



Universidad
Zaragoza

Análisis geomorfológico de la ladera derecha de la Presa de Yesa (Río Aragón, Pirineos)

Francisco Gutiérrez



Junio, 2013

Contenido

1. <i>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</i>	2
2. <i>CONTEXTO GEOLÓGICO Y GEOMORFOLÓGICO</i>	5
3. <i>EL DESLIZAMIENTO ANTIGUO</i>	8
4. <i>EL DESLIZAMIENTO DE 2012-13</i>	18
5. <i>CONCLUSIONES</i>	23
6. <i>BIBLIOGRAFÍA</i>	24

ANEXO

Cartografía geomorfológica

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El presente trabajo ha sido elaborado a petición de la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) con la asistencia del geólogo Oscar Laborda, de la Asistencia Técnica. La presa del Embalse de Yesa, en explotación desde el año 1959, se ubica en un estrechamiento del valle del Río Aragón formado principalmente por facies flysch, más resistentes a la erosión que las margas impermeables que ocupan gran parte del vaso del embalse. La presa de gravedad actualmente existente es de hormigón, posee 78 m de altura sobre cimientos, una longitud en coronación de 398 m, y embalsa a su nivel máximo normal (cota 488,61 m) un volumen de 447 hm³. Con la finalidad de aumentar la capacidad del embalse se ha proyectado la construcción de una presa de materiales sueltos con pantalla de hormigón apoyada en el paramento escalonado de aguas abajo de la presa actual. Esta estructura alcanzará la cota 520 m en coronación (Fig. 1).

Para la construcción de la presa recrecida se ha excavado un volumen importante de material en la parte inferior de la ladera derecha, aguas abajo de la presa actual (ver imagen de la portada y Fig. 1). Dicha excavación se llevó a cabo en dos fases; entre octubre de 2003 y la primavera de 2005, y entre enero de 2011 y julio de 2012. La ladera, afectada por una pérdida de confinamiento lateral sustantiva durante un periodo de aproximadamente una década, ha manifestado movimiento desde finales del año 2012. Dicha actividad ha alcanzado picos de hasta unos 4 cm/semana correlacionables, con un cierto desfase temporal, con periodos de abundante precipitación; 301,3 l/m² entre el 11 y el 27 de octubre de 2012, y 321,5 l/m² entre el 13 de enero y el 10 de febrero de 2013. Los límites laterales del sector de la ladera afectado por el deslizamiento se han manifestado mediante grietas y roturas en estructuras humanas situadas aguas abajo y aguas arriba de la presa actual, alcanzando una anchura de unos 450 m (ver mapa). En el límite este se ha producido el agrietamiento de la carretera ZN-240 (Fig. 2). El límite oeste atraviesa la urbanización Lasaitasuna por la zona central, habiendo provocado daños conspicuos tanto en pavimentos como edificios (Fig. 3). El 8 de febrero de 2013, el Ayuntamiento de Yesa, previo informe de la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE), procedió al desalojo preventivo de las viviendas ubicadas dentro de la zona afectada por el movimiento de ladera de las urbanizaciones Mirador de Yesa y Lasaitasuna. En esa misma fecha comenzó la ejecución de un plan de corrección que incluye el descabezamiento de la parte superior de la ladera (se prevé excavar un volumen de aproximadamente 1 millón de m³), así como la acumulación de un tacón de tierra y la colocación de anclajes justo por encima de la coronación de la presa actual (ver imagen de la portada).

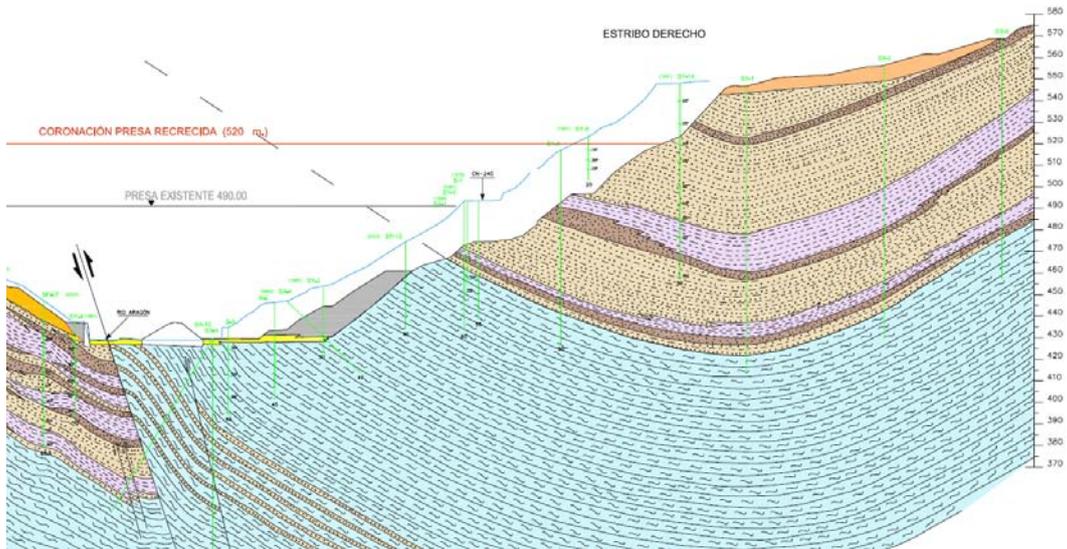


Figura 1. Corte geológico del sector norte de la cerrada reflejando la distribución y disposición de las Margas de Pamplona (azul claro) y el Flysch de Yesa (marrón y morado) en el eje de la presa proyectada. El trazo azul refleja el perfil de la ladera previamente a la excavación llevada a cabo en el estribo derecho. Éste corresponde al flanco sur de un sinclinal en el que las capas buzcan hacia el interior de la ladera.



Figura 2. Grieta con movimiento sinistro afectando a la carretera ZN-240 en el límite este del deslizamiento de 2012-13. En este sector, el movimiento afecta a sedimentos eocenos sin evidencias de haber sido afectados por deslizamientos previos. Nótese la continuidad de los estratos de arenisca y margas. El plano de rotura parece adaptarse al contacto entre el flysch y las margas infrayacentes. Imagen tomada el 8 de marzo de 2013. Punto 25 del mapa.

Atendiendo a las indicaciones del solicitante, el objetivo del presente informe es analizar desde una perspectiva geomorfológica, la ladera afectada por el movimiento, con la finalidad de dilucidar si existen deslizamientos antiguos pre-existentes en la misma. Para el desarrollo del trabajo se ha contado con el informe (nivel borrador) "Primer avance de las posibles causas que motivan el deslizamiento de la cerrada de la presa de Yesa (Navarra)", elaborado por el

Área de Seguridad de Infraestructuras y Geotecnología de la CHE, así como diversa documentación gráfica suministrada por la empresa TYPESA. La zona de estudio se ha examinado durante cuatro jornadas de campo; 13 de diciembre de 2012 y 16 de febrero, 8 de marzo y 22 de marzo de 2013. Durante las tres últimas jornadas se estaban llevando a cabo las labores de excavación en la parte superior de la ladera (descabezamiento), lo que permitió la observación de un buen número de afloramientos. Por otra parte, se han analizado las siguientes fotografías aéreas y modelos digitales del terreno:

- Fotografías aéreas en blanco y negro, tomadas en 1956 (vuelo americano) con anterioridad a la puesta en carga del embalse y positivadas a una escala aproximada 1:30.000.
- Fotografías aéreas en color de 1999 y positivadas a una escala aproximada 1:3.600. Estas imágenes, suministradas por la Asistencia técnica, tan solo cubren la parte inferior de la ladera.
- Fotografías aéreas en color de 2007, con una escala aproximada 1:3.000, suministradas por la Asistencia técnica. Estas imágenes con visión estereoscópica permiten llevar a cabo un análisis fotogeomorfológico detallado de la totalidad de la ladera.
- Modelo digital de elevaciones LIDAR con una resolución espacial de 5 m, descargado del portal web del Instituto Geográfico Nacional. Estos datos, al igual que las imágenes indicadas previamente, permiten identificar diversas anomalías geomorfológicas relacionadas con un deslizamiento pre-existente en la parte superior de la ladera.

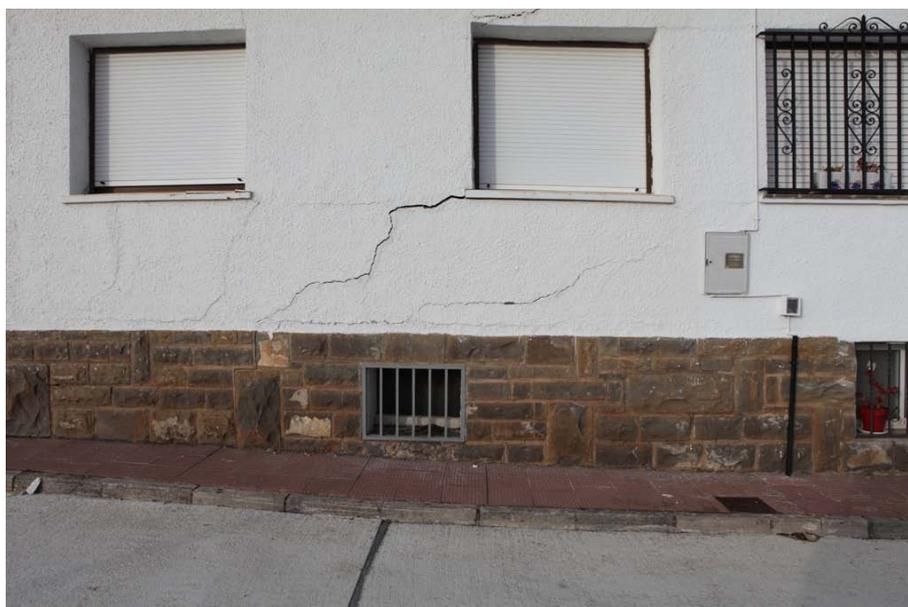


Figura 3. Grietas en el límite oeste del deslizamiento activo afectando a una vivienda en la urbanización Lasaitasuna. Imagen tomada el 8 de marzo de 2013. Punto 29 del mapa.

2. CONTEXTO GEOLÓGICO Y GEOMORFOLÓGICO

El Embalse de Yesa se encuentra situado en el Pirineo central, formando parte de las provincias de Zaragoza y Navarra. Para la construcción del embalse se aprovechó una depresión erosiva con orientación E-O (Canal de Berdún) excavada por el Río Aragón en formaciones eocenas de la Cuenca de Jaca. El substrato de gran parte del vaso está formado por margas, mientras que en el estrechamiento del valle en el que se encuentra la presa afloran tanto margas como facies flysch, estas últimas más resistentes a la erosión (Lafuente et al., 2007; Gutiérrez et al., 2010).

El presente trabajo se centra en la ladera derecha de la cerrada de la presa. El substrato aflorante en este sector está constituido, de muro a techo, por la siguientes unidades litoestratigráficas (Figs. 1, 2 y 4): (1) Margas de Pamplona (Eoceno medio-superior), formadas por una serie potente de margas de color gris azulado con intercalaciones de areniscas (de Rojas y Latorre, 1972; Puigdefábregas, 1975). (2) Flysch de Yesa (Eoceno superior), constituido por una alternancia de niveles de arenisca y marga con un espesor de más de 120 m (de Rojas y Latorre, 1972; Puigdefábregas, 1975; Lafuente et al., 2007). El contacto entre las dos unidades estratigráficas es concordante y gradual, produciéndose un aumento en la proporción de capas de arenisca a techo de la unidad de margas.

Desde el punto de vista estructural, la zona de estudio se encuentra situada en el bloque inferior del Cabalgamiento de Leyre. Esta estructura de dirección E-O y vergencia sur, superpone diversas formaciones marinas y continentales de edades comprendidas entre el Cretácico superior y el Eoceno inferior sobre las Margas de Pamplona, formando la Sierra de Leyre al norte del embalse (de Rojas y Latorre, 1972). En la zona de la presa, la serie paleógena del bloque inferior del Cabalgamiento de Leyre está afectada por un haz de pliegues de dirección preferente ONO-ESE desplazados por la Falla de Yesa (Figs. 1 y 4). Esta estructura corresponde a una falla inversa de rumbo E-O y buzamiento norte cuya traza discurre por el fondo del valle del Aragón. En la zona de la presa, la Falla de Yesa posee un salto estratigráfico de unos 150-200 m y yuxtapone las Margas Pamplona, al norte, con el Flysch de Yesa, al sur (Fig. 1).

En la ladera afectada por el deslizamiento la serie eocena presenta un anticlinal y un sinclinal con orientación preferente ONO-ESE e inmersión oeste. La charnela y el flanco sur del anticlinal corresponden a la parte superior de la ladera, aproximadamente al norte de la carretera ZN-240. En la zona de divisoria (Marmayor), el flysch presenta un disposición subhorizontal, aumentando rápidamente su buzamiento hacia el valle (ver mapa). En el grueso de la porción de la ladera situada por encima de la ZN-240, las capas presentan

un buzamiento de 20-30°S concordante con la topografía (*dip slope*). Los afloramientos existentes en la zona de Las Foyazas y en los desmontes de la ZN-240 permiten observar, tanto el contacto transicional entre las margas y el flysch in situ, como la estructura anticlinal (ver mapa y Fig. 2). El eje del sinclinal se encuentra en el rellano estructural por el que discurre la carretera ZN-240, por debajo de las urbanizaciones Lasaitasuna y Mirador de Yesa, aunque resulta difícil precisar su traza por la escasez de afloramientos (Figs. 1 y 4). En la porción de la ladera situada por debajo de la ZN-240, incluyendo la zona donde se ha realizado la excavación del estribo derecho de la nueva presa, el sustrato presenta direcciones y buzamientos variables hacia el interior del talud (Fig. 5). El contacto entre las margas y el flysch se encuentra situado ligeramente por debajo de la coronación de la presa actual (Fig. 1).

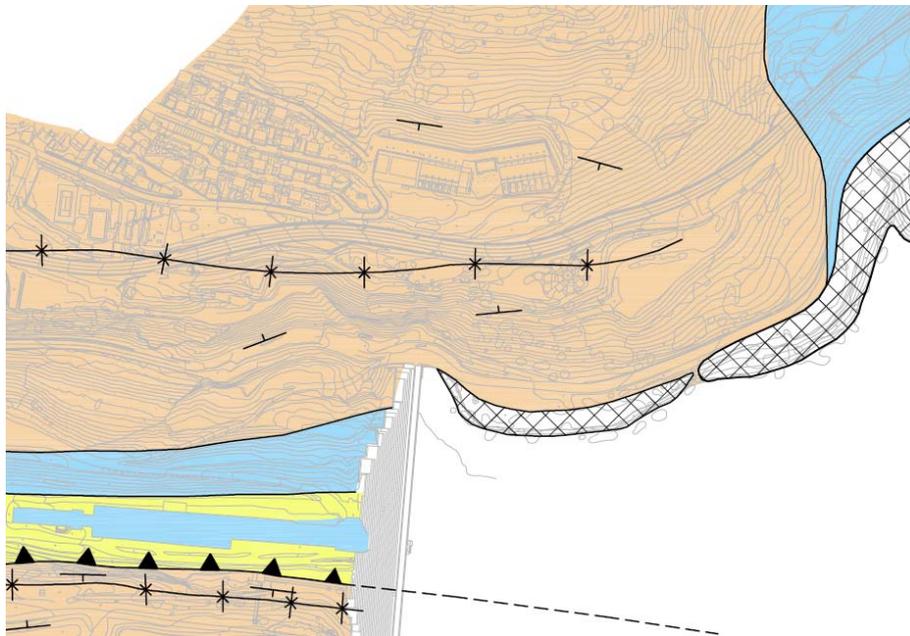


Figura 4. Esquema geológico del sector norte de la cerrada de la presa. La falla inversa situada en el fondo del valle del Aragón corresponde a la Falla de Yesa. Los colores azul y naranja representan las Margas de Pamplona y el Flysch de Yesa, respectivamente. En la parte superior de la ladera las capas buzaman hacia el valle, mientras que en la inferior el buzamiento de los estratos es hacia el interior. Figura suministrada por la Asistencia técnica.

En la ladera, con un desnivel de unos 300 m y una pendiente media de aproximadamente 22°, se pueden diferenciar dos sectores desde el punto de vista morfoestructural (ver mapa). En la parte inferior, situada por debajo de la carretera ZN-240, las margas y el flysch buzaman hacia el interior del talud (flanco sur del sinclinal). En este sector, incluyendo la excavación del estribo de la nueva presa, los estratos muestran una clara continuidad lateral y no presentan evidencias de estar afectados por deslizamientos previos al movimiento actual (Fig. 5). En la porción situada por encima de la carretera ZN-240, el sustrato eoceno presenta un buzamiento general hacia el valle (flanco norte del sinclinal). Sin embargo, tal y como se detalla en el siguiente apartado, en un

amplio sector, la ladera está afectada por un deslizamiento antiguo. Este movimiento de ladera pre-existente se manifiesta mediante y diversas anomalías geomorfológicas que no guardan coherencia con la estructura del sustrato, y la presencia de espesores importantes de flysch brechificado o afectado por fracturas dilatadas y rellenas de arcilla.



Figura 5. Zona de excavación del estribo derecho de la nueva presa, en la que afloran margas y flysch buzando hacia el interior de la ladera. Imagen tomada en agosto de 2007.

3. EL DESLIZAMIENTO ANTIGUO

Las fotografías aéreas tomadas en diferentes fechas (1956, 1999, 2007) y el modelo digital de elevaciones LIDAR del IGN, muestran como un amplio sector de la ladera por encima de la ZN-240, presenta un perfil longitudinal escalonado, formado por una sucesión de rellanos y zonas con mayor pendiente. Destaca en rellano superior, con una superficie de aproximadamente 9000 m² (Figs. 6 y 7 y mapa). Esta topografía, anómala para una ladera en la que el sustrato presenta un buzamiento general hacia el valle (*dip slope*), contrasta con el perfil longitudinal uniforme y acorde con la estructura que presentan las laderas situadas al oeste del Barranco de Valmayor (Fig. 7). La cartografía de las distintas anomalías geomorfológicas (escarpes de cabecera y laterales, rellanos, surcos longitudinales, geometrías convexas) a partir de fotografías aéreas y el modelo LIDAR, permite acotar de forma aproximada los límites del deslizamiento antiguo y diferenciar cuerpos dentro del mismo, salvo en la zona ocupada por la urbanizaciones Lasaitasuna y Mirador de Yesa, donde la topografía original ha sido modificada por la excavación de terrazas para la construcción.



Figura 6. Vista aérea de la ladera en la que se reconoce el amplio rellano correspondiente a la parte superior del deslizamiento antiguo (flecha roja).

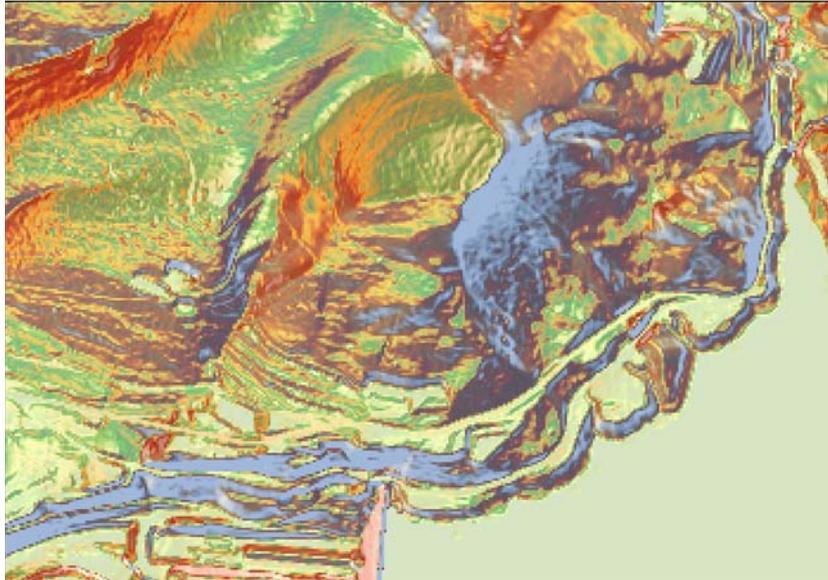


Figura 7. Mapa de pendientes sobre modelo sombreado del relieve generado a partir de datos LIDAR del Instituto Geográfico Nacional. La sucesión de rellanos en la porción de la ladera deslizada situada por encima de las urbanizaciones Lasaitasuna y Mirador de Yesa, contrasta con el perfil longitudinal uniforme de la ladera situada al oeste, donde el sustrato también presenta un buzamiento general hacia el valle.

A continuación se describen los distintos sectores del deslizamiento antiguo, así como las características de los materiales observados en excavaciones artificiales.

El sector noroeste del deslizamiento está definido por un escarpe E-O y N-S que corresponde a la cicatriz superior y occidental del deslizamiento (ver mapa). Por encima del escarpe de cabecera se ha medido un buzamiento en el flysch in situ de unos 6° hacia el sur. El escarpe lateral orientado hacia el este pierde altura progresivamente ladera abajo, desapareciendo unos metros por debajo de la torre de alta tensión situada en el punto 1 (ver mapa). Este sector debe corresponder al paso entre la zona de deflación y acumulación del deslizamiento (Cruden y Varnes, 1996). Al este del escarpe lateral se identifica un cuerpo longitudinal de unos 60-70 m de ancho y con perfil transversal convexo, cuyo límite oriental viene definido por un surco orientado en la dirección de la pendiente (ver mapa). En la parte superior de este cuerpo, al pie del escarpe de cabecera, se reconoce un rellano. En los puntos de observación 2 y 3, el flysch expuesto en las excavaciones se ha transformado en una brecha caótica. En un corte perpendicular al surco longitudinal (punto 4, Fig. 8), se reconoce una depresión canaliforme parcialmente rellena por unos 3 m de facies coluviales con una matriz limosa morrón anaranjada. Al oeste de este surco el flysch forma una masa brechoide caótica (Fig. 8), mientras que al este, donde los estratos de arenisca alcanzan un espesor considerable, el sustrato muestra un buzamiento general hacia el pie de la ladera, aunque presenta juntas de hasta varios decímetros rellenas de margas con clastos de arenisca (Fig. 9). En el

punto 5, situado en el surco longitudinal en una posición más baja, se observan relaciones geométricas similares, con un flysch brechoide al oeste del surco relleno de facies coluviales, y estratos potentes de arenisca fracturados y dilatados al este, en los que se reconoce un buzamiento hacia el sur. En el punto 1, al oeste del escarpe lateral, aflora el flysch in situ con un buzamiento de 36°S . Por el contrario, al este del escarpe el flysch se ha transformado en bloques fracturados y desplazados. En pequeños afloramientos situados por encima de la urbanización Lasaitasuna (puntos 6 y 7), se reconocen estratos de arenisca con espesor decimétrico y buzamiento $31\text{-}35^{\circ}\text{S}$. En esta zona, en la que la ladera también presenta un perfil transversal convexo (Fig. 7), el flysch ha debido deslizar traslacionalmente en bloque experimentado una deformación interna limitada.



Figura 8. Punto de observación 4. Surco longitudinal parcialmente relleno de facies coluviales con matriz marrón anaranjada. Al oeste el flysch se encuentra brechificado, mientras que al este (ver figura 9) presenta un buzamiento general hacia el valle y fracturas dilatadas rellenas de margas y cantos de arenisca.



Figura 9. Afloramiento al este del punto 4. Estratos de arenisca potentes buzando hacia el valle con fracturas dilatadas rellenas de margas y clastos de arenisca.



Figura 10. Punto de observación 5. Surco relleno de facies coluviales con flysch brechificado al oeste (izquierda) y estratos de arenisca con buzamiento sur afectados por fracturas dilatadas (derecha).

El sector central y oriental de la parte superior del deslizamiento se manifiesta morfológicamente como un extenso rellano de unos 9000 m² de superficie que aprovechaba una de las pistas que ascendía a Marmayor (Figs. 6, 7 y mapa). Inmediatamente por encima de este rellano se reconoce un escarpe. Al N y NE del rellano, fuera del deslizamiento, se han medido buzamientos en estratos de arenisca de 21, 3 y 18°S. En los cortes de las excavaciones realizadas en los puntos 8, 9 y 10, dentro de la zona del rellano, se han identificado dos unidades. La superior, de apenas 1 m espesor, corresponde a un coluvión formado fundamentalmente por cantos planares de arenisca con una inclinación preferente hacia el valle y con matriz limo-arenosa marrón. La inferior es un depósito de deslizamiento formado por clastos de arenisca empastados en una matriz de margas grises (*floatbreccia*). En esta unidad, las partículas planares de arenisca, tamaño grava y bloque, presentan una inclinación preferente hacia el interior de la ladera (Fig. 11). Esta evidencia, junto con el extenso rellano que presenta el deslizamiento en la parte superior, sugiere que el movimiento antiguo ha tenido una componente de desplazamiento rotacional en la zona de cabecera. El 16 de febrero de 2013, junto al punto 10, se excavó una trinchera de reconocimiento N-S de unos 20 m de longitud y 6 m de profundidad. El objetivo de la misma era intentar identificar el plano basal de deslizamiento o en su caso, obtener una estimación mínima del espesor del material deslizado en dicho punto (Fig. 12). La trinchera expuso 6 m de depósito de deslizamiento brechoide formado por cantos de arenisca y matriz margosa, sin alcanzar el contacto con el sustrato in situ. Más al sur, en un amplio corte E-O de unos 5 m de desnivel excavado bajo en rellano (punto 11 y entorno), se reconoció una secuencia estratigráfica similar a la de los puntos anteriores (Figs. 13 y 14). La

unidad coluvial, con unos 2 m de espesor, estaba formada por clastos de arenisca planares de tamaño grava con matriz limo-arenosa y disposición subparalela a la superficie topográfica. La inferior corresponde a una brecha meteorizada de color marrón claro formada por margas y clastos tamaño grava y bloque de arenisca. En este afloramiento, los clastos presentaban una disposición aparentemente caótica. Una fábrica orientada hacia el interior de la ladera no sería observable en este corte de dirección E-O.



Figura 11. Punto de observación 8, en el que se diferencian dos unidades. La superior corresponde a un coluvión y la inferior a un depósito de deslizamiento (flysch brechificado; *floatbreccia*). En la primera los clastos buzcan hacia el valle, mientras que en la segunda la fábrica de los clastos muestra una orientación preferente hacia el interior de la ladera.



Figura 12. Trinchera de reconocimiento excavada junto al punto 10 en la que se expuso un depósito de deslizamiento de al menos 6 m de espesor formado por una brecha de flysch. En el

“mogote” situado por encima de la zanja aflora un depósito coluvial con un suelo marrón oscuro depositado en la zona del rellano.



Figura 12. Excavación realizada bajo el rellano superior en torno al punto 11, en la que se diferencia un flysch brechificado por deslizamiento con fábrica aparentemente caótica y una unidad coluvial superior en la que los clastos presentan una disposición subparalela a la superficie topográfica.



Figura 13. Punto de observación 11. A la izquierda, detalle de la unidad coluvial superior. Las flechas indican la posición aproximada de la base. A la derecha, detalle de la brecha de flysch correspondiente al depósito de deslizamiento.

En el extremo NE del deslizamiento (punto 12), se han identificado capas de arenisca buzando 26° hacia el interior de la ladera, lo que debe corresponder a un bloque desplazado rotacionalmente. En el punto 13, coincidiendo con una vaguada longitudinal interpretada como el límite este del deslizamiento, se han reconocido los siguientes rasgos (Fig. 14): (1) Al oeste de la vaguada aflora un depósito de deslizamiento formado por un flysch brechificado. (2) Bajo la vaguada aparece un relleno canaliforme de facies coluviales-aluviales, y bajo éste, un rezume de agua. (3) Al este de la vaguada, el sustrato, si bien escasamente expuesto, parece encontrarse in situ. Más abajo, y también coincidiendo con el surco longitudinal interpretado como el límite oriental del deslizamiento (punto 14), se observan relaciones estratigráficas similares con mayor claridad (Fig. 15). Bajo la vaguada se reconoce un relleno coluvial-alluvial canaliforme de unos 2-3 m de espesor coronado por un suelo marrón oscuro. Dicho relleno fosiliza

un paleosuelo pardo desarrollado sobre un surco pre-existente generado por la deformación de la ladera debido al deslizamiento. Bajo el flanco oeste del canal aflora un flysch deslizado (brecha), mientras que al este del mismo el flysch se encuentra in situ, con un buzamiento de 10°S.



Figura 14. Vaguada longitudinal atribuida a límite este del deslizamiento. Al oeste de la misma (izquierda), flysch brechificado.



Figura 15. Vaguada correspondiente al límite este del deslizamiento en el punto 14. Se reconoce un relleno canaliforme sobre un paleosuelo desarrollado sobre una paleotopografía en surco (flechas rojas). Al oeste del surco el flysch está brechificado (abajo a la izquierda), mientras que al este se encuentra in situ (abajo a la derecha).

Por debajo del rellano superior se reconocen varios rellanos de menor entidad situados aproximadamente a la misma cota. El más occidental se encuentra interrumpido por una excavación longitudinal (punto 20) realizada en la primera mitad del siglo XX para el transporte de caliza desde una cantera situada en la Sierra de Leyre hasta la presa. La presencia de rellanos a distintas alturas refuerza la idea de que el deslizamiento antiguo es un movimiento formado por varios cuerpos separados por planos de rotura secundarios. En los puntos de observación 15, 16 y 17, situados ligeramente por encima del nivel de rellanos inferior, el material aflorante en las excavaciones corresponde a una flysch brechificado y caótico. Al oeste y por debajo del punto 17 (puntos 18, 19, 20, 21 y 22), el material aflorante corresponde a un flysch con una elevada proporción de capas de arenisca de elevado espesor con buzamientos de 31 a 42°S. Diversas evidencias indican que el flysch en este sector ha deslizado traslacionalmente en bloque (*block slide*) sin apenas experimentar deformación interna (*raft*), circunstancia frecuente en los deslizamientos planares con un desplazamiento limitado: (1) La presencia de rellanos indica que la ladera ha experimentado deformación gravitacional. En ausencia de un deslizamiento, cabría esperar un perfil longitudinal continuo concordante con el buzamiento de las capas hacia el valle. (2) En los puntos 19, 21 y 22 las capas de arenisca presentan numerosas fracturas dilatadas, con aberturas localmente de orden decimétrico, y rellenas de material arcilloso (Figs. 16 y 17). (3) En la excavación perpendicular a la dirección de las capas correspondiente al punto 20 y situada bajo un rellano, aflora una alternancia de areniscas y margas con un buzamiento general de unos 42 grados hacia el valle, cubierta por un coluvión relativamente bien seleccionado y estratificado. En este punto el flysch está afectado por un pequeño pliegue de despegue (Fig. 18). Al sur del pliegue, las capas de arenisca están fragmentadas en bloques que presentan desplazamientos relativos considerables, lo que sugiere una deformación gravitacional a escasa profundidad. Al norte del pliegue, se reconoce una zona en la que el sustrato se encuentra brechificado. Por otra parte, la sinforma asociada al pliegue de despegue afecta tanto a flysch como al coluvión suprayacentes, tal y como indica la orientación de los clastos. Estas relaciones geométricas indican que el pliegue de despegue se ha formado tras la acumulación del coluvión, correspondiendo a una deformación gravitacional de edad presumiblemente de holocena.



Figura 16. Punto de observación 19, en el que las capas de arenisca, aunque localmente muestran continuidad, se encuentran afectadas por juntas rellenas de material arcilloso, o muy fracturadas.



Figura 17. Capas de arenisca buzando hacia el sur con fracturas dilatadas y rellenas de material arcilloso (punto 22).



Figura 18. Afloramiento de flysch afectado por un pliegue de despegue relacionado con la actividad del deslizamiento en el punto 20. La sinforma asociada al pliegue de despegue afecta tanto al flysch eoceno como al depósito coluvial suprayacente, lo que indica que se trata de una deformación gravitacional reciente (imagen superior). Las capas de arenisca al sur del pliegue se encuentran fracturada en bloques desplazados entre sí (imagen inferior izquierda). Los estratos situados por debajo del pliegue están afectados por fracturas dilatadas e incluso brechificados (imagen inferior derecha).

En el sector este del desmonte de la urbanización Mirador de Yesa, bajo un rellano, el flysch presenta un grado de fracturación y meteorización visiblemente mayor que en el resto de la excavación. Esta zona debe corresponder a una porción del deslizamiento anexa al límite oriental en la que el grado de deformación ha sido sustancialmente mayor. El este, en el punto 23, y por debajo de éste en el corte de la carretera ZN-240, los estratos de flysch y las margas infrayacentes presentan una estructura continua, lo que indica que no están afectados por el deslizamiento antiguo.

En lo que respecta al límite inferior del deslizamiento antiguo, éste no ha podido ser cartografiado debido a la alteración que ha experimentado la topografía en las urbanizaciones Lasaitasuna y Mirador de Yesa, y a la falta de afloramientos. En cualquier caso, parece razonable que la distribución del deslizamiento se ajuste al sector en el que el sustrato buza hacia el valle. Según esta hipótesis, el límite inferior podría coincidir con la zona de charnela del sinclinal, donde las capas pierden buzamiento.

4. EL DESLIZAMIENTO DE 2012-13

En este apartado se describen las deformaciones superficiales relacionadas con el movimiento de 2012-13 y se analiza su relación espacial con el deslizamiento antiguo.

El 8 de marzo de 2013, por encima del límite superior del deslizamiento antiguo, a unos 40-50 m al norte (punto 24), se descubrió un sistema de grietas frescas con traza irregular y una apertura de hasta 5-10 cm (Fig. 19). Estas fisuras, que deben corresponder al límite superior del deslizamiento activo, se han desarrollado en un sector de la ladera con una pendiente elevada en la que el sustrato, originalmente in situ, está cubierto con un coluvión muy raquíutico. Es probable que existan grietas de tracción importantes en zonas más bajas, pero que no han llegado a romper la superficie por la presencia de coluviones de mayor espesor que acomodan mediante deformación continua la extensión del terreno.



Figura 19. Grieta de tracción situada por encima del deslizamiento antiguo (punto 24) descubierta el 8 de marzo de 2013.

El límite oriental del deslizamiento se ha manifestado, al este del deslizamiento antiguo, mediante grietas y escarpes que afectan a la carretera ZN-240 y a pistas situadas por debajo de la misma (Figs. 2, 20 y 21). Estas roturas indican un movimiento sinistro y localmente el hundimiento del bloque oeste. El sistema de grietas en relevo que afecta a la carretera ZN-240 presenta una dirección N135E (punto 25). En el talud de la carretera situado inmediatamente al norte, los estratos de flysch y margas muestran una manifiesta continuidad, lo que indica que este sector de la ladera no había sido afectado previamente por deslizamientos (Fig. 2). La proyección de las grietas coincide aproximadamente con la zona de contacto entre el flysch y las margas (Fig. 2). Por otra parte, la orientación de las grietas es bastante pareja a las direcciones medidas en los estratos que afloran en el desmonte. Estos datos apuntan a que en este sector el plano de deslizamiento se adapta a la zona de contacto transicional entre las Margas de Pamplona y el Flysch de Yesa.



Figura 20. Fotografías tomadas el 13 de diciembre de 2012 (izquierda) y el 16 de febrero de 2013 (derecha) mostrando grietas afectando a la carretera ZN-240 en el límite este del deslizamiento activo (punto 25).



Figura 21. Grietas y escarpes con orientación principal oeste correspondientes al límite este del deslizamiento activo (punto 26). Imagen tomada el 8 de marzo de 2013.

El límite oeste del deslizamiento activo atraviesa la urbanización Lasaitasuna por la zona central. En la calle superior, éste se manifiesta mediante grietas que afectan a unos garajes (Fig. 22) y al pavimento (punto 27). En esta zona, las grietas afectan a una amplia banda de unos 50 m, entre los puntos 27 y 28. En la calle situada inmediatamente por debajo (punto 29), la rotura atraviesa una vivienda (Fig. 3). El 16 de febrero de 2013 el edificio presentaba daños en las fachadas atribuibles al nivel 5, según la clasificación de 7 categorías planteada por Cooper (2008) para evaluar patologías en estructuras humanas debidas a deslizamientos, subsidencia y otros fenómenos de deformación supercical. En la calle, el cabeceo del muro sobre el que se apoya el pavimento ha motivado la pérdida de soporte y el hundimiento de la acera (Fig. 23). En las calles inferiores el límite del deslizamiento se reconoce mediante grietas con desplazamiento dextro afectando a garajes, muros (punto 30) y pavimentos. El límite oeste del deslizamiento activo se ha manifestado recientemente en la carretera ZN-240 mediante roturas que afectan a la cuneta norte (punto 31, Fig. 24). En el punto 32 (cuneta de la carretera) también se han identificado deformaciones recientes atribuibles

al deslizamiento. Por debajo de la carretera ZN-240, existen amplios desmontes en los que el flysch no se encuentra afectado por deslizamientos previos.

Las deformaciones que marcan el límite oeste del deslizamiento, tanto en la urbanización Lasaitasuna como en la carretera ZN-240 (puntos 27, 29, 30 y 31), se encuentran perfectamente alineadas y su proyección ladera arriba muestra una clara coincidencia con el límite oeste del deslizamiento antiguo (ver mapa). Por otra parte, la proyección ladera arriba y en la dirección de máxima pendiente de la deformación detectada en el punto 32 de la carretera ZN-240 también tiende a coincidir con el límite este del cuerpo longitudinal identificado en el sector occidental del deslizamiento antiguo. Estos datos indican que el deslizamiento activo está reactivando al deslizamiento antiguo en la parte superior de la ladera y desplazando sedimentos eocenos en la parte inferior de la ladera que no habían sido afectados previamente por movimientos gravitacionales, lo que implica el desarrollo de nuevas superficies de deslizamiento. Por el momento, la posición del límite inferior del deslizamiento activo no puede ser cartografiada mediante criterios geomorfológicos. Este aspecto debe ser abordado mediante inclinómetros, mediciones geodésicas y la auscultación de la presa.



Figura 22. Grieta en el límite occidental del deslizamiento afectando a garajes y pavimento en la calle superior de la urbanización Lasaitasuna. Imagen tomada el 16 de febrero de 2013.



Figura 23. Colapso en la acera de la calle centro-superior de la urbanización Lasaitasuna (punto 29). Imagen tomada el 16 de febrero de 2013.

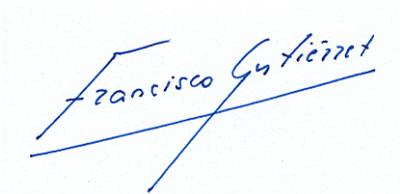


Figura 24. Deformaciones recientes afectando a la cuneta norte de la carretera ZN-240 en el límite oeste del deslizamiento activo (punto 31). Imagen tomada el 16 de febrero de 2013. El 13 de diciembre de 2012 no se detectó esta deformación.

5. CONCLUSIONES

La parte superior de la ladera derecha de la presa de Yesa presenta un deslizamiento antiguo, con una anchura de unos 280-330 m, que se manifiesta mediante diversas anomalías geomorfológicas: escarpes de cabecera y laterales, sucesión de rellanos en una ladera en la que los estratos buzcan hacia el valle, geometrías transversales convexas, surcos longitudinales. Sobre la base de estas evidencias morfológicas y de las observaciones llevadas a cabo en un buen número de excavaciones, se han cartografiado de forma aproximada los límites de este deslizamiento antiguo, salvo en su zona inferior, donde los aterrazamientos realizados en las urbanizaciones Lasaiatasuna y Mirador de Yesa han obliterado la topografía original. En cualquier caso, parece razonable que el límite inferior del deslizamiento se haya adaptado a la zona del núcleo del sinclinal, en torno a la carretera ZN-240, donde las capas pasan de buzcan hacia el valle a estar inclinadas hacia el interior de la ladera. Los elementos morfológicos observados, así como las variaciones espaciales que presentan las características de los materiales deslizados, indican que se trata de un movimiento de ladera constituido por diversos cuerpos separados por planos de rotura secundarios. En la zona de cabecera, donde se encuentra un amplio rellano con una superficie de unos 9000 km², el deslizamiento ha debido tener una componente deslizamiento rotacional. En gran parte del deslizamiento, el flysch se ha transformado en una brecha caótica. En otras zonas, especialmente en el sector central y allí donde los estratos de arenisca alcanzan mayor espesor y proporción, se ha producido la traslación de bloques sin apenas experimentar deformación interna, estando ésta prácticamente limitada a juntas dilatadas rellenas de arcilla.

El deslizamiento activo en su parte superior engloba a la totalidad del deslizamiento antiguo. Por el contrario, en la parte inferior de la ladera, principalmente en el flanco sur del sinclinal donde las capas buzcan hacia el interior de la ladera, el movimiento afecta margas y flysch no deslizados previamente. En esta zona por tanto se están desarrollando nuevos planos de rotura, mientras que en la porción superior es bastante probable que el deslizamiento aproveche superficies pre-existentes, tal y como indica la estrecha correlación espacial entre el límite oeste del deslizamientos antiguo y el activo.

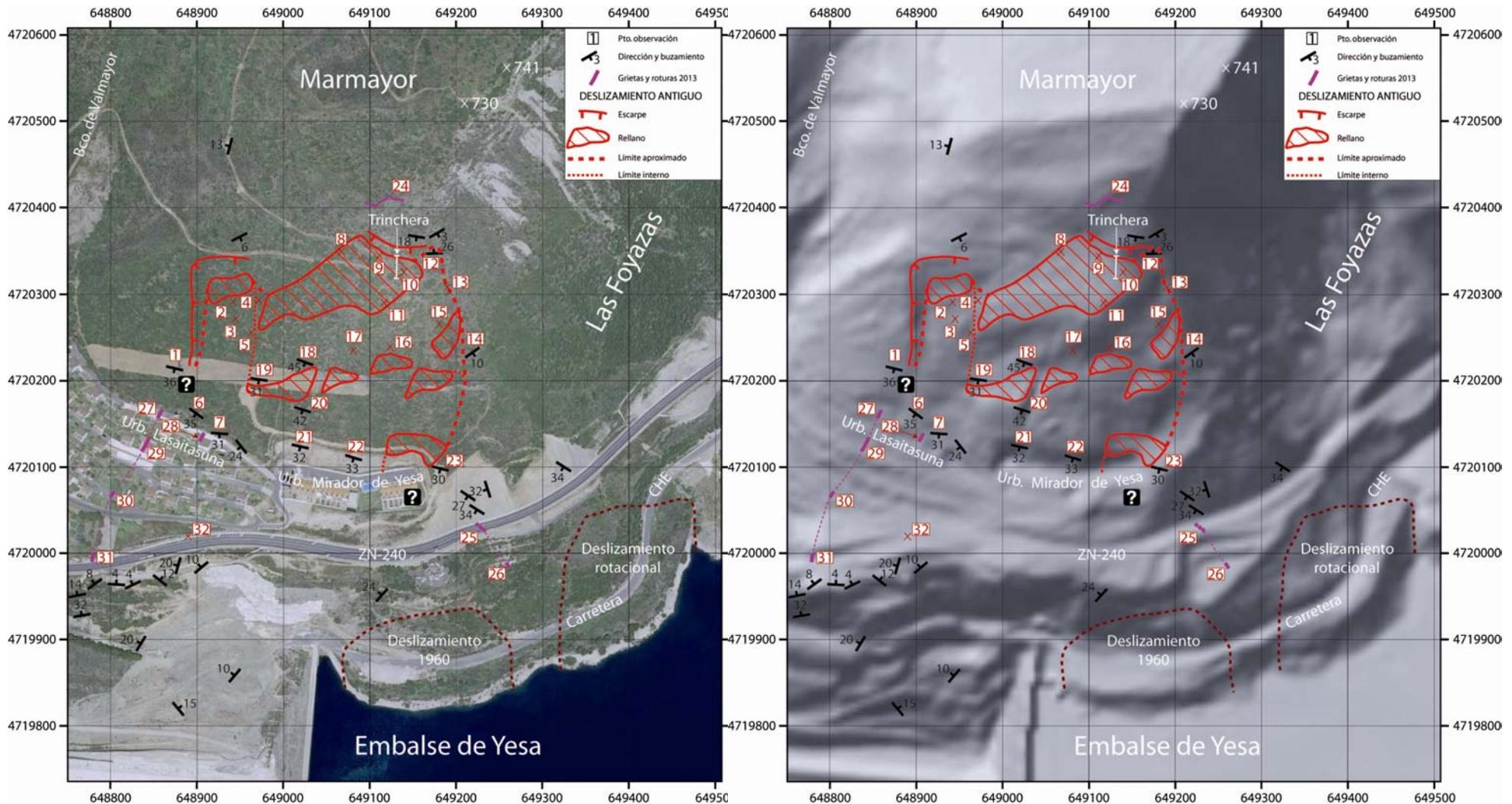


Francisco Gutiérrez Santolalla
Catedrático de Geodinámica externa

BIBLIOGRAFÍA

- Cooper, A.H. (2008). The classification, recording, databasing and use of information about building damage caused by subsidence and landslides. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 41, 409-424.
- Cruden, D.M. y Varnes, D.J. (1996). Landslides types and processes. En: Turner, A.K. y Schuster, R.L. (Eds.). *Landslides: investigation and mitigation*. Transportation Research Board special report 247, 36-75.
- De Rojas, B.J.; Latoree, F. (1972). Mapa Geológico de España. Sigüés (175). E: 1:50.000. IGME. Madrid, 15 p.
- Gutiérrez, F.; Lucha, P.; Galve, J.P. (2010). Reconstructing the geochronological evolution of large landslides by means of the trenching technique in the Yesa Reservoir (Spanish Pyrenees). *Geomorphology*, 124, 124-136.
- Lafuente, R.J.; Gómez, R.; Merino, M.; De Diego, P.; Martínez, J.L.; García, J. (2007). Laderas del Embalse de Yesa. Jornadas técnicas sobre estabilidad de laderas en embalses. Confederación Hidrográfica del Ebro. Zaragoza, 277-293.
- Puigdefábregas, C. (1975). La sedimentación molásica en la Cuenca de Jaca. Monografía del Instituto de Estudios Pirenaicos, 104, 188 p.
- Puigdefábregas, C.; Rojas, B.; Sánchez, I.; del Valle, J. (1976). Mapa Geológico de Aoiz (142) a escala 1:50.000. IGME. Madrid, 27 p.

ANEXO



Cartografía geomorfológica de la ladera derecha de la Presa de Yesa (Navarra)

Francisco Gutiérrez, Junio 2013