (905 m<sup>3</sup>) con una superficie de 0,37 ha y una profundidad máxima de 0,7 m.
- *Laguna de los Claveles:* originada al abrigo de un arco morrénico en el macizo de Peñalara, sierra de Guadarrama, a 2.119 m de altitud (Figuras 6 y 14), presenta una forma de medialuna ajustada al perímetro del arco morrénico. Aunque Sanz Herráiz (1977) la describió como una formación de tipo *protalus rampart*, relativamente frecuente en la vecina sierra de Gredos (de Marcos, 2000; Sancho *et al.*, 2001), la realidad es que las dimensiones del arco morrénico (más de 300 m) se corresponden con una típica morrena de origen glacial, cuya edad de deglaciación se ha calculado en  $16,2 \pm 1,6$  ka (Carrasco *et al.*, 2022b). A pesar de su tamaño (0,72 ha y 7.605 m<sup>3</sup>) y profundidad máxima (2,6 m), relativamente grandes para este tipo, presenta un régimen hidrológico temporal favorecido por la gran permeabilidad del sustrato, secándose totalmente a comienzos del verano.

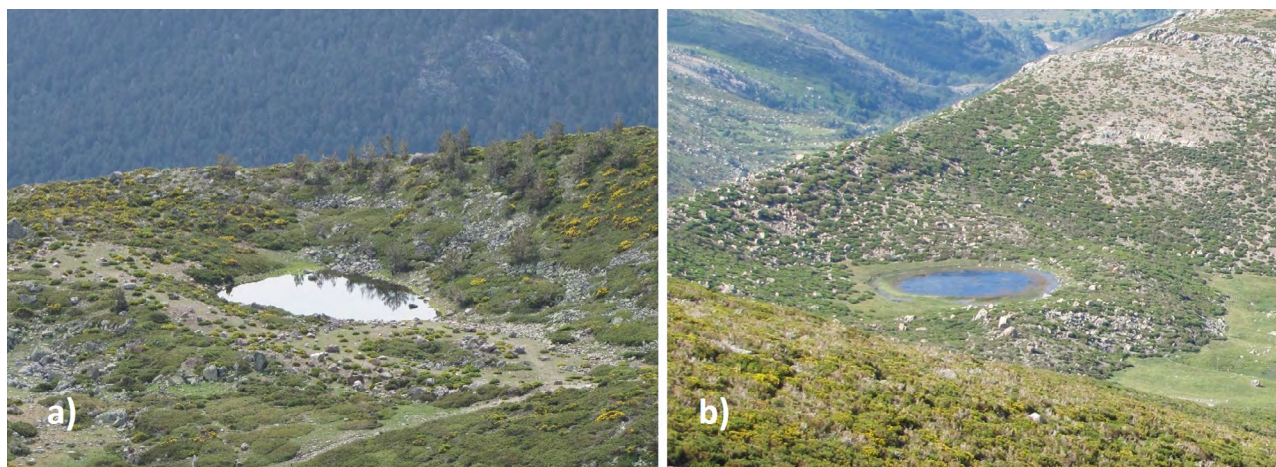


Figura 15. a) laguna Chica; b) laguna del Cervunal.  
Figure 15. a) lake Chica; b) lake Cervunal.

**b. Intermorrénica:** lagunas formadas en una depresión entre dos arcos morrénicos.

*Tipo LG9. Intermorrénica.*

- *Laguna Chica:* formada a 1.959 m de altitud en una depresión entre dos arcos morrénicos del paleoglaciar de la Hoya de Peñalara, en la sierra de Guadarrama (Figuras 6 y 15), como consecuencia de fluctuaciones en el avance y retroceso de los hielos pleistocenos (de Marcos *et al.*, 2022; Palacios *et al.*, 2012c; Sanz Herráiz, 1977), y cuya edad media de deglaciación se ha establecido en  $17,1 \pm 1,1$  ka (Carrasco *et al.*, 2022b). Tiene un régimen estacional, secándose en la época estival debido al carácter permeable del depósito morrénico, a sus pequeñas dimensiones (0,12 ha y 838 m<sup>3</sup>) y a la ausencia de un aporte hídrico de su pequeña cuenca. Su cubeta (1,8 m de profundidad máxima) y entorno presentan una orientación NW, a diferencia de las otras tres lagunas estudiadas en esta sierra, que muestran una orientación SE o ESE. El cordón morrénico que cierra esta laguna por su orilla NW sufrió un recrecimiento en 1985 para almacenamiento de agua con fines de innivación artificial de una estación de esquí (hoy desmantelada), aunque fue restaurada un año después a sus condiciones originales (Toro, 2007).
- *Laguna del Cervunal:* su cubeta circular se formó en el sistema morrénico lateral del paleoglaciar del valle del Pinar, en el macizo Central de Gredos (Figuras 5 y 15), en una zona intermorrénica de un pequeño arco periférico, probablemente originado por una transfluencia glacial del paleoglaciar del Pinar hacia la cuenca del pequeño paleoglaciar de ladera de Hoya Nevada (Carrasco *et al.*, 2020; de Pedraza & López, 1980; Paris, 1916; Pedraza *et al.*, 2013). La disposición de estos cordones morrénicos laterales determinó la singular orientación ESE de la laguna y su entorno. Al igual que la anterior, es una laguna temporal que carece de aportes hídricos estivales y se localiza sobre un material morrénico muy permeable, almacena poco volumen de agua (2.902 m<sup>3</sup>) y tiene una superficie (0,59 ha) y profundidad máxima (1 m) modestas.

La tipología morfogenética que se propone para las lagunas glaciares de las sierras de Guadarrama y Gredos se representa en la Figura 16. En las imágenes aéreas de las Figuras 5, 6, 7 y 9 puede verse la ubicación de cada laguna en el entorno geomorfológico modelado por los glaciares cuaternarios de las sierras objeto del estudio.

La clasificación propuesta profundiza más en las singularidades morfogenéticas de las lagunas respecto a la elaborada previamente por Toro & Granados (2001) para 21 de las 26 lagunas incluidas en este trabajo. Abarca toda la diversidad genética en detalle de los complejos lacustres del sistema Central ibérico en su territorio español,

algunos de cuyos tipos no tienen una correspondencia exacta con los tipos de las clasificaciones tradicionales establecidas previamente por otros autores. Se mantienen tipos comunes a todas ellas como LG1 (*hoya-circo s.s.*), LG4 (*hoya-valle en rosario*) o LG8 y LG9 (*morrénica s.s. e intermorrénica*), pero se incluyen tipos de nueva definición, como LG7 (*hoya-fluvial*), o que representan variaciones de algunos tipos más comunes por su peculiaridad geomorfológica en relación con su génesis glacial, como LG2 (*hoya-circo con morrena*) o LG5 (*hoya-valle lateral*). Una aplicación directa de los tipos más generales a estos sistemas lacustres enmascararía estas singularidades geomorfológicas características de estas montañas en el ámbito mediterráneo, no definidas en otros sistemas montañosos. A raíz del análisis de esta clasificación, también puede establecerse un gradiente de edad para algunos de los tipos en base a la retirada de los hielos, constituyendo un buen ejemplo de ello las lagunas situadas en el valle del paleoglaciar del Pinar (Palacios *et al.*, 2012a). A priori las más jóvenes serían las del tipo *hoya-ombigo* (LG06), ubicadas en los últimos nichos colgados ocupados por los hielos (ej. Gutre), seguidas de las de *hoya-circo s.s.* (LG01) en las cabeceras de los valles (ej. Cimera), y algo menos jóvenes serían las de *hoya-valle en rosario* (LG04), en las que el aparato glacial fue retirándose progresivamente desde la situada a menor altitud (ej. Cinco Lagunas). Las más antiguas serían las de *hoya-fluvial* (LG7), en las depresiones de menor pendiente situadas en la base de los valles, donde la acción fluvial ha tenido más tiempo de modelar el terreno al retroceder los glaciares en el pasado (ej. Majalaescoba).

## 5. Conclusiones

En la península ibérica, los lagos y lagunas de alta montaña tienen un origen asociado, en la mayoría de los casos, a la acción de los hielos cuaternarios. Los glaciares retrabajaron el relieve preexistente y aprovecharon la red de fracturación para ensanchar valles y circos y crear cubetas de sobreexcavación, así como para depositar sedimentos. Este relieve postglacial ha sido aprovechado por los cuerpos lacustres en zonas donde la litología y las condiciones microclimáticas eran favorables, originando así el conjunto de lagos alpinos de las montañas peninsulares.

Gracias a los numerosos estudios geomorfológicos existentes sobre el glacialismo pleistoceno en el sistema Central ibérico, se han podido definir 9 tipos morfogenéticos específicos para las lagunas de alta montaña de las sierras de Guadarrama y Gredos, que representan de forma más ajustada su diversidad geomorfológica como consecuencia de su génesis glacial. Algunas de ellas han perdido su condición natural al haber sufrido el represamiento de sus cubetas para aumentar la capacidad de almacenamiento de agua para usos hidroeléctricos y de regadío, lo que ha supuesto una lamentable pérdida de información sobre las características geomorfológicas originales de algunas de las lagunas del sistema Central ibérico; en especial, aquéllas pertenecientes al tipo genético de *hoya-valle*

**TIPOLOGÍA MORFOGENÉTICA DE  
LAS LAGUNAS DEL SISTEMA CENTRAL IBÉRICO  
(Sierras de Guadarrama y Gredos)**

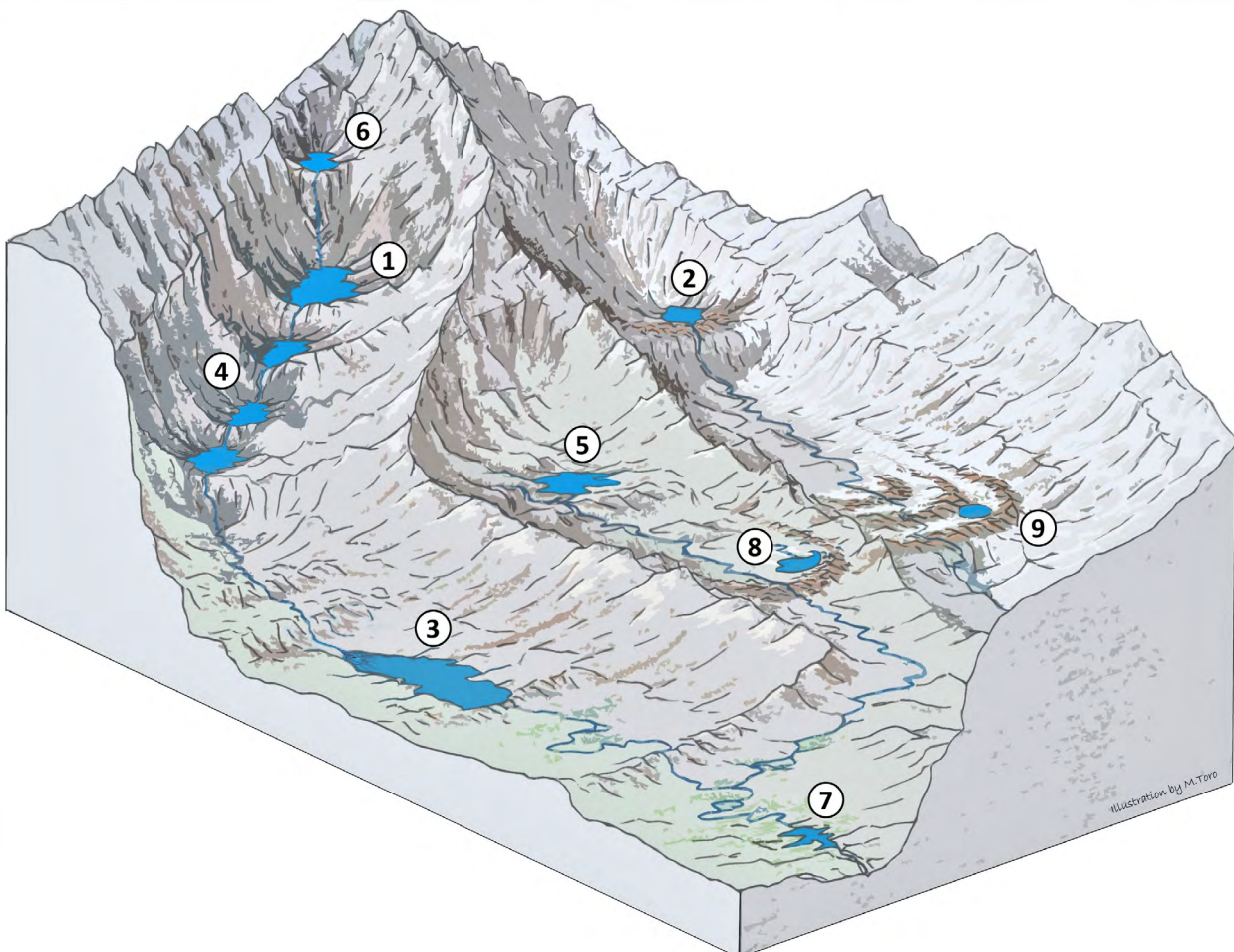
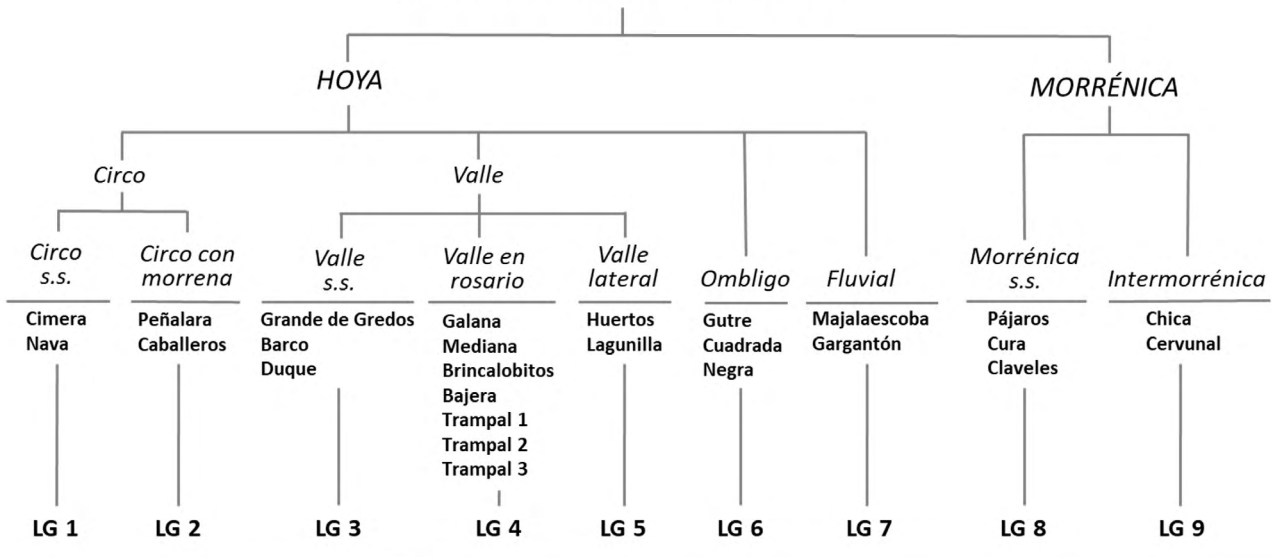


Figura 16. Tipología de la morfogénesis ligada al glaciario de las lagunas de alta montaña del sistema Central ibérico (sierras de Guadarrama y Gredos).

Figure 16. Morphogenesis typology of high mountain lakes in Iberian Central System (Sierras de Guadarrama and Gredos).

situadas en las zonas más bajas que alcanzaron los hielos. Además, este represamiento altera drásticamente las condiciones ecológicas naturales de estas lagunas, afectando a sus características fisicoquímicas, las comunidades biológicas y su régimen hidrológico.

Más de la mitad de los lagos y lagunas de la península ibérica no superan las 2 ha de superficie (Pascual Martínez *et al.*, 2000), y en el caso de las lagunas de alta montaña del sistema Central ibérico español (sierras de Guadarrama y Gredos), el 65% tiene una superficie inferior a 1 ha y el 80% una profundidad máxima inferior a 10 m (Granados *et al.*, 2006; Toro & Granados, 1998, 2001). De ahí la importancia de considerar toda su diversidad morfo genética, a pesar de sus dimensiones relativamente pequeñas en comparación con los lagos que han sido el objeto de estudio paradigmático en la historia de la limnología y en los que se han basado las tipologías genéticas lacustres a escala mundial (Casado & Montes, 1995).

En trabajos futuros, esta clasificación podría ampliarse incluyendo otros tipos específicos de las lagunas de alta montaña mediterránea existentes en sistemas montañosos de la península ibérica no incluidos en este estudio. Un ejemplo serían las cercanas lagunas de la Serra da Estrela, en el extremo oeste del sistema Central ibérico, donde se produjo un glaciario de meseta que originó una geomorfología glacial con cubetas lacustres (Vieira, 2006) diferente a la observada en los sistemas lacustres de las sierras de Guadarrama y Gredos, al igual que sucedió más al norte en las lagunas de sierra Segundera (montes galico-leoneses) (Morales & Negro, 2021).

La aproximación conjunta de los estudios geomorfológicos centrados en la reconstrucción espacio-temporal de la deglaciación utilizando técnicas geocronológicas (ej. dataciones por isótopos cosmogénicos de registros erosivos y deposicionales de origen glacial) (de Marcos *et al.*, 2022), junto con estudios paleolimnológicos en las cubetas de los lagos formados tras la retirada de los hielos, en los que se reconstruya toda la historia de estos ecosistemas estudiando sus sedimentos y su cronología mediante técnicas radiométricas (Sánchez-López, 2016), constituye un excelente enfoque multidisciplinar para reconstruir con precisión la historia de las montañas y del origen y evolución de sus sistemas lacustres a escala local y regional.

La creación y asignación de una tipología genética a los lagos y lagunas de otros sistemas montañosos de la península ibérica, siguiendo criterios de clasificación similares a los adoptados en este trabajo, proporcionaría un conocimiento esencial para poder caracterizar e interpretar mejor el funcionamiento y los procesos ecológicos de estos ecosistemas, y valorar y predecir su sensibilidad y respuesta frente a cambios ambientales o climáticos recientes, tanto a nivel individual como en conjunto para cada uno de los sistemas lacustres de cada región.

### Agradecimientos

El Servicio Territorial de Medio Ambiente de Ávila (Junta de Castilla y León) ha facilitado los permisos

para realizar esta investigación en las lagunas del Parque Regional de la Sierra de Gredos, y la Dirección General de Medio Ambiente de la Comunidad de Madrid para los trabajos en las lagunas del Macizo de Peñalara. Gracias a Victoria Bermejo por su valiosa revisión del primer manuscrito, y a los revisores anónimos de la revista Pirineos, contribuyendo todos ellos a mejorar sustancialmente el manuscrito final en su forma y contenido. La autoría de las fotografías de las lagunas es de Manuel Toro, excepto la 12 a) realizada por Ignacio Granados, la 14 a) por Miguel A. Izquierdo, y la 14 c) por M<sup>a</sup> Ángeles Miguel. Marc Oliva agradece el apoyo del grupo de investigación AN-TALP (2021 SGR 00269) financiado por AGAUR-Generalitat de Catalunya.

### Referencias

- Alcalá-Reygosa, J., Palacios, D., Campos, N., de Andrés, N., Schimmelpfennig, I., Léanni, L. & Sanjurjo, J., ASTER Team. 2019. The rapid deglaciation of the La Vega gorge (Sierra de Gredos, Spain) following the Last Glacial Maximum. *20th Congress of the International Union for Quaternary Research (INQUA)*. Dublin.
- Aparicio, A. & Cacho, L. 1987. *Geología del Sistema Central español*. Madrid, España: Consejería de Política Territorial de Madrid, Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- Battarbee, R. W. 2005. Mountain lakes, pristine or polluted?. *Limnetica*, 24 (1): 1-8. <https://doi.org/10.23818/limn.24.01>
- Boavida, M. J. & Gliwicz, M. 1996. Limnological and biological characteristics of the alpine lakes of Portugal. *Limnetica*, 12 (2): 39-45. <https://doi.org/10.23818/limn.12.11>
- Campos, N., Tanarro, L. M. & Palacios, D. 2018. Geomorphology of glaciated gorges in a granitic massif (Gredos range, central Spain). *Journal of Maps*, 14 (2): 321-329. <https://doi.org/10.1080/17445647.2018.1468829>
- Carandell, J. 1924. La topografía glacial del Macizo del Trampal-Calvitero (Bejar). *Boletín del Instituto Geológico de España*, XLV(V): 1-24.
- Carrasco, R. M., Pedraza, J., Domínguez-Villar, D., Villa, J. & Willenbring, J. K. 2013. The plateau glacier in the Sierra de Béjar (Iberian Central System) during its maximum extent. Reconstruction and chronology. *Geomorphology*, 196: 83-93. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.03.019>
- Carrasco, R. M., Pedraza, J. & Palacios, D. 2022a. The glaciers of the Sierra de Gredos. In: M. Oliva, D. Palacios & J. M. Fernández-Fernández (eds.), *Iberia, Land of Glaciers*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier. 457-483 pp. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821941-6.00022-0>
- Carrasco, R. M., Pedraza, J. & Palacios, D. 2022b. The glaciers of the Sierras de Guadarrama and Somosierra. In: M. Oliva, D. Palacios, y J. M. Fernández-Fernández (Eds.), *Iberia, Land of Glaciers*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier. 485-503 pp. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821941-6.00023-2>
- Carrasco, R. M., Soteres, R. L., Pedraza, J., Fernández-Lozano, J., Turu, V., Antonio López-Sáez, J., Karampaglidis, T., Granja-Bruña, J. L. & Muñoz-Martín, A. 2020. Glacial geomorphology of the High Gredos Massif: Gredos and Pinar valleys (Iberian Central System, Spain). *Journal of Maps*, 16 (2): 790-804. <https://doi.org/10.1080/17445647.2020.1833768>
- Carrivick, J. & Tweed, F. 2013. Proglacial Lakes: Character, behaviour and geological importance. *Quaternary Science Reviews*, 78: 34-52. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2013.07.028>

- Casado, S. & Montes, C. (eds) 1995. *Guía de los lagos y humedales de España*. Madrid, España: J.M. Reyer Editor.
- Castillo, A. 2009. *Lagunas de Sierra Nevada*. Granada, España: Editorial Universidad de Granada.
- Castillo, A., Benavente, J. & Hidalgo, M. del C. 2005. Primeros datos sobre el inventario y caracterización morfométrica de las lagunas glaciares “permanentes” del Parque Nacional de Sierra Nevada (Granada). *Publicaciones del IGME*, 1, 619-628.
- Catalan, J., Camarero, L., Felip, M., Pla, S., Ventura, M., Buchaca, T., Bartumeus, F., de Mendoza, G. & Miró, A. 2006. High mountain lakes: Extreme habitats and witnesses of environmental changes. *Limnetica*, 25 (1): 551-584. <https://doi.org/10.23818/limn.25.38>
- Catalan, J., Ventura, M., Anton, B., Granados, I., Thies, H., Nic-kus, U., Korhola, A., Lotter, A., Barbieri, A., Stuchlik, E., Lien, L., Bitušik, P., Buchaca, T., Camarero, L., Goudsmit, G., Kopáček, J., Lemcke, G., Livingstone, D., Müller, B. & Toro, M. 2002. Seasonal ecosystem variability in remote mountain lakes: Implications for detecting climatic signals in sediment records. *Journal of Paleolimnology*, 28: 25-46. <https://doi.org/10.1023/A:1020315817235>
- Clark, P., Dyke, A., Shakun, J., Carlson, A., Clark, J., Wohlfarth, B., Mitrovica, J., Hostetler, S. & McCabe, A. 2009. The Last Glacial Maximum. *Science*, 325: 710-714. <https://doi.org/10.1126/science.1172873>
- Cruz, R., Goy, J. L. & Zazo, C. 2014. Hydrological Patrimony in the mountainous areas of Spain: Geodiversity inventory and cataloguing of the Sierras De Béjar and Del Barco (in the Sierra de Gredos of the Central System). *Environmental Earth Sciences*, 71 (1): 85-97. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2697-0>
- de Marcos, F. J. 2000. Procesos actuales en el Alto Gredos: Garganta del Pinar. En: J.L., Peña, Sánchez-Fabre & M., Lozano, M.V. (eds.), *Procesos y formas periglaciares en la montaña mediterránea*. Albarracín, España: IV Reunión I.P.A. 213-234 pp.
- de Marcos, F. J., Úbeda, J., Andrés, N. & Palacios, D. 2022. A combination of cosmogenic and Schmidt hammer exposure dating in the study of the deglaciation timing of Sierra de Guadarrama National Park (Spain). *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 104 (2): 70-89. <https://doi.org/10.1080/04353676.2022.2054146>
- de Pedraza, J. 2005. El glaciario pleistoceno del Sistema Central. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 13 (3): 278-288. <https://raco.cat/index.php/ECT/article/view/89059>
- de Pedraza, J. & López, J. 1980. *Gredos. Geología y glaciario*. Zaragoza, España: Trazo-Editorial.
- de Pisón, E. M. & Otero, F. A. 1992. Algunas reflexiones sobre el glaciario en las montañas españolas. *Cuadernos de Sección. Historia*, 20: 109-121.
- del Castillo, M. 2003. *Morfometría de lagos. Una aplicación a los lagos del Pirineo*. Tesis doctoral. Universitat de Barcelona.
- Díaz-Hernández, J. & Herrera-Martínez, A. 2021. Formation Patterns of Mediterranean High-Mountain Water-Bodies in Sierra-Nevada, SE Spain. *Water*, 13 (4): 438. <https://doi.org/10.3390/w13040438>
- Durán, L., Sánchez, E. & Yagüe, C. 2013. Climatology of precipitation over the Iberian Central System mountain range. *International Journal of Climatology*, 33 (9): 2260-2273. <https://doi.org/10.1002/joc.3602>
- Easterbrook, D. J. 1999. *Surface Processes and Landforms*. New Jersey, USA: Prentice Hall.
- Fairbridge, R. W. 1968. Glacial lakes. In: R. W. Fairbridge (eds.), *Geomorphology. Encyclopedia of Earth Science*. Berlin, Germany: Springer. 444-453 pp. [https://doi.org/10.1007/3-540-31060-6\\_152](https://doi.org/10.1007/3-540-31060-6_152)
- Fernández, C. & García, E. 1987. *Lagos y lagunas de Asturias*. Salinas, España: Ayalga Ediciones.
- Fuentes-Pérez, J. F., Navarro Hevia, J., Ruiz Legazpi, J. & García-Vega, A. 2015. Inventario y caracterización morfológica de lagos y lagunas de alta montaña en las provincias de Palencia y León (España). *Pirineos*, 170 (0): e013. <https://doi.org/10.3989/Pirineos.2015.170006>
- Granados, I. & Toro, M. 2000. Recent warming in a high mountain lake (Laguna Cimera, Central Spain) inferred by means of fossil chironomids. *Journal of Limnology*, 59 (suppl. 1): 109-119. <https://doi.org/10.4081/jlimnol.2000.s1.109>
- Granados, I., Toro, M. & Rubio-Romero, A. 2006. *Laguna Grande de Peñalara: 10 años de seguimiento limnológico*. Serie Técnica del Medio Natural. Madrid, España: Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio de la Comunidad de Madrid.
- Håkanson, L. 2004. *Lakes: Form and Function*. Caldwell, USA: Blackburn Press.
- Håkanson, L. 2005. The Importance of Lake Morphometry for the Structure and Function of Lakes. *International Review of Hydrobiology*, 90 (4): 433-461. <https://doi.org/10.1002/iroh.200410775>
- Haritashya, U. K., Singh, V. P. & Singh, P. 2011. Paternoster Lakes. In: V. P. Singh, P. Singh, y U. K. Haritashya (eds.), *Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers*. Netherlands: Springer. 826-826 pp. [https://doi.org/10.1007/978-90-481-2642-2\\_394](https://doi.org/10.1007/978-90-481-2642-2_394)
- Hassen, K. 2021. *Spatial analysis and Environmental modeling*. Haramaya, Ethiopia. 143 pp.
- Hidroeléctrica de Navarra 1919. Construcción de central en laguna del Duque. *La Energía Eléctrica*, Año XXI (19) (10 octubre 1919): 231.
- Hutchinson, G. E. 1957. *A treatise on limnology. I. Geography, Physics and Chemistry*. New York, USA: John Wiley & Sons.
- Křížek, M., Vočadlova, K. & Engel, Z. 2012. Cirque overdeepening and their relationship to morphometry. *Geomorphology*, 139-140: 495-505. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.11.014>
- Löffler, H. 2003. The Origin of Lake Basins. In: P.E. O’Sullivan & C.S. Reynolds, *The Lakes Handbook*. New York, USA: John Wiley & Sons, 8-60 pp. <https://doi.org/10.1002/9780470999271.ch2>
- Margalef, R. 1983. *Limnología*. Barcelona, España: Ediciones Omega.
- McCoy, J., Johnston, K., Kopp, S., Borup, B., Willison, J. & Payne, B. 2002. *Using ArcGIS™ Spatial Analyst*. ESRI. Redlands, USA: Environmental Systems Research Institute Inc. [http://downloads.esri.com/support/documentation/ao\\_776Using\\_Spatial\\_Analyst.pdf](http://downloads.esri.com/support/documentation/ao_776Using_Spatial_Analyst.pdf)
- Medina-Sánchez, J. M., Cábritero, M. J., González-Olalla, J. M., Villar-Argaiz, M. & Carrillo, P. 2022. High Mountain Lakes as Remote Sensors of Global Change. In: R. Zamora & M. Oliva (eds.), *The Landscape of the Sierra Nevada: A Unique Laboratory of Global Processes in Spain*. Springer International Publishing. 261-278 pp. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-94219-9\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-030-94219-9_16)
- Ministerio de Fomento 2015. Orden FOM/2807/2015, de 18 de diciembre, por la que se aprueba la política de difusión pública de la información geográfica generada por la Dirección General del Instituto Geográfico Nacional. *Boletín Oficial del Estado*, 306 (Sección III): 122165-122170.
- Montes, C. (coord.). (1995). *Proyectos de apoyo técnico a los Planes Hidrológicos de cuenca en aspectos relacionados con las Zonas Húmedas. Actualización e informatización del Inventario de Lagos y Humedales de España y desarrollo de manuales de valoración y deslinde*. [Informe Técnico]. D.G.O.H. (MOPTMA) - INIMA.

- Morales, J. & Negro, A. I. 2021. Caracterización del complejo lacustre glaciario de alta montaña de sierra segunda (NO de Zamora). *Pirineos*, 176 (e63): 1-23. <https://doi.org/10.3989/pirineos.2021.176001>
- Moser, K. A., Baron, J. S., Brahney, J., Oleksy, I. A., Saros, J. E., Hundey, E. J., Sadro, S., Kopáček, J., Sommaruga, R., Kainz, M. J., Strecker, A. L., Chandra, S., Walters, D. M., Preston, D. L., Michelutti, N., Lepori, F., Spaulding, S. A., Christianson, K. R., Melack, J. M. & Smol, J. P. 2019. Mountain lakes: Eyes on global environmental change. *Global and Planetary Change*, 178: 77-95. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.04.001>
- Muñoz, J., de Marcos, F. J. & Palacios, D. 2022. El valor patrimonial de los paisajes glaciares de Gredos. En: Martínez Cardenas, R.; Cabrales Barajas, L.F.; Calle Vaquero, M. de la; García Hernández, M.; Minguéz García, M.C. & Troitiño Torralba, L.. *Leyendo el territorio. Homenaje a Miguel Ángel Troitiño*. Guadalajara, España: Universidad de Guadalajara. 374-386 pp.
- Muñoz, J., Palacios, D. & de Marcos, F. J. 1995. The influence of the geomorphologic heritage on present slope dynamics. The Gredos Cirque, Spain. *Pirineos*, 145-146: 35-63. <https://doi.org/10.3989/pirineos.1995.v145-146.146>
- Obermaier, H., Carandell, J. 1926. Sierra de Guadarrama: Excursión B-2. *XIV Congreso Geológico Internacional, Madrid*, 46.
- Oliva, M., Palacios, D. & Fernández-Fernández, J. (2022). *Iberia, land of glaciers*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821941-6.00026-8>
- Oliva, M., Palacios, D., Fernández-Fernández, J. M., Rodríguez-Rodríguez, L., García-Ruiz, J. M., Andrés, N., Carrasco, R. M., Pedraza, J., Pérez-Alberti, A., Valcárcel, M. & Hughes, P. D. 2019. Late Quaternary glacial phases in the Iberian Peninsula. *Earth-Science Reviews*, 192: 564-600. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.03.015>
- Otto, J.-C. 2019. Proglacial Lakes in High Mountain Environments. In: T. Heckmann & D. Morche (eds.), *Geomorphology of Proglacial Systems. Geography of the Physical Environment*. Cham, Switzerland: Springer. 231-247 pp. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-94184-4\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-319-94184-4_14)
- Paiva, M. de S. 2016. *Estudo morfológico e hidrogeoquímico de lagoas da Serra da Estrela*. Master Dissertação. Universidade do Porto.
- Palacios, D., Andrés, N., Marcos, J. & Vázquez-Selem, L. 2012a. Maximum glacial advance and deglaciation of the Pinar Valley (Sierra de Gredos, Central Spain) and its significance in the Mediterranean context. *Geomorphology*, 177-178: 51-61. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.07.013>
- Palacios, D., Andrés, N., Vieira, G., Marcos, J. & Vázquez-Selem, L. 2012b. Last glacial maximum and deglaciation of the Iberian Central System. *Geophysical Research Abstracts*, 14: EGU2012-3738-1. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2010.04.029>
- Palacios, D., de Andrés, N., de Marcos, J. & Vázquez-Selem, L. 2012c. Glacial landforms and their paleoclimatic significance in Sierra de Guadarrama, Central Iberian Peninsula. *Geomorphology*, 139-140: 67-78. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.10.003>
- Paris, P. 1916. Junta para ampliación de estudios é investigaciones científicas. *Bulletin Hispanique*, 18 (2): 114-131. <https://doi.org/10.3406/hispa.1916.1923>
- Pascual Martínez, M. L., Rodríguez-Alarcón, A., Hidalgo Zamora, J., Borja, F., Díaz del Olmo, F. & Montes del Olmo, C. 2000. Distribución y caracterización morfológica y morfológica de los lagos y lagunas de alta montaña de la España peninsular. En: Granados I. & Toro M. (eds.), *Conservación de los Lagos y Humedales de Alta Montaña de la Península Ibérica*. Colección de Estudios, 63. Madrid, España: UAM Ediciones. 51-77 pp.
- Pedraza, J., Carrasco, R. M., Domínguez-Villar, D. & Villa, J. 2013. Late Pleistocene glacial evolutionary stages in the Gredos Mountains (Iberian Central System). *Terrestrial archives of the Mediterranean*, 302: 88-100. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2012.10.038>
- Pedraza, J., Carrasco, R. M., Villa, J., Soteris, R. L., Karampaglidis, T. & Fernández-Lozano, J. 2019. Cirques in the Sierra de Guadarrama and Somosierra Mountains (Iberian Central System): Shape, size and controlling factors. *Geomorphology*, 341: 153-168. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.05.024>
- Pérez-Martínez, C., Conde-Porcuna, J., Ramos-Rodríguez, E., Moreno-Linares, E., Rühland, K., Jezierski, A., Smol, J., García-Alix, A., Heiri, O., Corral-Arredondo, E. & Jiménez, L. 2022. Paleolimnological Indicators of Global Change. In: Zamora, R. & Oliva, M. (eds) *The Landscape of the Sierra Nevada*. Cham, Switzerland: Springer. 279-291 pp. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-94219-9\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-030-94219-9_17)
- Robles, S., Rodríguez, J. M., Granados, I. & Guerrero, M. C. 2000. Sulfite-Reducing clostridia in the sediment of a high mountain lake (Laguna Grande, Gredos, Spain) as indicators of fecal pollution. *International Microbiology*, 3: 187-191.
- Ruiz-Labourdette, D., Martínez, F., Martín-López, B., Montes, C. & Pineda, F.D. 2011. Equilibrium of vegetation and climate at the European rear edge. A reference for climate change planning in mountainous Mediterranean regions. *International Journal of Biometeorology*, 55 (3): 285-301. <https://doi.org/10.1007/s00484-010-0334-0>
- Sánchez-España, J., Vegas, J., Morellon, M., Mata, M. P. & Rodríguez García, J. A. 2019. Hydrogeochemical characteristics of the Saliencia lakes (Somiedo Natural Park, NW Spain): Trophic state and relationship with anthropogenic pressures. *Boletín Geológico y Minero*, 130 (2): 251-269. <https://doi.org/10.21701/bolgeomin.130.2.003>
- Sánchez-López, G. 2016. *North Atlantic Oscillation imprints in the Central Iberian Peninsula for the last two millennia: From ordination analyses to the Bayesian approach*. Tesis Doctoral. Universitat de Barcelona.
- Sánchez-López, G., Hernández, A., Pla-Rabes, S., Trigo, R. M., Toro, M., Granados, I., Sáez, A., Masqué, P., Pueyo, J. J., Rubio-Inglés, M. J. & Giralt, S. 2016. Climate reconstruction for the last two millennia in central Iberia: The role of East Atlantic (EA), North Atlantic Oscillation (NAO) and their interplay over the Iberian Peninsula. *Quaternary Science Reviews*, 149: 135-150. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2016.07.021>
- Sancho, L. G., Palacios, D., de Marcos, J. & Valladares, F. 2001. Geomorphological significance of lichen colonization in a present snow hollow: Hoya del Cuchillar de las Navajas, Sierra de Gredos (Spain). *Catena*, 43 (4): 323-340. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(00\)00131-4](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(00)00131-4)
- Sanz Herráiz, C. 1977. Morfología glaciario en la Sierra de Guadarrama. El modelado de las áreas glaciares y periglaciares (Peñalara—Los Pelados). *V Coloquio de Geografía*, 49-55.
- Sanz Herráiz, C. 1988. *El relieve del Guadarrama Oriental*. Madrid, España: Consejería de Medio Ambiente, Vivienda y Agricultura.
- Toro, M. 2007. Las lagunas del Macizo de Peñalara (Sierra de Guadarrama): De los primeros naturalistas y científicos a los problemas de conservación a comienzos del siglo XXI. *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural. Sección biológica*, 102 (1): 127-148.
- Toro, M., Granados, I. 1999. *Inventario, cartografía y caracterización de las charcas y lagunas del Parque Natural de la Cumbre, Circo y Lagunas de Peñalara*. Informe del Departamento de Ecología de la Universidad Autónoma de Madrid para la Consejería de Medio Ambiente y Desarrollo Regional de la Comunidad de Madrid. Comunidad de Madrid.



- Toro, M., Granados, I. 2001. *Las lagunas del Parque Regional de la Sierra de Gredos*. Monografías de la red de Espacios Naturales de Castilla y León. Valladolid, España: Junta de Castilla y León. Valladolid.
- Vega, J. C., De Hoyos, C. & Aldasoro, J. J. 1992. *Estudio del sistema de lagunas de las Sierras Segundera y Cabrera*. Monografías de la red de Espacios Naturales de Castilla y León. Valladolid, España: Junta de Castilla y León.
- Velasco, J. L., Álvarez, M. & Colomer, M. G. S. 2005. Comunidades planctónicas de los lagos de montaña de Neila (Burgos, España). *Ecología*, 19: 75-94.
- Velasco, J. L., Araujo, R., Álvarez, M., Colomer, M. G. S. & Baltanás, J. A. 1999. Aportación al conocimiento limnológico de ocho lagos y lagunas de montaña de Asturias (España). *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural (Sección biológica)*, 95 (1-2): 181-191.
- Vieira, G. 2006. Características generales del glaciario de la Serra de Estrela, Portugal. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 13 (3): 289-295.
- Vieira, G. & Palacios, D. 2010. *New cosmogenic exposure dates for the Serra da Estrela glaciation. Preliminary results*. National Conference of Geomorphology, Lisboa.
- Vieira, G. & Woronko, B. 2022. Chapter 4.16—The glaciers of Serra da Estrela. In: Oliva, M., Palacios, D. & Fernández-Fernández J. M. (eds.), *Iberia, Land of Glaciers*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier. 417-435 pp. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821941-6.00020-7>
- Vielva, J., Prieto, D. & Granados, I. 2004. Restauración de ecosistemas de montaña: El Parque Natural de Peñalara (Madrid, España). *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural (Sección Geología)*, 99: 1-4.
- Wetzel, R. G. 2001. 3. Rivers and lakes – Their distribution, origins, and forms. In: R. G. Wetzel (ed.), *Limnology (Third Edition)*. Academic Press. 15-42 pp. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-057439-4.50007-1>
- Wetzel, R. G. & Likens, G. 1991. *Limnological Analyses*. New York, USA: Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-4098-1>
- Yao, X., Liu, S., Han, L., Sun, M. & Zhao, L. 2018. Definition and classification system of glacial lake for inventory and hazards study. *Journal of Geographical Sciences*, 28 (2): 193-205. <https://doi.org/10.1007/s11442-018-1467-z>

Anexo 1

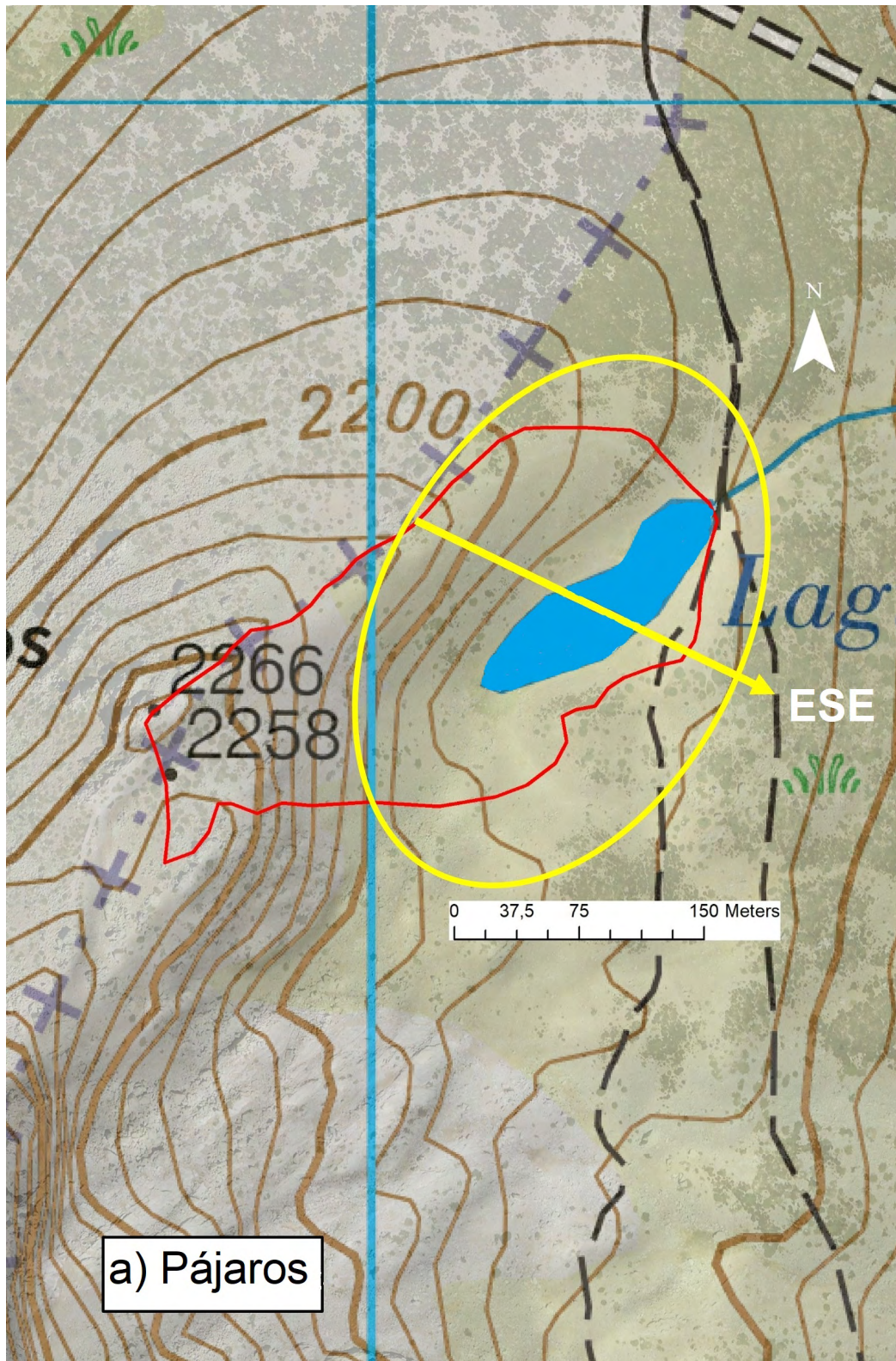


Figura A1a. Límite de la cuenca hidrográfica (en rojo) y zona considerada para calcular la orientación media (en amarillo) del entorno de la laguna de los Pájaros y su cuenca, así como el eje que la indica.

Figure A1a. Lake watershed boundary (in red) and area considered for the calculation of mean aspect (in yellow) of the area around the lake Pájaros and its watershed, as well as the axis indicating it.

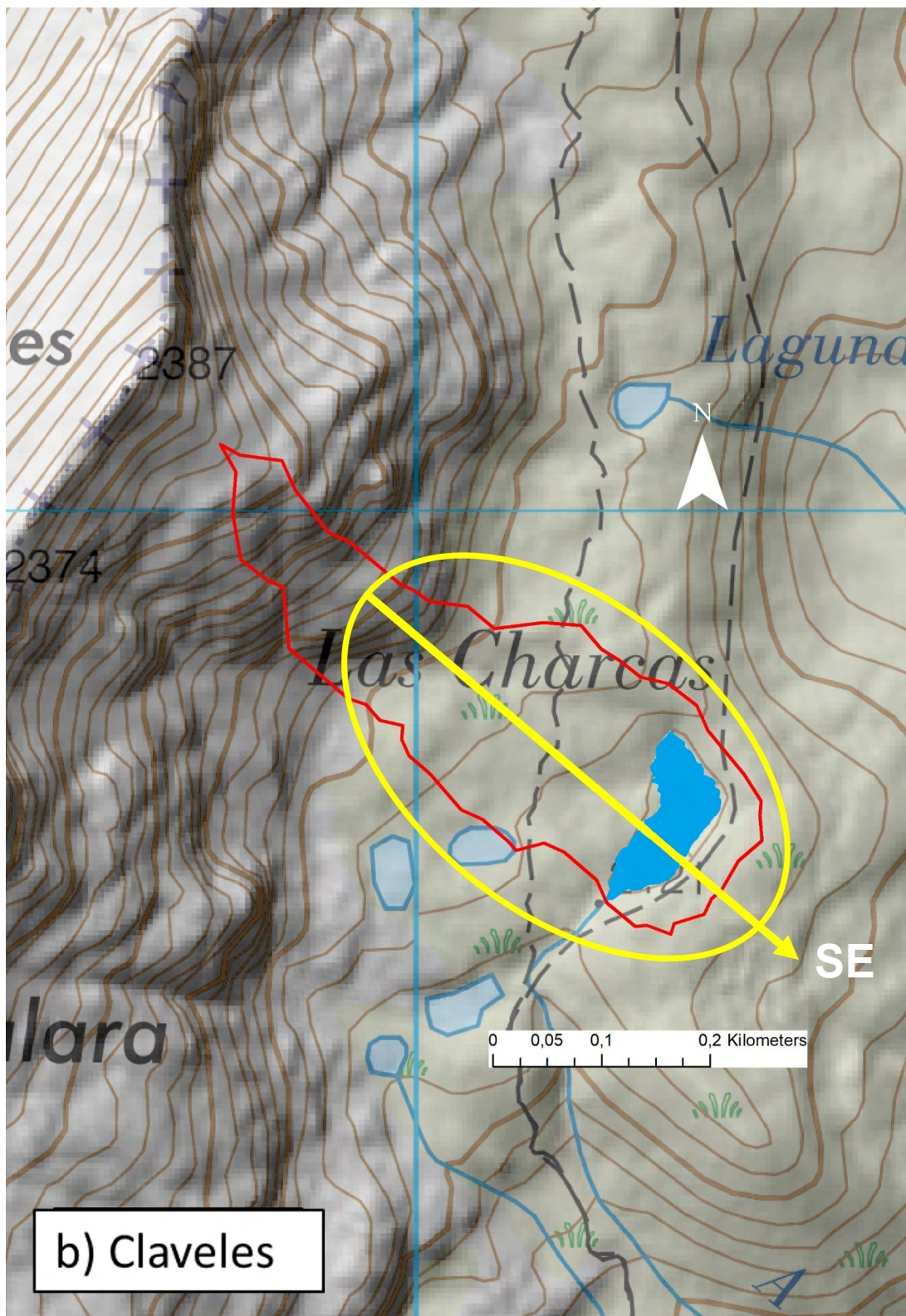


Figura A1b. Límite de la cuenca hidrográfica (en rojo) y zona considerada para calcular la orientación media (en amarillo) del entorno de la laguna de los Claveles y su cuenca, así como el eje que la indica.

Figure A1b. Lake watershed boundary (in red) and area considered for the calculation of mean aspect (in yellow) of the area around the lake Claveles and its watershed, as well as the axis indicating it.

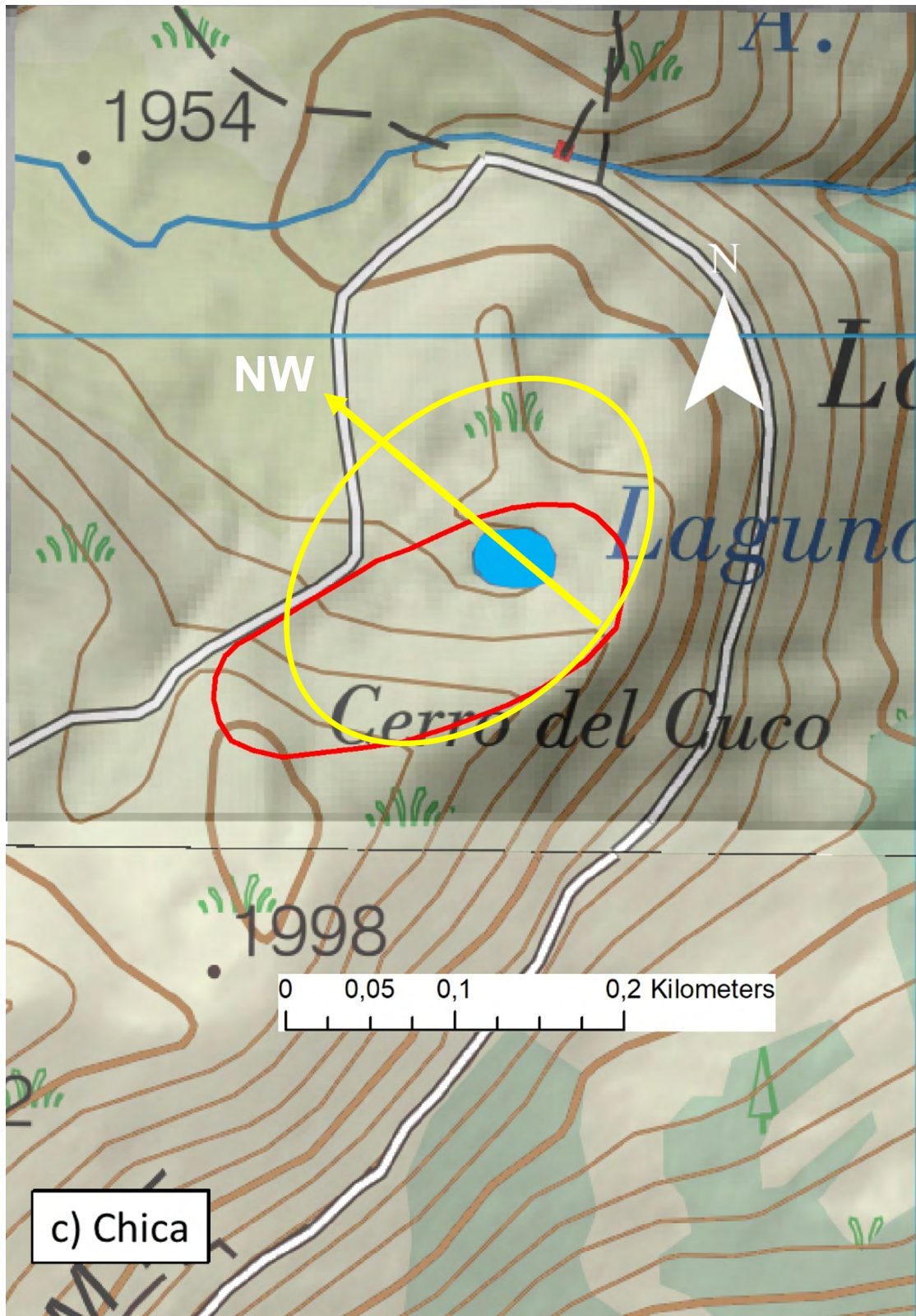


Figura A1c. Límite de la cuenca hidrográfica (en rojo) y zona considerada para calcular la orientación media (en amarillo) del entorno de la laguna Chica y su cuenca, así como el eje que la indica.

Figure A1c. Lake watershed boundary (in red) and area considered for the calculation of mean aspect (in yellow) of the area around the lake Chica and its watershed, as well as the axis indicating it.

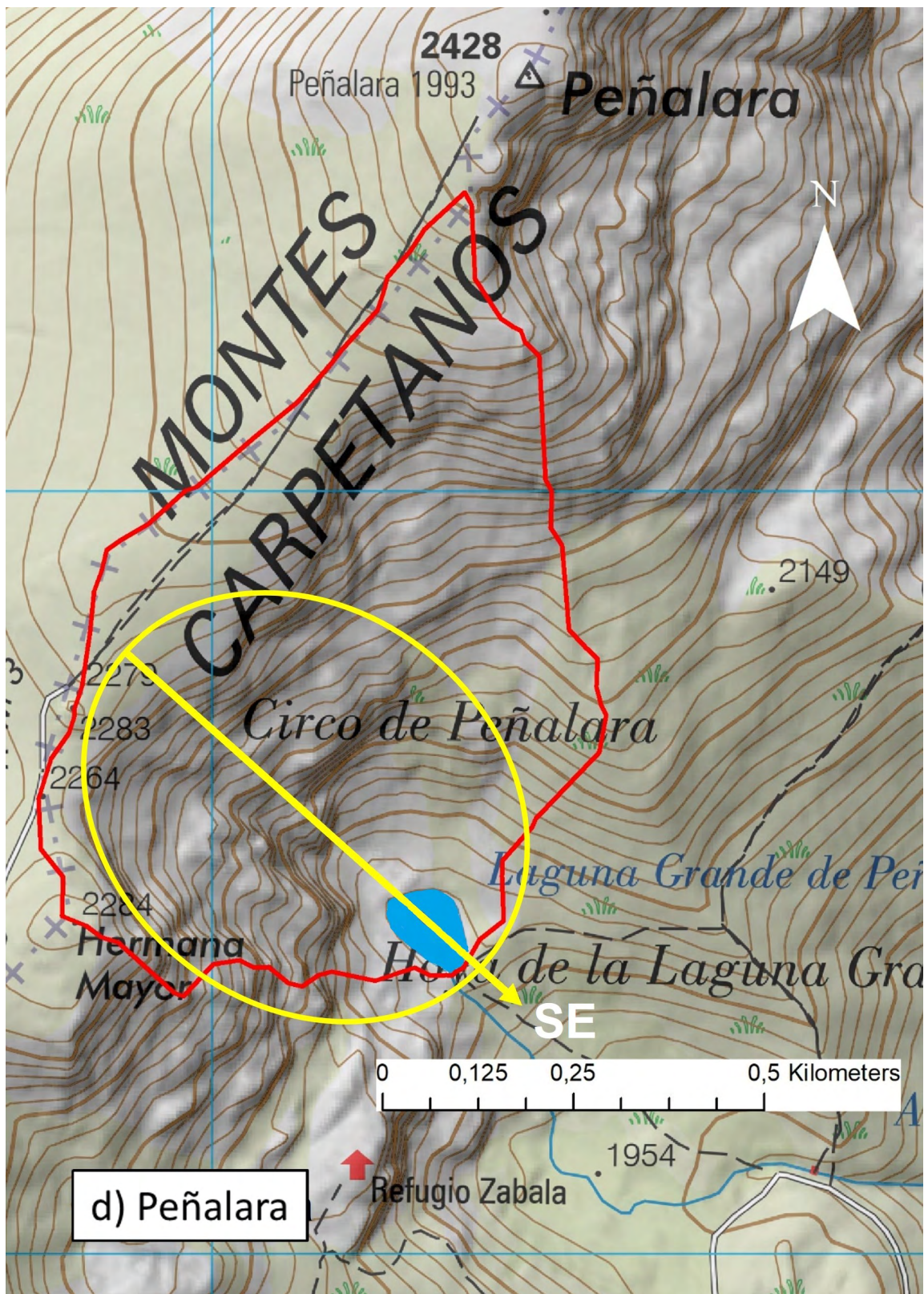


Figura A1d. Límite de la cuenca hidrográfica (en rojo) y zona considerada para calcular la orientación media (en amarillo) del entorno de la laguna de Peñalara y su cuenca, así como el eje que la indica.

Figure A1d. Lake watershed boundary (in red) and area considered for the calculation of mean aspect (in yellow) of the area around the lake Peñalara and its watershed, as well as the axis indicating it.



Figura A1e. Límite de la cuenca hidrográfica (en rojo) y zona considerada para calcular la orientación media (en amarillo) del entorno de la laguna del Cura y su cuenca, así como el eje que la indica.

Figure A1e. Lake watershed boundary (in red) and area considered for the calculation of mean aspect (in yellow) of the area around the lake Cura and its watershed, as well as the axis indicating it.

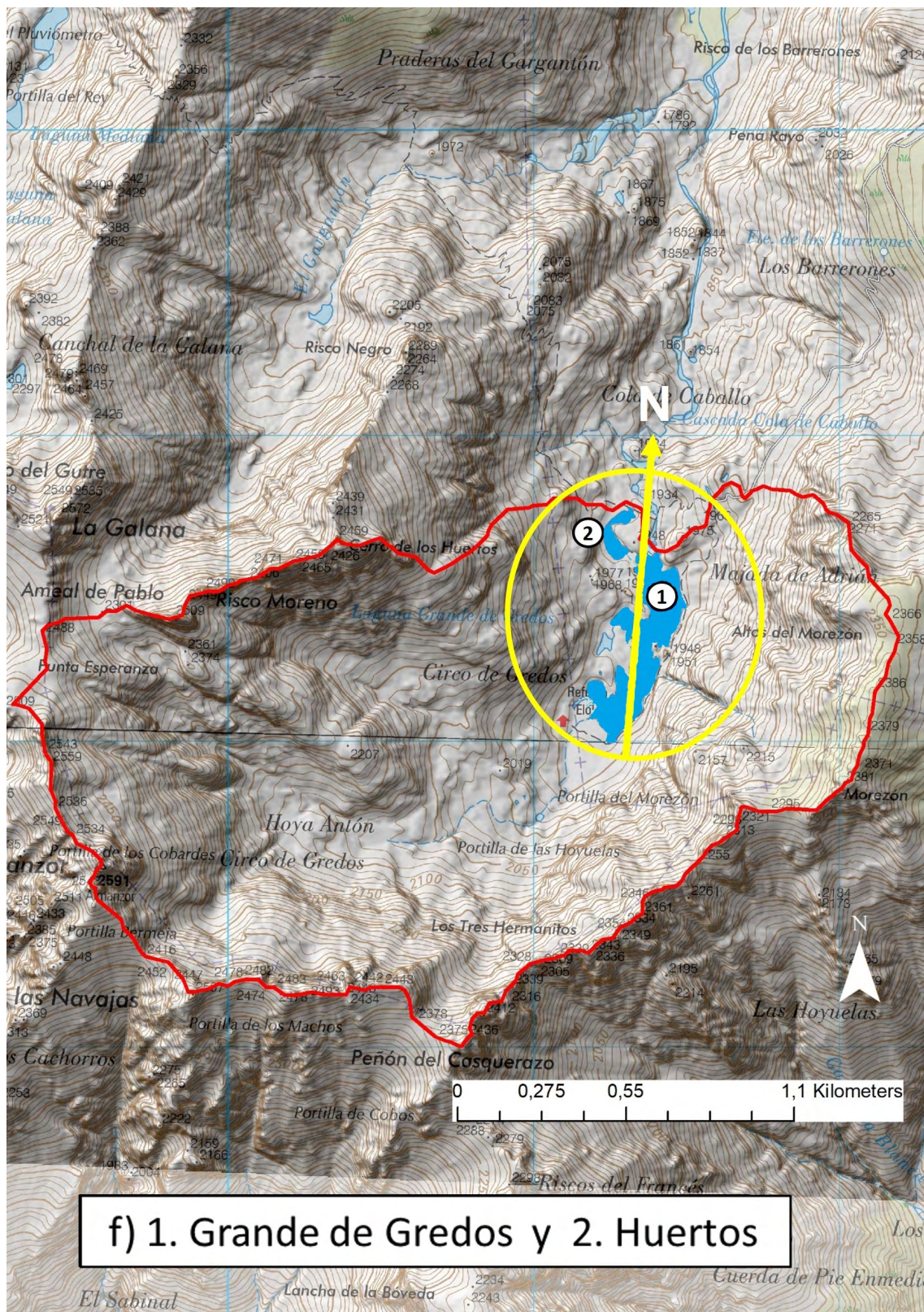


Figura A1f. Límite de la cuenca hidrográfica (en rojo) y zona considerada para calcular la orientación media (en amarillo) del entorno de las lagunas Grande de Gredos y Huertos, y su cuenca, así como el eje que la indica.

Figure A1f. Lake watershed boundary (in red) and area considered for the calculation of mean aspect (in yellow) of the area around the lakes Grande de Gredos and Huertos, and their watershed, as well as the axis indicating it.

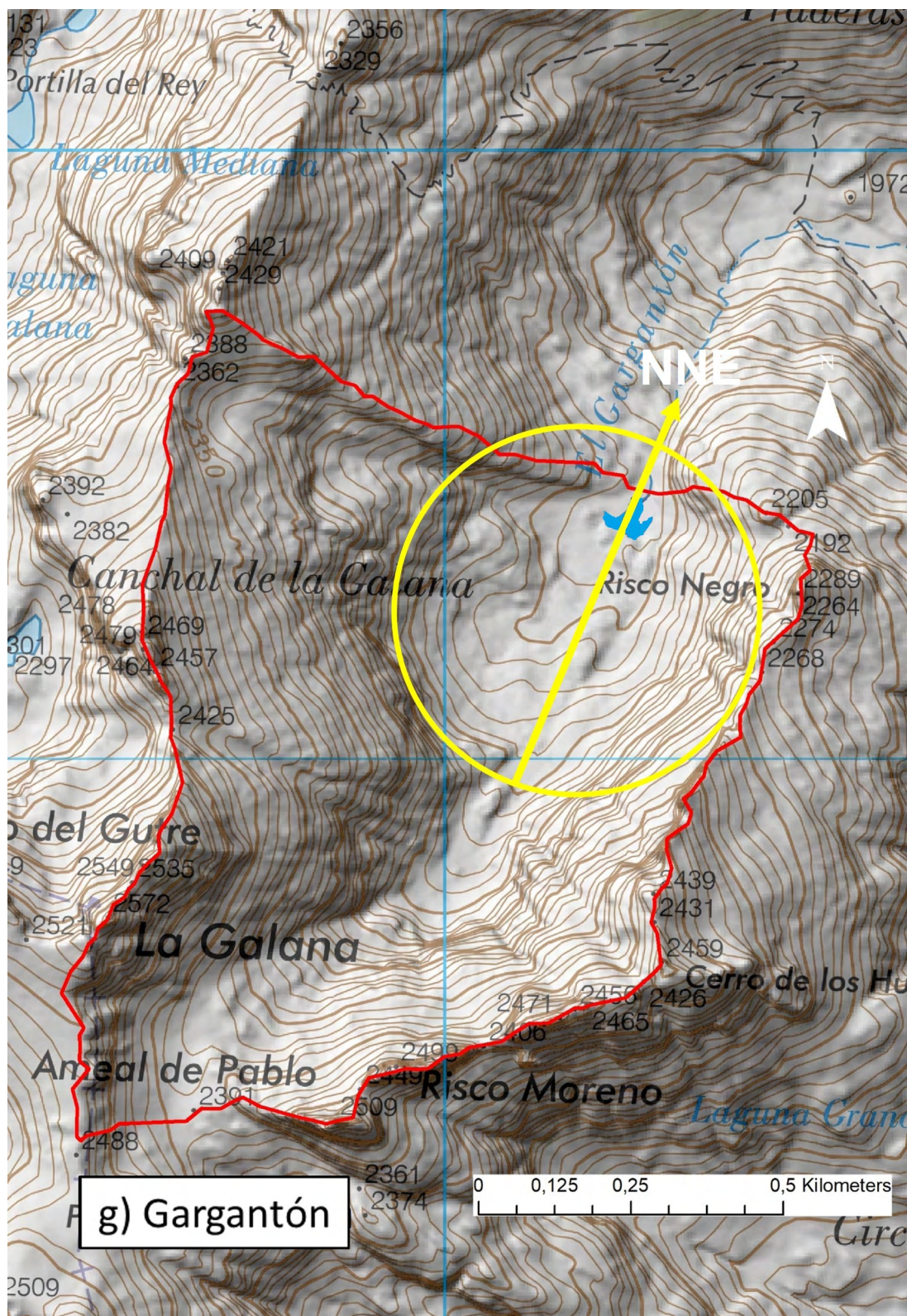


Figura A1g. Límite de la cuenca hidrográfica (en rojo) y zona considerada para calcular la orientación media (en amarillo) del entorno de la laguna del Gargantón y su cuenca, así como el eje que indica.

Figure A1g. Lake watershed boundary (in red) and area considered for the calculation of mean aspect (in yellow) of the area around the lake Gargantón and its watershed, as well as the axis indicating it.



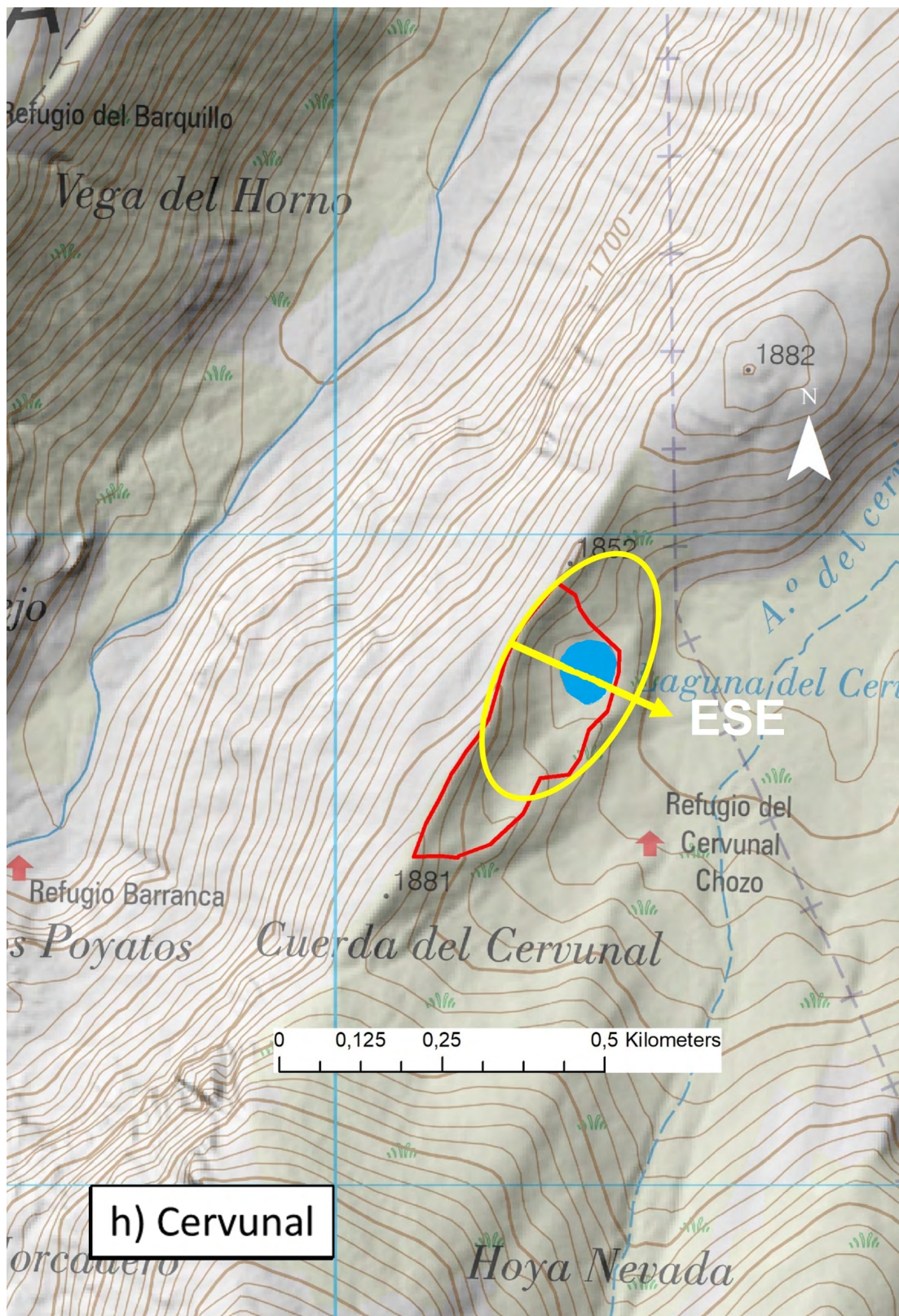
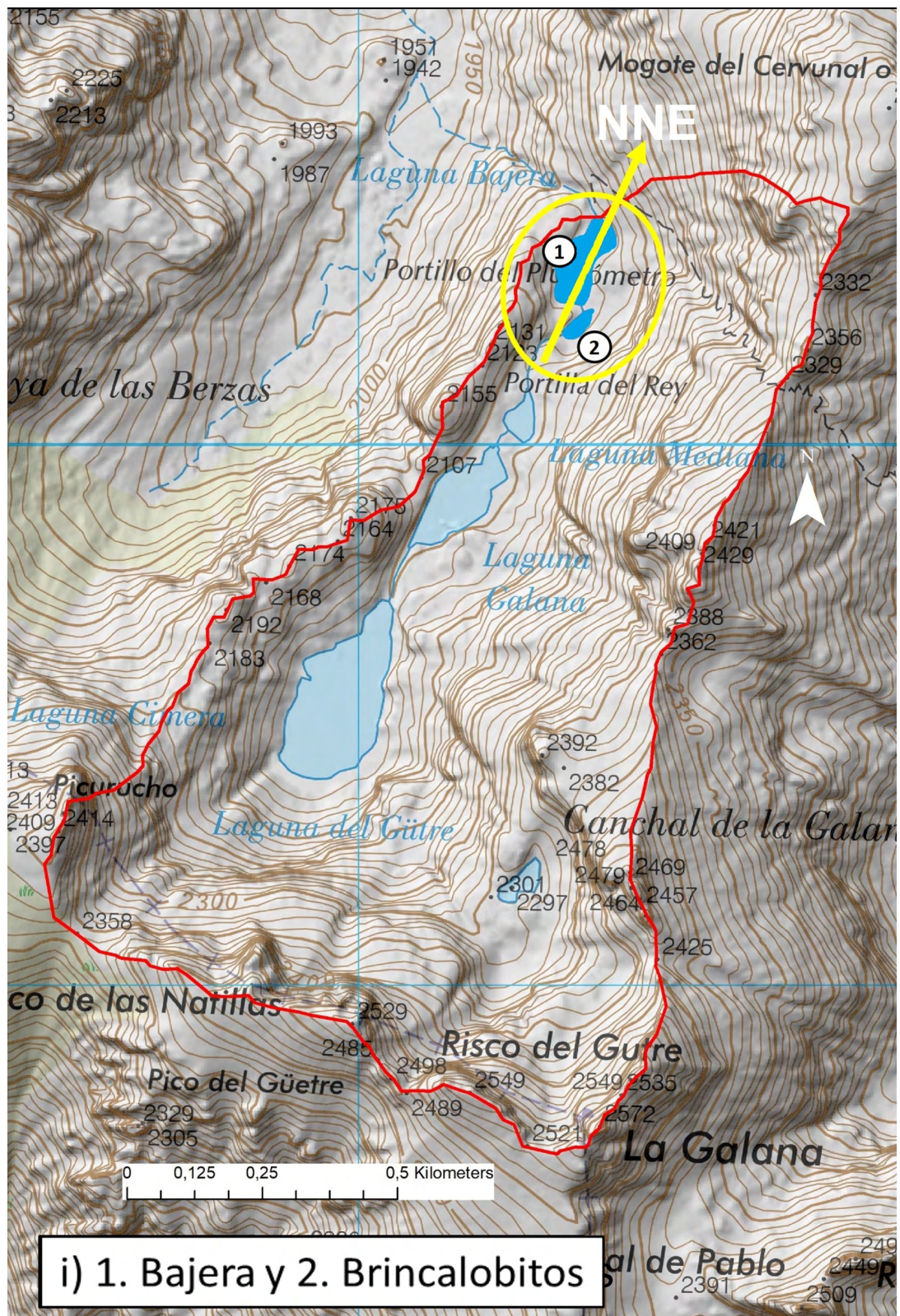


Figura A1h. Límite de la cuenca hidrográfica (en rojo) y zona considerada para calcular la orientación media (en amarillo) del entorno de la laguna del Cervunal y su cuenca, así como el eje que la indica.

Figure A1h. Lake watershed boundary (in red) and area considered for the calculation of mean aspect (in yellow) of the area around the lake Cervunal and its watershed, as well as the axis indicating it.



**i) 1. Bajera y 2. Brincalobitos**

Figura A1i. Límite de la cuenca hidrográfica (en rojo) y zona considerada para calcular la orientación media (en amarillo) del entorno de las lagunas Bajera y Brincalobitos, y su cuenca, así como el eje que la indica.

Figure A1i. Lake watershed boundary (in red) and area considered for the calculation of mean aspect (in yellow) of the area around the lakes Bajera and Brincalobitos, and their watershed, as well as the axis indicating it.

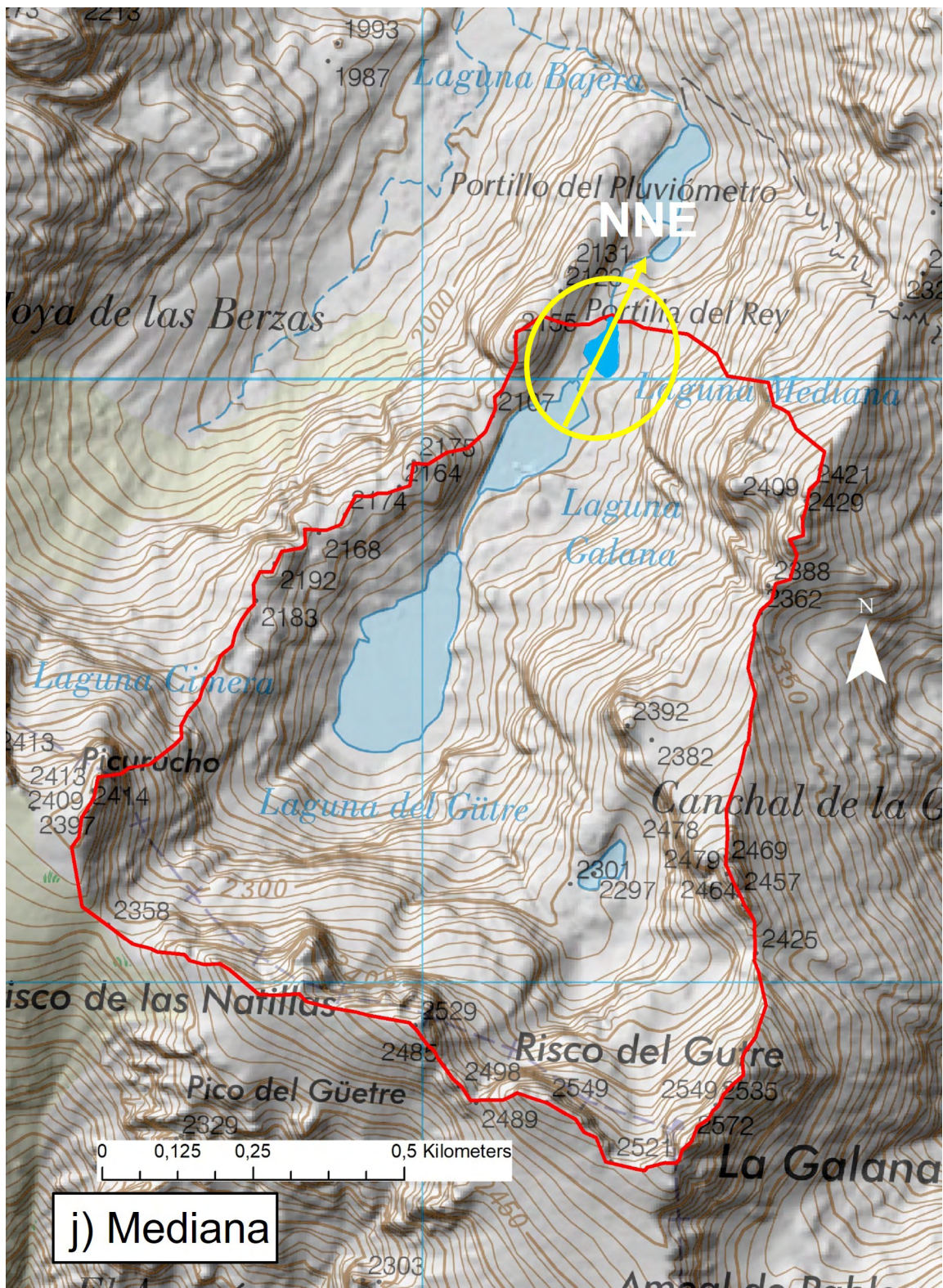


Figura A1j. Límite de la cuenca hidrográfica (en rojo) y zona considerada para calcular la orientación media (en amarillo) del entorno de la laguna Mediana y su cuenca, así como el eje que la indica.

Figure A1j. Lake watershed boundary (in red) and area considered for the calculation of mean aspect (in yellow) of the area around the lake Mediana and its watershed, as well as the axis indicating it.

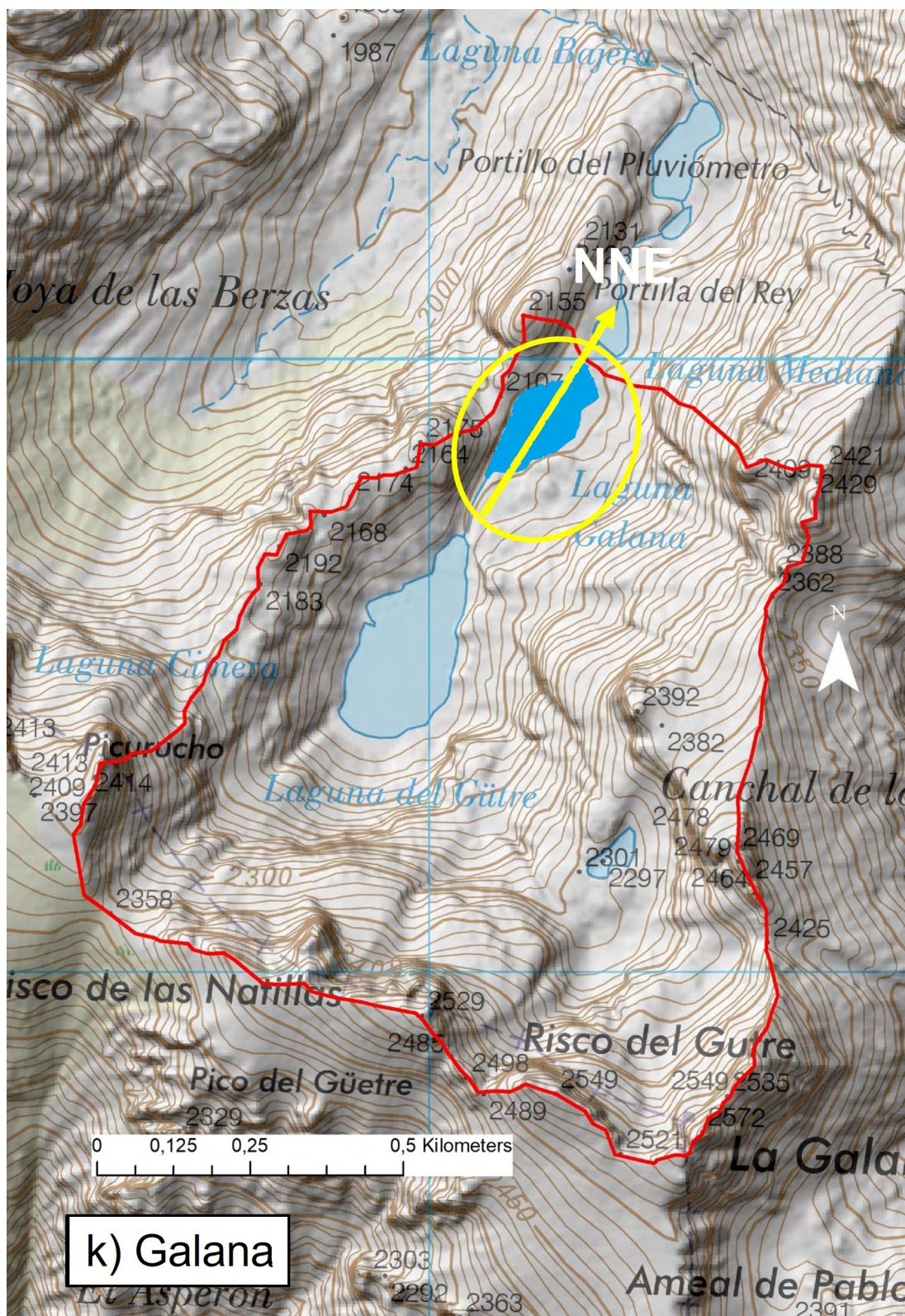


Figura A1k. Límite de la cuenca hidrográfica (en rojo) y zona considerada para calcular la orientación media (en amarillo) del entorno de la laguna Galana y su cuenca, así como el eje que la indica.

Figure A1k. Lake watershed boundary (in red) and area considered for the calculation of mean aspect (in yellow) of the area around the lake Galana and its watershed, as well as the axis indicating it.

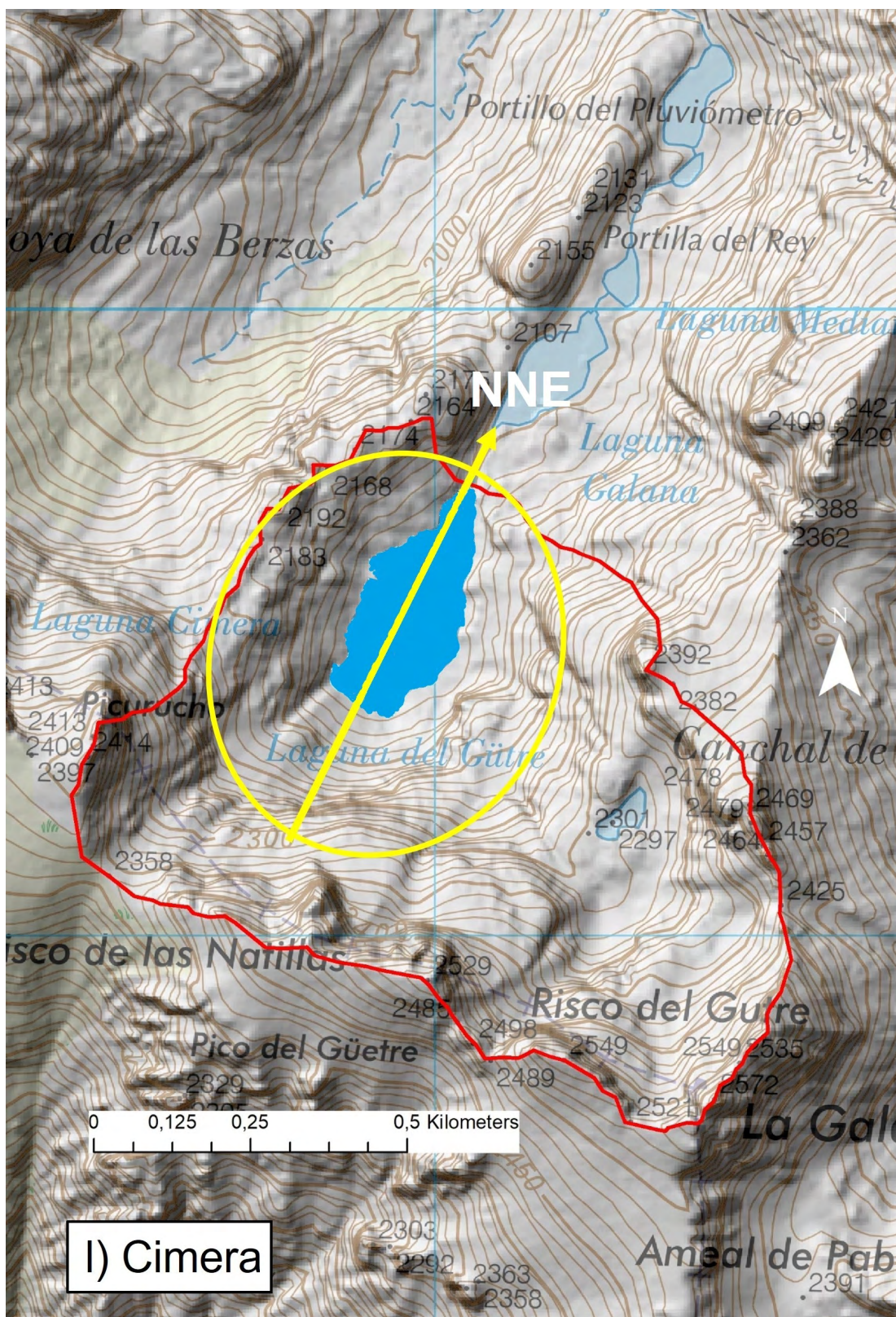


Figura A11. Límite de la cuenca hidrográfica (en rojo) y zona considerada para calcular la orientación media (en amarillo) del entorno de la laguna Címera y su cuenca, así como el eje que la indica.

Figure A11. Lake watershed boundary (in red) and area considered for the calculation of mean aspect (in yellow) of the area around the lake Címera and its watershed, as well as the axis indicating it.

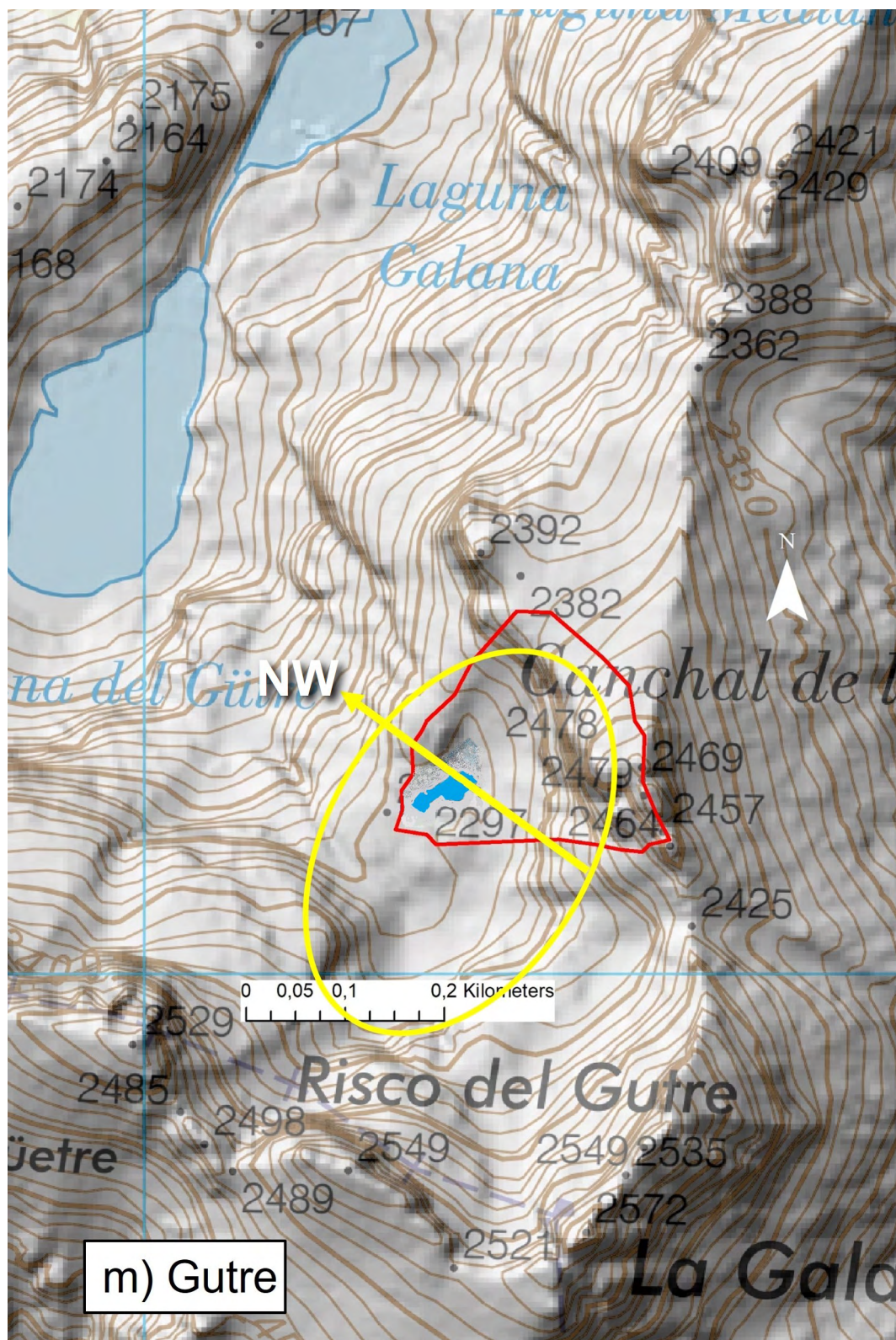


Figura A1m. Límite de la cuenca hidrográfica (en rojo) y zona considerada para calcular la orientación media (en amarillo) del entorno de la laguna del Gütre y su cuenca, así como el eje que la indica.

Figure A1m. Lake watershed boundary (in red) and area considered for the calculation of mean aspect (in yellow) of the area around the lake Gutre and its watershed, as well as the axis indicating it.

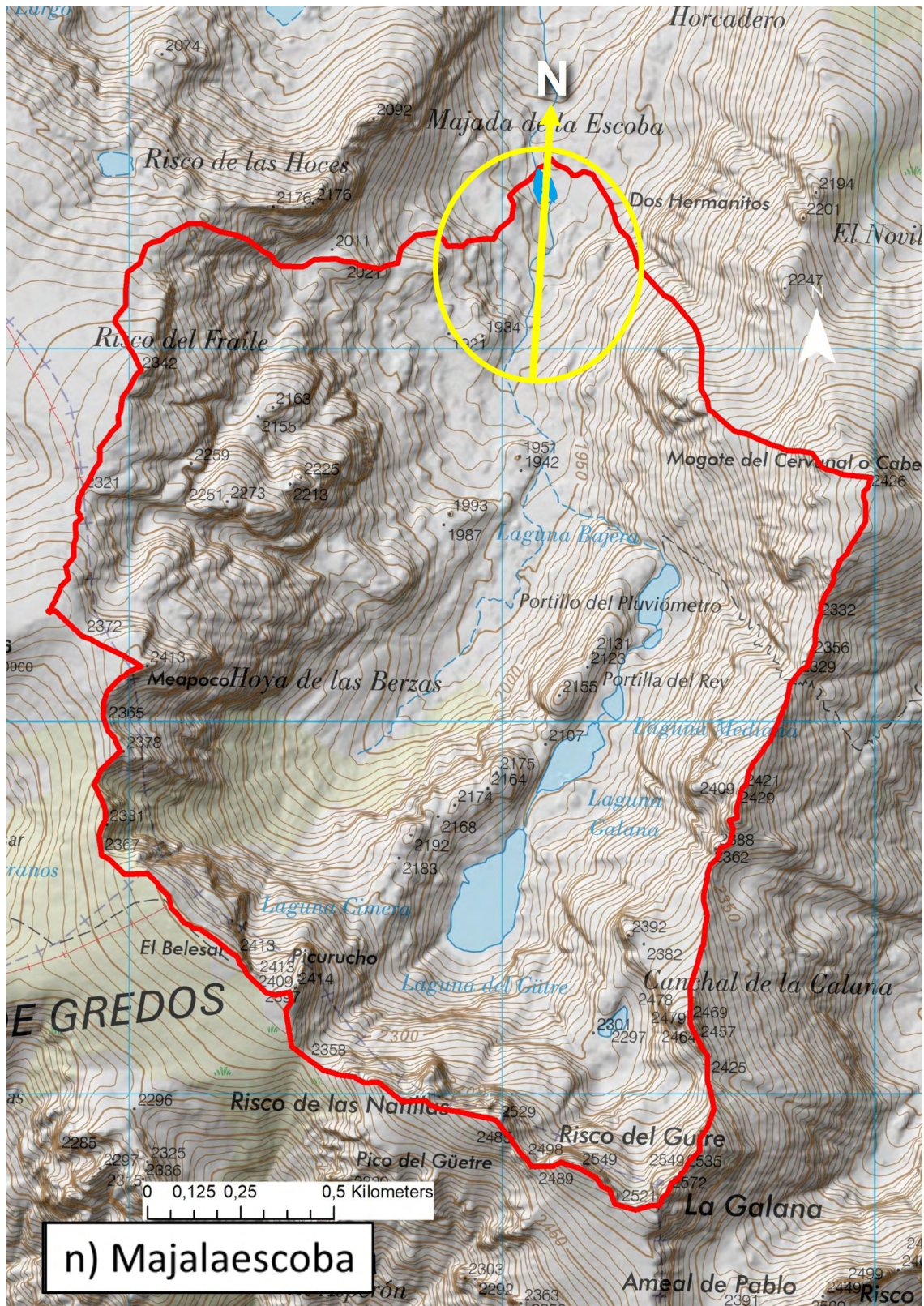


Figura A1n. Límite de la cuenca hidrográfica (en rojo) y zona considerada para calcular la orientación media (en amarillo) del entorno de la laguna de Majalaescoba y su cuenca, así como el eje que la indica.

Figure A1n. Lake watershed boundary (in red) and area considered for the calculation of mean aspect (in yellow) of the area around the lake Majalaescoba and its watershed, as well as the axis indicating it.

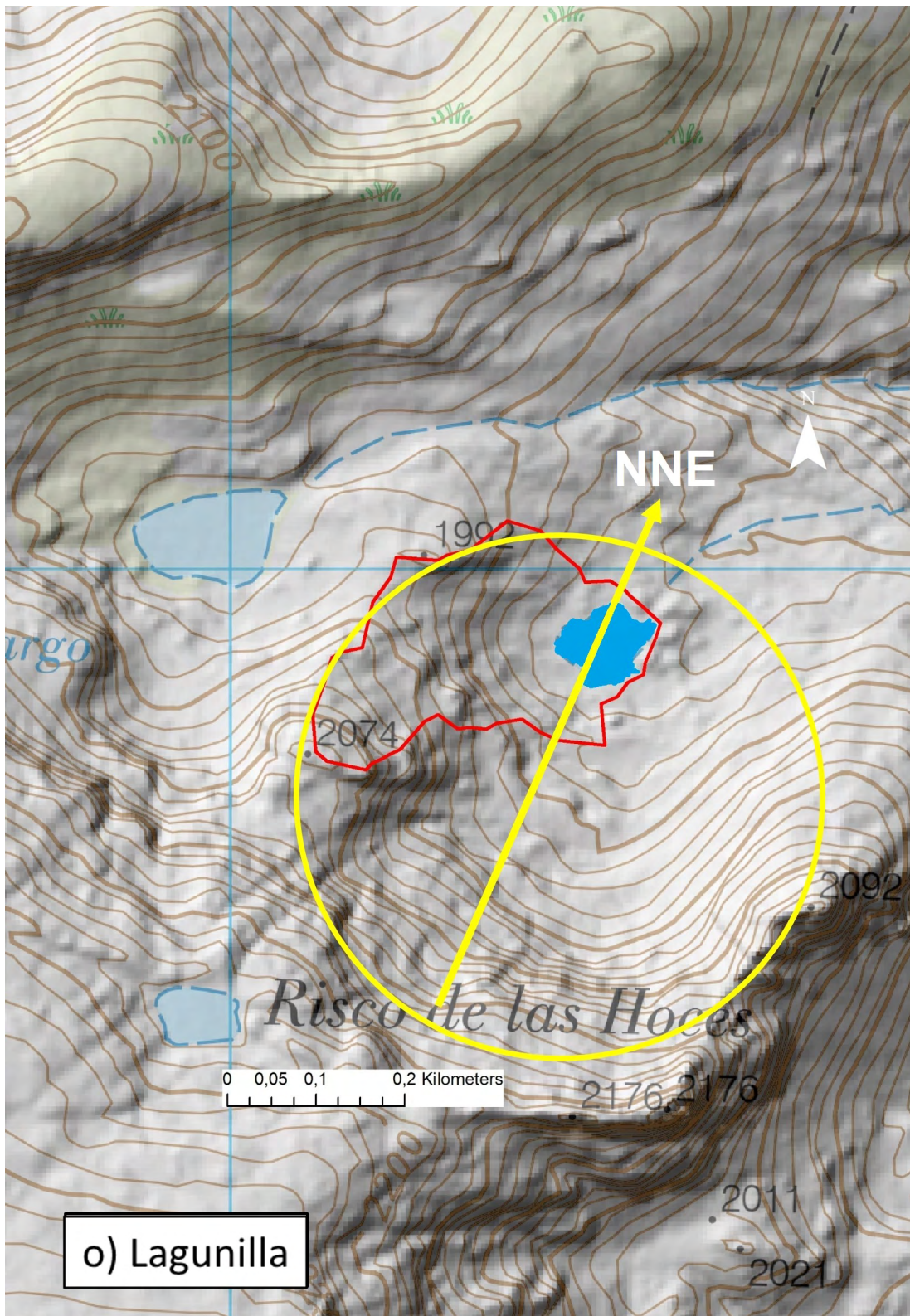


Figura A1o. Límite de la cuenca hidrográfica (en rojo) y zona considerada para calcular la orientación media (en amarillo) del entorno de la Lagunilla y su cuenca, así como el eje que la indica.

Figure A1o. Lake watershed boundary (in red) and area considered for the calculation of mean aspect (in yellow) of the area around the lake Lagunilla and its watershed, as well as the axis indicating it.



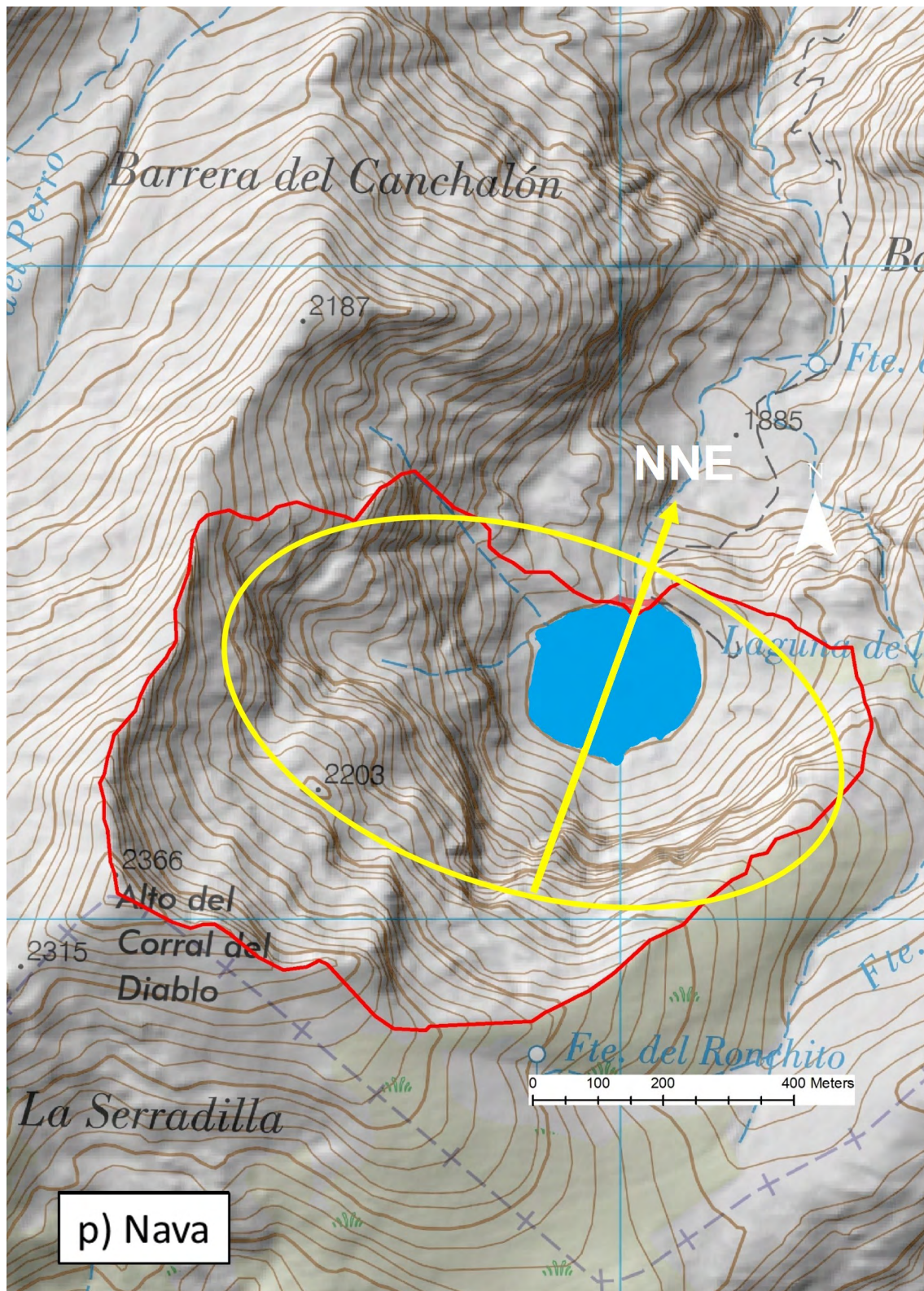


Figura A1p. Límite de la cuenca hidrográfica (en rojo) y zona considerada para calcular la orientación media (en amarillo) del entorno de la laguna de la Nava y su cuenca, así como el eje que la indica.

Figure A1p. Lake watershed boundary (in red) and area considered for the calculation of mean aspect (in yellow) of the area around the lake Nava and its watershed, as well as the axis indicating it.

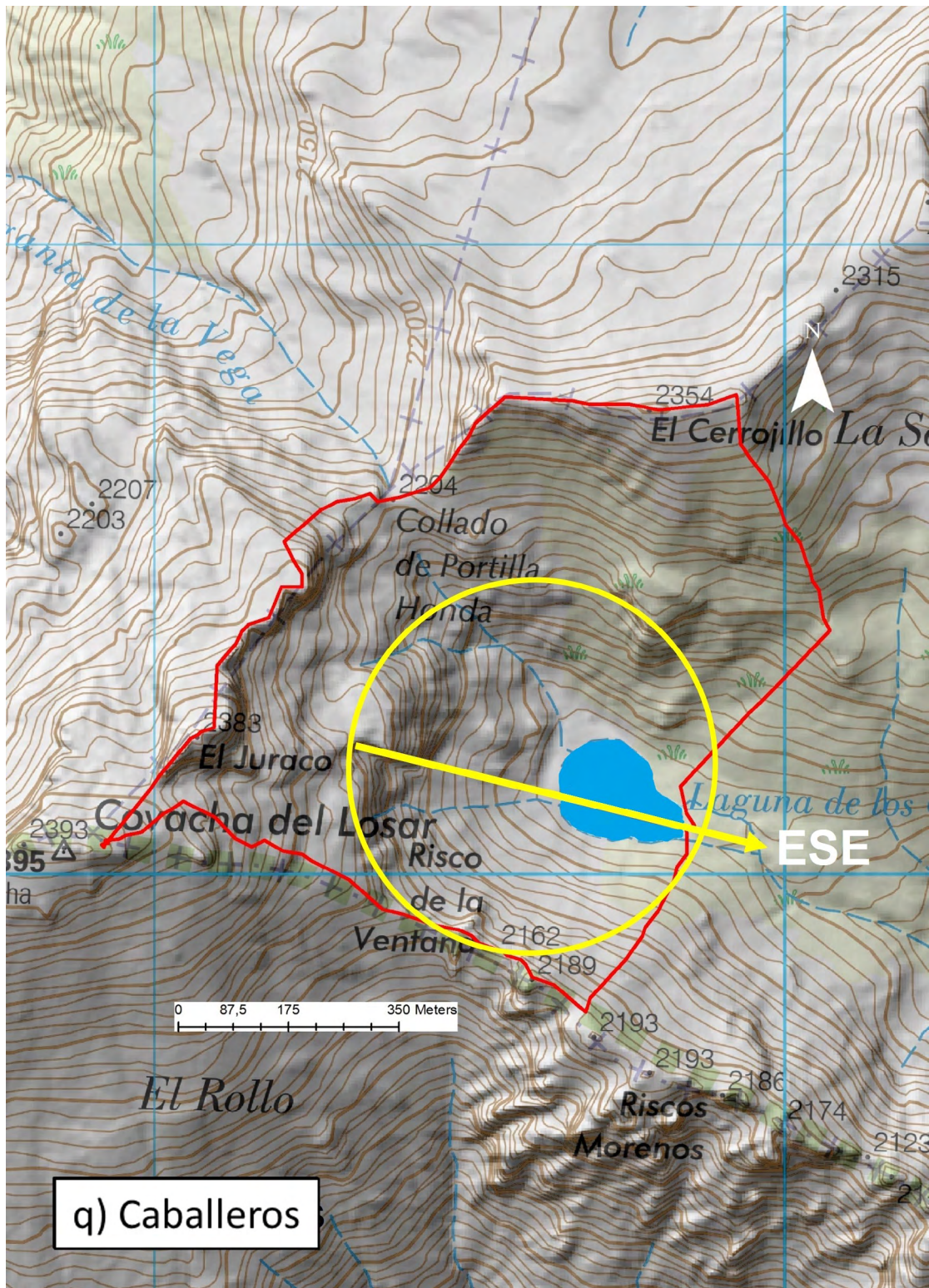


Figura A1q. Límite de la cuenca hidrográfica (en rojo) y zona considerada para calcular la orientación media (en amarillo) del entorno de la laguna de los Caballeros y su cuenca, así como el eje que la indica.

Figure A1q. Lake watershed boundary (in red) and area considered for the calculation of mean aspect (in yellow) of the area around the lake Caballeros and its watershed, as well as the axis indicating it.

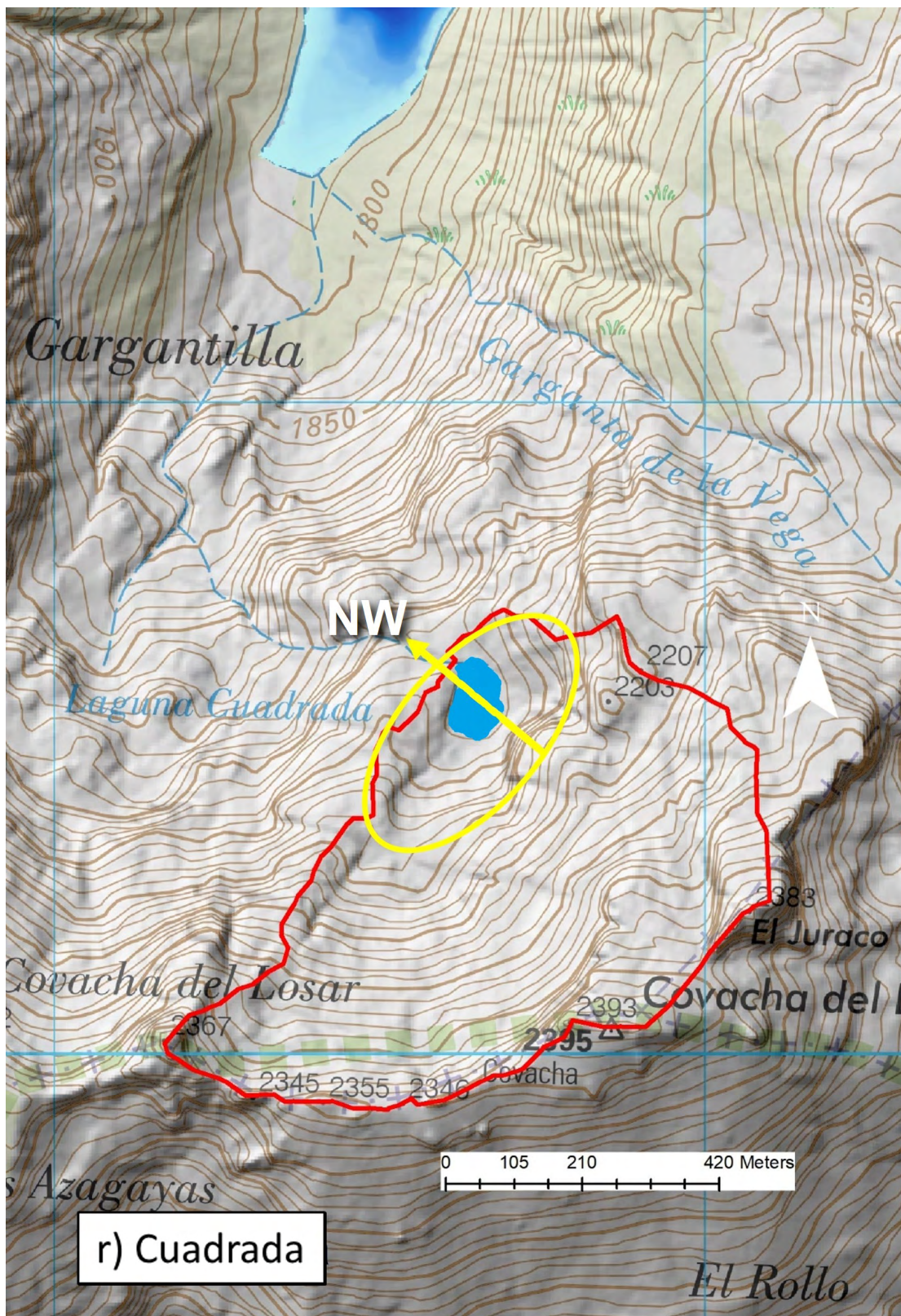


Figura A1r. Límite de la cuenca hidrográfica (en rojo) y zona considerada para calcular la orientación media (en amarillo) del entorno de la laguna Cuadrada y su cuenca, así como el eje que la indica.

Figure A1r. Lake watershed boundary (in red) and area considered for the calculation of mean aspect (in yellow) of the area around the lake Cuadrada and its watershed, as well as the axis indicating it.

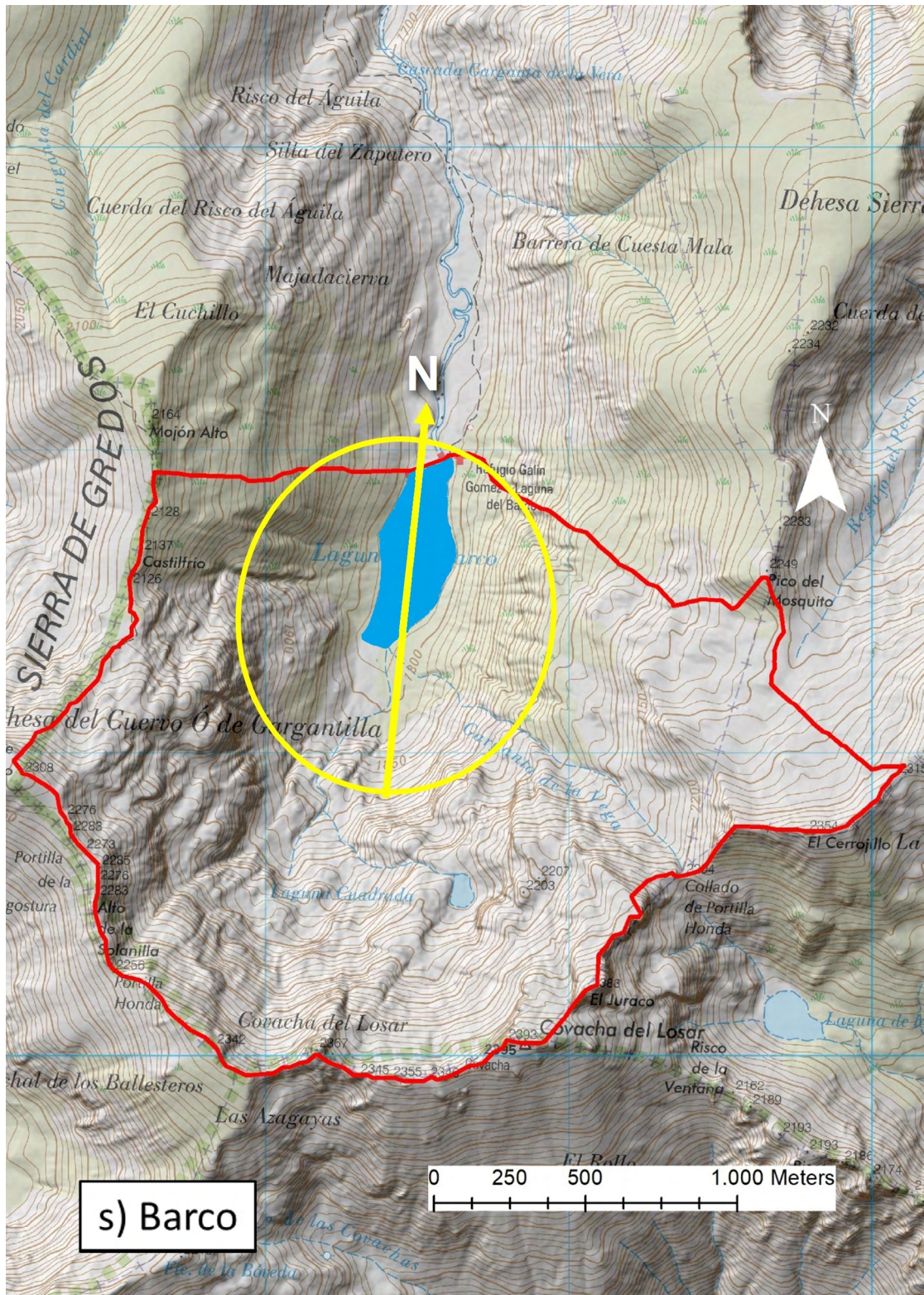


Figura A1s. Límite de la cuenca hidrográfica (en rojo) y zona considerada para calcular la orientación media (en amarillo) del entorno de la laguna del Barco y su cuenca, así como el eje que la indica.

Figure A1s. Lake watershed boundary (in red) and area considered for the calculation of mean aspect (in yellow) of the area around the lake Barco and its watershed, as well as the axis indicating it.

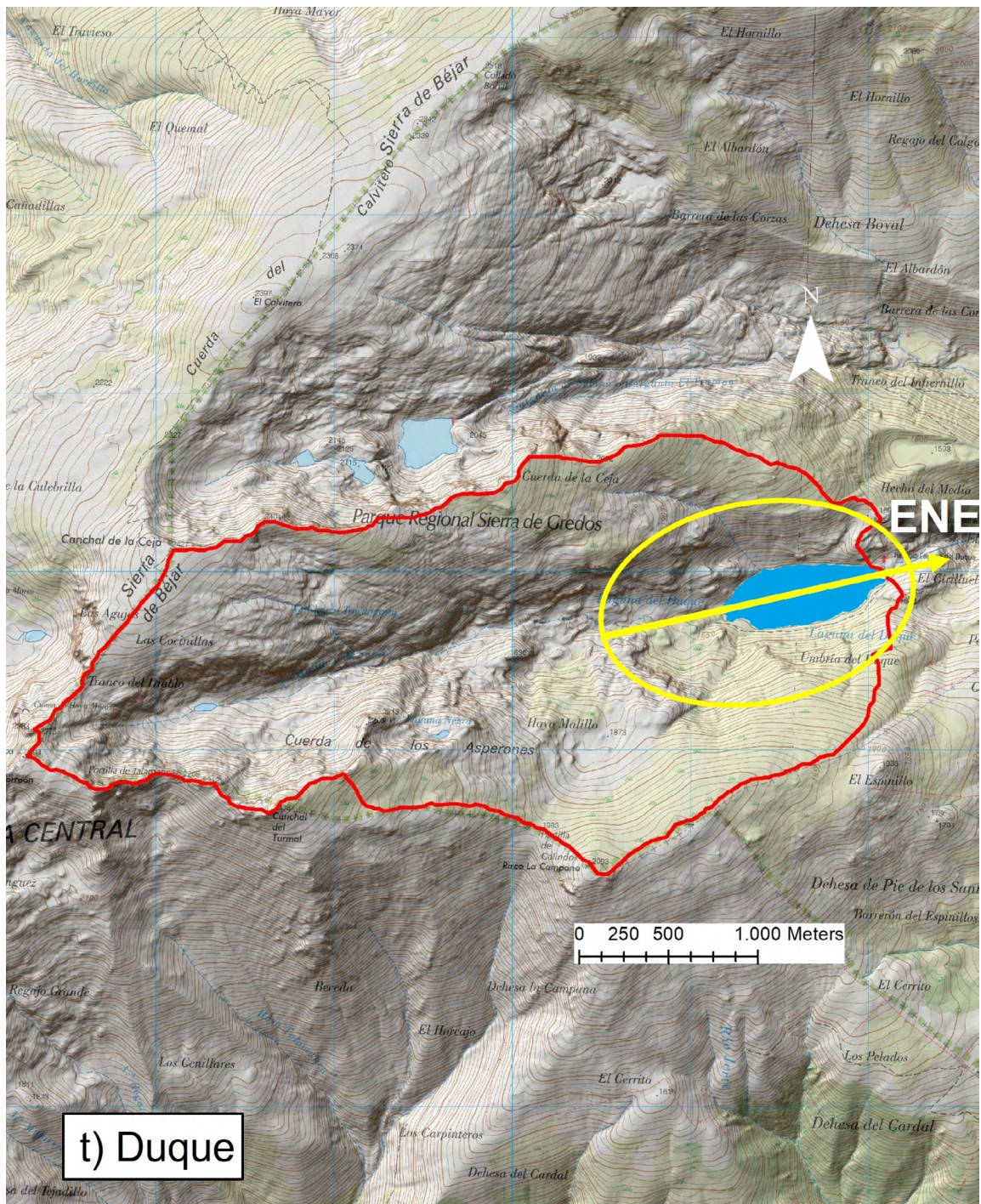


Figura A1t. Límite de la cuenca hidrográfica (en rojo) y zona considerada para calcular la orientación media (en amarillo) del entorno de la laguna del Duque y su cuenca, así como el eje que la indica.

Figure A1t. Lake watershed boundary (in red) and area considered for the calculation of mean aspect (in yellow) of the area around the lake Duque and its watershed, as well as the axis indicating it.

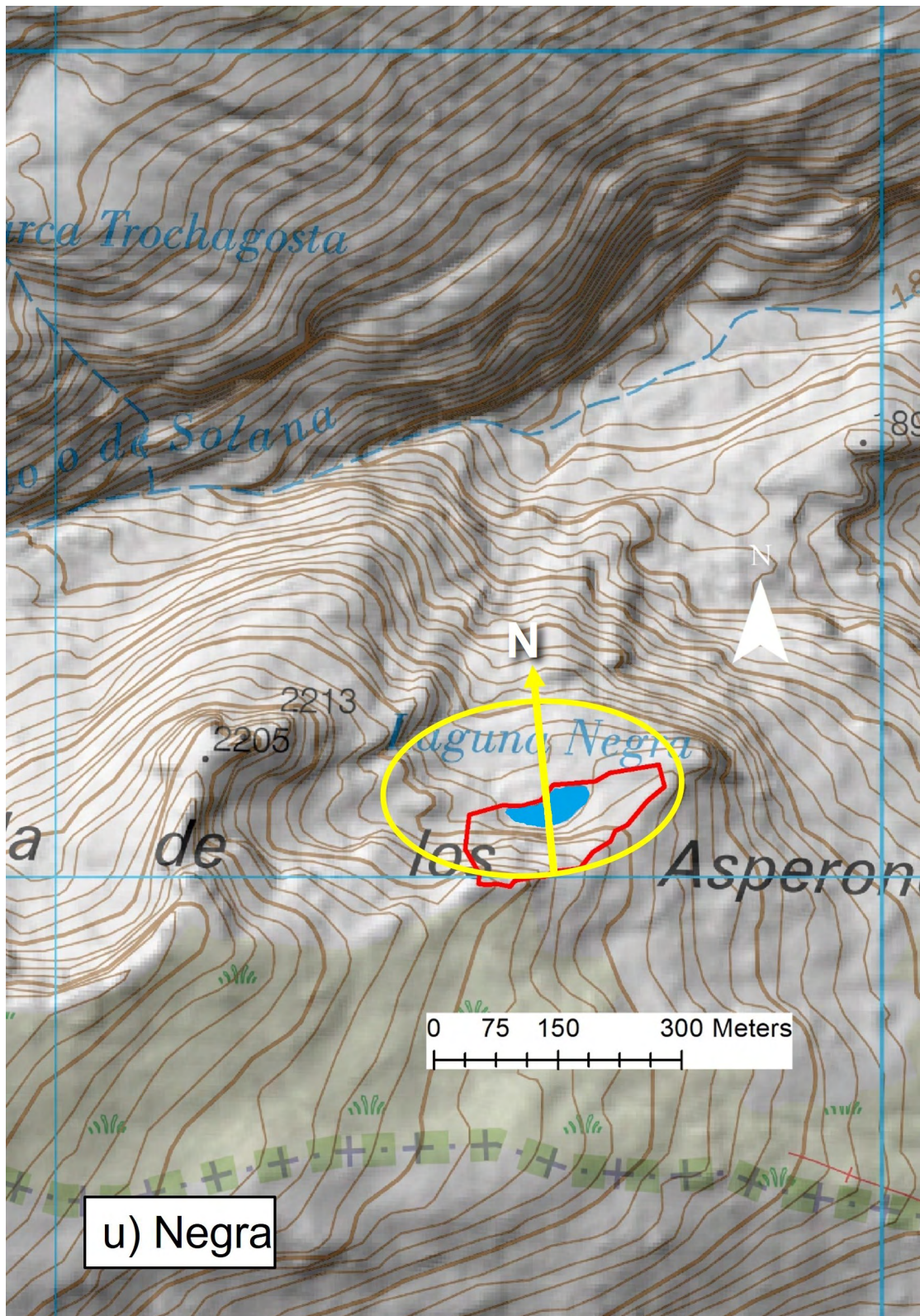


Figura A1u. Límite de la cuenca hidrográfica (en rojo) y zona considerada para calcular la orientación media (en amarillo) del entorno de la laguna Negra y su cuenca, así como el eje que la indica.

Figure A1u. Lake watershed boundary (in red) and area considered for the calculation of mean aspect (in yellow) of the area around the lake Negra and its watershed, as well as the axis indicating it.

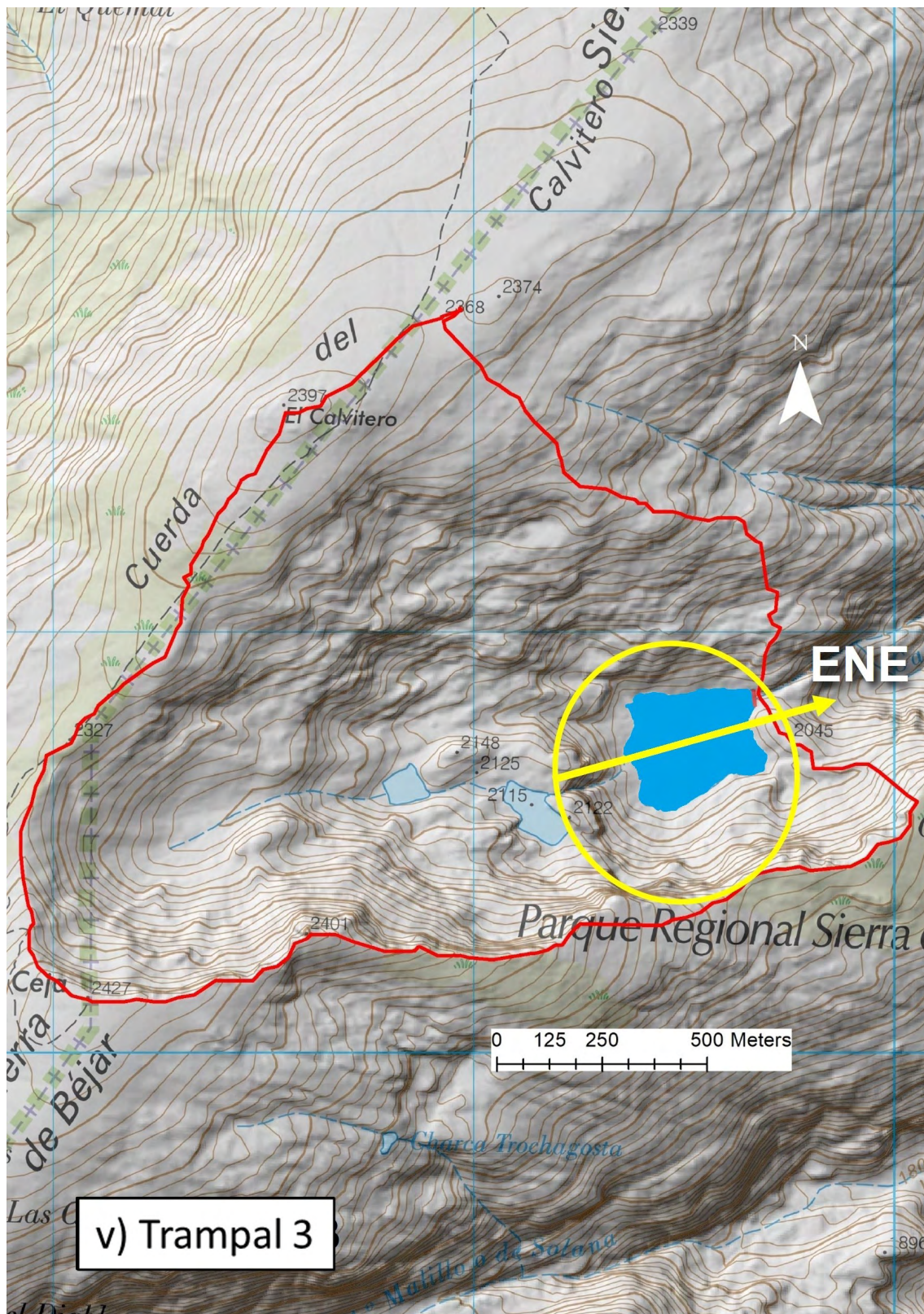


Figura A1v. Límite de la cuenca hidrográfica (en rojo) y zona considerada para calcular la orientación media (en amarillo) del entorno de la laguna del Trampal 3 y su cuenca, así como el eje que la indica.

Figure A1v. Lake watershed boundary (in red) and area considered for the calculation of mean aspect (in yellow) of the area around the lake Trampal 3 and its watershed, as well as the axis indicating it.

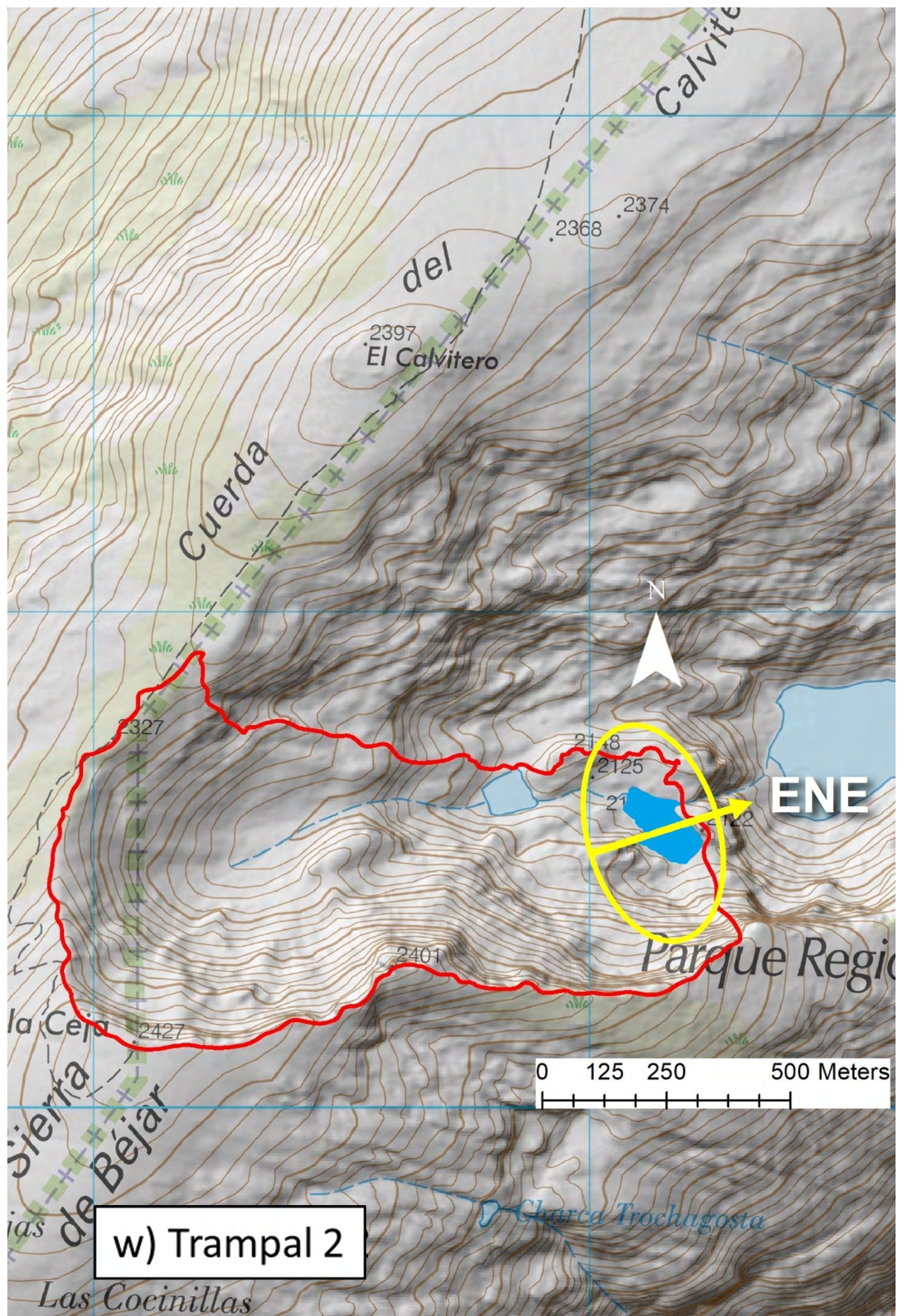
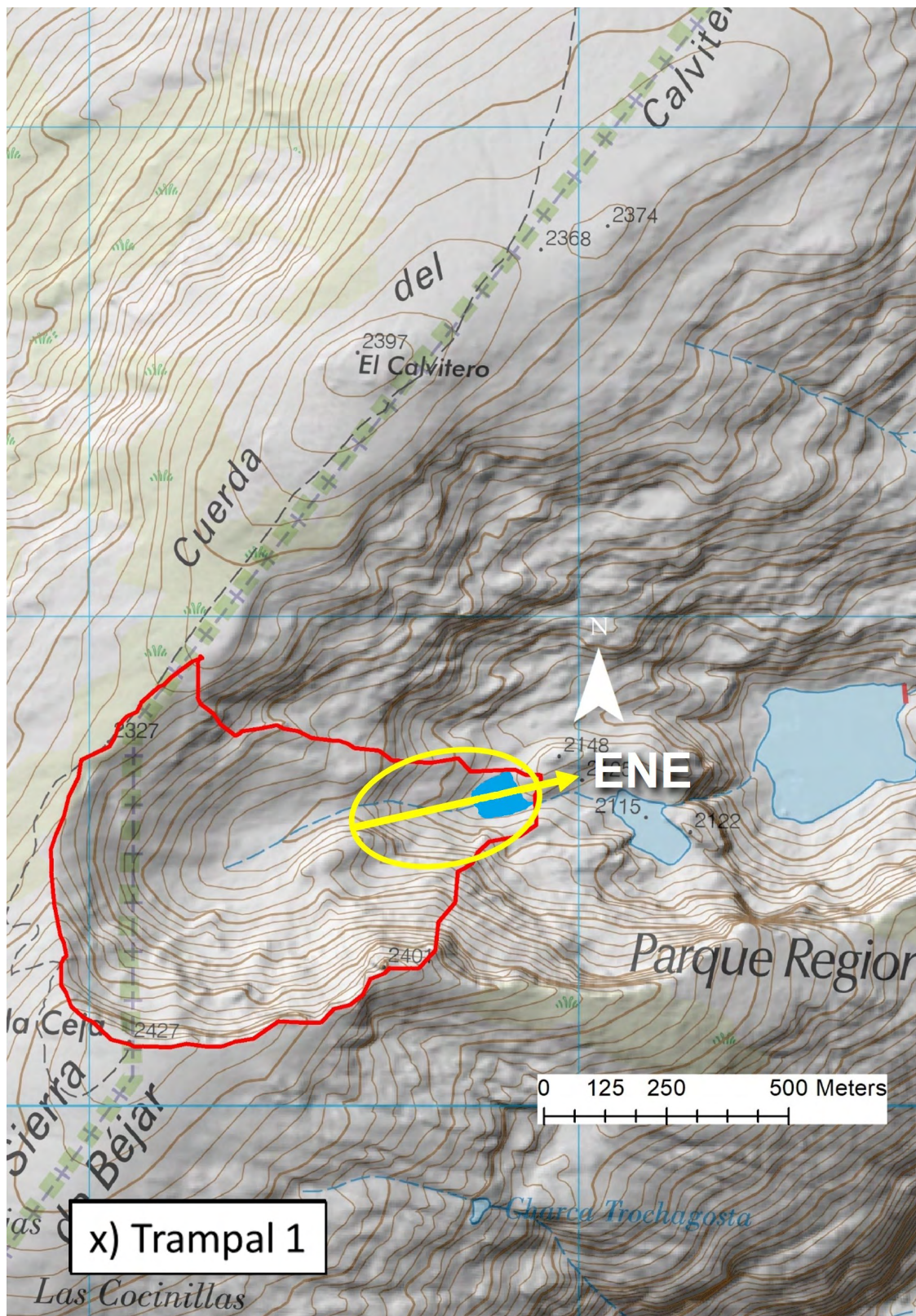


Figura A1w. Límite de la cuenca hidrográfica (en rojo) y zona considerada para calcular la orientación media (en amarillo) del entorno de la laguna del Trampal 2 y su cuenca, así como el eje que indica.

Figure A1w. Lake watershed boundary (in red) and area considered for the calculation of mean aspect (in yellow) of the area around the lake Trampal 2 and its watershed, as well as the axis indicating it.





**x) Trampal 1**

Figura A1x. Límite de la cuenca hidrográfica (en rojo) y zona considerada para calcular la orientación media (en amarillo) del entorno de la laguna del Trampal 1 y su cuenca, así como el eje que la indica.

Figure A1x. Lake watershed boundary (in red) and area considered for the calculation of mean aspect (in yellow) of the area around the lake Trampal 1 and its watershed, as well as the axis indicating it.