



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Grado en Geología

Riesgos geológicos en el entorno del embalse de Montearagón



Autor:

Julen Iriberry Muniesa

Directores:

Luis Arlegui Crespo

Antonio Casas Sainz

Facultad de Ciencias | Departamento de Ciencias de la Tierra

Curso 2020-2021

Índice

| | |
|--|----|
| 1. Abstract | 2 |
| 2. Introducción | 2 |
| 2.1 Planteamiento y Objetivos | 2 |
| 2.2 Características de la presa, antecedentes y situación actual:..... | 3 |
| 3. Contexto geográfico y geológico | 4 |
| 3.1 Contexto geográfico | 4 |
| 3.2 Contexto geológico..... | 5 |
| 3.2.1 Estratigrafía | 5 |
| 3.2.2 Estructura y geomorfología | 6 |
| 3.2.3 Sismicidad..... | 6 |
| 4. Metodología | 7 |
| 5. Resultados | 8 |
| 5.1 Fracturación..... | 9 |
| 5.2 Procesos activos. Clasificación de los movimientos de ladera..... | 10 |
| 5.3 Modelización. Caracterización de los deslizamientos | 14 |
| 5.3.1 Análisis del modelado del deslizamiento DE-1..... | 14 |
| 5.3.2 Análisis del modelado del deslizamiento DE-2..... | 16 |
| 5.3.3 Análisis del modelado del deslizamiento DE-3..... | 16 |
| 5.3.4 Análisis del modelado del deslizamiento DE-4..... | 17 |
| 6. Discusión | 18 |
| 6.1 Medidas de control y corrección del deslizamiento I-13 | 19 |
| 7. Conclusion | 21 |
| 8. Bibliografía..... | 22 |
| ANEXO I: Cartografía | 24 |
| ANEXO II: Mapa de pendientes | 25 |

1. Abstract

In the north of Spain, the filling of Montearagon reservoir is standstill because of multiple landslide risks. The construction of the dam began in 1992 near to Huesca, during its development, many issues associated to the geology have interrupted or caused changes in the project.

In this essay, I will expose the actual state of the reservoir, through the study of the geology where it is located and looking for different kind of geologic hazards. Some of the most important active processes observed during the field works are: landslides of different scales and erosive processes (soil piping).

The hillside stability has been studied in four different sections through digital modeling to obtain the safety factor of each one. The data obtained from the models and field work has been used on the Markland method to analyze its kinematics. In general, the research displays a stability of the landslide areas at this moment, which can be at risk when the filling of the Montearagon reservoir is completed.

2. Introducción

En los últimos años, de cara a construir infraestructuras de gran envergadura, como es el caso de las presas y embalses, poder conocer la geología, así como los riesgos geológicos en el área de trabajo, ha tomado una mayor importancia y reconocimiento. Debido a casos como los del embalse de Yesa o de Biscarrués, donde los movimientos de ladera han imposibilitado su finalización, han hecho que estos sean, de entre todos los riesgos geológicos, unos de los más estudiados y controlados en todas las fases de construcción y llenado.

El presente trabajo, toma el caso del embalse de Montearagón como marco para llevar a cabo un estudio de los riesgos geológicos asociados a él y su entorno, donde poder aplicar y demostrar lo aprendido durante el Grado de Geología. Se trata de un proyecto que ha tenido una repercusión mediática modesta, a pesar de que la infravaloración de los riesgos ha conllevado un cambio de proyecto y dos paralizaciones de varios años, necesarias para corregir problemas asociados a la geología del terreno que no se consideraron en 1992, cuando se planteó por primera vez la construcción del embalse.

2.1 Planteamiento y Objetivos

Este trabajo plantea un estudio de la geología a lo largo del embalse de Montearagón y su entorno, con la finalidad de identificar los riesgos geológicos asociados al mismo. Así mismo, el trabajo busca cumplir una serie de objetivos específicos:

- ❖ Estudiar y comprender el contexto geológico en el que se sitúa el embalse y que caracteriza su entorno. Del mismo modo, caracterizar la fracturación (familias de discontinuidades, planos, espesores...) y describir las litologías presentes a lo largo del vaso del embalse.

- ❖ Identificar y delimitar las zonas con peligro de deslizamiento mediante el uso de ortofotos y su posterior reconocimiento en campo.
- ❖ Analizar la estabilidad de los casos más representativos a través de su modelado digital y análisis mediante procedimientos informáticos.
- ❖ Describir otros peligros geológicos que ya existen o que pueden tener lugar durante el llenado del embalse.
- ❖ Poner en valor los estudios geológicos y las medidas propuestas para solucionar los riesgos que en ellos se incluyen. Exponer las actuaciones tomadas para mitigar los peligros surgidos durante la construcción del embalse.

2.2 Características de la presa, antecedentes y situación actual:

El periplo que ha conllevado la construcción del embalse de Montearagón sobre el río Flumen comienza en 1989, cuando la redacción del proyecto de las obras de la presa es encargada por la Diputación General de Aragón. Es en 1992, mediante el Real Decreto-Ley 3/1992 de 22 de mayo, por el que se toman medidas de urgencia para corregir los efectos de la sequía en la provincia de Huesca, que se declara el proyecto del embalse como obra de interés general (BOE, 1993). Ese mismo año se incluye dentro del primer Plan Hidrológico Nacional.

A finales de 1994 se adjudican las obras y comienza su construcción, que se alargaría durante más de 10 años y sufriría varios retrasos. Al comienzo de las obras, los estudios del suelo mostraron que: el asiento de la presa era menos compacto y más plástico de lo considerado en el proyecto, por lo que se aconsejó cambios sustanciales en la presa, para aumentar la estabilidad ante movimientos de ladera, y frente a deformaciones verticales y horizontales. Esto provocó la reescritura completa en un nuevo proyecto y la suspensión de los trabajos hasta el 28 de diciembre de 2000. Estas modificaciones se constituían de: el pasó de una presa de planta recta a una de planta curva y realizada con hormigón vibrado en vez de hormigón compactado, además aumentó 8 m su altura máxima sobre los cimientos (Novella y Zueco, 2004), situando la cota máxima del embalse a 579.50 m sobre el nivel del mar (msnm). La finalización de la obra del Embalse de Montearagón (Fig. 1) tuvo lugar el 27 de septiembre de 2006.

Un año antes (septiembre de 2005), se elaboró el estudio “Análisis de las laderas del embalse de Montearagón río Flumen (Huesca)”, donde se caracterizaron todas las inestabilidades descubiertas. En él se consideraron como deslizamiento aquellas masas desplazadas con una superficie mayor a 0,1 hm², acotando el número a treinta en la margen derecha y catorce en la margen izquierda, de las que seis superan 1 hm² y solo una los 10 hm² (CHE, 2020). El deslizamiento de mayor tamaño, denominado “I-13”, se encuentra bajo seguimiento desde 2006



Figura 1. Estado del vaso del embalse previo a su llenado y tras finalizar su construcción. (CHE, 2007)

y limita el llenado del embalse a la cota de 554 msnm, máximo de la primera fase del plan de puesta en carga, hasta solucionar su inestabilidad, ya que el pie del deslizamiento quedaría sumergido por encima de esa cota. En el primer semestre de 2007, con la colocación de un vertedero de obra a media ladera, el deslizamiento I-13 alcanzó una velocidad máxima de desplazamiento horizontal de 5.2 cm/mes.

En 2010 tuvo inicio el llenado del embalse, cuya cota máxima permitida (554 msnm) hasta solucionar las inestabilidades en el deslizamiento I-13, se alcanzó a mediados de 2013.

3. Contexto geográfico y geológico

3.1 Contexto geográfico

El embalse de Montearagón se encuentra en la comarca de Hoya de Huesca (Comunidad autónoma de Aragón) a 8 km de la población de Huesca por la carretera HU-V-3242. Se integra en la zona norte de la península ibérica, concretamente al norte del valle o depresión del Ebro, quedando la cola del embalse a escasos kilómetros del comienzo de las Sierras Exteriores donde destaca el Salto del Roldán.

El embalse tiene orientación N-S, con una longitud de aproximadamente 4 km que discurre en paralelo a las poblaciones de Fornillos de Apiés en la margen occidental y Chibluco en la margen oriental (Fig. 2). Es abastecido por el río Flumen cuyo caudal medio es de 0,99 m³/s, con una aportación media anual de 27,3 hm³ (CEH). Aguas arriba del embalse se encuentran la presa de Santa María Belsué y como contraembalse de esta, la presa de Cienfuegos.

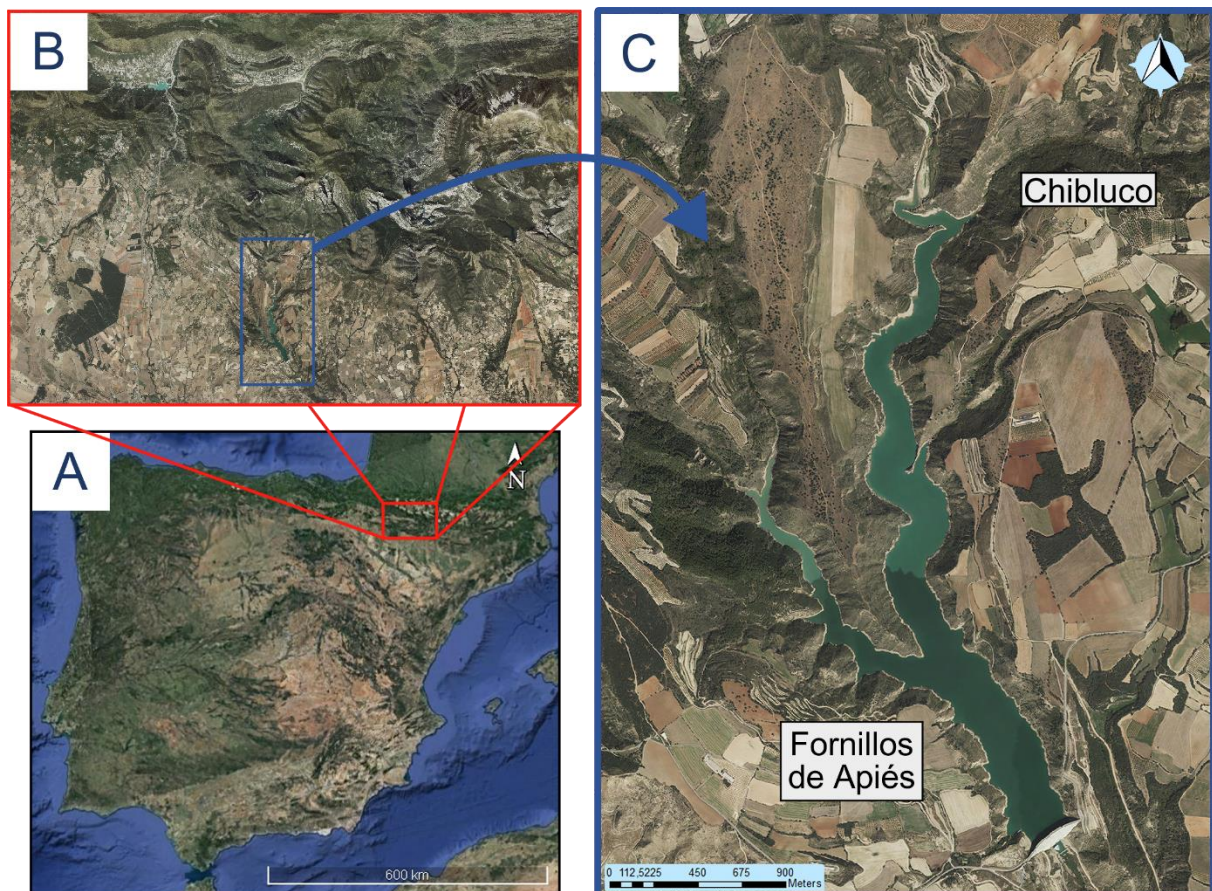


Figura 2. Situación geográfica del embalse de Montearagón. A escala: A) peninsular, B) comarcal y C) local.

3.2 Contexto geológico

La Cuenca del Ebro se caracteriza por ser una cuenca endorreica formada durante el Oligoceno Superior y el Mioceno. El origen de los materiales sobre los que se sitúa el embalse está ligado a cursos fluviales cenozoicos, con lutitas y paleocanales de arenisca de la Formación Sariñena, y sobre estos, terrazas encajadas de edad cuaternaria.

En el entorno del embalse, a pesar de la cercanía con el orógeno pirenaico, no se aprecian estructuras tectónicas de importancia en el área de trabajo.

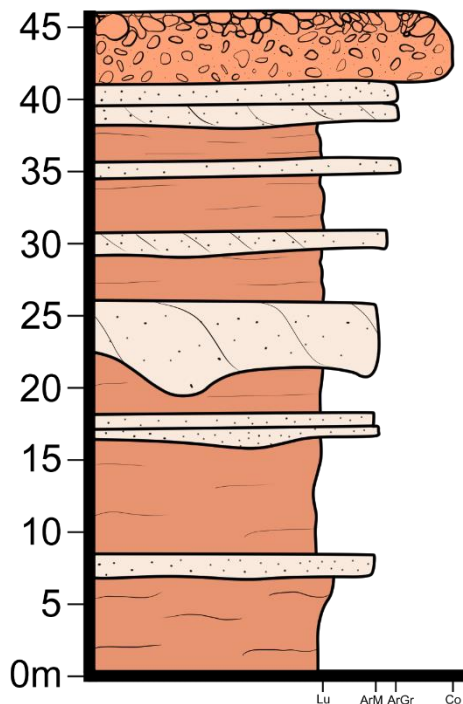


Figura 3. Secuencia general del embalse.

3.2.1 Estratigrafía

Para conocer la secuencia completa del vaso del embalse de cara a los posteriores modelados, se han descrito tanto la sección inundada mediante fotografías previas a su llenado, como los afloramientos accesibles que han sido estudiados y descritos con mayor detalle.

A pesar de su gran longitud, la secuencia general del embalse (Fig. 3) presenta una homogeneidad litológica desde su punto más meridional al más septentrional. Los materiales neógenos se asocian a un curso fluvial de tipo *braided* (Samsó *et al.*, 1991), dejando a su paso múltiples paleocanales caracterizados por una importante variación lateral en su espesor. Debido a esta homogeneidad, se han descrito solo dos perfiles en cabeza y cola del embalse, el primero en la cerrada de la presa y el segundo en la ladera donde se desarrolla el deslizamiento I-13.

El primer afloramiento se encuentra en el sector sur del embalse, sobre la cerrada de la presa, donde únicamente aparece la secuencia neógena con un marcado carácter granocreciente y estratodecreciente. En este punto, la Fm. Sariñena comienza con un primer tramo potente de 15 m de lutitas grises con intercalación de niveles finos de arenisca (10-50 cm), que impermeabilizan la base del vaso, terminando a techo con una capa potente de arenisca (~2 m) que dibuja un paleocanal. El segundo tramo se compone de una alternancia de lutitas y areniscas beige, con mayor proporción de lutitas en la base y areniscas a techo. Por último, una terraza cuaternaria da lugar a una nueva unidad granocreciente, con areniscas en la base y conglomerados a techo. Los conglomerados tienen una matriz arenosa y no granosoportada en su base que pasa a granosoportada, el lavado de estos da lugar a la formación de caliche en algunos puntos y una matriz más cementada.

La segunda columna levantada se localiza en la ladera del deslizamiento I-13, el punto más al norte del embalse que se ha estudiado; la secuencia varía ligeramente, continuando con el carácter granocreciente. La Fm. Sariñena continúa patente, en este caso con un primer tramo de 10 m compuesto por lutitas con cantos (1-3 cm) y láminas (5-20 cm) de arenisca de grano fino, y que a partir de, en torno a la cota de 620 msnm, toman predominancia las lutitas pardas con tonos rojizos, amarillos y beige con intercalación de capas de arenisca (20-50cm), donde destacan dos niveles de 2-3 m. Sobre ellas se encuentra la unidad correspondiente a las

terrazas del Cuaternario, similares a aquellas a lo largo del embalse, partiendo en la base de conglomerados con cantos de hasta 20 cm y no granosoportados y terminando con conglomerados de cantos de hasta 40 cm y granosoportados, en ambos casos la matriz es de tamaño arena con mayor cementación y aparición de costra carbonatada hacia techo.

3.2.2 Estructura y geomorfología

El embalse presenta una homogeneidad litológica y estructural en sus dos márgenes, con una pendiente media de las laderas de la cerrada de entre 25-30°. Las unidades se disponen subhorizontales con buzamientos de entre 5-10° hacia el noreste, permitiendo que los paleocanales de arenisca de mayor potencia (hasta 5 m) se puedan seguir a lo largo del embalse. Estos llegan a formar voladizos cuando los materiales inferiores, de menor resistencia, son erosionados, lo que conlleva que en muchos casos se terminen fracturando y volcando sobre la ladera. Ocasionalmente, en los niveles de arenisca se pueden observar estructuras de sedimentación fluvial (en su mayoría degradadas por la erosión) como estratificación cruzada planar y superficies de acreción, propias de la migración lateral de los cursos *braided*, con una morfología sinusoidal de la capa y en algún caso con base canaliforme.

La geomorfología del embalse se encuentra determinada por el encajamiento del río Flumen en su fondo. En su entorno se pueden observar dos niveles de terraza, delimitados por fuertes escarpes. Estas terrazas dan lugar a extensas superficies horizontales sobre las que se aprecian cultivos desde los años 50.

En el entorno del embalse no existen grandes estructuras tectónicas expuestas. Durante la construcción del embalse, las excavaciones realizadas mostraron que a pocos metros bajo los cimientos del sector central de la presa (la cota más baja del vaso), aparece un pliegue anticlinal caracterizado como clase 1B según Ramsay (CHE, 2020).

3.2.3 Sismicidad

La aceleración sísmica básica en el entorno del embalse de Montearagón se encuentra entre 0.04g y 0.05g y un coeficiente de contribución K de 1.0, obtenidos del Mapa de Peligrosidad Sísmica de España de 2012 (IGN, 2012) (Fig. 4).

Según el Reglamento Técnico sobre Seguridad de Presas y Embalses al embalse de Montearagón se le asigna una categoría A ante los riesgos potenciales generados de su posible rotura o funcionamiento incorrecto. Para esta categoría, la Norma de Construcción Sismorresistente (Ministerio de Fomento, 2002) clasifica el embalse como una construcción de importancia especial, lo que implica que, a la hora del diseño de la presa, se ha definido una aceleración sísmica de cálculo con un coeficiente adimensional de riesgo de 1.3. De esta forma, el proyecto del embalse tiene en consideración un valor de aceleración sísmica por encima de lo esperado.

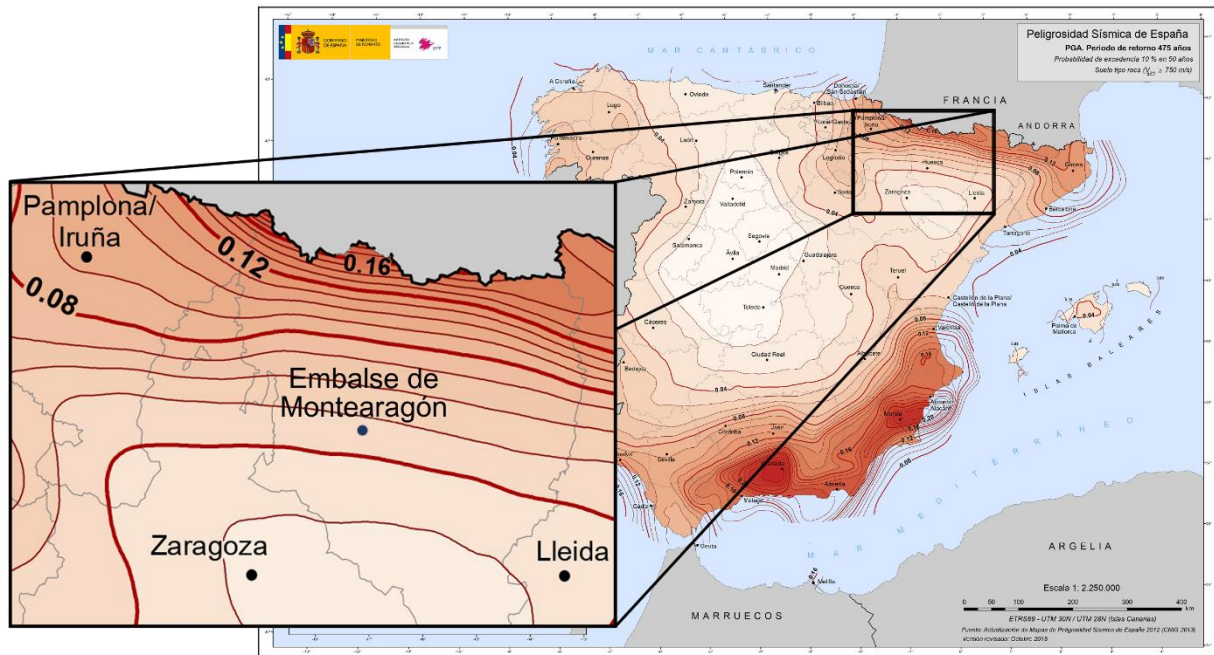


Figura 4. Mapa de peligrosidad sísmica de España, para un periodo de retorno de 475 años y una probabilidad de exceder un 10% en 50 años. Instituto Geográfico Nacional (IGN), 2012.

4. Metodología

Para llevar a cabo el estudio de los riesgos que afecta al entorno del embalse de Montearagón, se han llevado a cabo hasta 7 jornadas de campo, complementadas por el trabajo en gabinete. A partir de la primera visita al embalse, en la que se recorrió todo el entorno del mismo, y una revisión general de la bibliografía existente, se ha decidido tomar como principales riesgos los procesos de erosión (*piping*) y los movimientos de ladera. Destaca en este estudio el deslizamiento denominado como “I-13”, que obligó a la paralización del llenado del embalse tras la primera fase.

Durante los trabajos de campo, se han recorrido ambas márgenes del embalse en busca de evidencias de la actividad de procesos geológicos. Para la caracterización del macizo se ha seguido el siguiente procedimiento:

- ▶ Levantamiento de perfiles estratigráficos, describiendo in situ las litologías (color, textura y espesor) que se aprecian y delimitando los límites de unidad. También se han descrito las estructuras sedimentarias en las capas de arenisca.
- ▶ Caracterización del macizo mediante tres estaciones geomecánicas delimitadas de norte a sur a lo largo del embalse. En ellas se han recogido datos estructurales de la estratificación, así como de las fracturas y cicatrices cuando las hubiese. La red de fracturación ha sido descrita a detalle junto a su abertura, relleno y espaciado.
- ▶ Se ha complementado la cartografía de deslizamiento, buscando posibles indicios de movimientos de ladera como cicatrices, fracturas paralelas a los mismos, distorsión de la estratificación, etc.
- ▶ Se han descrito y tomado medidas de los procesos activos identificados.

Los procedimientos seguidos durante el trabajo de gabinete han sido variados, y en algunos casos, en base a datos recogidos en campo:

- ▶ Recopilación de fotos aéreas y ortofotos para observar la evolución del terreno a lo largo del tiempo. Estas abarcan desde el vuelo americano de 1956 hasta las imágenes más actuales del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) de 2018, ambos obtenidos del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG).
- ▶ Procesamiento mediante el programa RStudio (V1.3.1093, RStudio Team, 2020) de datos LiDAR, generando un raster con una definición de 0.5 m en formato .tiff con el que poder trabajar en Sistemas de Información Geográfica (GIS). Para trabajar con estos raster, se ha utilizado el programa QGIS (V3.8, Zanzibar), mientras que, para realizar la cartografía a detalle de los movimientos de ladera (ANEXO I), se han editado y dibujado mediante Clip Studio Paint sobre imágenes de alta definición (14031x19842 pp). Sobre el mismo mapa se han localizado los afloramientos descritos y las estaciones geomecánicas.
- ▶ Para la representación de los datos de estratificación y de la fracturación medidos en campo, así como del test de Markland, se ha usado el programa Stereonet (Allmendinger *et al.*, 2012).
- ▶ Se han generado modelos digitales de los posibles deslizamientos más importantes mediante el software Rocscience Slide (V6.0, Rocscience Inc, 2013) trazando un corte que lo cruza en la trayectoria supuesta de desplazamiento. Para la base del modelo, se ha extraído el perfil topográfico de cada traza de manera precisa con la herramienta “Interpolate shape” del programa ArcGIS (V10.8).
Para realizar los modelados en Slide, se han tenido en cuenta además de la geometría de la cerrada, las litologías que la componen y sus propiedades geomecánicas, así como la distribución de las mismas. Lo obtenido mediante estos análisis es el factor de seguridad para numerosas superficies de deslizamiento que pueden darse en las masas desplazadas, de esta forma se ha podido conocer la estabilidad de las laderas del embalse en aquellos sectores donde se ha considerado necesario.
- ▶ A lo largo de todo el estudio, se ha revisado la escasa bibliografía existente sobre la geología en el entorno del embalse y los procesos activos en él. Esta se compone principalmente artículos de prensa e información técnica adjuntada a las contrataciones del estado para ejecutar las actuaciones correctoras.

Por último, se ha procedido a la discusión de los resultados obtenidos para evaluar el conjunto de riesgos geológicos que se han reconocido en el entorno del Embalse de Montearagón. De manera complementaria a los análisis realizados y usando los resultados obtenidos, se han aplicado otros métodos para estudiar la posibilidad cinemática de los deslizamientos y la probabilidad del vuelco de bloques.

Todos los resultados, interpretaciones y conclusiones llevadas a cabo durante este estudio se han dejado recogidas en la presente memoria y expuestas en la posterior presentación de las mismas.

5. Resultados

A continuación, se muestra lo obtenido a partir de los trabajos de campo y su posterior procesado, se exponen los datos relativos a la fracturación que afecta a los materiales del embalse y se recogen los procesos geológicos activos que suponen un riesgo. Además de ello, se introducen los modelos de deslizamiento, obtenidos mediante Rocscience Slide y que se discutirán en el apartado “6. Discusión”.

Como primer acercamiento al área de trabajo, se ha contrastado una serie de ortofotos en secuencia temporal, siendo la más antigua encontrada el vuelo americano de 1956 y la más actual correspondiente al Plan Nacional de Ortofografía Aérea (PNOA) de 2018. Durante el estudio de estas fotografías, no se han apreciado cambios relevantes en la geomorfología del entorno del embalse. Así mismo, se ha observado que los grandes bloques caídos en la ladera, han preservado su posición intacta durante los últimos 65 años. De la misma forma, aparentemente la morfología de las cicatrices y la pendiente de sus laderas no han sufrido grandes cambios. Sí que se aprecia la interacción antrópica, principalmente a la altura de la presa.

5.1 Fracturación

El sistema de fracturas que se sigue a lo largo de la cerrada, afecta principalmente a las capas de arenisca de la Fm. Sariñena. Para analizar la red de fisuras que afectan al macizo, incluyendo las cicatrices en la cabecera de los paleodeslizamientos, se han detallado tres estaciones geomecánicas repartidas en la margen derecha del embalse, desde la presa hasta la cola.

En cada estación se ha recogido la orientación general del talud y datos de la estratificación (S0) y de las fracturas (F1) que aparecen, todo ello representado mediante proyección estereográfica (Fig. 5) para su mejor comprensión espacial. Además, en los afloramientos que lo han permitido, la fracturación se ha caracterizado según su espaciado, su rugosidad y abertura y su relleno y/o presencia de agua.

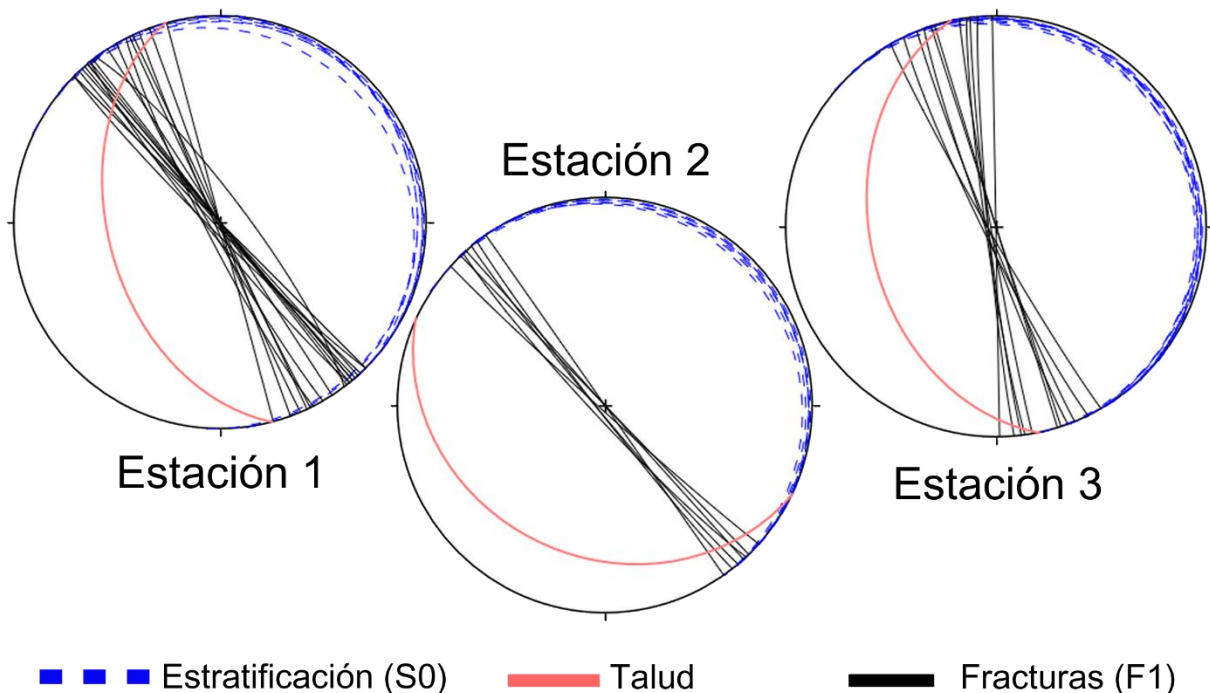


Figura 5. Representaciones estereográficas de los datos tomados en cada estación geomecánica.

En los estereogramas quedan recogidas las dos familias de discontinuidades: la estratificación (S0) que se presenta prácticamente horizontal, con un plano medio de dirección 145 y un buzamiento de 4° hacia el noreste, y una sola familia de fracturas (F1) que se puede encontrar a lo largo de toda la cerrada con una dirección de entre 135 y 175, en su mayor

parte verticales y con un plano de orientación y buzamiento medios de 147/88 O. La orientación general del embalse y sus laderas es de entre 150 y 005, con una pendiente muy variable, mayormente de 25 a 55°.

Las fracturas no presentan desplazamiento vertical entre labios, cuya abertura va desde 0,5 a 7 cm y dejando una rugosidad entre media y alta, obteniendo a partir de los perfiles estandarizados de rugosidad de Barton y Choubey (1977) un índice JRC de rugosidad desde 5 hasta 10, con mayor abundancia en la parte media (6-8). El espaciado entre fracturas no es constante, pudiendo encontrar varias fracturas cercanas con espaciados de 20 a 30 cm y puntos donde el espaciado es métrico o incluso fracturas aisladas.

En las aberturas de las areniscas no se aprecia un flujo continuado, pero la alteración superficial de sus bordes superiores indica el paso de agua por las fisuras en otros momentos. En estas, el relleno es lavado y disgregado por lo que no queda rastro y se favorece su ampliación por el crecimiento de vegetación (Fig. 6 Sup.). En aquellas fracturas que sí presentan relleno (Fig. 6 Inf.), este se compone tanto de arcillas como de limos y arenas sueltas y sin cementar.



Figura 6. Fracturación vista en planta. Superior: Abertura sin relleno y abundante vegetación y humedad. Inferior: Abertura con relleno de material limoso y materia orgánica arrastrada.

5.2 Procesos activos. Clasificación de los movimientos de ladera

En el entorno del embalse se pueden apreciar una serie de procesos que están en desarrollo actualmente, algunos de estos son: procesos de erosión diferencial como el *piping*, surgencias desde el macizo o movimientos de ladera. A su vez, se aprecian cicatrices en la

cabecera de antiguos deslizamientos que se encuentran inactivos y que la posibilidad de su reactivación será estudiada en el apartado 5.3.

Los procesos de *piping* (o sufosión), definidos por Chorley (1978) como: “la formación de conductos (*pipes*) naturales en el suelo u otros depósitos no consolidados por eluviación o por procesos de erosión diferencial subsuperficial”, se pueden encontrar a lo largo de todo el entorno del embalse. Su aparición tiene lugar, tanto en los campos de cultivos y caminos, como en las nuevas vías y taludes realizados tras la construcción del embalse, lo que implica una rápida evolución y desarrollo. En superficie quedan representados por orificios (en algunos casos conectados) de hasta 20 cm de diámetro y alcanzando el metro de profundidad (Fig. 7)., De manera excepcional y en puntos donde el agua encauzada en las bajantes se desvía del cauce diseñado, se produce un *piping* intenso con cavidades de diámetro y desarrollo subterráneo de escala métrica (Fig. 8, C) y E)).



Figura 7. Eventos de *piping* a menor escala.

Además de las cavidades dejadas por la erosión continuada, tras los días de lluvia, se pueden encontrar en las laderas y taludes surgencias desde el interior del macizo a través de los materiales lutíticos, en muchos casos asociadas a las zonas de descalce bajo las areniscas. El caudal de la surgencia no se ha podido medir en campo, aunque queda recogido en los informes técnicos que el caudal de las filtraciones en el vaso se encuentra entre 4.08 l/min y 4.70 l/min (CHE, 2020).

Los movimientos de ladera descritos a continuación, han sido caracterizados siguiendo la ampliación de la clasificación de Varnes (1978), realizada por Cruden y Varnes (1996). A pequeña escala (métrica a decamétrica), se han apreciado procesos de menor magnitud e impacto sobre el entorno del embalse (Fig. 8), se describen a continuación:

- La red de fisuración que afecta a los estratos de arenisca y el lavado de las arcillas sobre las que se asientan provocan la caída de bloques por un mecanismo de vuelco y en algún caso por desprendimiento.
- En la parte alta de algunos taludes junto a la carretera y de los realizados en el deslizamiento I-13, donde afloran los paleocanales de arenisca, aparecen fracturas de gran longitud (7-10 m), paralelas entre sí y cuya abertura es mayor hacia borde del talud (10-20 cm). Estas se pueden considerar como grietas de tracción, afectando únicamente a materiales superficiales y sin repercusión importante.

- De escala métrica, también aparecen movimientos de ladera que pueden ser caracterizados como deslizamientos, se pueden observar tanto deslizamientos rotacionales como traslacionales de falla plana.

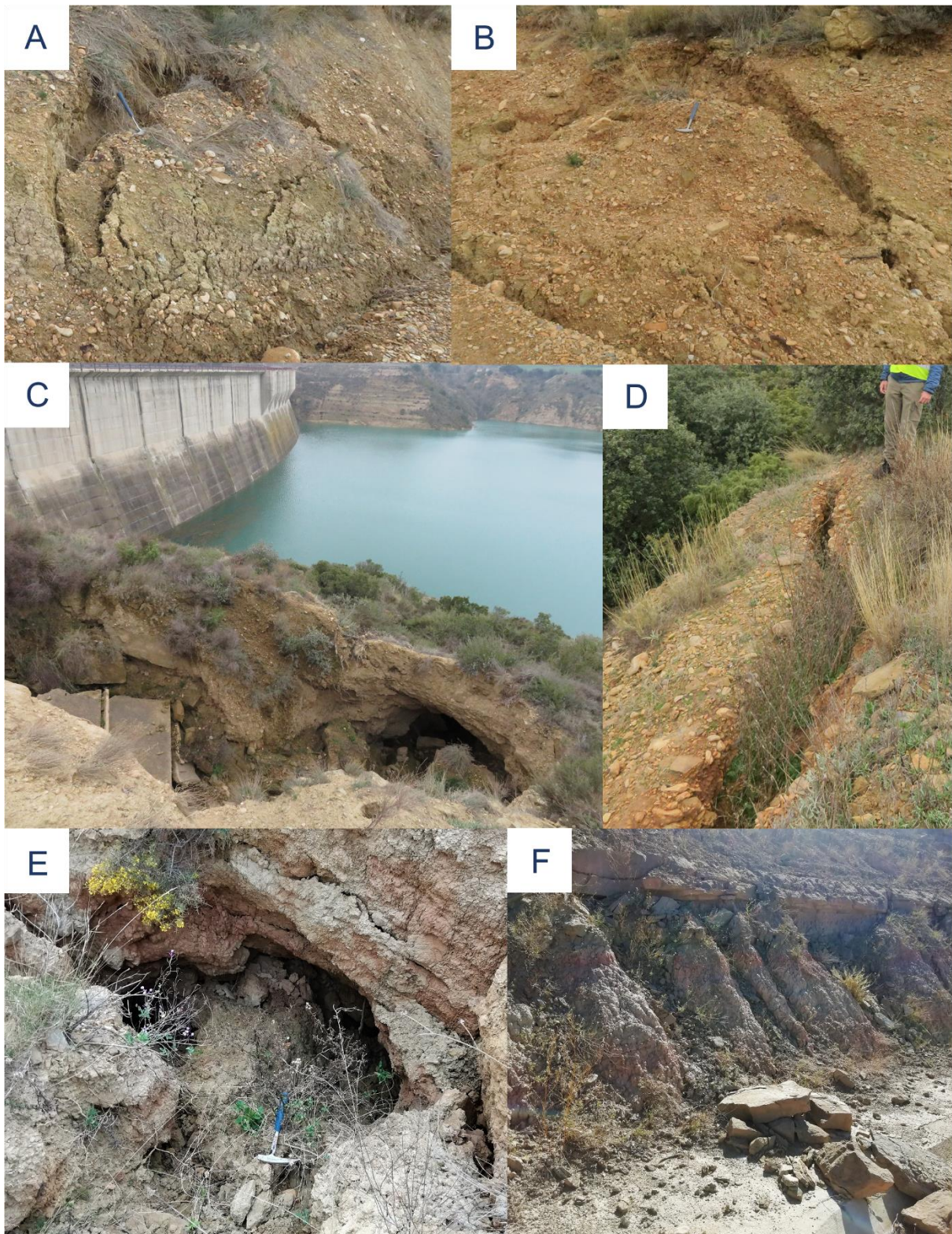


Figura 8. Ejemplos de procesos activos. A) Deslizamiento traslacional rotacional, B) Deslizamiento traslacional planar, C) y E) Proceso de piping intenso (escala métrica y decamétrica), D) Grieta de tracción y F) Vuelcos y desprendimientos en los voladizos de arenisca.

Los movimientos de ladera de mayor escala y que podrían implicar un mayor riesgo geológico, se restringen a deslizamientos, los cuales se han podido cartografiar sobre las ortofotos (Anexo I) y en su mayor parte se pueden considerar paleodeslizamientos, es decir, inactivos en la actualidad. La cicatriz, con morfología cóncava, en la cabecera de los deslizamientos es lo más accesible, ya que el pie de estos generalmente se encuentra bajo la cota del embalse. Aun así, se pueden delimitar sus márgenes laterales, que en algunos casos se superponen lateralmente, lo que aporta una mayor complejidad a la hora de su modelado. Se ha interpretado que estos desplazamientos están compuestos por más de un deslizamiento rotacional afectando a toda la masa desplazada, por tanto, con más de una falla curva y adquiriendo en su conjunto una mayor irregularidad en su desplazamiento.

En el caso de la ladera del deslizamiento I-13, la morfología del embalse se distorsiona. Los voladizos formados por los paleocanales se pueden apreciar en los extremos del área afectada, siendo estos cortados de manera brusca y quedando dispersos en forma de bloques sobre la ladera. Además, el primer tramo lutítico, que recorre gran parte de la cerrada, pierde su homogeneidad y pasa a presentar cantos e indicios de removilizaciones, así como trazados de paleodeslizamientos de menor magnitud en el interior de la masa desplazada (Fig. 9).



Figura 9. Deslizamiento menor dentro del deslizamiento I-13. Se aprecia la superficie de deslizamiento (línea a trazos) sobre la que se distorsiona la estructura original.

La pendiente de la ladera es un factor importante de la generación de nuevos deslizamientos y la reactivación de los ya presentes, como se discutirá más tarde mediante el test de Markland. Mediante el raster creado con los datos LiDAR, se ha realizado un mapa de pendientes (Anexo II) de gran detalle que recoge el buzamiento de las mismas y las clasifica en 5 niveles de riesgo: En buzamientos inferiores a 5° se considera muy bajo, entre 5° y 25° presentan un riesgo bajo, entre 25° y 35° alcanza un riesgo medio, entre 35° y 55° un riesgo alto y valores mayores a 55° se considera que existe un riesgo muy alto de que se produzcan deslizamientos.

5.3 Modelización. Caracterización de los deslizamientos

El modelado de los movimientos de ladera con programas como Rocsciense Slide nos permite aplicar los parámetros geotécnicos del terreno, incluir la geometría de sus laderas y el curso del nivel piezométrico de las mismas, para poder obtener una serie de superficies de rotura y conocer su estabilidad mediante el factor de seguridad (FS) que se asocia a cada uno.

El método usado para obtener el FS ha sido el de Janbu corregido, basado en el método de Janbu simplificado. Considera un caso de superficies de rotura compuestas, dividiendo la superficie desplazada en pequeñas secciones verticales y teniendo en cuenta los esfuerzos normales sobre cada sección, asumiendo una línea de desplazamiento que relaciona todas las partes hasta alcanzar un equilibrio de fuerzas (Prajapati y Maheshwari, 2016). Mediante la opción de Janbu corregido, Slide aplica un factor de corrección sobre el FS de Janbu simplificado en función de la geometría del deslizamiento y las propiedades de los materiales atravesados, de esta forma trata de compensar que el método no tiene en cuenta el equilibrio de momentos y las fuerzas tangenciales sobre cada sección.

Para poder estudiar las múltiples superficies de deslizamiento que se pueden producir, se ha generado una malla de ejes de rotación, a partir de los cuales Slide genera la superficie más probable (mediante el método de Janbu). En su representación, Slide asigna un color a cada superficie en función del FS obtenido y los aúna, lo que en su conjunto permite conocer qué trazados presentan mayor peligro. En este caso se ha realizado un mallado de 20x20, lo que genera 400 ejes y, por tanto, 400 superficies de deslizamiento estudiadas.

A lo largo del embalse se han trazado cuatro perfiles en orientación este-oeste (Anexo I), denominados de norte a sur como DE-1, DE-2, DE-3 y DE-4 y que se suponen las áreas de menor estabilidad del embalse, correspondiendo DE-1 con el área que ocupa el deslizamiento I-13. Las propiedades geotécnicas de los materiales, introducidas en los modelados, han sido obtenidas de una serie de tablas estandarizadas en la bibliografía (British Standards Institution, 1994) debido a la imposibilidad de consultar proyectos del embalse o estudios en la zona. Los valores de peso específico aplicados a las areniscas han sido de 21 kN/m³ en seco y 22.5 kN/m³ en saturado, mientras que para las lutitas se ha usado un valor único de 17 kN/m³. A causa de la fragmentación que presenta la arenisca, se le ha asignado una cohesión de 0 kPa, mientras que a las lutitas se les ha considerado una cohesión de al menos 100 kPa. Como coeficiente de rozamiento interno, se han considerado valores conservadores de: 18° para las lutitas y 30° para las areniscas. La unidad conglomerática, que marca el nivel de terraza en la cabecera de los deslizamientos y queda expuesta en sus cicatrices, no ha sido incluida debido a que el espesor de esta unidad (2-5 m) se considera despreciable en relación al desnivel total (97-140 m).

Para cada trazado, se han realizado dos modelados con la misma geometría, uno con el nivel piezométrico a la cota actual (554 msnm) del embalse y otro a su cota máxima (579 msnm).

5.3.1 Análisis del modelado del deslizamiento DE-1

El trazado realizado para estudiar el deslizamiento DE-1 cruza el deslizamiento I-13, el de mayor superficie y situado en la cola del embalse. Debido a su excepcional longitud, el eje X del mallado de ejes abarca el doble, siendo un 20x40 y generando 800 superficies de

deslizamiento distribuidas a lo largo de la ladera. Este deslizamiento presenta en campo una gran cicatriz de 3 m de altura y se desarrolla a lo largo de 365 m aproximadamente, con un desnivel de 140 m, dando lugar a una pendiente media de 20°.

Las superficies de deslizamiento restringidas a desnivel dibujado por la cicatriz (Fig. 10) obtienen un FS inferior a 1, por lo que se consideran inestables. A lo largo de la ladera, las probabilidades de un deslizamiento que solo afecte a un sector de la misma disminuyen a un FS superior a 1.5. Mientras que las superficies que atraviesan toda la masa, son aquellas cuyo FS se mantiene muy cercano a 1, llegando a ser ligeramente inferior cuando la cota del embalse se encuentre en su máximo.

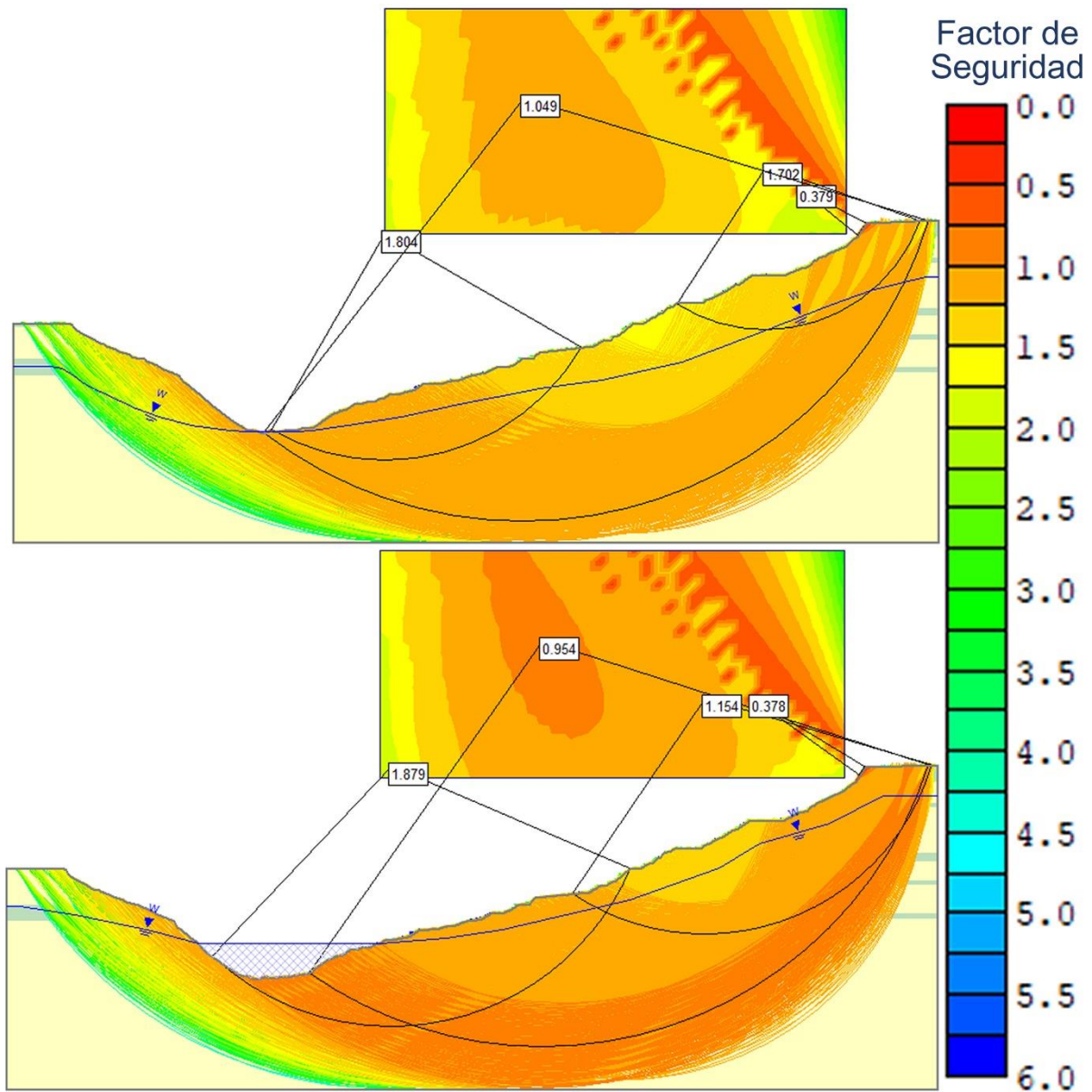


Figura 10. Superior: DE-1 a cota 550. Inferior: DE-1 a cota 579. Se indican superficies de deslizamiento concretas y sus FS.

5.3.2 Análisis del modelado del deslizamiento DE-2

En el caso del deslizamiento DE-2 (Fig. 11), ha sido el único considerado en la margen oeste del embalse. En campo presenta poca vegetación y unidades de arenisca y lutitas expuestas por caídas recientes de menor importancia y carácter retrocesivo. Esto queda representado en los modelados donde se observa que los voladizos presentan un FS mucho menor a 1, aunque el volumen desplazado presenta un riesgo bajo para el embalse. La ladera tiene una longitud de 250 m, con un desnivel de 110 m y una pendiente media de 24°.

Los factores de seguridad más bajos se presentan en los dos cortados que dibuja la ladera, donde alcanza un mínimo de 0.310 tanto en una cota alta como baja (correspondiente al voladizo superior). Mientras que las posibles fracturas que recorren la masa desde la cabecera a su pie, presentan valores en torno a 1.15 - 1.0 a una cota alta y de 1.2 - 1.05 en el caso de la cota actual. El número de superficies con un FS inferior a 1.5 es ligeramente mayor cuando el embalse alcanza su cota máxima. Así mismo, los valores de las superficies que afectan únicamente al pie del deslizamiento, aumentan con el llenado del embalse, superando valores de 1.7.

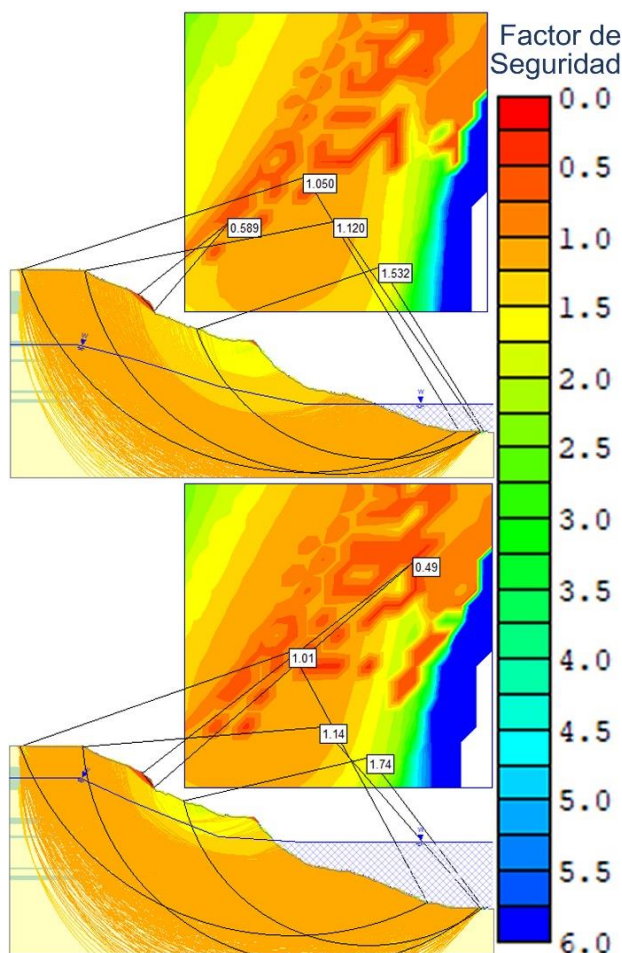


Figura 11. Superior: DE-2 a cota 550. Inferior: DE-2 a cota 579. Se indican superficies de deslizamiento concretas y sus FS.

5.3.3 Análisis del modelado del deslizamiento DE-3

El deslizamiento DE-3 presenta una cicatriz de casi 2 m en cabecera y recorre 190 m, descendiendo 90 m en una pendiente de 28°. Su forma en planta claramente cóncava y la cicatriz en cabecera, evidencian la existencia de un deslizamiento, pero la espesa vegetación y la falta de desprendimientos recientes, dejan patentes su inactividad. Mediante los modelados, se puede probar si la estabilidad que ha alcanzado la ladera, se mantendrá durante el llenado.

Como en los casos anteriores, los voladizos de arenisca destacan en rojo por un FS menor a 0.5 (Fig. 12 Izq.), en este caso, con valores mínimos de 0.359 en la cota actual y 0.363 para la misma superficie con el embalse lleno. Los trazados que recorren la masa por completo presentan valores de FS entre 1.25 y 1.0 en ambos casos, siendo aquellas con contrapendiente al pie las que dan un factor más bajo. Se llegan a alcanzar valores superiores a 1.5 en superficies que afectan solo al pie o la cabecera del deslizamiento, con una variación en la estabilidad entre los dos casos mínima.

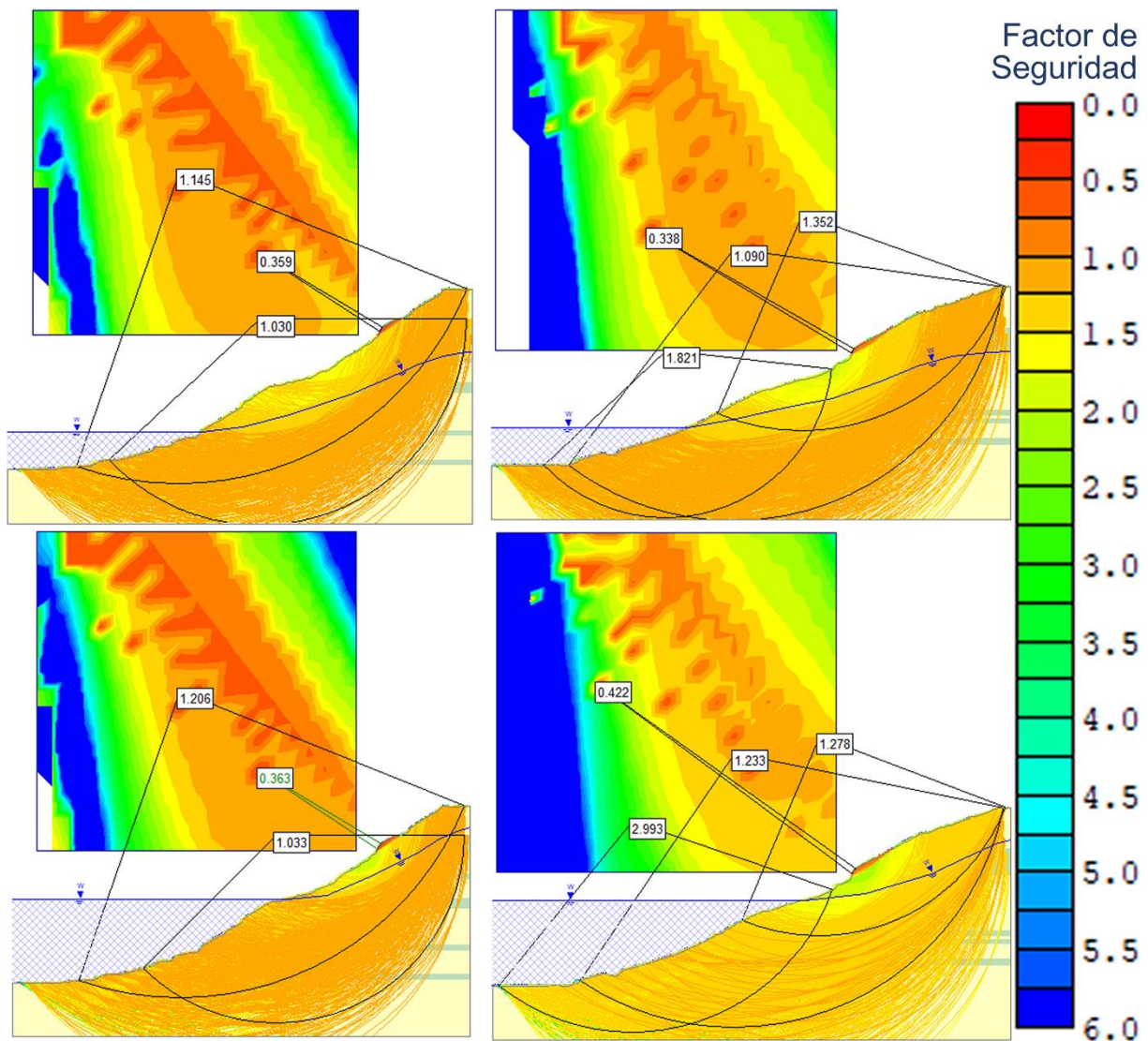


Figura 12. Izquierda) Superior: DE-3 a cota 550. Inferior: DE-3 a cota 579. Derecha) Superior: DE-4 a cota 550. Inferior: DE-4 a cota 579. Se indican superficies de deslizamiento concretas y sus FS.

5.3.4 Análisis del modelado del deslizamiento DE-4

El último deslizamiento (Fig. 12 Der.) se sitúa a apenas medio kilómetro de la pared de la presa, es por ello que, a pesar de no presentar movimientos de ladera recientes, es importante conocer su estabilidad actual y futura. Tiene una longitud de 230 m, en los que desciende 90 m con una pendiente media de 23° . Al igual que en el deslizamiento DE-3, se puede apreciar una cicatriz de 1,2 m con cierta forma cóncava y sobre la que se aprecian grietas de tracción.

Los valores de FS mínimos alcanzados en los cortados de arenisca son de 0.338 y 0.422 a cota baja y alta respectivamente. Con valores cercanos a uno en las superficies de gran recorrido, presentando valores de 1.15-1.09 en la cota actual y de 1.40-1.20 cuando se produzca el llenado del embalse. En este caso el valor del Factor de Seguridad de las superficies más inestables, asciende tras el llenado, alcanzando valores similares en aquellas que recorren la cabecera del deslizamiento, mientras que, las superficies que quedan sumergidas alcanzan valores superiores a 2.0.

6. Discusión

Haciendo una lectura general de los resultados obtenidos, podemos decir que la geología en el entorno del embalse de Montearagón presenta numerosos procesos activos. Cada uno de estos de manera individual, no generan un gran impacto sobre el embalse o la presa, pero en su conjunto, dan lugar a un terreno cuya estabilidad se encuentra en constante cambio y que debe conllevar un seguimiento.

La red de fracturas caracterizada en el entorno del embalse, se desarrolla paralela al mismo, dejando su marca en los paleocanales de arenisca, más competentes. Con orientación similar, se disponen las cicatrices de deslizamientos de superficie desde 0,1 hm² hasta 10 hm². Esta constancia en la orientación de las discontinuidades permite plantear que los procesos de fragmentación activos en el macizo provienen de la descompresión de la cerrada, de esta forma se descarta un factor tectónico.

Los procesos de erosión, caracterizados principalmente como *piping*, dan lugar a numerosas cavidades, encontradas tanto en el terreno natural como en los taludes y bermas, cuyo diseño data de hace unos años, pudiendo así afirmar que su desarrollo ha sido rápido. A pesar de que en general, son conductos de pequeño diámetro sin mucho impacto, también son procesos que en un corto plazo pueden llegar a magnificarse. Destacar que este proceso alcanza su mayor intensidad en el entorno de la presa, concretamente en su margen izquierda, donde se han podido observar conductos de diámetro métrico (hasta 3 m), a ambos lados de la presa. Además del *piping*, una erosión activa de las laderas, a largo plazo, puede conllevar la colmatación del embalse y una pérdida de la capacidad real del mismo.

Las discontinuidades asociadas a esta fisuración y erosión diferencial, provocan en algún caso el vuelco de bloques hacia el fondo del valle, por lo que es conveniente estudiar si se trata hechos aislados. Para ello, se ha comparado los datos obtenidos en cada estación geomecánica con las condiciones para el vuelco descritas por Hoek y Bray (1977), en cuyo estudio, relacionan el cociente del ancho del bloque (x, definido por el espaciado de la discontinuidad) y la anchura del mismo (y, su espesor) con la pendiente del plano basal del bloque (β).

Como se observa (Fig. 13), al tener una estratificación subhorizontal, se descarta el deslizamiento del bloque sobre su plano basal, mientras que, la relación x/y que condiciona el vuelco del mismo, no lo permite en ninguna de las estaciones estudiadas. Allí donde se puede observar el vuelco de bloques, se encuentra condicionado por paleocanales cuyo espesor es muy superior a la media, junto a la erosión del nivel blando en su base.

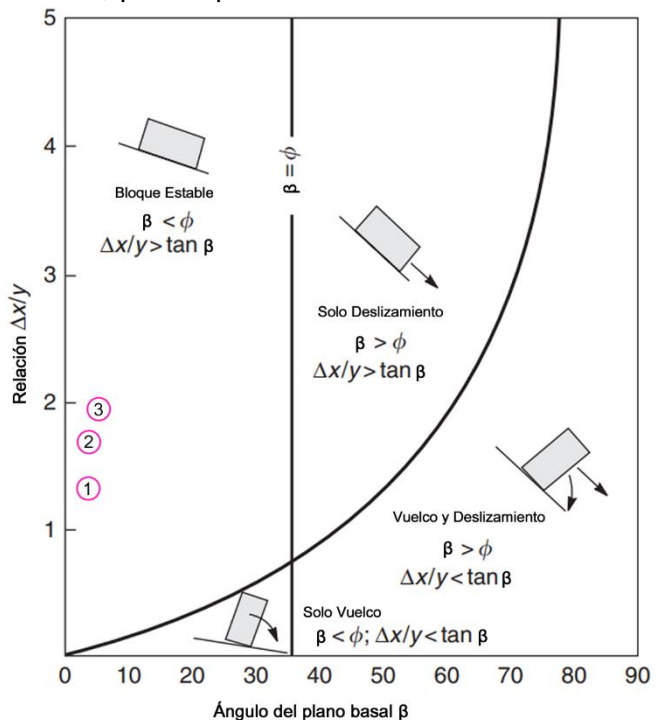


Figura 13. Valores en cada estación geomecánica sobre las condiciones para el deslizamiento y vuelco de un bloque sobre un plano (Traducido de Hoek y Bray, 1977).

En los análisis realizados con el programa Rocscience Slide, se observa que la cerrada del embalse presenta un riesgo medio de sufrir movimientos de ladera a gran escala, aunque alcanzará una mayor inestabilidad en el momento en que se lleve a cabo su llenado total.

Los que al inicio se han caracterizado como paleodeslizamientos, han demostrado tener factores de seguridad cercanos a 1.0, lo que implica que aun manteniendo su estabilidad se encuentran cerca de generar un riesgo real para el embalse. Cabe destacar que aquellas laderas donde el nivel de llenado alcanzará prácticamente la mitad de la misma, el peso del agua genera un efecto estabilizador que aumenta su factor de seguridad, así mismo, se corre el peligro de que un vaciado excepcionalmente rápido del embalse provoque un movimiento de ladera, ya que el terreno saturado no tendría tiempo de drenarse y disminuiría su resistencia al corte. Con estos valores, se encuentran dentro de un marco de seguridad medio a bajo y que implica la necesidad de aumentar las medidas de control y seguimiento en varios puntos a lo largo de la cerrada del embalse y sobre las masas desplazadas.

La complejidad de los deslizamientos descritos pide que, para reafirmar su estabilidad, esta sea contrastada por más de un método. Podemos acudir al test de Markland (1972) para el análisis cinemático de fallas, tomando la geometría del talud, el coeficiente de fricción (Φ) de su litología y posicionando la orientación de la discontinuidad en cada estación geomecánica podemos conocer si se mantendrá estable. Representando todos los datos en la ciclográfica, el sector generado por el cruce del plano del talud sobre el círculo menor (dibujado según Φ) serán los límites de la inestabilidad y si la discontinuidad cruza dicho sector con orientación subparalela al talud ($\pm 20^\circ$), supondrá que el deslizamiento es cinemáticamente probable.

Como se puede observar en la proyección estereográfica de todos los factores (Fig. 14), los planos de fractura mantienen un constante subparalelismo con la cerrada del embalse y una clara subverticalidad. De esta forma, el trazado de los planos de rotura se mantiene alejado del área de inestabilidad.

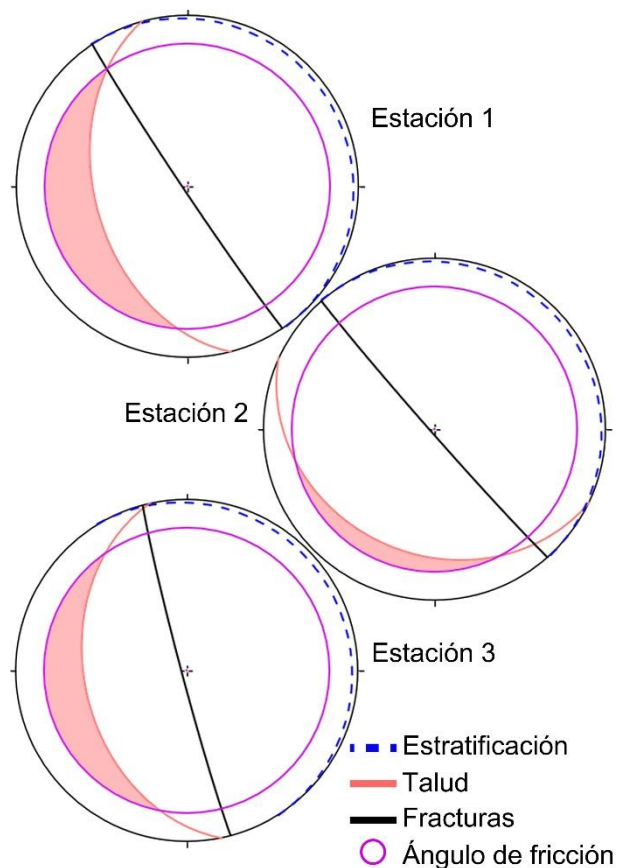


Figura 14. Representación del test de Markland. Área de inestabilidad coloreada en rosa.

6.1 Medidas de control y corrección del deslizamiento I-13

Así como se ha indicado, que en los deslizamientos de cuyo modelado se ha obtenido un factor de seguridad inferior a 1.5 es necesario aplicar medidas de control y seguimiento, también hay que destacar que el deslizamiento I-13, el de mayor superficie en el embalse y situado en su cola, ha sido auscultado y estudiado en detalle debido a su reactivación durante

el llenado del primer escalón del embalse. Gracias al previo posicionamiento de nueve hitos, se pudo detectar un desplazamiento absoluto de 27 cm en 4 meses.

Tras detectar esta reactivación, además de detener el llenado del embalse, se han tomado una serie de medidas de control y corrección. Para observar el desplazamiento de la masa, se ha ampliado a dieciocho el número de hitos de control de la topografía, junto a cinco inclinómetros para controlar el desplazamiento vertical. Respecto a los problemas con el drenaje de aguas en su ladera, se pretende evacuar el agua mediante cuatro drenes franceses (534m) y otros dos drenes en zanja (380m) para recoger el agua infiltrada; además de cunetas revestidas que recogen el agua de escorrentía; todo ello descargando sobre colectores que recorren las bermas situadas sobre el nivel máximo normal (N.M.N.) del embalse; para terminar desembocando en la bajante general formada por una escollera hormigonada de 2 m de anchura y uno de altura. Como medidas de control, se ha tejido una red de hasta diecinueve piezómetros y dos pozos de bombeo (CHE, 2020). Por último, se ha llevado a cabo unas medidas correctivas estructurales importantes como son el desmonte de la parte alta del talud (12.149m³ removidos) y el montaje de un repié de escollera de 3m de altura.

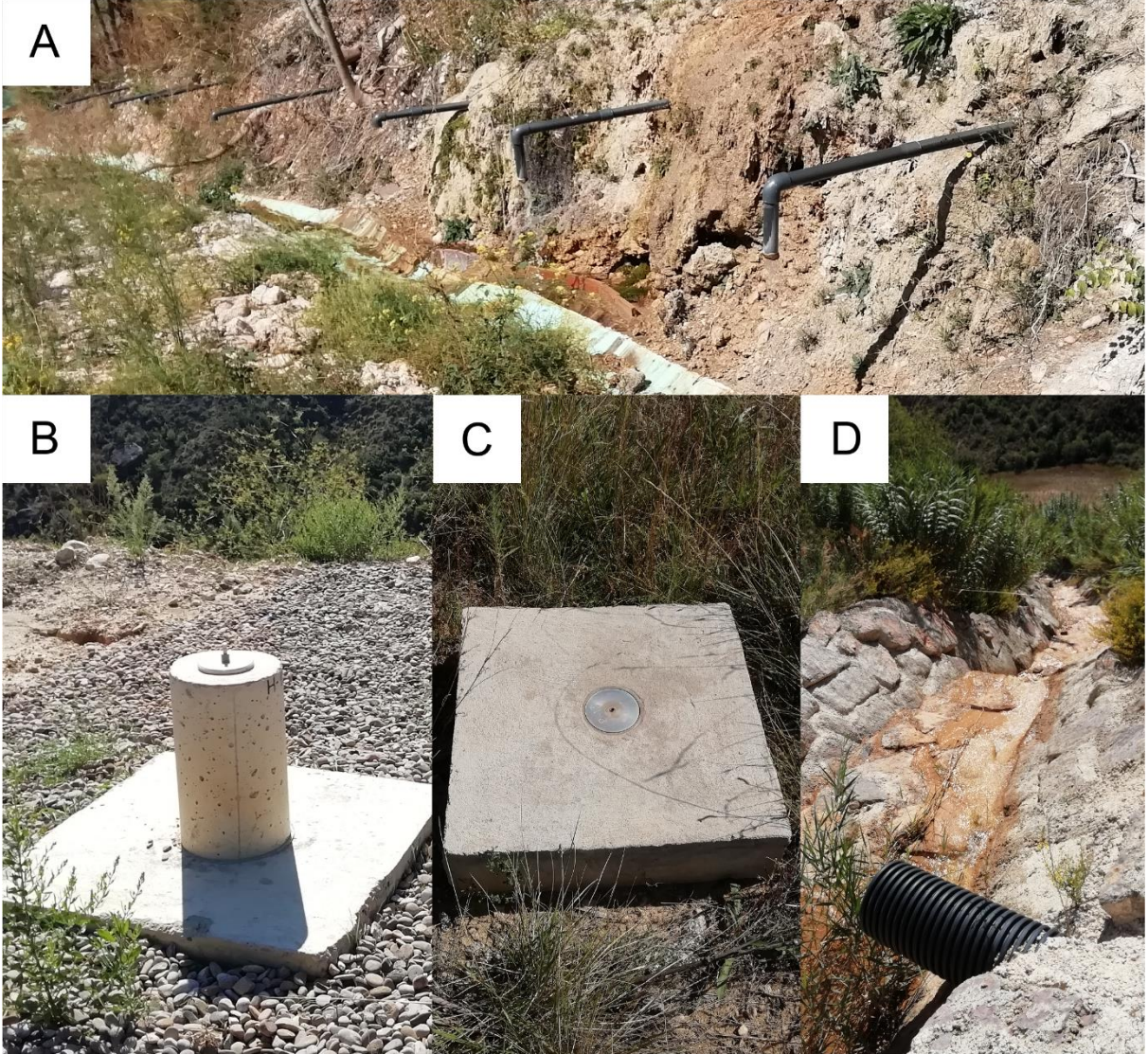


Figura 15. Medidas de control y auscultación del Deslizamiento I-13.

Las medidas correctivas y de control aplicadas (Fig. 15) y que se planean implantar en el deslizamiento I-13, antes de continuar el llenado del embalse, constituyen un ejemplo a seguir de cara a otros posibles movimientos de ladera que puedan tener lugar durante las siguientes fases de llenado. A pesar de ello, se debe detallar que algunas medidas más antiguas implantadas a lo largo del embalse, se encuentran inoperativas debido a una falta de vigilancia y cuidado.

7. Conclusion

The Montearagon reservoir has covered a large area which has been affected in many ways. Specifically, the superficial geological processes are now active and its geomorphology is in constant change; this means that it is necessary an extensive study and control of every process. The results in this essay characterize the hillsides, developed on the Sariñena formation which is formed by clays with intercalations of sandstones, and the processes that affect them.

The erosive activity carried out by the water (piping) is represented by holes throughout the area. Most of them have little dimensions, but the alternating lithology and its fast development makes of these, a bigger risk than it seems at first sight.

Also, thanks to the geomechanical analysis, we are able to conclude that fractures are not dangerous by themselves. They generate discontinuities which the water takes as his path and evolves in the toppling of blocks when the clay under the sandstones is eroded.

As the most important process, the landslides in the Montearagón reservoir have been subject of few research works during its construction. The hillsides are active with many visible landslides of short development. Meanwhile, the mass movements of large volume have their main scarp visible, in some case with crown fissures; they also present smaller inner landslides and blocks fall throughout the slope. Analyzing the digital models of these movements, we can affirm that they are mostly inactive, with a low probability of losing its stability in a short term; even after the filling of the reservoir, the hillsides should stay inactive.

Most of the active processes on the area involve geological risks which can evolve into major impact risks in short or long term. So, despite of the prior, the Montearagón reservoir needs to implement control measures and corrections to its surroundings before continuing with the filling.

8. Bibliografía

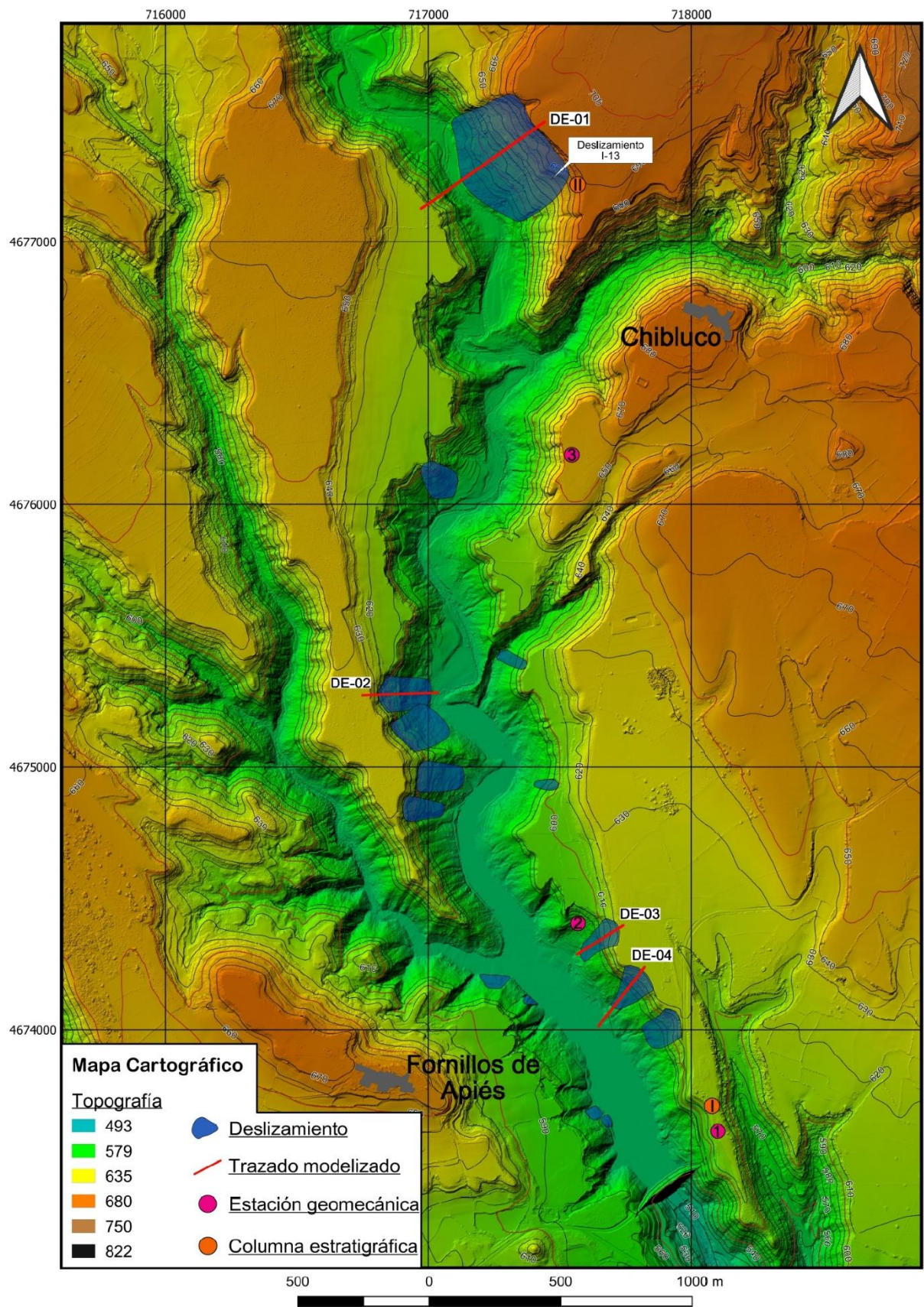
- Allmendinger, R. W., Cardozo, N., y Fisher, D. (2012): *Structural geology algorithms: Vectors and tensors in structural geology*. Cambridge University Press. 302pp.
- Barton, N. y Choubey, V. (1977): The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mechanics*, 10. 1-54pp.
- Boletín Oficial del Estado, BOE (1993): Resolución de 10 de diciembre de 1992 de la Dirección General de Política Ambiental, por la que se hace pública la declaración de impacto ambiental sobre el proyecto de presa de Montearagón en el río Flumen (Huesca), de la Dirección General de Obras Hidráulicas. Madrid. 4pp.
- British Standards Institution (1994): *Code for Practice for Earth retaining structures*. *British Standards, BS 8002:1994*. BSI, Londres. 144pp.
- Centro de estudios Hidrográficos, CEH (en línea): Estación 9320: río Flumen en Montearagón C.E. (Fecha de última consulta: 09/11/2021). Disponible en: <<https://ceh.cedex.es/anuarioaforos/afo/estaf-datos.asp?indroea=9320>>
- Chorley, R.J. (1978): Glossary of terms. En: *Hillslope Hydrology* (M.J. Kirkby, ed.). Wiley, New York. 365-376pp.
- Confederación Hidrográfica del Ebro, CHE (2007): 4. Flumen desde Cabecera hasta Barranco de Valdabra. En: *El Alcanadre en fotos*. 43pp.
- Confederación Hidrográfica del Ebro, CHE (2020): *Control y seguimiento de la auscultación de la presa y deslizamiento I-13 en la reanudación del segundo escalón de la puesta en carga de la Presa de Montearagón*. Pliego de Bases, Zaragoza. 95pp. Disponible en: <<https://contrataciondelestado.es/wps/wcm/connect/665d1d1d-fc07-4e82-adb7-5a0a3694baf5/DOC20200115150611PPT.pdf?MOD=AJPERES>>
- Cruden, D.M. y Varnes, D.J. (1996): Landslide types and processes. *Transportation Research Board - Special Report*, 247. 36-75pp.
- Hoek, E. y Bray, J. (2004): Principles of rock slope design. En: *Rock Slope Engineering: civil and mining, 4th Edition*. Institution of Mining and Metallurgy, Londres. 1-20pp.
- Instituto Geográfico Nacional, IGN (2012): *Actualización de mapas de peligrosidad sísmica de España. 1: 2.250.000*. IGN, Madrid. 1p.
- Markland, J. (1972): A useful technique for estimating the stability of rock slopes when the rigid wedge sliding type of failure is expected. *Imperial College Rock Mechanics Research Report*, 19. 10pp.
- Ministerio de Fomento (2002): *Norma de construcción sismoresistente. NCSE-02*. IGN, Madrid. 70pp.
- Novella, E. y Zueco, M. (2004): Presa de Montearagón. *Revista de Obras Públicas: Órgano profesional de los ingenieros de caminos, canales y puertos*, 3411. 167-190pp.
- Prajapati, S. y Maheshwari, B.K. (2016): Slope Stability Evaluation by Different Limit Equilibrium Methods. En: *IndoRock 2016*. 23pp.

Rocscience Inc. (2013): *Slide V. 6.0 - 2D slope stability analysis for soil and rock slopes*. Rocscience, Toronto, Ontario, Canada. Disponible en: <www.rocscience.com>

RStudio Team (2020): *RStudio: Integrated Development for R*. RStudio, PBC, Boston, MA. Disponible en: <<http://www.rstudio.com/>>

Samsó, J. M., Sanz, J., García, J. (1991): *Mapa Geológico de España. 1:50.000, hoja nº 248 (Apiés) y memoria*. IGME, Madrid. 77pp.

ANEXO I: Cartografía



ANEXO II: Mapa de pendientes

