

Los túneles de desvío de la presa de La Yesca (México)



Manuel Romana Ruiz

Catedrático emérito de Ingeniería del Terreno. Universidad Politécnica de Valencia

Resumen

El complejo hidroeléctrico de La Yesca está en México sobre el río Santiago. La presa es de escollera con pantalla de hormigón (tipo CFRD) con 208 m de altura. La central subterránea tiene 750 Mw. Al comenzar a excavar, en 2008, los dos túneles de desvío (en herradura, 14m x 14m cada uno) se produjo un gran corrimiento de ladera (del orden de dos millones de m³) con velocidad de deformación de 5 mm/día. Se describe el corrimiento y las medidas de corrección tomadas. La presa se terminó en 2012 y embalsó a altura máxima en otoño de 2013.

Palabras clave

Túneles, deslizamiento, presas CFRD, desvío, ignimbritas, riolitas

Abstract

The La Yesca hydroelectric plant is located on the Santiago River in Mexico. The concrete face rockfill dam (CFRD) is 208 m high. The 750 MW power station is underground. In 2008, when starting the excavation of the two river deviation tunnels (14mx14m. each one; horseshoe shape), there was a large landslide (around two million cubic meters) with a deformation velocity of 5 mm/day. The paper describes the landslide and the necessary correction measures taken to cope with it. The dam was completed in 2012; maximum reservoir height was reached by October 2013.

Keywords

Tunnels, landslide, CFRD dams, deviation, ignimbrite, rhyolite

1. Introducción

Casi al comienzo de la excavación de los túneles de desvío del río Santiago para la construcción de la presa de La Yesca en México se produjo un gran deslizamiento de ladera que puso en cuestión la viabilidad de todo el proyecto hidroeléctrico. Se describen las medidas necesarias para la corrección del deslizamiento sobre los túneles. Fue necesario introducir cambios en la posición de la presa para evitar que su plinto estribase sobre la parte movida de la ladera y medidas para controlar las presiones intersticiales bajo la cimentación, aguas arriba y aguas abajo del plano de estanqueidad de la presa, pero no se describen porque caen fuera del tema de este número monográfico de la ROP. El autor ha trabajado, desde al año 2008, (y aún trabaja actualmente) como asesor de construcción, y proyecto de detalle, de la presa y central, para la empresa constructora mexicana ICA, que ha construido toda la obra civil del complejo hidroeléctrico.

2. El complejo hidroeléctrico de la presa de La Yesca

La presa de La Yesca (oficialmente Proyecto Hidroeléctrico “Alfredo Elías Ayub”) está en México, en el río Grande de San-

tiago, que es el límite entre los estados de Jalisco y Nayarit y desemboca en Puerto Vallarta en el Océano Pacífico. El río Santiago dispone ya de un conjunto de presas para la generación hidroeléctrica (presas de Aguamilpa y El Cajón) construidas y operadas por el organismo estatal mexicano, Comisión Federal de Electricidad (CFE).

La presa de La Yesca es una presa de escollera con pantalla de hormigón (CFRD) de 208 m de altura (la segunda más alta del mundo), con una longitud en coronación de 628,7 m y un volumen de $12 \times 10^6 \text{ m}^3$. El embalse tiene una capacidad de $1.392 \times 10^6 \text{ m}^3$. Se construye para la generación de energía eléctrica en una central subterránea con dos turbinas tipo Francis de 375 MW cada una (producción de electricidad anual prevista: 1.210 GWh) suministradas y montadas por la empresa ucraniana Energoprojekt. Las dos tomas y la central subterránea están situadas en la margen derecha del río. El aliviadero tiene seis vanos, con compuertas radiales, para una avenida máxima prevista de 15.915 m³/s, y está situado en la margen izquierda. También en la margen izquierda están situados los dos túneles de desvío

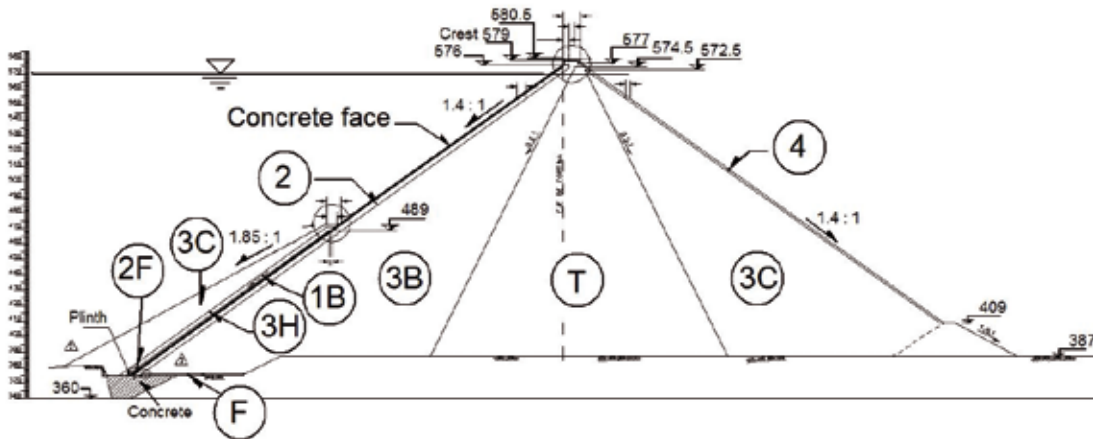


Fig. 1. Sección tipo (de altura máxima) de la presa de La Yesca (Aleman et al., 2011), con la nomenclatura habitual en las presas de pantalla de hormigón (CFRD Int. Soc., 2008)



Fig. 2. La presa de La Yesca en septiembre de 2013 (CNN)

y el desagüe de fondo. La figura 1 muestra la sección tipo de la presa.

El proyecto básico es de CFE (a través de su división GEIC) y ha sido dirigido por el ingeniero mexicano Humberto Marengo Mogollón, que dirigió también la construcción. Como asesores de CFE han trabajado el ingeniero suizo Giovanni Lombardi y varios ingenieros brasileños. El proyecto de detalle ha sido realizado en obra por ICA con la colaboración de la empresa colombiana Ingetec. El coste total de la obra supera los 1.100 millones de dólares.

La obra civil principal de la presa comenzó a primeros de 2008 y se terminó a primeros de 2013. Se empezó a producir electricidad a principios del verano de 2013 y el embalse se llenó

durante el año 2013, alcanzando la cota máxima de agua en diciembre de 2013. Algunos tratamientos del terreno están realizándose todavía en este año 2014 pero, en conjunto, se han cumplido los plazos programados. La figura 2 muestra la presa en septiembre de 2013.

3. El terreno

El terreno es volcánico, del periodo cenozoico, dentro de la llamada 'faja volcánica central mexicana', y está compuesto básicamente por una gran serie de coladas ignimbríticas y, en menor medida, dacíticas, riolíticas y riodacíticas. Hay intrusiones menores de basaltos y cantidades escasas de sedimentos fluviales entre algunas coladas y en el lecho del río. Aguas arriba de la presa aparece un pequeño dique-batolito de granito que cruza oblicuamente el valle y termina en el terreno situado entre

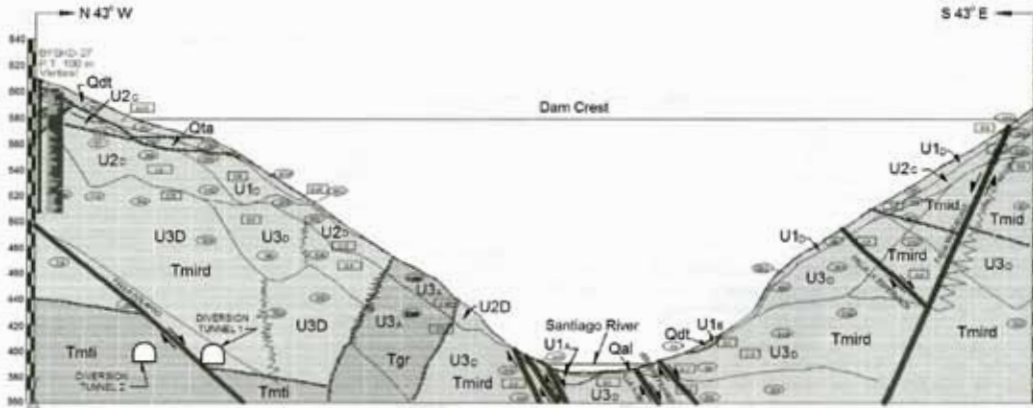


Fig. 3. Sección tipo geológica por el plinto de la presa (Alemán et al., 2011)

las embocaduras de los dos túneles de desvío. En el propio emplazamiento de la presa hay una gran caldera volcánica, que ha sido reexcavada por el río. Todo este conjunto, un poco caótico, está surcado por varias familias de fallas con diversos rumbos y buzamientos.

El material utilizado en la construcción de la presa es básicamente ignimbrítico y está ligeramente alterado, lo que ha favorecido su compactación (realizada por los sistemas habituales con adición de agua) por la creación de finos durante el proceso. Los asentamientos del cuerpo de presa han sido muy reducidos.

La cartografía geológica del emplazamiento es muy minuciosa y recoge con detalle todos los afloramientos en superficie, pero es de poca ayuda para prever las formaciones que se pudieran encontrar en profundidad, a pesar de que durante la fase de proyecto la CFE realizó numerosos sondeos, especialmente en la traza del plinto de la presa. La figura 3 reproduce la sección geológica por el plinto publicada por CFE en una comunicación donde aparecen también datos muy interesantes sobre los estudios y trabajos geotécnicos desarrollados por GEIC para el proyecto de la presa (Alemán et al., 2011).

Durante la construcción de la obra se detectaron algunos niveles artesianos en la parte baja de la margen izquierda, con agua a temperatura algo superior a la del ambiente. Actualmente, en 2014, la elevación de los niveles freáticos regionales ha hecho aflorar en las galerías de la margen izquierda caudales más importantes, y a temperaturas próximas a los 70°, de aguas de origen geotérmico no determinado.

4. Los túneles de desvío y el deslizamiento

Los dos túneles de desvío tienen una sección en herradura con dimensiones en la embocadura de 14 m x

14 m cada uno. El caudal máximo de los dos túneles es 5.738 m³/s, con una velocidad de 16,4 m/s. Las obras de desvío (ataguía y túneles) pueden evacuar una avenida de 7.578 m³/s. La figura 4 muestra el interior de uno de los túneles.

Los métodos constructivos de los túneles de desvío y de los túneles auxiliares de la caverna hidroeléctrica se insertan en la tradición americana: en México se ha utilizado poco el Nuevo Método Austriaco y sólo recientemente y para túneles de carretera, de menores dimensiones y con sección convencional. En <http://www.youtube.com/watch?v=jc8EzNIVGq4> puede descargarse un documental de diez minutos de duración sobre la construcción de los túneles en La Yesca.

La obra se inició a primeros de 2008. El emboquille de los túneles de desvío requirió una importante excavación en la ladera, muy empinada en esa zona. A primeros de junio, tres meses después de comenzar la excavación de los túneles, se produjo bruscamente un deslizamiento plano en la margen izquierda, siguiendo una falla rellena con milonito volcánico. No existían trazas de agua en la ladera: el nivel freático natural estaba a la cota del río, lo que fue confirmado mediante la instalación de una serie de piezómetros dentro del cuerpo del deslizamiento. Pero la situación cambiaría drásticamente tras la construcción de la presa con niveles freáticos regionales altos.

El volumen deslizado no se conoce con seguridad, a pesar de una amplia campaña de instrumentación en la ladera (tanto en superficie como en profundidad) y en el interior de los túneles, pero se estima que es del orden de 2 a 2,5 por millones de m³. Las figuras 5 y 6 presentan dos vistas diferentes de las trazas del deslizamiento en la ladera.



Fig. 4. Interior y boca de uno de los túneles



Fig. 5. Vista frontal de los túneles y esquema del deslizamiento



Fig. 6. Vista lateral de la ladera con el esquema del deslizamiento

La falla afloraba en el frente del túnel (figura 7) y en la ladera de forma que fue instrumentada con rapidez y facilidad. No había trazas de agua. Los desplazamientos iniciales fueron muy rápidos, con velocidades de hasta 4-5 mm (figura 8). Las tres gráficas corresponden a las tres componentes del movimiento. Se han realizado numerosos análisis geotécnicos del deslizamiento: en dos dimensiones con directrices circulares o simplificadas a dos grandes cuñas; en tres dimensiones con el método de Bishop extendido o con directrices complejas, y cálculo por

elementos finitos (figura 9). Las muestras del milonito de falla eran limosas, con plasticidad muy reducida. Los ensayos de corte realizados con las muestras secas en diversos laboratorios dieron ángulos de rozamiento entre 12° y 16°, valores que coincidían grosso modo con los resultados de los diversos análisis retrospectivos. Pero la falta de conocimiento exacto del desarrollo en profundidad de la superficie del deslizamiento resultó un fuerte *handicap* para una definición precisa del coeficiente de seguridad, de forma que el parámetro de control



Fig. 7. Afloramiento de la falla en el frente del túnel

adoptado fue la velocidad de deformación en el afloramiento de la superficie de deslizamiento.

El deslizamiento afectó seriamente a los dos túneles, produciéndoles roturas por torsión en el sostenimiento-revestimiento, que tuvo que ser fuertemente reforzado. No había muchas posibilidades de actuación en un deslizamiento “seco” de esta magnitud, que amenazaba seriamente la viabilidad de la obra, si se quería construir la presa en plazo. La corrección del deslizamiento se realizó descargando pesos en su parte superior mediante una serie de excavaciones sucesivas de la cabeza del deslizamiento, en la ladera sobre los túneles, con un volumen total de 700.000 m³ de roca sobre la traza de los túneles (obra comenzada en junio de 2008 y terminada en septiembre del año 2009) y aumentando la resistencia en

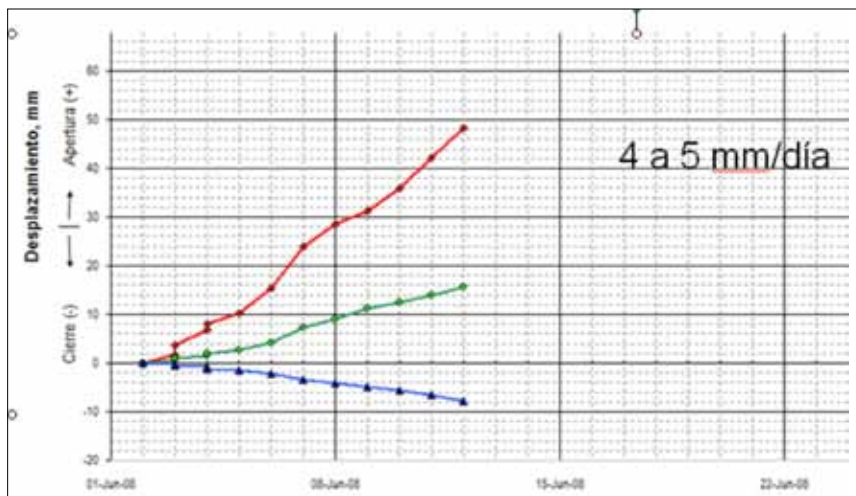


Fig. 8. Velocidad inicial de desplazamiento del deslizamiento.

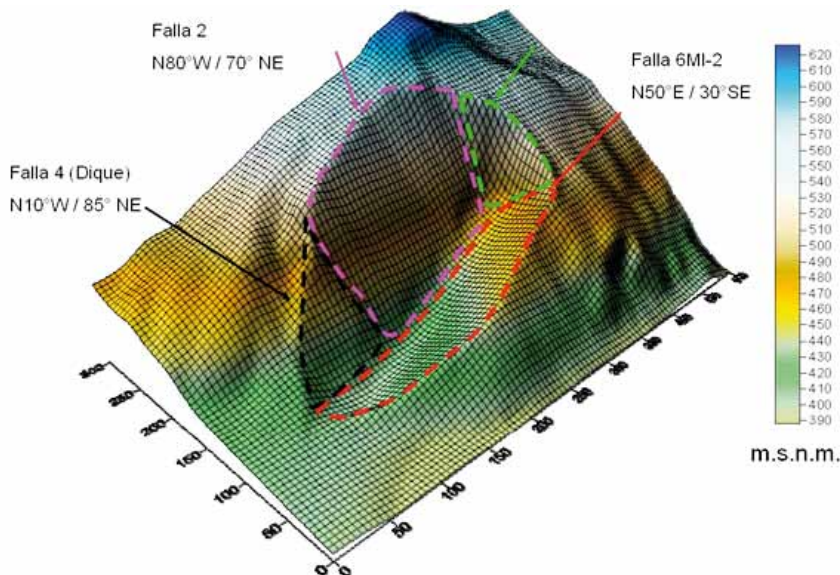


Fig. 9. Modelo del deslizamiento para el cálculo por elementos finitos

la base del deslizamiento mediante la construcción de dos falsos túneles que prolongaron la embocadura hacia aguas arriba (y de un monolito de hormigón sobre los falsos túneles). La figura 10 muestra el esquema de las excavaciones sucesivas. La figura 11 muestra el estado final de la ladera, con las excavaciones superiores y el monolito de hormigón en la base del deslizamiento.

La velocidad del deslizamiento disminuyó rápidamente mientras se realizaban las obras de corrección (figura 12). Puede verse que la medida más efectiva para ralentizar el movimiento fue la primera etapa de excavación (la velocidad disminuyó un orden de magnitud en un mes, de 12 cm/mes a valores del orden de 1 cm/mes), pero la estabilización requirió más excavaciones y la construcción del monolito de hormigón en su base. Este comportamiento es frecuente en deslizamientos de estas dimensiones donde el posible efecto estabilizador de los anclajes es muy reducido, lo que ha sido comprobado en muchos casos.

Los túneles se terminaron de excavar con un revestimiento ‘pesado’ de hormigón y cerchas metálicas. El desvío de río

por los túneles, vital para el cumplimiento de los plazos de obra, se realizó el 12 de abril de 2009, casi seis meses antes de la terminación de las obras de corrección del deslizamiento, pero cuando se habían alcanzado velocidades de deformación reducidas en la ladera. El desvío del río funcionó hasta finales del año 2012, cuando la capacidad de regulación de la presa en construcción fue suficiente para controlar las avenidas. Cuando se volvieron a examinar los túneles en seco se comprobó que no habían sufrido daños durante su etapa de servicio. Se construyeron ‘taponos’ de hormigón fuertemente armados para que sirvieran de ‘llaves’ en la zona en que atraviesan la superficie de deslizamiento. También se añadió una gran lumbrera vertical de hormigón con el mismo fin.

El deslizamiento puede considerarse estabilizado, a la vista del satisfactorio comportamiento (ampliamente instrumentado) de la presa y de la ladera durante el llenado de la presa. La abundante instrumentación no señala desplazamientos de importancia durante las primeras fases de embalse y desembalse parcial. Las filtraciones en las galerías de la margen izquierda son reducidas para lo que es habitual en este tipo de presas CFRD de gran altura. **ROP**

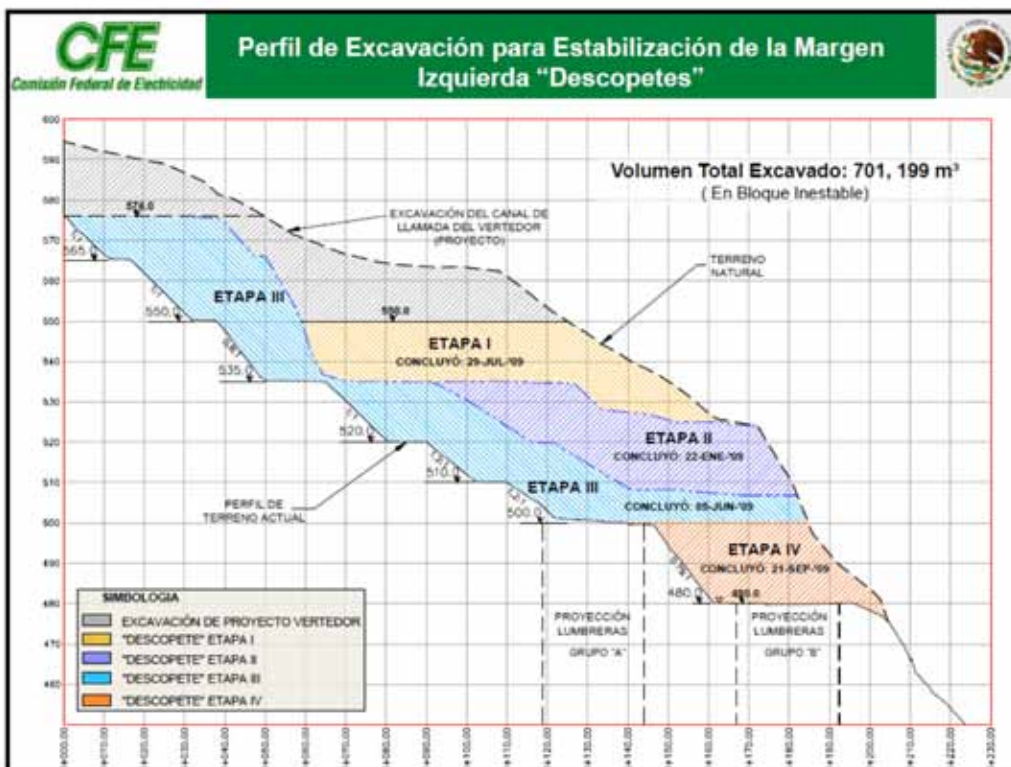


Fig. 10. Esquema de las excavaciones de descarga en la parte superior del deslizamiento ("descopetes" en la terminología mexicana), según CFE



Fig. 11. Vista de la ladera con las sucesivas excavaciones en su parte superior y el monolito de hormigón en la base del deslizamiento

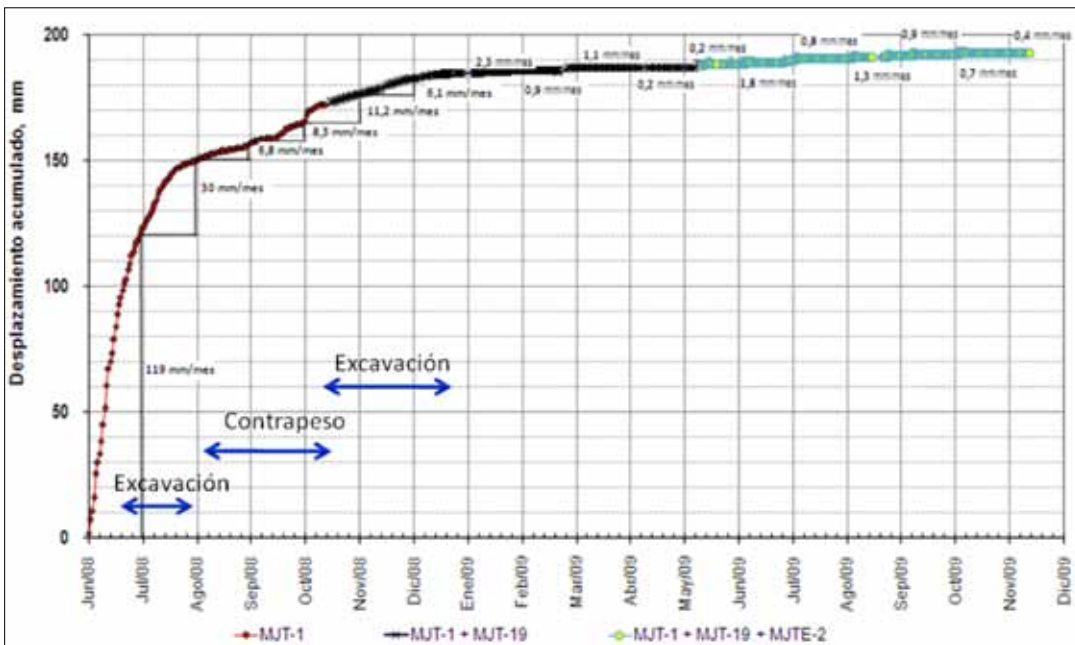


Fig. 12. Variación de la velocidad de deformación del corrimiento de junio de 2008 a diciembre de 2009

Referencias

- Alemán, J.D. , Pantoja, A. & Villegas S. (2011) "Geotechnical studies and design of La Yesca dam". Pan-Am CGS Geotechnical conference.
 - CFRD International Society (2008) "Guidelines for design high concrete face rockfill dams (Draft)" http://www.vncold.vn/Modules/CMS/Upload/13/Science/CFRDGuideEw_21_10_08/CFRDGuide_1.pdf.

- Marengo Mogollón, H. (2011) "Proyecto Hidroeléctrico La Yesca". Túneles en México. Aula Paymacotas. Departamento de Ingeniería y Cartografía del Terreno. Universidad Politécnica de Cataluña <https://www.etcg.upc.edu/docencia/aula-paymacotas/tunels-a-mexico/ponencias/marengo1.pdf>.
 - Romana Ruiz, M. (2008 a 2014) "Informes sobre la construcción del Proyecto hidroeléctrico La Yesca". No publicados.