

Reconstrucción y análisis geomorfológico de la avenida de junio de 2013 entre Arties y Vielha (Val d'Aran): estudio del riesgo residual y dinámica del Garona

Ane Victoriano Lamariano
Tutora: Gloria Furdada Bellavista

Máster en Recursos Minerales y Riesgos Geológicos
Especialidad: Riesgos Geológicos

Julio 2014



Reconstrucción y análisis geomorfológico de la avenida de junio de 2013 entre Arties y Vielha (Val d'Aran): estudio del riesgo residual y dinámica del Garona

Ane Victoriano Lamariano

Tutora: Gloria Furdada Bellavista

Máster en Recursos Minerales y Riesgos Geológicos 2013-2014 (UB-UAB)

Julio de 2014

ABSTRACT

Flood risk is one of the most dangerous natural disasters in mountain stream areas. A qualitative approach of the residual risk has been carried out in the Garona river between Arties and Vielha (Val d'Aran) comparing the geomorphological map and the effects of the flood in the study area. The main geomorphologic elements that have been identified are channel areas, the floodplain, alluvial terraces and alluvial fans. In terms of the effects, eroded margins, flooded areas and depositional areas have been identified. This information has been compared in order to assess the actual risk of the area due to the anthropic changes. Thus, the results showed that the river tends to flow through areas that are part of the natural fluvial system. Besides, the dynamics of the Garona has been studied. The specific analysis of different entrenchment indicators shows evidences of a vertical incision tendency of the drainage network. However, there are areas of deposition which correspond to confluences of streams with high sediment transport rate and/or to a slope decrease of the main river. The obtained data allowed us to estimate an approximate entrenchment rate of 1,07 mm/year since the end of the Pleistocene last glacial period.

Key words: anthropization, effects, entrenchment, geomorphology, residual risk.

RESUMEN

El riesgo de inundaciones es uno de los desastres naturales más peligrosos en zonas de alta montaña. Este trabajo analiza cualitativamente el riesgo residual del tramo del Garona entre Arties y Vielha (Val d'Aran) mediante la realización de la cartografía geomorfológica y de los efectos de la avenida en la zona de estudio. Los principales elementos geomorfológicos identificados son zonas de cauce, llanura aluvial, terraza aluvial y conos de deyección. En cuanto a los efectos, se han identificado erosión en los márgenes, zonas inundadas y zonas de acumulación. Se ha combinado esa información para evaluar el riesgo que sufre la zona en la actualidad debido a las modificaciones antrópicas, lo cual ha permitido valorar que el río tiende a recuperar su espacio vital. También se ha estudiado la dinámica del Garona. El análisis específico de múltiples indicadores de encajamiento muestra claras evidencias de una tendencia de la red de drenaje a la incisión vertical. De todos modos, se encuentran zonas de acumulación preferente que corresponden a las confluencias de tributarios con un alto transporte de material y/o a disminuciones de la pendiente del río principal. Los datos obtenidos permiten calcular una tasa de encajamiento del Garona de 1,07 mm/año desde el último periodo glacial del Pleistoceno.

Palabras clave: antropización, efectos, encajamiento, geomorfología, riesgo residual.

1. Introducción

Las inundaciones son uno de los desastres naturales con más repercusión, siendo un problema relativamente frecuente que conlleva severos efectos e impactos en personas, socioeconómicos, geomorfológicos, culturales, medioambientales y de salud, especialmente en zonas urbanizadas. De hecho, el riesgo de inundación es el riesgo natural de mayor incidencia y pérdidas económicas a nivel global, y según El Plan Estatal de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones (2011), es el riesgo natural de mayor frecuencia y afectación en territorio catalán. Por lo tanto, es indispensable el estudio de estos fenómenos para la correcta gestión y reducción del riesgo de avenidas e inundaciones.

Los eventos de inundaciones pueden ser de diferentes tipos dependiendo su origen y características, (e.g. naturales o artificiales, terrestres o costeras, avenidas o crecidas, riadas o *in situ*). Según El Plan Estatal de Protección Civil ante el riesgo de Inundaciones (2011) todos estos fenómenos se pueden agrupar en tres tipos de inundaciones: por precipitación *in situ*; por escorrentía, avenida o desbordamiento de cauces; o por rotura y/o operación incorrecta de obras de infraestructura hidráulica.

El estudio y la gestión para la reducción del riesgo se lleva a cabo de diferente forma dependiendo de la tipología del fenómeno estudiado. En general, existen medidas predictivas, preventivas y correctoras, y actualmente uno de los campos de actuación más importantes es la ordenación del territorio, considerada una medida preventiva idónea (Díez et al., 2008). Para ello, uno de los estudios necesarios es la realización de mapas de riesgo, obtenidos mediante la combinación de estudios de peligrosidad, vulnerabilidad y exposición ($R=P \times V \times E$). El análisis de peligrosidad se puede llevar a cabo mediante diferentes métodos de análisis: históricos/paleohidrológicos, geológicos/geomorfológicos e hidrológicos/hidráulicos (Díez et al., 2008). De acuerdo a lo

indicado en el informe INUNCAT (2012), la peligrosidad por inundaciones viene determinada por la distribución espacial del fenómeno con su intensidad (magnitud) y frecuencia (periodo de retorno), el conocimiento de los efectos dominó (deslizamientos, afectación en estructuras hidráulicas,...) y la identificación de puntos negros. De todos modos, lo correcto es la integración de estas técnicas. En cuanto a la vulnerabilidad y exposición, en las últimas décadas hay una tendencia general de aumento de estos factores debido a la ocupación del territorio en zonas expuestas al peligro. Por ello, el análisis de vulnerabilidad es de vital importancia en los estudios de riesgo, ya que evalúan los daños provocados por el fenómeno. Según INUNCAT (2012), los factores principales a considerar que pueden afectar a los elementos vulnerables expuestos son el calado (altura de la lámina de agua), la velocidad de la corriente, la duración del evento y permanencia temporal, y la concentración de sedimentos (transporte de carga sólida).

Este trabajo presenta un estudio geomorfológico del tramo del río Garona entre Arties y Vielha (Val d'Aran) como herramienta para el estudio de la avenida del 18 de junio de 2013 en dicha zona. Este valle pirenaico de origen glaciar es una zona de riesgo susceptible a avenidas torrenciales típicas de sistemas montañosos. INUNCAT (2012) determina la cuenca del Garona como una región de alto riesgo de inundaciones.

Así pues, se conocen varios episodios históricos de inundaciones en la Val d'Aran durante el siglo XX, en los años 1937, 1963 y 1982 (Piris, 2013; García, 2014). Este registro histórico permite estimar globalmente un periodo de retorno de unos 20-25 años. El último fenómeno ocurrido es la devastadora riada del verano de 2013 en la cuenca del Garona, que a diferencia de las anteriores, provocaron afectaciones a lo largo de prácticamente todo curso de dicho río hasta la frontera con Francia, así como en algunos tributarios (Fig. 1).

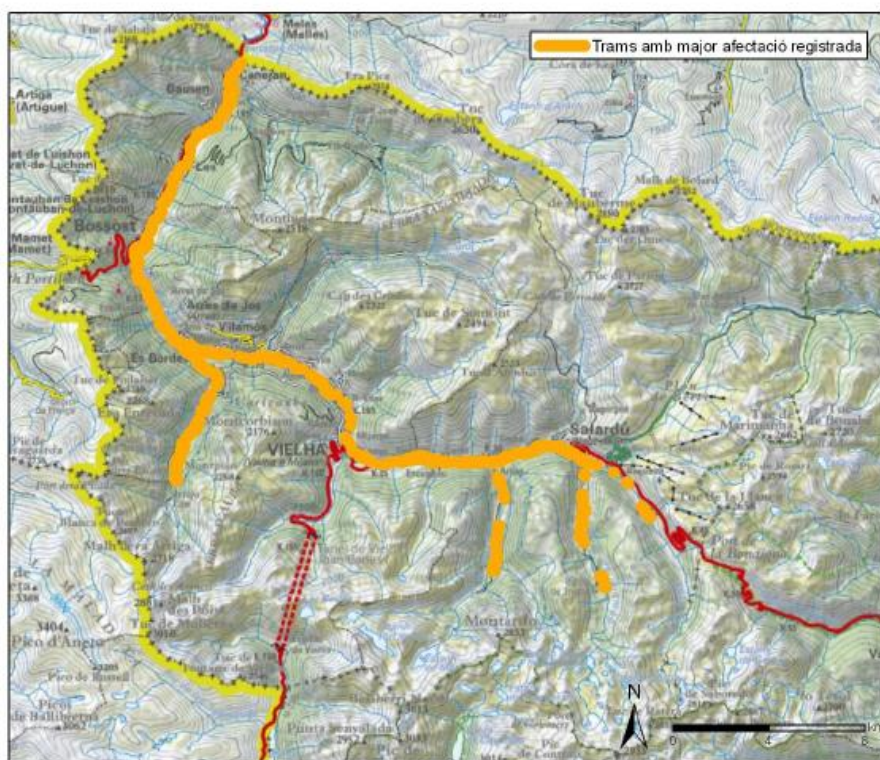


Figura 1. Principales cursos afectados durante la avenida del 18 de junio de 2013 en el Garona y afluentes, sobre el mapa topográfico 1:250.000 del ICC (IGC, 2013).

Las principales causas de la avenida de junio de 2013 fueron las cuantiosas precipitaciones del 17 y 18 de junio y el deshielo fruto de la excepcional temporada de nieve (Pineda *et al.*, 2013). De este modo, los factores desencadenantes de dicho evento fueron las acumulaciones existentes de nieve (espesor de nieve elevado), las precipitaciones en forma de agua (lluvias intensas de 120mm en 48h, de los cuales más de 100 l en menos de 24h), el aumento de la temperatura (deshielo acelerado) y la gestión de construcciones hidráulicas (taponamiento y rotura); sumados a unos condicionantes previos como la saturación del suelo, las laderas con pendientes pronunciadas y el uso urbano del suelo en zonas inundables (Piris, 2013) que agravaron los efectos de este fenómeno excepcional.

Los efectos provocados por la avenida del 18 de junio de 2013 son múltiples. Los principales efectos geomorfológicos registrados a escala regional son la socavación (erosión de los márgenes del cauce), la acumulación de materiales, los movimientos de ladera (deslizamientos superficiales y flujos torrenciales) y la reactivación de algunos conos de deyección (IGC, 2013). También se registraron afectaciones en elementos antrópicos, como casas, campings, carreteras, puentes, presas, centrales hidroeléctricas, muros y canalizaciones, suministros eléctricos y colectores de agua. Aunque no hubo víctimas mortales, en total estas inundaciones provocaron pérdidas económicas que hasta ahora superan los 64.000.000 € (La Vanguardia, 2014).

Sin embargo, los daños provocados por la avenida de 2013 en la Val d'Aran están directamente relacionados con los factores exposición y vulnerabilidad. De hecho, el caudal registrado en ese evento fue menor que el de las anteriores inundaciones históricas conocidas (Ortuño, 2013). La sobreexposición debido a la urbanización en zonas inundables explica el aumento del riesgo en la zona estudiada. Aunque actualmente el ACA prohíba la construcción en zonas de alto riesgo de inundación, en las últimas décadas se ha registrado una sobreocupación en zonas que corresponden al espacio vital de los ríos. Por ello, el análisis y cartografía geomorfológica de detalle son vitales para el estudio del riesgo, ya que nos permiten hacer una valoración del riesgo residual por erosión y desbordamiento mediante la comparación de la situación natural y antropizada de la red fluvial.

En cuanto a la zona de estudio, el aumento del riesgo viene asociado a diversas modificaciones antrópicas de la dinámica natural. Por un lado, cabe destacar las actuaciones en los cauces. Las canalizaciones aumentan la velocidad del agua e impiden la erosión de los márgenes y evitan el desbordamiento natural de los ríos en crecidas intermedias, dando una falsa sensación de seguridad. Por otro lado, la sobreocupación de las llanuras de inundación (e incluso de zonas de antiguo cauce) ha aumentado considerablemente en las últimas décadas. Estas zonas llanas se forman mediante el desbordamiento y deposición de los ríos, por lo que son zonas de alto riesgo de inundación. La construcción de edificios, campings, carreteras y otras infraestructuras en las llanuras aluviales aumenta el riesgo de estas áreas inundables y agrava los daños. Por último, los conos de deyección situados en las confluencias de los ríos y torrentes son también zonas riesgo en los que se sitúan muchos municipios.

La documentación base que sirve como punto de partida son el informe preliminar del IGC (2013), que presenta una cartografía preliminar de los efectos de la riada, el trabajo de Guillem Piris Casanovas (2013) y la tesina de Marta García Silvestre entre Era Bordeta-Les (2014). Además, las causas meteorológicas e hidrológicas de las riadas de junio de 2013 en la Val d'Aran han sido ampliamente estudiadas en un trabajo multidisciplinar realizado por el Servei Meteorològic de Catalunya (SMC), el Servei de Predicció d'Allaus de l'Institut Geològic de Catalunya y la Agència Catalana de l'Aigua (ACA) (Pineda *et al.*, 2013), en el cual se realiza un análisis meteorológico, nivològic y hidrològic. Otros antecedentes son los estudios realizados en la Val d'Aran por Bordonau (1985), Bordonau (1992), Ortuño *et al.* (2013) y Stange *et al.* (2014).

Este trabajo se centra en la reconstrucción y análisis geomorfológico entre Arties y Vielha (Val d'Aran). Para ello, primero se mencionan los objetivos e hipótesis, después se sitúa la zona de estudio geográfica y geológicamente y se presenta la metodología de trabajo empleada. Posteriormente se realiza el análisis geomorfológico y los estudios de riesgo residual y dinámica del Garona. Por último, se presenta la discusión y las conclusiones obtenidas.

2. Objetivos e hipótesis del trabajo

La avenida de 2013 en la cuenca del Garona produjo daños muy severos en la Val d'Aran. Aunque la gran mayoría del curso del río principal sufrió importantes efectos, cabe destacar que el tramo entre Arties y Vielha fue uno de los más afectados y, por ello, se ha escogido esta área de estudio.

El presente estudio de la avenida del 18 de junio de 2013 en la Val d'Aran se basa en el análisis geomorfológico del tramo del río Garona entre los municipios de Arties y Vielha, incluyendo el paso de dicho río por estas localidades. Asimismo, se estudia la dinámica a largo plazo del Garona en esta zona y la relación de esta tendencia con los efectos provocados por la riada. El objetivo principal del trabajo es doble pero la combinación de ambos es necesaria para una valoración del riesgo de la zona y para la comprensión de las consecuencias e impactos del evento analizado.

Como primer objetivo está la evaluación cualitativa del riesgo residual, basándose en la comparación entre la dinámica natural y la situación actual de la red fluvial. Este análisis consiste en la valoración del riesgo de desbordamiento y erosión en crecidas futuras debido a una situación de antropización del río. Para ello, se ha realizado por un lado, un análisis geomorfológico detallado de la zona de estudio, y por otro lado, la reconstrucción de los efectos de la crecida. El segundo objetivo es el estudio de la dinámica del río Garona. Este análisis se realiza mediante la combinación de los efectos de la riada, las observaciones generales a lo largo del cauce y las características y formas de los elementos geomorfológicos.

El interés del trabajo es obtener unas conclusiones que mejoren la gestión para la reducción del riesgo de inundaciones en la Val d'Aran. Por un lado, el estudio del riesgo residual permite conocer los cambios ocurridos en los cauces y elementos geomorfológicos (interés científico) y la

relación de estos con los efectos de la inundación (interés práctico). Con ello, se puede obtener información útil para la predicción de los efectos debido a los cambios ocurridos a lo largo de los años en la red fluvial, lo cual permite conocer las zonas preferentes de erosión y desbordamiento. Por otro lado, conocer la dinámica del Garona tiene implicaciones en la gestión, ya que condicionará las actuaciones en el cauce. Un ejemplo es la profundidad de los cimientos de los diques laterales de protección en los tramos canalizados.

Con todo esto, inicialmente se plantean dos hipótesis. Primero, que la ocupación del territorio es la principal causa del aumento del riesgo y que el río tiende a recuperar su dinámica natural. Segundo, se parte de la hipótesis de que el Garona tiene una tendencia al encajamiento.

3. Situación geográfica y climática

Los Pirineos son una cadena montañosa situada al NE de la Península Ibérica, de unos 435 km de longitud, dirección WNW-ESE y en la cual se pueden distinguir tres grandes zonas geográficas, los Pirineos Occidentales, Centrales y Orientales. Limitan al norte con la cuenca de antepaís de Aquitania y al sur con la cuenca del Ebro (Bordonau, 1992).

La Val d'Aran se encuentra en la vertiente septentrional del Pirineo Central. Esta comarca pirenaica de 620,47 km² (ICC, 1994) está situada al NW de la provincia de Lleida, en la Comunidad Autónoma de Cataluña (Fig. 2), y tiene una población de 10.090 habitantes (2013) (IDESCAT). Es la única comarca catalana de Cataluña situada en la vertiente atlántica. Limita al N con Francia, al E con la comarca del Pallars Sobirà (Lleida, Cataluña), al S con la comarca de la Alta Ribagorça (Lleida, Cataluña) y al W con Francia y la comarca de la Ribagorça (Huesca, Aragón). Es una región de alta montaña con altitudes superiores a los 3000 m y un 30% de su superficie a una altitud mayor que 2000 m (IGC, 1994). Su municipio principal es Vielha e Mijaran y la capital de comarca es Vielha.



Figura 2. Localización de la Val d'Aran en Cataluña (IGC, 1994).

Aunque conste de tres cuencas de recepción, este valle del Pirineo Catalán corresponde casi en su totalidad a la cabecera del río Garona, el cual en su parte más alta tiene una dirección E-W y posteriormente pasa a orientarse en N-S. Esta orientación de la red fluvial se debe a un control estructural de los cursos fluviales, con un componente N debido a la estructura de la cordillera y un componente E-W asociado a factores tectónicos como la fracturación (ICC, 1994). A nivel administrativo, la cuenca hidrográfica del Garona es parte de las Cuencas Intercomunitarias de Catalunya. El valle del Garona es un territorio montañoso que tiene una red de drenaje bien definida, grandes desniveles y pendientes pronunciadas. Su principal río, el Garona, recorre unos 45 km a lo largo de la Val d'Aran hasta llegar a Francia y posteriormente desembocar en el Océano Atlántico (en Bordeaux), tras haber atravesado el suroeste del territorio francés.

El presente estudio se centra en el tramo del río Garona que transcurre entre los municipios de Arties y Vielha (8,3 km aproximadamente), incluyendo sus principales afluentes (arriu Valarties, barranc de Artigues, barranc de Salider, barranc de Bargadera, barranc de Cal, torrente de Escunhau, arriu Nere y barranc de Casau). A lo largo de la zona de estudio se encuentran diversas zonas urbanizadas como Arties, Garós, Casarilh, Escunhau, Betrén y Vielha (Fig. 3).

La región, debido a su carácter septentrional, presenta un clima Atlántico (o oceánico) de alta montaña, caracterizado por una alta humedad, grandes variaciones en la temperatura y una pluviometría elevada y regular durante todo el año. Algunos datos climáticos extraídos del Plan de Emergencias para Inundaciones de Cataluña (INUNCAT) son: PMA (precipitación media anual) = 900-1100 mm, RPE (régimen pluviométrico estacional) = equilibrado, TMA (temperatura media anual) = 6-10°C y AAMT (amplitud media anual de temperatura) = 13,14°C. Las precipitaciones en forma de agua de mayor intensidad y frecuencia se registran en primavera y otoño, mientras que en invierno se dan importantes precipitaciones en forma de nieve.

4. Contexto geológico y geomorfológico

Los Pirineos son el resultado de la colisión entre la placa Ibérica y Euroasiática, en un proceso que comenzó en el Cretácico tardío y se prolongó hasta el Mioceno medio (Ortuño *et al.*, 2013), durante la llamada orogenia alpina. Su estructura tectónica consta principalmente de un sistema de cabalgamientos y pliegues de edad alpina, orientados en dirección WNW-ESE, de forma casi paralela a la cordillera. La zona axial se caracteriza por estar compuesta por tres cabalgamientos principales. El final de la orogenia alpina pirenaica es asincrónico. En la zona E el periodo post-orogénico comenzó en el Oligoceno tardío (Lacan y Ortuño, 2012) y se caracteriza por una convergencia relativamente lenta (Beaumont *et al.*, 2000). Sin embargo, estudios de la neotectónica de los Pirineos, como el de Lacan y Ortuño (2012), han identificado zonas de extensión y compresión, que indican un levantamiento continuado asociado a procesos isostáticos y demuestran la tectónica activa de la zona axial.



Figura 3. Red de drenaje de la zona de estudio y localización de los principales municipios, sobre el mapa topográfico 1:10.000 del ICC.

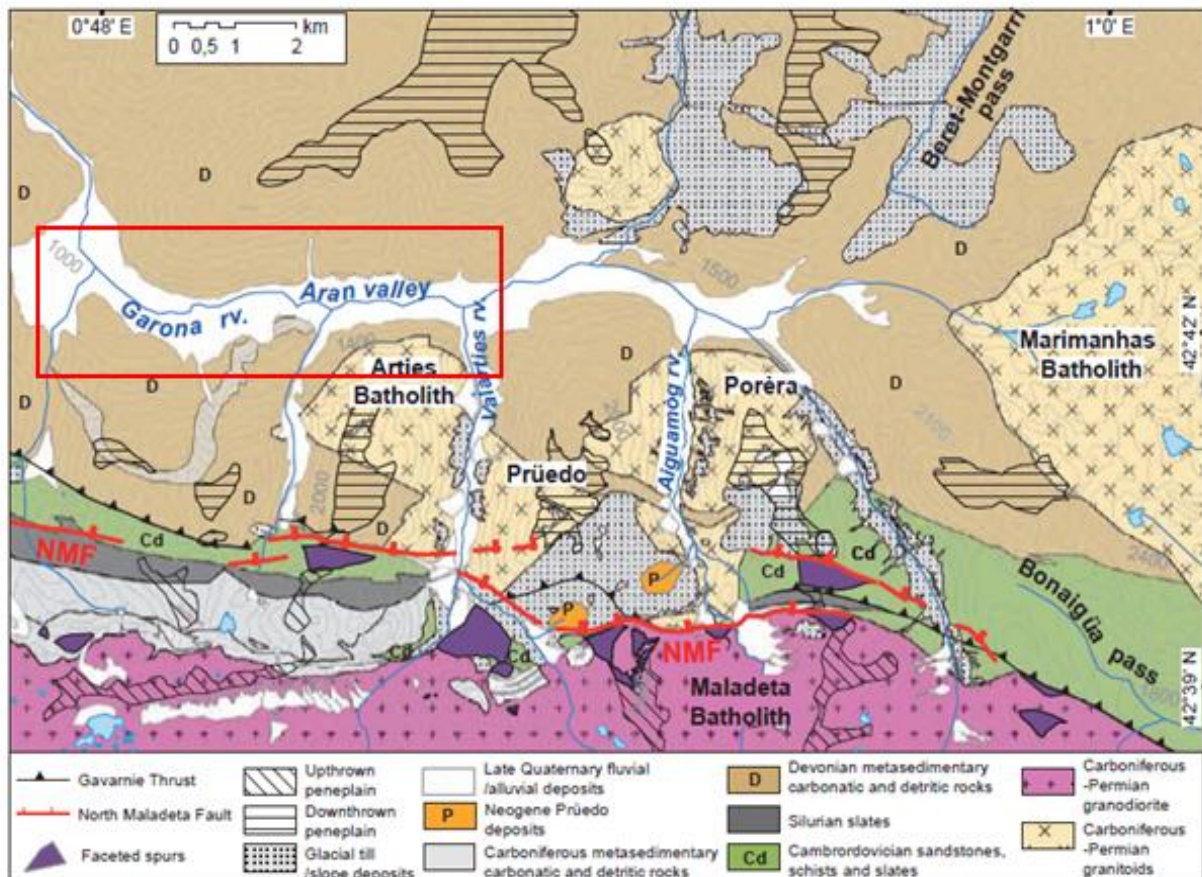


Figura 4. Mapa geológico la zona de estudio y alrededores, con el área estudiada marcada en un recuadro rojo (Ortuño *et al.*, 2013)

Según Bordonau (1992), los materiales que aparecen en los Pirineos se pueden agrupar en tres grandes unidades de límites discordantes: el basamento o zócalo Paleozoico (las rocas más antiguas de la cordillera), la cobertera Mesozoica y Terciaria, y los terrenos post-orogénicos Neógenos y Cuaternarios. Cabe mencionar la presencia de intrusiones tardohercínicas de batolitos graníticos (IGC, 1994).

La Val d'Aran se sitúa en la zona axial pirenaica. Los materiales del basamento que afloran son rocas metasedimentarias del Paleozoico (Ortuño *et al.* 2013), deformadas por la orogenia hercínica (200.000.000 años BP) y alpina. Entre ellos, se encuentran materiales que van desde el Ordovício hasta el Pérmico, de variadas litologías como lutitas, calizas, cuarcitas, pizarras, filitas, calcoesquistos, ampelitas y cuarcitas. En cuanto a la geología estructural de

este valle, se pueden distinguir tres sectores o unidades geológicas de N a S: el anticlinal de Les, el sinclinal de Vielha y el macizo intrusivo de la Maladeta (Angulo y Martín, 2001).

La zona de estudio se encuentra en el valle del Garona (Val d'Aran). En el área estudiada, los materiales del substrato que predominan son del Devónico Superior (lutitas, calizas y cuarcitas), Devónico Medio (calizas) y Carbonífero-Pérmico (granodioritas biotíticas). Estas rocas están intruidas por las rocas plutónicas del batolito de Arties (Fig. 4) que genera un metamorfismo de contacto. Sin embargo, el presente estudio se centra en el fondo de valle, en el que los materiales predominantes son de edad Cuaternaria, cuyo origen se explica mediante la evolución geomorfológica del valle.

La geomorfología actual de los Pirineos es el resultado del último ciclo glacial del Pleistoceno. De este modo, los elementos geomorfológicos principales son del Cuaternario, a excepción de las planicies altas Neógenas (Ortuño *et al.* 2013). De este modo, se encuentran sedimentos y formas tanto glaciales (tills, morrenas laterales y glaciares rocosos) como post-glaciales (depósitos debris de ladera, sedimentos aluviales y zonas de turbas) (Bordonau, 1985; Bordonau, 1992; Serrat y Vilaplana, 1992; Ortuño *et al.*, 2013).

La Val d'Aran es un valle de origen glaciar (Fig. 5). Sus características geomorfológicas principales son su morfología en forma de "U", la existencia de valles laterales "colgados", la dinámica de laderas, la morfología cárstica y el fondo de valle dominado por un régimen fluvial. Los trabajos llevados a cabo por Bordonau (1985) y Bordonau (1992) estudian la evolución geomorfológica de la zona y distinguen 4 periodos principales con sus principales formas y depósitos:

- Periodo preglacial (Oligoceno superior-Mioceno inferior): formación de superficies de erosión (niveles de aplanamiento), actualmente situados a 2000-2200 m.

- Último periodo glacial (Pleistoceno): se divide en tres fases. Primero, una fase de estabilización pre-máximo con conos de deyección y depósitos lacustres. Después, el máximo glacial caracterizada por la presencia de lenguas de glaciares de valle, la acción erosiva (circos glaciares, cubetas de sobreexcavación, cuellos de transfluencia y valles en "U") y la formación del relleno principal (tills y bloques erráticos). Finalmente, están las fases de deglaciación con la retirada de las lenguas glaciares debido a un aumento de la temperatura, y la presencia de complejos morrénicos. En esta última fase de deshielo se diferencian un primer periodo de glaciares de valle de reducidas dimensiones y un posterior episodio de pequeños glaciares de circo, hasta la retirada total del hielo.

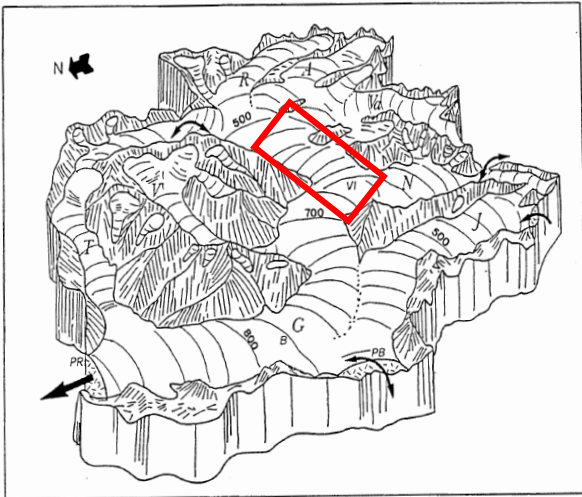


Figura 5. Reconstrucción de la extensión de los glaciares durante el último máximo glacial, con la zona de estudio delimitada por el recuadro rojo. Los números indican el espesor del glaciar en metros (Bordonau, 1992; modificado de Vilaplana *et al.*, 1986).

- Periodo tardiglacial: existencia de glaciares rocosos (hielo intersticial en la paredes rocosas), morrenas y coexistencia con pequeños glaciares de circo.

- Periodo post-glacial: remodelación y/o destrucción de formas antiguas y actuación de procesos similares a los actuales. Se caracteriza por una acción periglacial-nival y fluvial-fluviotorrencial, procesos de fracturación y regularización de laderas, ambientes lacustres, aluvionamiento de los fondos de valle y formación de conos de deyección fluvio-torrenciales.

Por lo tanto, el área estudiada en el presente trabajo muestra unas características geomorfológicas asociadas a la antigua existencia del glaciar cuaternario del Garona. El zócalo pirenaico levantado por la orogenia alpina esta erosionado en primer lugar generándose amplias y suaves superficies de erosión y finalmente por la dinámica fluvial pre y post-glacial, mediante un progresivo encajamiento de la red fluvial. De este modo, los elementos geomorfológicos principales de la zona están asociados a la dinámica fluvial y fluvio-torrencial, como son los conos de deyección y las llanuras y terrazas aluviales.

5. Metodología

El estudio de la avenida del 18 de junio de 2013 entre Arties y Vielha se ha realizado mediante diversos métodos, con el fin de alcanzar los objetivos planteados y obtener unas conclusiones.

Se ha realizado una recopilación de información y consulta previa de los antecedentes de estudios realizados en la Val d'Aran, así como otras investigaciones con información de utilidad para el presente estudio. El documento principal que se han utilizado como punto de partida es el informe preliminar realizado por el IGC. También se ha hecho una amplia consulta de mapas topográficos y geológicos de la zona.

En general, se ha utilizado la vía geomorfológica como método de trabajo, con el objetivo de realizar una cartografía geomorfológica de la zona y una cartografía de los efectos de la inundación.

Como primer paso, se ha llevado a cabo un trabajo de gabinete de fotointerpretación. Para ello, se han utilizado las fotografías aéreas del vuelo americano de 1956-1957 a escala aproximada 1:33.000, y se han interpretado los principales elementos geomorfológicos.

Las primeras cartografías se han elaborado utilizando el software de información geográfica ArcGIS® 10 de ESRI y los geoservicios en línea (WMS) del ICC. Por un lado, se ha realizado un primer mapa geomorfológico de la zona en base a la fotointerpretación de 1956, mediante el reconocimiento de los elementos geomorfológicos principales, que son la red de drenaje, zona de cauce, terrazas aluviales y conos de deyección. Por otro lado, la elaboración de una cartografía inicial de los efectos de la avenida se ha elaborado en base al reconocimiento de los efectos de la avenida, principalmente las zonas de acumulación, erosión, desbordamiento y líneas de flujo preferente. Esta digitalización se ha llevado a cabo mediante la observación de las ortofotos del 2012 y las de la inundación del 2013, ambas del ICC.

En el posterior trabajo de campo se han realizado diversos trabajos de mayor detalle, entre ellos verificación de la cartografía de las formas geomorfológicas fotointerpretadas, la verificación de los efectos de la avenida,

la cartografía del curso fluvial actual, la observación y toma de datos de diferentes indicadores de erosión y encajamiento, la identificación de puntos críticos a lo largo del cauce del Garona y la observación de las medidas de defensa tomadas tras la riada. El informe preliminar realizado por el IGC ha sido una herramienta clave en el trabajo de campo.

Con la integración de toda la información obtenida se obtienen el mapa geomorfológico y la cartografía de los efectos de las inundaciones definitivos del área estudiada, en los cuales se representan tanto formas de erosión como de acumulación. Así mismo, se han digitalizado los cauces el 2012 del Garona y sus tributarios, en base al mapa topográfico 1:5.000 y ortofoto del 2012 del ICC.

El estudio cualitativo del riesgo residual se basa en la comparativa entre la cartografía geomorfológica de 1956, la red fluvial de 2012 y los efectos de la inundación de 2013. Estos mapas comparativos permiten relacionar los efectos de la avenida con la dinámica natural del río, determinada por las formas geomorfológicas.

También se ha estudiado la dinámica del Garona mediante el análisis específico de los diferentes indicadores de encajamiento identificados, como el descalzamiento de cimientos, incisión en los conos de deyección... Con los datos obtenidos de los mapas topográficos y las mediciones realizadas en campo, se han calculado las algunas tasas de encajamiento en la zona. Además, los valores de la incisión fluvial en los conos de deyección de los afluentes del Garona se han representado gráficamente.

Se han realizado perfiles transversales y longitudinales del río Garona y sus tributarios utilizando ArcGIS y Global Mapper, que permiten relacionar los efectos registrados con la tendencia de la red fluvial. Los datos necesarios para los cortes topográficos se han extraído de los modelos digitales del terreno (MDT) de 5 m del 2012 (ICGC).

Finalmente, se ha llegado a la elaboración de las conclusiones finales que nos permiten entender el riesgo de inundaciones que sufre este tramo del Garona, así como sus causas y consecuencias.

6. Análisis geomorfológico

Los sistemas fluviales están compuestos por formas erosivas (e.g. canales aluviales) y deposicionales (e.g. llanuras, conos aluviales, terrazas), aunque el impacto humano también afecta en la geomorfología resultante, con acciones como por ejemplo el aumento en el aporte de sedimento y la construcción de canales y presas (Huggett, 2007).

La identificación y estudio de los diferentes elementos geomorfológicos, y su relación con el curso principal del Garona, tiene como objetivo describir la formación y evolución natural de la zona. La cartografía geomorfológica sirve tanto para la evaluación cualitativa del riesgo residual como para entender la dinámica del Garona.

6.1. Cartografía geomorfológica

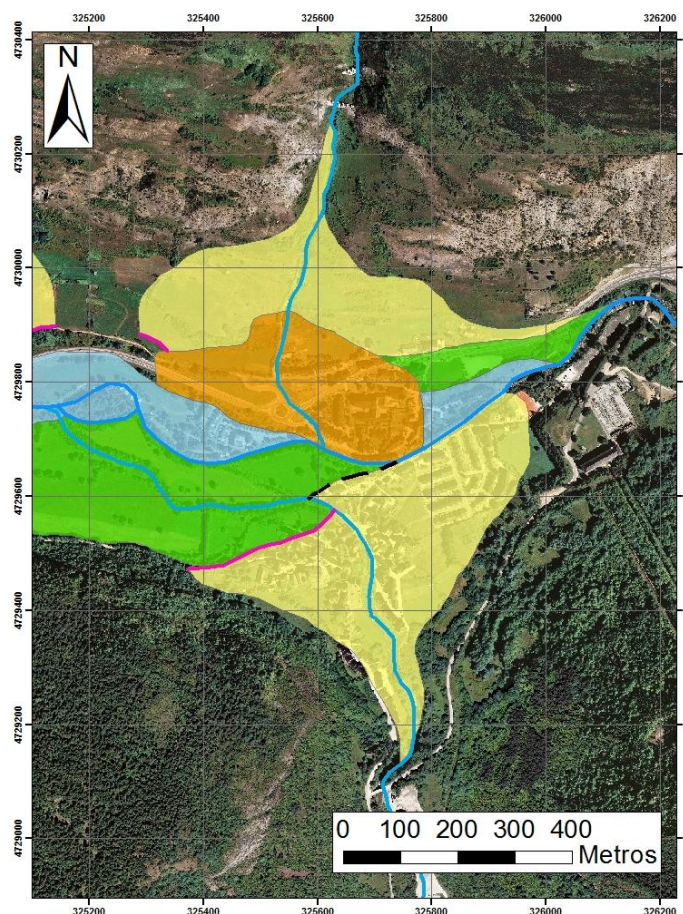
El mapa muestra los principales elementos geomorfológicos identificados en la zona de estudio. Se ha cartografiado tanto el fondo de valle del Garona entre los municipios de Arties y Vielha, como los sistemas

torrenciales y las formas de acumulación y erosión identificadas en la parte baja de estos afluentes principales. Cabe mencionar que la cartografía realizada se centra solamente en las formas asociadas a la dinámica fluvial, torrencial y aluvial, sin incluir otro tipo de elementos como los depósitos coluviales de ladera.

El anexo I incluye la cartografía geomorfológica completa, realizada en base a la fotointerpretación de 1956 y el trabajo de campo. La figura 6 es un ejemplo concreto de esta cartografía, traspasada sobre la ortofotografía de 2011. Los elementos identificados mediante el análisis geomorfológico son:

- Red de drenaje principal: el curso del río Garona y los tributarios (ríos y torrentes) principales. En los casos en los que cauce de los afluentes no está bien definido o es inactivo (o estacional), ese tramo se ha indicado como red de drenaje supuesta.

- Zona de antiguo cauce: se han identificado algunas zonas bajas que corresponden al cauce natural del río. Estas áreas muestran líneas de circulación de agua en las fotografías aéreas de 1956. Por tanto, son zonas adyacentes al curso principal por las que el agua circula de forma relativamente frecuente o circulaba en el pasado.



Leyenda

- Red de drenaje (1956)
- Incisión en cono
- Límite deducido
- Cauce antiguo
- Terraza aluvial baja
- Conos de 1ª generación
- Conos de 2ª generación

Figura 6. Cartografía geomorfológica en la zona de Arties, sobre la ortofoto de 25 cm del ICC.

- Terraza baja (llanura aluvial): las zonas prácticamente llanas situadas en ambos márgenes del Garona, en la parte más baja del fondo del valle, corresponden a la llanura aluvial del río. Este primer nivel de terrazas se forma mediante la deposición de materiales en episodios de crecidas.

- Terraza alta: un segundo nivel de terraza aluvial se ha identificado a cotas más altas. Corresponden a una llanura aluvial antigua abandonada debido al encajamiento del cauce.

- Conos de deyección: los afluentes principales del Garona forman conos aluviales en su confluencia con el Garona. Estos elementos geomorfológicos se formaron mediante la deposición de los materiales transportados por los ríos tributarios al disminuir su pendiente de forma relativamente brusca. Se han distinguido dos generaciones de conos, unos antiguos de grandes dimensiones y otros menores sobre los anteriores, cuya formación es más reciente.

- Incisión fluvial: en algunos casos, las formas de deposición (terrazas y conos de deyección) están fuertemente erosionadas debido a la incisión continuada del río.

6.2. Análisis de las formas geomorfológicas

La descripción de las formas geomorfológicas y sus características relevantes permite interpretar la evolución geomorfológica de la zona de estudio. La realización de perfiles transversales a lo largo del río permite obtener información de los diferentes elementos geomorfológicos. El anexo IV incluye cortes transversales al río Garona en diversos puntos.

El tramo del río Garona analizado tiene un desnivel de 207 m a lo largo de 8,3 km, con lo que su pendiente media es de 2,6 %. Sin embargo, la pendiente no es uniforme durante este recorrido, como se observa en el perfil longitudinal (Fig. 7). En cuanto a la anchura del cauce, también varía, encontrando tramos más estrechos en las zonas más encajadas. En general, las zonas en las que el cauce de Garona es más estrecho corresponde a tramos de mayor pendiente y un cauce más ancho coincide con las zonas de disminución de la pendiente. De todas formas, la morfología actual del cauce

está en algunos tramos antrópicamente modificada, especialmente en las zonas urbanas, en la que el cauce está delimitado por canalizaciones o muros de escollera. En cuanto a los tributarios, tienen una pendiente más pronunciada que el río principal (Fig. 19 y Fig. 20).

Las zonas de antiguo cauce se caracterizan por estar a una cota algo mayor que el curso principal del Garona pero menor que la terraza aluvial baja. Ocupa zonas relativamente llanas situadas a una altura de entre 0 y 5 m respecto al curso del río, aunque generalmente se encuentra a una altura menor a 3 m (Fig. 8).

Se pueden diferenciar dos niveles de terrazas aluviales. Estos dos niveles de terrazas bajas y altas corresponden a un mismo sistema de terrazas del Cuaternario. Por un lado, el nivel bajo corresponde a la llanura aluvial del Holoceno reciente, la cual no es continua a lo largo del curso del Garona. Las zonas de terraza baja se encuentran de forma discontinua a ambos márgenes de río y generalmente enlazan con el cauce principal o la zona de antiguo cauce, a excepción de las terrazas bajas de la zona de Casarilh y Escunhau. Estas zonas de llanura aluvial se sitúan a una cota de 3-10 m sobre el canal actual del Garona (Fig. 8). Por otro lado, se observan restos de un segundo nivel de terraza del Holoceno a mayor altura que las terrazas anteriormente descritas, que corresponde a una antigua llanura aluvial del río abandonada debido al encajamiento de éste. Estos niveles planos se encuentran a una cota de 15-20 m sobre el río. Sólo se observan dos zonas de terraza alta en el área de estudio, una en Casarilh y Escunhau, y la otra antes de llegar a Betrén (Fig. 9). La terraza de Casarilh-Escunhau se ha identificado en base a la fotointerpretación de 1956, pero no se ha identificado en campo. Esta zona de terraza alta enlaza en su mayor parte con el nivel de terraza baja o llanura aluvial. En cuanto a la terraza aluvial situada al este de Betrén, no está unida al cauce ya que esta incidida por la dinámica fluvial.

Los conos de deyección se encuentran en las confluencias de los ríos tributarios con el Garona, en el cambio de pendiente de la red fluvial. Tienen una morfología convexa en corte transversal y/o longitudinal. En algunos casos de la parte alta y media de la zona de estudio, se

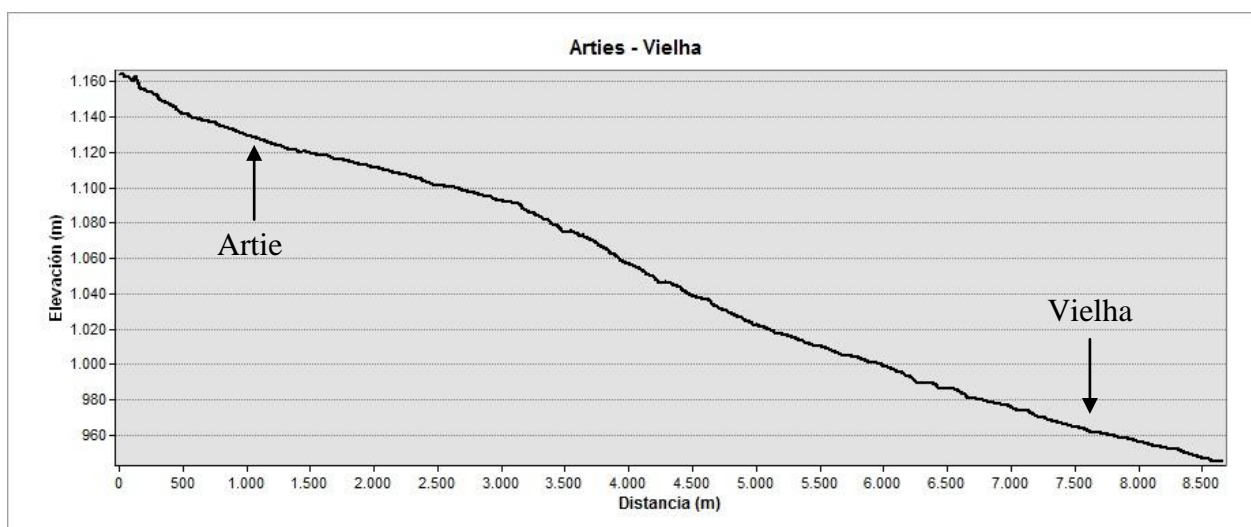


Figura 7. Perfil longitudinal del río Garona desde la estación de aforo a la entrada de Arties hasta el polígono a la salida de Vielha.

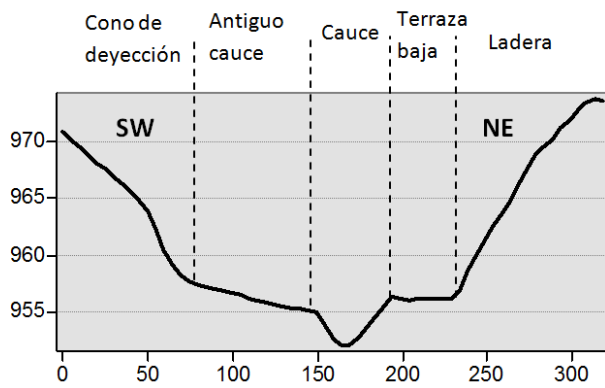


Figura 8. Perfil transversal del Garona a la altura del puente de la carretera N-230.

distinguen dos generaciones de conos aluviales, con un pequeño cono más reciente encajado en el cono antiguo de mayores dimensiones. Es decir, el torrente se incide en el cono antiguo y genera aguas abajo un cono más reciente. Esta característica solamente se ha identificado en tres confluencias del margen derecho del Garona (barranco de Artigues, barranco de Salider y barranco de Cal) y en una del margen izquierdo (barranco de Cal). En la parte baja del área estudiada (Escunhau, Betrén y Vielha) no se han identificado dos generaciones de conos, ni tampoco en el cono del Valarties, sobre el cual se sitúa el municipio de Arties, aunque éste se halla erosionado en su parte de más aguas abajo. En cuanto a la relación espacial de los conos con las terrazas bajas y cauce, se observan importantes diferencias a lo largo del tramo analizado. Por un lado, en la parte alta y media (entre Arties y Casarilh), los conos de 1º generación no están unidos al cauce ni a las terrazas, pues muestran una importante erosión en su parte distal, a excepción del cono del Valarties (margen izquierdo); mientras que los conos de 2º generación tienden a enlazar con una zona de cauce o de llanura aluvial, excepto en el caso del barranco de Cal, el cual muestra una importante erosión en la zona de pie del cono. Por otro lado, en la parte baja (entre Casarilh y Vielha), los grandes conos de deyección generalmente enlazan con el cauce o la terraza baja, excepto el tramo entre Escunhau y Betrén en el que el río está más encajado.

Por último, hay zonas en las que destaca la incisión fluvial al pie de algunos elementos geomorfológicos. Esta incisión se observa especialmente en los conos antiguos de la parte alta y media (e.g. barranco de Artigues, barranco de Salider), aunque también en los conos y terraza alta del tramo entre Escunhau y Betrén. El valor de los escarpes varía entre 15 y 35 m dependiendo del caso, aunque cabe destacar que en general la altura de los escarpes es mayor en el margen derecho del Garona que en el izquierdo (Fig. 16).

7. Estudio del riesgo residual

La evaluación del riesgo por inundaciones de una zona consiste en la integración de los mapas obtenidos del análisis de peligrosidad, vulnerabilidad y exposición. Sin embargo, la metodología varía dependiendo del contexto de la zona de estudio.

Según Mazzorana *et al.* (2013), en el caso de zonas de montaña, es necesaria la caracterización de muchos posibles

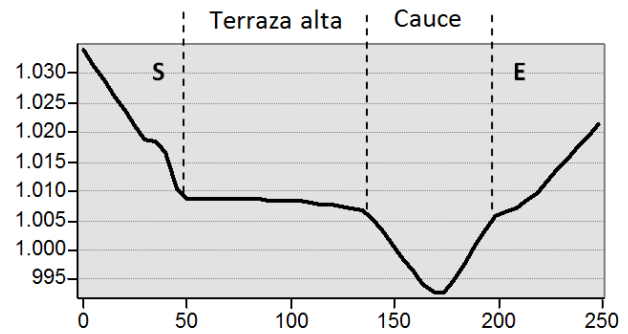


Figura 9. Perfil transversal del Garona a la entrada de Betrén.

procesos, así como la consideración de las cadenas causa-efecto. En estos contextos, es importante tener en cuenta las variaciones temporales y espaciales, como el tipo de flujo, ubicación y magnitud del cauce (e.g. zonas de erosión, agradación, incisión), y la distribución espacial de la inundación. Otros factores a considerar son las laderas inestables (e.g. volumen de potencial del deslizamiento y relación con cambios en llanuras y terrazas aluviales), confluencias (e.g. cambios de pendiente y aporte de sedimentos), puntos críticos, carga sólida, cambios en el uso del suelo, roturas, obstrucciones, avulsiones y localización de áreas urbanizadas. La integración de todos estos procesos es necesaria para un correcto análisis, gestión y mitigación del riesgo de inundación para ríos y torrentes de zonas montañosas, evitando la visión tradicional ingenieril.

El área estudiada se encuentra en un contexto de alta montaña en el que múltiples variables condicionan y controlan los efectos de las avenidas. Uno de los factores más importantes son los cambios temporales del sistema fluvial natural, debidos tanto a la evolución natural del río como a las actuaciones antrópicas. El estudio del riesgo residual es la evaluación cualitativa del riesgo de inundación que aún existe después de que se hayan tomado las medidas de defensa. En el tramo del río Garona entre Arties y Vielha, este análisis se realiza mediante la relación entre la geomorfología, la cartografía del cauce previamente a la riada y los efectos producidos por la avenida.

7.1. Reconstrucción de los efectos

Los efectos provocados por la avenida son de diversos orígenes y tipología. Los efectos geomorfológicos registrados ocurren en zonas donde la peligrosidad es conocida y previsible (Oller *et al.*, 2013). Según el informe preliminar del IGC, se pueden distinguir efectos en el cauce fluvial, zonas erosivas y depósitos de desbordamiento. Los efectos y elementos en el cauce son los cambios en el trazado del río (diferencias entre el trazado actual y el anterior a la avenida), límite de la zona inundada, zonas de ensanchamiento y la dirección de los flujos secundarios. Las zonas erosivas pueden corresponder a cicatrices de socavación, movimientos de ladera o zonas erosionadas o modificadas. Por último, en cuanto a los efectos de deposición, se pueden encontrar zonas con depósitos

fluviales de diferentes granulometrías y zonas o puntos de acumulación de evidencias efímeras (e.g. hierbas y troncos).

Mediante la observación y análisis de los efectos de la avenida se identifican las principales zonas de peligro y el impacto de los cambios y actuaciones en el cauce en el riesgo de inundación.

7.1.1. Cartografía de los efectos

Se han cartografiado los efectos registrados en el fondo de valle del río Garona durante el episodio del 18 de junio de 2013 entre Arties y Vielha, sin considerar los efectos en las cuencas de los tributarios, en las laderas u otros fenómenos geológicos asociados.

El anexo II incluye la cartografía de los efectos completa, realizada en base a las ortofotos de la inundación (IGC) y el trabajo de campo. La figura 10 es un ejemplo de esta cartografía. Los elementos representados son:

- Red de drenaje principal: el cauce principal del Garona durante la avenida y el de los tributarios principales. El cauce del Garona se ha delimitado como la zona de mayor circulación de agua.

- Zonas de erosión: se indican los tramos del Garona en el que los márgenes han sido erosionados durante la riada. No se han cartografiado las erosiones anteriores, sólo las provocada por el episodio de junio de 2013.

- Zonas de acumulación: corresponden a las áreas de deposición importante de materiales transportados por el agua durante la riada. La tipología y granulometría del material depositado en las zonas de acumulación no se ha diferenciado, pues en muchas partes las evidencias se han perdido con los trabajos de reconstrucción.

- Zonas inundadas (reconstrucción en base a la ortofoto del ICC de la inundación, informe preliminar del IGC, trabajo de campo, cartografía geomorfológica y testimonios): el caudal del río inundo áreas adyacentes al cauce principal. Estas zonas corresponden tanto a zonas de ensanchamiento del cauce principal como a zonas de desbordamiento.

- Líneas de flujo preferente: en algunas zonas de inundación se observan líneas de circulación, indicando la dirección del agua en las zonas inundadas.

- Cono con actividad: a lo largo del tramo del

Garona estudiado, se ha identificado un cono de deyección (barranco de Salider) que tuvo actividad durante el episodio. Corresponde a la parte distal del cono.

7.1.2. Análisis de los principales efectos

El estudio cuantitativo de los efectos geomorfológicos principales permite valorar la magnitud e importancia relativa de cada uno de ellos, para una posterior interpretación de su relación con la dinámica fluvial de encajamiento.

El curso del río Garona durante la avenida presenta dos características importantes. Una es el ensanchamiento generalizado del cauce mediante la erosión de los márgenes. La otra es el fenómeno de avulsión registrado en algunas zonas, ya que hay partes en las que el Garona modifica la trayectoria que tenía previa a la avenida y toma un camino diferente. Un claro ejemplo de este cambio del curso del río es el Garona a la salida de Arties, en donde el río erosiona los materiales de la terraza aluvial baja e invade el antiguo cauce del río Valarties (Fig. 13).

Uno de los efectos más devastadores fue la socavación fluvial a lo largo del curso del río. La erosión produjo graves daños en las zonas urbanas, especialmente en la población de Arties (Fig. 11). Gran parte de los márgenes del Garona fueron fuertemente erosionados en la riada del 2013, así como los márgenes del río Valarties en la zona de confluencia. Para el análisis del total de los márgenes erosionados, se han tenido en cuenta el Garona y el último tramo del Valarties. La suma de la longitud de las zonas erosionadas corresponde al 44,3% del tramo estudiado (Fig. 12), lo cual indica que la erosión es un efecto de gran magnitud. Sin embargo, este dato es un valor mínimo, ya que hay zonas que la presencia de los árboles de ribera impide visibilidad para detectar la erosión en la ortofoto y otras que no eran accesibles en el campo. Respecto a la altura del escarpe de erosión, generalmente es menor a un metro, aunque en algunos casos puede llegar a los 10 m de altura.

Las zonas de acumulación son áreas de deposición de arcillas, arenas, gravas, bloques y/o madera transportada por el Garona y tributarios. La tendencia a la sedimentación se da por una disminución de la velocidad de la corriente, lo que corresponde con zonas de disminución de pendiente y/o

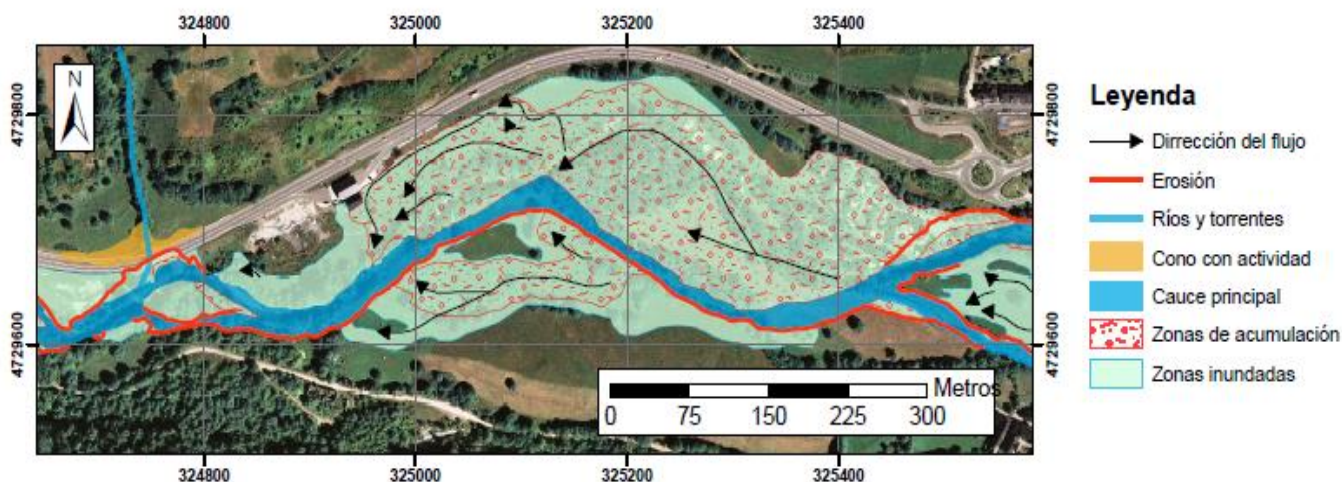


Figura 10. Cartografía de los efectos de la avenida de 2013 a la salida de Arties, sobre la ortofoto de 25 cm del ICC. Se muestra la zona del camping Era Yerla y el cono reactivado del barranco de Salider.

confluencia (Fig. 20). La mayor acumulación se da en la zona del camping Era Yerla de Arties, en el margen derecho del Garona. Esta zona ocupa un área de 55026 m², que corresponde a un 50,3% del total de las zonas de acumulación en el área de estudio (Fig. 12). Allí, se han observado espesores de arenas, gravas y bloques fluviales superiores a 2 m.

Otro de los efectos principales fueron las áreas adyacentes al cauce principal que fueron inundadas, por ejemplo el núcleo urbano de Arties y el polígono de Vielha (Fig. 14). Este fenómeno se produce tanto debido al desbordamiento del río como al ensanchamiento del lecho por la socavación de los márgenes, que aumenta el área potencialmente inundable. En el tramo analizado, se ha calculado una extensión inundada de 328948 m² fuera de los cursos fluviales, la cual es algo más que el doble del área ocupada por el cauce principal (Fig. 12). En total, más de 47.000 m² de la zona de estudio fueron inundados durante la avenida. Sin embargo, este valor es el área mínima inundada, detectada en las ortofotos de la inundación de IGC y los testimonios recogidos.

El último efecto geomorfológico identificado es la actividad en el cono de deyección de la cuenca del barranco de Salider. Debido a la presencia de formaciones superficiales y depósitos de alteración en la zona de salida, durante el evento se registraron flujos torrenciales (debris flow) adyacentes al Garona. Este transporte de material produjo la reactivación del cono durante la riada y en la zona confluencia de este torrente se produjo una acumulación, por la alta carga de sólidos del barranco de Salider. Los depósitos se componen de bloques y gravas paleozoicas de alto rodamiento, con imbricación y tamaño centrimétrico-decimétrico, en una matriz lutítica-arenosa de color gris,



Figura 11. Socavación fluvial en un edificio del margen derecho a la salida de Arties (IGC, 20/07/2013).

cuya proporción bloques-matriz es del 50% (IGC, 2013). La parte activa del cono durante el evento ocupó un área de 1718 m², que corresponde al 3,5% del área total del cono aluvial más reciente (Fig. 12).

Con todo esto, podemos determinar que los procesos y efectos de la avenida de mayor importancia son la avulsión (formación de un nuevo lecho fluvial), las socavaciones y los procesos de inundación. De todos modos, cabe destacar que los procesos erosivos tienen una importancia relativa mayor que los de desbordamiento.

7.1.3. Zonas de mayor afectación y puntos críticos

Las afectaciones en diferentes zonas del área de estudio fueron de diferente magnitud y causa. Las zonas que sufrieron más daños se localizan en zonas urbanas o puntos del cauce con alguna estructura antrópica y pertenecen a edificios, campings, carreteras, calles y estructuras hidráulicas (e.g. puentes). El anexo VI incluye fotografías de estas zonas del día del evento o de algunos días después. Las zonas y estructuras de mayor afectación y sus causas fueron las siguientes:

- Presa de Arties: la acumulación de agua y posterior rotura del terraplén del margen izquierdo provocaron un aumento del caudal aguas abajo. La falta de actuación de emergencia para la apertura de los aliviaderos agravó los daños (Ortuño, 2013).
- Municipio de Arties: se dieron fenómenos de erosión y desbordamiento que afectaron a múltiples edificios del pueblo, y el centro urbano quedó completamente inundado.
- Camping Era Yerla (Arties): el desbordamiento del Garona inundó toda la llanura del camping y depositó muchos materiales (Fig. 13).
- C-28 a la altura del barranco de Salider: el bloqueo del tramo subterráneo del torrente produjo una acumulación de gravas que afectó a la carretera. Además, la socavación fluvial erosionó parte de la C-28 en este punto, tanto la del barranco de Salider como la provocada por el Garona.
- Depuradora de Naut Aran: la zona quedó inundada.
- Puente de Garós: en el meandro del Garona a la salida de Garós se produjo una importante incisión lateral en el margen izquierdo antes del último puente, afectando tanto la carretera como los cimientos.
- Torres eléctricas de Casarilh: antes de llegar a Casarilh el Garona tiene un meandro importante y en el margen izquierdo la erosión fluvial se llevó dos torres eléctricas.

Efecto	Longitud/Área	Magnitud afectación
Erosión lateral	Total márgenes	18490 m
	Márgenes erosión	8198 m
Zonas de acumulación	Total	109378 m ²
	Camping Era Yerla	55026 m ²
Zonas inundadas	Cauce principal	147366 m ²
	Zonas inundadas	328948 m ²
Actividad en cono	Cono 2ª generación	48874 m ²
	Cono reactivado	1817 m ²

Figura 12. Tabla cuantitativa de los principales efectos registrados en el tramo estudiado.

- **Puente de Casarilh:** debido a la elevada carga sólida transportada por el río se produjo la obturación y colmatación del puente.

- **Puente de Escunhau:** el importante caudal y las dimensiones insuficientes del puente fueron las causas de la rotura.

- **Puente de Vielha:** a la entrada de Vielha, el curso del Garona tiene un meandro en cuyo margen derecho el agua erosionó parte de la carretera.

- **Polígono de Vielha:** el desbordamiento del río inundó la zona del polígono a la salida de Vielha (Fig. 14), debido en parte a que el tramo deja de estar canalizado.

La combinación entre la cartografía de los efectos de la inundación, el conocimiento de las zonas más afectadas y las observaciones de campo, permite identificar los puntos críticos de mayor riesgo a lo largo del Garona entre Arties y Vielha. Además, es necesario tener en cuenta el aporte de sedimento y madera en las avenidas. En el anexo V se incluye un mapa de localización y listado de los puntos críticos, con la descripción del riesgo que conlleva cada uno de ellos. La mayoría de ellos corresponden a estructuras hidráulicas, puentes o confluencias.

7.2. Evaluación del riesgo residual

El riesgo residual se valora mediante la comparación de la cartografía geomorfológica a partir de fotografías aéreas de 1956, el cauce previo a la avenida, la cartografía de los efectos de la avenida y el cauce actual del Garona. Todos los mapas comparativos de las zonas de interés se presentan en el anexo III. Estas comparativas permiten relacionar el riesgo de desbordamiento y erosión actual con la dinámica fluvial natural.

A lo largo del cauce principal se produce un fenómeno de erosión lateral y ensanchamiento en la gran mayoría del curso del Garona. Además, los puntos con puentes, presas y canalizaciones son zonas de alto riesgo en los que a la peligrosidad intrínseca se le suma el riesgo inducido (e.g. rotura de presas).

Las zonas de antiguo cauce son áreas de alto riesgo que quedan inundadas durante avenidas importantes. En algunos casos se da una avulsión del cauce (Fig. 13) y éste toma otra trayectoria dentro de la zona de antiguo cauce identificada en las fotos de 1956. Los efectos de erosión son muy frecuentes en estos tramos, debido a la tendencia del río a recuperar su curso antiguo. Además, las mayores acumulaciones se dan en zonas de antiguo cauce, como el caso del camping de Arties. La urbanización (e.g. Vielha) y localización de campings (e.g. Era Yerla) en estas zonas de alta peligrosidad por avenidas relativamente frecuentes (consideradas por varios autores como de $Tr < 50$ años) causa graves daños y pérdidas.

Las llanuras aluviales son en origen zonas de alto riesgo. Muchas de las terrazas bajas del Garona en este tramo son socavadas en su parte más próxima al cauce del río y son parcialmente inundadas (Fig. 14). Sin embargo, la extensión del área inundada en la avenida del 2013 es menor que la zona de terraza (e.g. polígono de Vielha), indicando que la inundación completa de estos elementos geomorfológicos corresponde actualmente a riadas de mayor magnitud que la estudiada. En otros casos, la zona de terraza no llega a ser

afectada, como en el caso de Casarilh, debido al encajamiento del río. Por último, en el caso de Vielha, las terrazas no son apenas inundadas debido a la canalización del río, impidiendo los fenómenos erosión y desbordamiento naturales. Por lo tanto, es evidente que las zonas que geomorfológicamente pertenecen a niveles de terraza baja son de peligrosidad alta pero que la inundación completa de estas zonas no es común para riadas como la estudiada.

El segundo nivel de terrazas aluviales no presenta riesgo de inundación aparente. Debido a su altura de 15-20 m sobre el lecho del río, no es una zona de peligrosidad ni siquiera para crecidas extremas.

En cuanto a los conos de deyección, por su origen, suelen ser zonas de riesgo. Sin embargo, en este contexto, sería demasiado alarmista asignar una peligrosidad alta a todos los conos de deyección. Teniendo en cuenta los efectos del Garona en la avenida de 2013 en estos elementos, se pueden observar diferencias en la inundabilidad de estas zonas dependiendo de su geomorfología.

- Por un lado, en los casos en los que los conos de 1ª generación tienen conos más recientes de 2ª generación encajados, los de 1ª generación no son funcionales, por lo que solamente los de 2ª generación son inundables (e.g. barranco de Artigues, barranco de Salider, barranco de Cal y barranco de Bargadera), mientras que los conos antiguos de grandes dimensiones en general no son afectados. Es decir, el peligro de inundación queda restringido a los conos de 2ª generación. En estos conos encajados, en eventos extremos predomina la socavación del río al pie de los conos y la consiguiente inundación de una parte de esta zona distal debido al ensanchamiento del cauce (Fig. 13). En zonas donde el río va más encajado la magnitud de la erosión y el ensanchamiento del cauce son menores, como en los meandros antes de llegar a Casarilh, aunque también se erosiona la parte distal de los conos de 2ª generación. Por último, los conos de 2ª generación pueden ser reactivados en eventos extremos debido a procesos geomorfológicos de los tributarios. En el caso del barranco de Salider, el transporte de material y la acumulación de este cerca de la confluencia es un efecto a considerar, ya que la carretera C-28 es un elemento expuesto en esta parte distal del cono.

- Por otro lado, en los casos en los que los conos de 1ª generación no tienen conos encajados, los grandes conos pueden ser funcionales o no. En la zona de estudio, hay conos de 1ª generación que no son funcionales porque tanto el torrente como el Garona van muy encajados. (e.g. torrente de Escunhau, torrente de Betrán). Por tanto, en estos casos los materiales aportados por el torrente serán directamente incorporados al Garona y no serán afectados por avenidas de periodos de retorno de 50 años.

- Por último, hay algunos conos de 1ª generación, que aunque no tengan conos encajados, enlazan con el Garona y son funcionales si el torrente no va muy encajado (e.g. río Valarties, río Nere, barranco de Casau). En estos últimos casos, los conos de 1ª generación en su parte distal son parcialmente inundados y/o levemente erosionados por el Garona y debido a la acción del tributario, las zonas adyacentes (e.g. Arties y Vielha) presentan un alto riesgo para avenidas de periodos de retorno inferiores a 50 años. Además, las canalizaciones de Arties y Vielha impiden en

gran parte la tendencia natural erosiva, provocando un aumento del riesgo aguas abajo (Fig. 14). Estos torrentes transportan una gran cantidad de material, que se sedimenta en la confluencia con el Garona. Las actuaciones antrópicas como puentes y canalizaciones provocan un aumento del riesgo en estas zonas anteriores a la confluencia. Por ejemplo, en el año 1963 el río Nere desbordó a la altura del pueblo, inundando gran parte de la zona urbana.

En conclusión, a la inundabilidad natural se le suma la actividad humana, la cual provoca efectos hidrológicos y geomorfológicos. Por lo tanto, el riesgo residual asociado a la ocupación de zonas inundables, la modificación del río y la gestión del río explica en gran parte los efectos y daños provocados por la avenida.

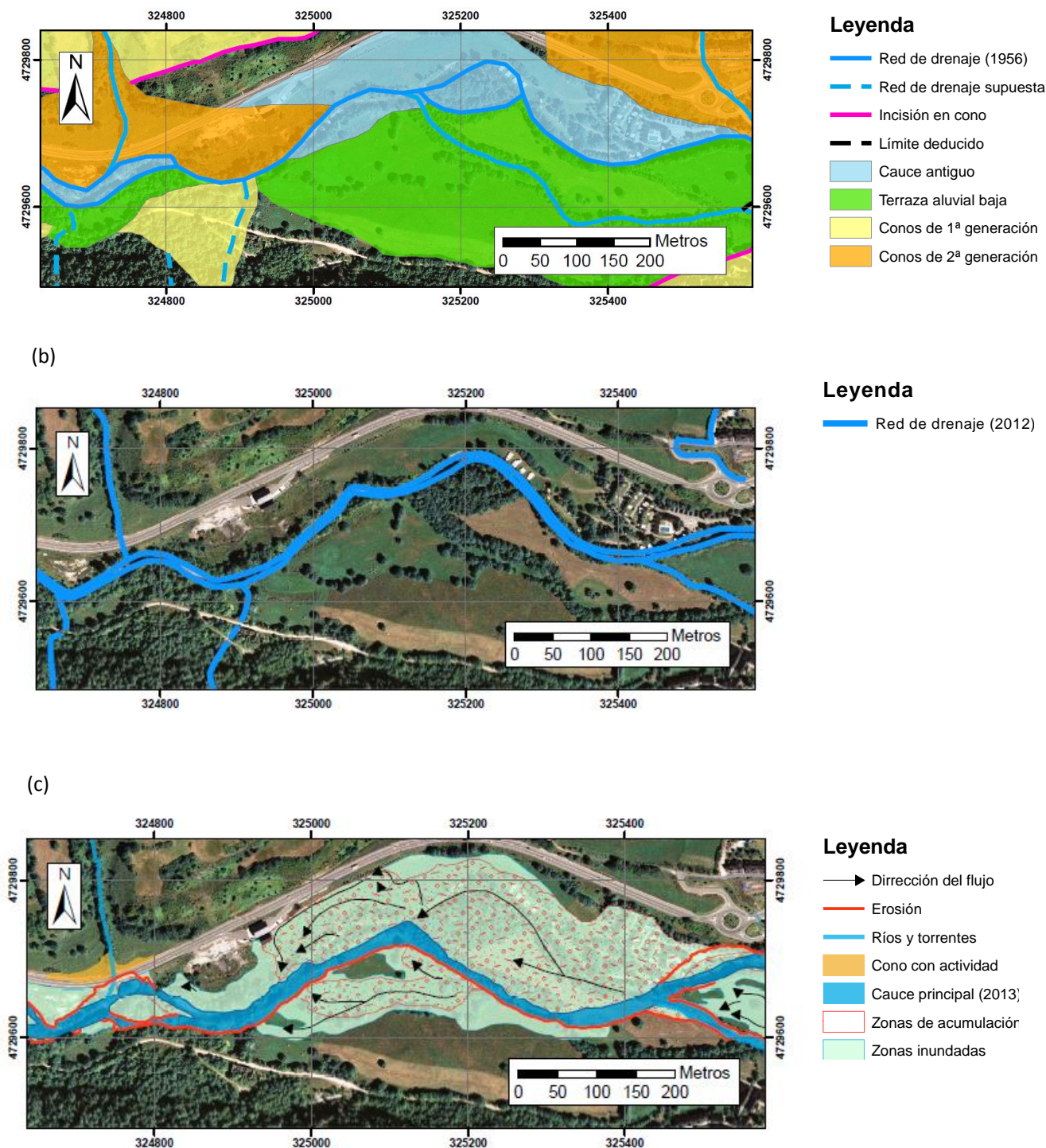


Figura 13. Mapas comparativos de la salida de Arties, desde el camping hasta el cono del barranco de Salider, sobre la ortofoto de 25 cm del ICC. (a) Cartografía geomorfológica (b) Cursos fluviales antes de la inundación (c) Cartografía de los efectos de la inundación.

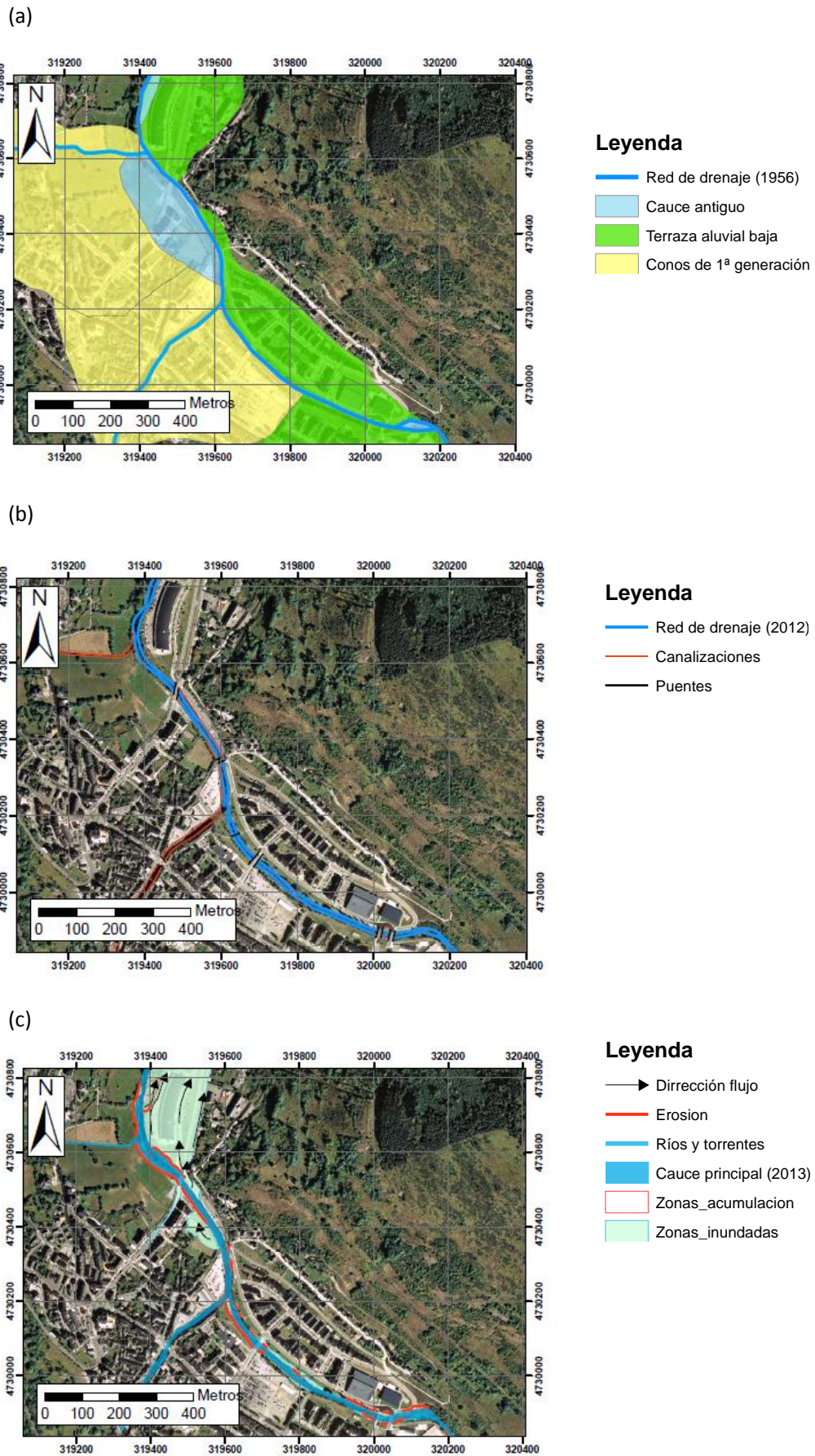


Figura 14. Mapas comparativos de Vielha, desde el palau de Gel hasta el polígono, sobre la ortofoto de 25 cm del ICGC. (a) Cartografía geomorfológica (b) Cursos fluviales antes de la inundación (c) Cartografía de los efectos de la inundación.

8. Dinámica del Garona

Previos estudios muestran evidencias de una evidente tendencia a la incisión del Garona. La tesina de Marta García Silvestre (2014) presenta importantes indicadores de encajamiento en la zona de Era Bordeta-Les. Así mismo, el informe del IGC registra unos efectos de erosión que predominan ante el desbordamiento. Sumado a la cartografía de efectos de la avenida de 2013 presentada en el presente trabajo, se plantea una hipótesis inicial de tendencia al encajamiento del río en su propio lecho.

Partiendo de esta idea, se han analizado los indicadores encontrados en el tramo entre Arties y Vielha, y se han calculado tasas de encajamiento en algunos puntos, con el fin de entender la dinámica del Garona desde el fin de la última glaciación hasta la actualidad.

8.1. Indicadores de encajamiento y estudio del encajamiento diferencial

En la zona de estudio se han identificado múltiples indicadores de erosión, socavación o incisión, tanto en elementos geomorfológicos (ver apartado 6, “Análisis geomorfológico”) como erosiones a nivel local en estructuras antrópicas. En el anexo IV se incluyen fotografías de algunos de estos puntos.

- Presencia de dos generaciones de conos: la cartografía geomorfológica realizada muestra la presencia de conos de deyección posteriores superpuestos a los más antiguos (Fig. 6). La formación de estos conos más recientes de segunda generación puede indicar el abandono de los conos de grandes dimensiones y la generación de otros en la parte distal, debido al cambio en la posición del cauce producido por el encajamiento del río y el consiguiente encajamiento de los torrentes. Sin embargo, además de la combinación entre el encajamiento del río y de los torrentes, influye la disminución del aporte de material de los tributarios.

- Incisión en conos de deyección y terrazas: algunos elementos geomorfológicos tienen un escarpe métrico a decamétrico formado por la incisión fluvial. Por un lado, se han identificado conos de deyección incididos en su parte más distal. La altura de estos escarpes respecto al lecho fluvial del Garona es de hasta 30 m y generalmente es mayor en la parte alta y margen derecho de la zona de estudio (Fig. 16). Por otro lado, la terraza alta situada antes de Betrán está fuertemente incidida por el río, con un escarpe de 15-20 m. En esta zona se interpreta que el río se ha ido encajando hacia el N, ya que se erosionó la parte distal del cono de Escunhau, posteriormente se formó la terraza y finalmente río se ha ido encajando cortando esta terraza aluvial.

- Encajamiento en substrato rocoso: en varias zonas se ha identificado substrato Paleozoico es los márgenes del cauce fluvial, lo cual indica que la capacidad erosiva del río es muy alta. En el caso del tramo del Garona a la altura de la confluencia con el torrente de Salider, en el margen izquierdo aflora el Paleozoico, mientras que en el margen derecho se encuentran materiales fluviales con formación de terrazas. A la altura de Betrán el Garona también está encajado en el basamento (Fig. 19). En el margen izquierdo

el río ha erosionado todo el espesor de los depósitos del cono de Betrán hasta llegar al Paleozoico y seguir encajándose en las pizarras y esquistos del substrato, generando un escarpe de hasta 20 m.

- Erosión lateral de los márgenes: la tendencia erosiva predomina claramente sobre tendencia a la acumulación. De hecho, a lo largo de prácticamente todo el tramo estudiado los márgenes se encuentran socavados (Fig. 10). Un claro ejemplo son los de erosión de la avenida de 2013, cuya magnitud generó escarpes superiores a los 10 m, aunque en su mayoría las incisiones son menores a 5 m.

- Socavación y descalzamiento de puentes y diques de canalizaciones: las actuaciones en el cauce son unos buenos indicadores del encajamiento del río en su lecho. En los tramos canalizados se han observado puntos en los que el Garona se ha encajado hasta llegar a los cimientos de los diques laterales. En algunos puentes que cruzan el cauce las columnas están descalzadas. Uno de estos puentes es el de Garós, en el que el río ha erosionado casi 2 m desde su construcción, provocando el descalzamiento de la base y una erosión de 1,5 m de los materiales fluviales. Por ello, se reconstruyó el puente con una nueva cimentación.

- Erosión en estructuras hidráulicas: las estaciones de aforo y presas son zonas en las que se observan incisiones importantes, especialmente a la salida. Esto puede ser interpretado como erosión de “aguas claras” con incorporación de carga sólida en el agua limpia (flujo de velocidad menor a la crítica que no tiene suficiente fuerza para arrastrar partículas pero que genera erosión local al encontrarse con algún obstáculo) y por turbulencias generadas aguas debajo de la infraestructura. De todos modos, aguas arriba también suele haber incisiones, aunque de menores dimensiones. En el Garona se han identificado puntos en los que la erosión del río es de tal magnitud que llegan a aparecer los materiales de tills glaciares subyacentes a las gravas fluviales. Las estaciones de aforo son zonas en las que el lecho del río está impermeabilizado, impidiendo la dinámica natural de encajamiento, y por ello, a la salida el río vuelve a poder erosionar los materiales fluviales. A la salida de la estación de aforo del tramo inferior del Valarties se ha medido una erosión de 3,5 m y afloran depósitos glaciares. En esta zona la dinámica fluvial ha erosionado todo el espesor de depósitos fluviales y parte de los tills. En cuanto a las presas, también provocan la impermeabilización del cauce. En la presa de Arties (Fig. 15), tanto en el margen derecho como en el izquierdo se han generado incisiones de 0,4-1 m (mayor incisión en el margen izquierdo) desde la



Figura 15. Erosión fluvial a la salida de la presa situada aguas arriba de Arties.

construcción de la plataforma cementada situada tras la presa, así como el descalzamiento del dique lateral. En esta zona también se encuentran tills glaciares. Estos últimos materiales se caracterizan por tener una estructura caótica compuesta por clastos heterométricos (0,1-50 cm) polimícticos (granitos, esquistos,...) en una matriz arcillosa muy fina (<1mm) de alta compactación.

Sin embargo, la magnitud de los datos de los diferentes indicadores de erosión vertical no tiene una distribución espacial uniforme. A lo largo del Garona entre Arties y Vielha se observan importantes diferencias, aunque en general los tramos de mayor pendiente tienen un mayor encajamiento (e.g. tramo después de Garós) (Fig. 19) y las zonas de disminución de pendiente muestran una tendencia a la acumulación (e.g. salida de Arties) (Fig. 20).

Una de las evidencias de este encajamiento diferencial son las incisiones en los conos de deyección de los afluentes principales (Fig. 16). Los mayores escarpes se han generado en el margen derecho de la parte alta de la zona de estudio (e.g. 15-20 m en el cono de Artigues y 25-35 m en el cono de Salider). En los conos del margen izquierdo del Garona los valores de incisiones son menores y también se ha detectado que los escarpes son cada vez menores aguas abajo (e.g. 20-25 m en el cono de Bargadera y 15 m en el cono de Betrán). De este modo, en la parte alta hay indicios claros de encajamiento, en las terrazas altas también, en la primera parte intermedia no y en la parte baja los conos tampoco están erosionados. Sin embargo, a la hora de interpretar estos datos hay que tener cuidado, ya que las causas de estas diferencias pueden depender de diversos factores, por ejemplo del espesor y morfología del cono aluvial, la litología de los materiales del lecho fluvial y/o la cantidad de material disponible en cada cuenca para ser transportado y depositado en cada cono.

Los conos cortados de la zona media y alta del tramo estudiado han sido incididos por el encajamiento del Garona y actualmente no son activos. De todos modos, en muchos de ellos se han generado pequeños conos más recientes que tienden a enlazar con la zona de cauce. En estos casos, la inactividad de los primeros conos y formación de los segundos puede explicarse tanto por el encajamiento del río

como por insuficiencia de aporte de material para mantenerse activos. En cuanto a la zona baja, los conos de deyección de 1ª generación tienden a estar unidos con el cauce o con un nivel de terraza baja, como es el caso de Vielha. Esta morfología se puede interpretar como un tramo de menor encajamiento fluvial o una predominancia de los aportes de material sobre la tasa de encajamiento, provocando una compensación del encajamiento mediante acumulación y un recubrimiento total de los conos. En estos casos, los conos de 1ª generación no funcionaron en 2013 pero algunos de ellos tuvieron actividad en otras crecidas históricas (e.g. río Nere en 1982).

Entre estos claros indicadores de encajamiento, la terraza alta de Betrán es uno de los más significativos. Esta erosión indica que el Garona se ha encajado 15-20 m desde la formación de esta terraza.

Por lo tanto, las causas de esta incisión diferencial son difíciles de concretar y sería necesario llevar a cabo estudios más precisos de la zona. Entre las posibles causas que podrían explicar los diferentes valores de incisiones están la geología (litología, estructuras tectónicas), aporte o disponibilidad de material, dimensiones de las cuencas hidrográficas de los afluentes,...

8.2. Evolución geomorfológica post-glacial

Toda esta información nos permite hacer una aproximación a la evolución del Garona desde que se definió la red de drenaje post-glacial hasta la actualidad. La relación entre el clima y la evolución de los sistemas fluviales ha sido objetivo de múltiples estudios, en los cuales se analiza el impacto de los cambios climáticos en la actividad y dinámica de los sistemas geomorfológicos y sedimentológicos en el tiempo.

La teoría climática tradicional de comienzos del siglo XX defendía una relación directa entre los periodos glaciales y la formación de terrazas (periodos glaciales de sedimentación fluvial), así como la relación entre periodos interglaciales y la incisión del río (periodos interglaciales de encajamiento fluvial). En contra de esta teoría clásica, diversos argumentos han corroborado que la respuesta fluvial

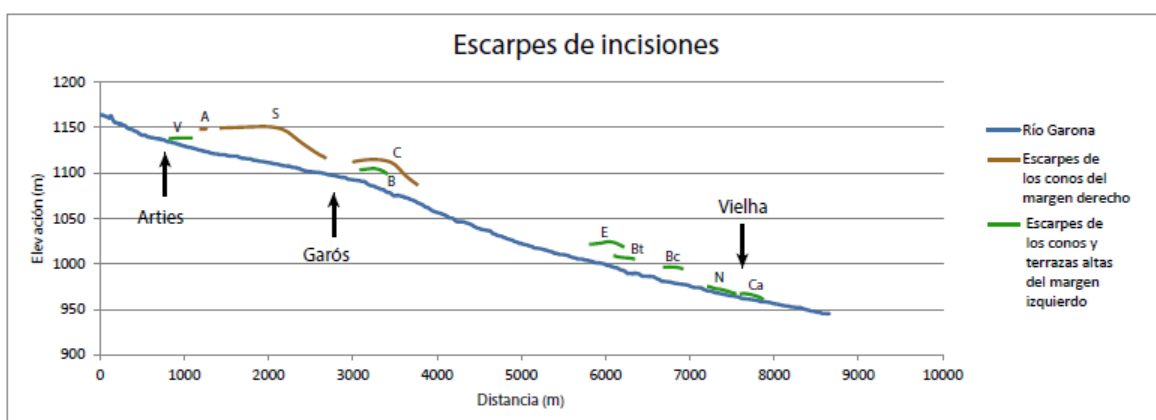


Figura 16. Gráfico de encajamiento diferencial del Garona, con el perfil topográfico del río y la altura de los escarpes generados en conos de 1ª generación y terrazas por la incisión del Garona. Se observan indicios claros de encajamiento del Garona en la parte alta y en la intermedia baja, mientras que en la parte baja no se detecta encajamiento en los elementos geomorfológicos. La terraza alta de Betrán indica un encajamiento de unos 15-20 m. V: cono de Valarties; A: cono de Artigues; S: cono de Salider; B: cono de Bargadera; C: cono de Cal; E: cono de Escunhau; Bt: terraza alta de Betrán; Bc: cono de Betrán; N: cono de Nere; Ca: cono de Casau.

ante los cambios climáticos no es directa ni linear, sino que se trata de una respuesta compleja con cambios morfológicos que no son lineales y una evolución gradual del sistema (Vandenbergue, 1995). De hecho, son necesarios superar ciertos valores de magnitud y duración en las oscilaciones climáticas para que se produzcan cambios en la acción y morfología fluvial (Vandenbergue, 2002), con lo que la escala de tiempo, duración y magnitud de los cambios en el clima controlan la dinámica fluvial. Además, la evolución fluvial no está únicamente controlada por el clima, sino que aparte de los parámetros climáticos (precipitación y nieve), actúan una serie de factores derivados del clima (energía, aporte de sedimento, permafrost y almacenamiento subterráneo), parcialmente dependientes del clima (cobertura vegetal) y no climáticos (características de la cuenca, tiempo de respuesta, valores umbrales, tectónica e influencia antrópica) (Vandenbergue, 2003). Todo esto indica que el papel del clima puede en algunos casos ser mínimo o ausente.

En el caso del valle del Garona, la evolución geomorfológica y dinámica fluvial durante el Cuaternario es el resultado del último periodo glacial del Pleistoceno y el posterior periodo interglacial del Holoceno. En este trabajo se presenta una aproximación a la evolución de la zona de estudio, que ha de ser posteriormente comprobada con futuros estudios detallados. Por ejemplo, estudios de caracterización y cuantificación del balance de sedimento, como el de Brisset *et al.* (2014), permiten identificar periodos de erosión, sedimentación o incisión vertical mediante reconstrucciones paleotopográficas.

Durante la última glaciación del Pleistoceno Superior, en la fase de máximo glacial, el glaciar del Garona ocupaba casi la totalidad del valle, con espesores de hielo superiores a 800 m en la zona de Vielha (Bordonau, 1985). El poder erosivo del glaciar generó una morfología en U y una deposición importante de tills y morrenas glaciares. Con la progresiva retirada del glaciar mediante etapas sucesivas de deglaciación, se fue generando una red de drenaje fluvio-glacial, a la vez que comenzaban los procesos de descompresión y fracturación de laderas. Para conocer cuando se dio la cronología de la fase de deglaciación en la zona de estudio existen varios estudios en lugares cercanos que nos ayudan a acotar esta edad. Según Stange *et al.* (2014), las dataciones de ^{10}Be indican que el lago de Barbazan, situado aguas debajo de la Val d'Aran, quedó descubierto por la retirada del hielo hace unos 21.084 ± 878 años BP, con lo que la deglaciación del área de estudio es más reciente que dicha fecha. Según Bordonau (1985), la retirada del hielo se dio durante el periodo de glaciares de valle de dimensiones reducidas, en el que es probable que el valle principal del tramo estudiado no estuviera cubierto de hielo y los glaciares se situasen en zonas topográficamente más altas. Esta fase de glaciares de valle, según Bordonau (com. pers.) está datado en $13.700 \pm 0,9$ años BP. Por lo tanto, la formación de las primeras terrazas y conos de deyección de primera generación se da en este periodo de tiempo, entre 21.084 y 13.700 años BP aproximadamente.

En una primera fase de vaciado y descarga post-glacial de gran actividad, los ríos transportaban una alta carga de materiales morrénicos con un caudal elevado y se formaron conos aluviales de grandes dimensiones (conos de 1ª

generación) en las confluencias de dichos ríos con el Garona. Tras la formación de esos grandes conos se produjo un periodo de incisión fluvial y el resultado de este fenómeno son los conos de 1ª generación cortados. Posteriormente se formaron las terrazas altas, las cuales enlazan con los conos cortados de 1ª generación. Asimismo, tras la fase inicial de vaciado post-glacial la disponibilidad de material en las cuencas era menor, y por ello la actividad de los torrentes también era menor, con lo que en algunas confluencias se formaron conos de menor tamaño superpuestos sobre los anteriores (conos de 2ª generación). Tras estas fases de acumulación aluvial y coluvial, la red de drenaje tomó una dinámica de agradación de la llanura aluvial. Por tanto, los conos de 2ª generación siempre enlazan con las llanuras aluviales y/o cauces. De este modo, se formaron las terrazas aluviales bajas que vemos ahora y los escarpes de los niveles de terrazas corresponden a fases de incisión predominante, fenómeno que parece predominar actualmente en la cuenca del Garona. En cuanto a los tributarios del Garona, la erosionabilidad de los materiales de las cabeceras y las fuertes pendientes favorecen al encajamiento de los barrancos afluentes laterales (CHEbro, 2008).

Esta evolución post-glacial ha sido propuesta por otros autores en otras zonas. Por ejemplo, Rosique T. (1997) en su estudio de las implicaciones climáticas del Würm la zona sur de los Alpes franceses, propone que tras la retirada de los glaciares se produce un aumento en el detritismo torrencial, así como una tendencia a la incisión vertical de los ríos y la desestabilización de las laderas.

El factor tectónico también influye en la evolución de la zona, debido al levantamiento post-orogénico. El estudio de Ortuño *et al.* (2013) demuestra una paleoaltitud de los depósitos lacustres de El Prüedo inferior a la altitud actual y lo explica con un levantamiento regional de la zona desde hace 11,1 – 8,7 Ma (Mioceno medio) que sigue activo en la actualidad. Además, añade que en los últimos 10 Ma se ha dado una importante exhumación de material de unos 2-3 km. Esta exhumación viene explicada por un lado por el levantamiento regional y por otro lado por la actividad de la Falla Norte de la Maladeta (Fig. 17). De este modo, la erosión y exhumación provocan un levantamiento post-orogénico del Pirineo Central debido a la compensación isostática y Ortuño *et al.* (2013) calcula tasas de levantamiento entre 0,08 y 0,19 mm/año. Los sectores con levantamiento muestran típicamente incisiones fluvio-torrenciales porque no hay tiempo suficiente para los procesos de regularización de laderas (Turu y Peña, 2006). Por lo tanto, el control tectónico (levantamiento) - isostático (efecto rebote) de la zona axial de los Pirineos puede explicar en parte la dinámica de encajamiento de la red de drenaje en el área estudiada.

Además, si situamos nuestra zona de estudio en todo el contexto de la cuenca del río Garona, podemos obtener más explicaciones para la tendencia de encajamiento. Tras la fase compresiva de la orogenia alpina, vino una fase de erosión importante con la consecuente formación de grandes abanicos aluviales en la cuenca de Aquitania, comenzando en el Mioceno tardío y prolongándose hasta el Holoceno (Stange *et al.*, 2014). El perfil longitudinal del Garona

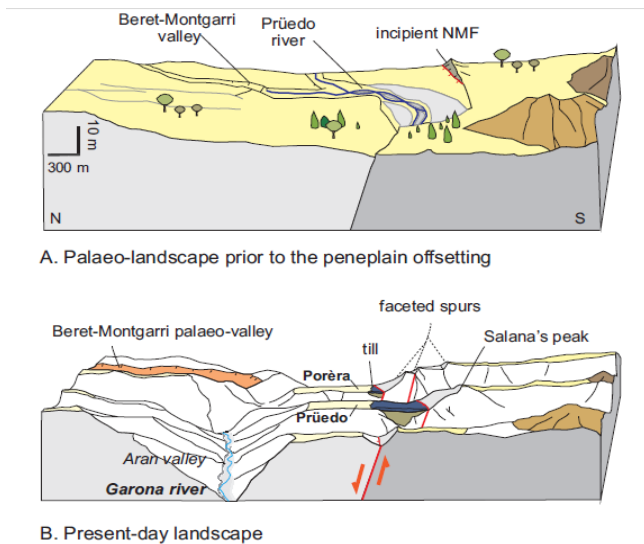


Figura 17. Reconstrucción de la evolución paleogeográfica de la zona. (a) Formación de llanuras pre-glaciales (b) Contexto incisivo post-glacial (Ortuño *et al.* 2013).

muestra una importante disminución de la pendiente aguas abajo y diversas rupturas de pendiente asociadas a estructuras geológicas (fallas) o cambios litológicos. El tramo estudiado se encuentra en la zona de mayor pendiente (Fig. 18), en la cual predominan los procesos erosivos.

A modo de resumen, se puede decir que el retroceso del hielo glaciar da paso a un periodo erosivo intenso con una actividad de carácter torrencial. Por lo tanto, la transición climática (glacial-interglacial) dejó una marca importante, que es la formación de grandes conos de deyección de los afluentes. Posteriormente, a la vez que se da una mejora climática, se pasó de un detritismo torrencial predominante a una disminución del ritmo de sedimentación, con la formación de niveles de terrazas y tendencia a la socavación. Durante el Holoceno la red fluvial está en una fase de incisión vertical de los ríos y torrentes, que se mantiene hasta la actualidad. Ese atrincheramiento de los ríos se explica mediante el control climático (e.g. caudal, aporte de sedimentos) y tectónico (levantamiento) de esta zona del Val d’Aran, aunque otros factores también podrían influir, por

ejemplo, la topografía, las estructuras geológicas y los cambios antrópicos. Eventos extraordinarios como la avenida de junio de 2013 tienen un impacto que representa esta tendencia erosiva predominante.

8.3. Tasas de encajamiento

Se han calculado tasas de encajamiento mediante los valores de incisiones de la cartografía geomorfológica o datos de erosiones obtenidos en el trabajo de campo. Los elementos estudiados son por un lado, la incisión de los conos de deyección y terraza alta y por otro, la erosión en estructuras antrópicas, como puentes y estaciones de aforo.

La cota de los escarpes de terrazas altas, generados por el encajamiento del Garona, sirve para calcular la tasa de encajamiento del río desde la formación de estos elementos geomorfológicos. La terraza alta de Betrén es el dato más representativo, que representa una erosión fluvial de 15-20 m desde su formación hace $21084 \pm 878 - 13700 \pm 0,9$ años BP tras la retirada del hielo en la zona de estudio. Suponiendo un encajamiento continuo, el Garona tiene una tasa de encajamiento de 1,07 mm/año. Si comparamos este dato con la tasa de levantamiento calculada por Ortuño *et al.* (2013) es evidente que el encajamiento fluvial, aunque en parte pueda ser explicado por el rebote isostático de la zona, es de una magnitud mucho mayor que el levantamiento de la zona. Por lo tanto, la dinámica de encajamiento está controlada por otros múltiples factores además del tectónico, como por ejemplo, el clima y la disponibilidad de material.

Unos de los puntos de mayor incisión que se han identificado en la zona de estudio es en la estación de aforo del río Valarties situada al comienzo de la población. Por un lado, aguas abajo de la estación de aforo el Valarties ha incidido 3,5 m desde 1965-1970 (Carlos Farré, com. pers.), con lo que la tasa de erosión local en este punto es de 7,1-1,9 cm/año. Al tratarse de una incisión justo aguas debajo de la estación de aforo, no es una tasa representativa de la dinámica del río pero su valor es suficientemente alto como para considerar que la incisión fluvial es más que importante. Sin embargo, aguas arriba de la instalación también se encuentran incisiones importantes en los muros de escollera

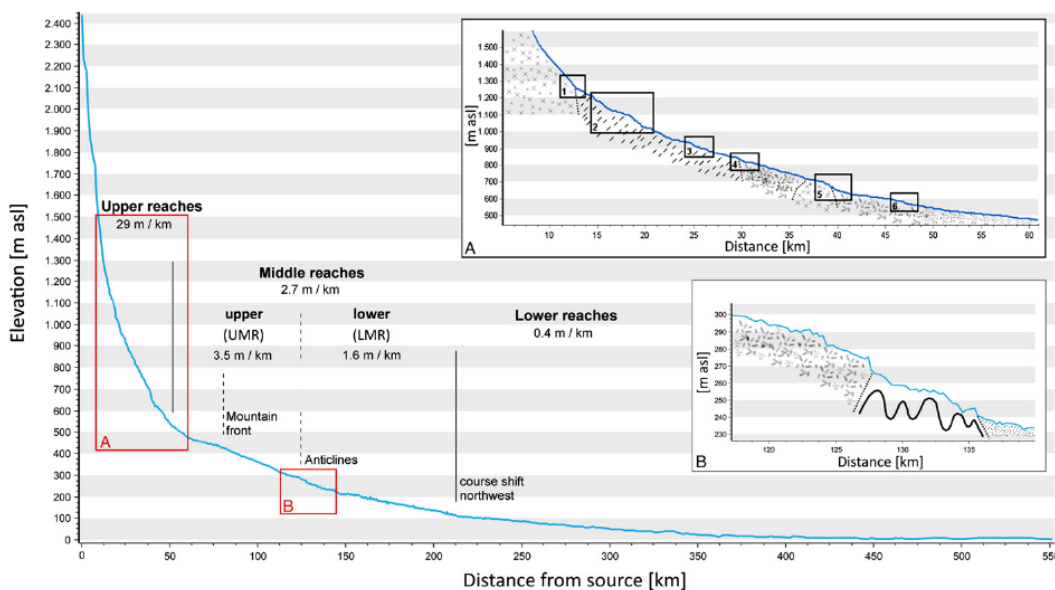


Figura 18. Perfil longitudinal del Garona desde su nacimiento hasta su desembocadura y subdivisión en base al gradiente. El tramo estudiado se sitúa en la zona A (Stange *et al.* 2014).

que delimitan el cauce y en alguna zona éste se encuentra descalzado en su base, lo cual nos indica que el río Valarties muestra también una tendencia a la socavación.

A la salida de la presa del río Garona situada aguas arriba de la población de Arties se han medido erosiones de 0,4-1m en la zona donde termina la plataforma cementada. Teniendo en cuenta que la construcción de dicha presa se llevo a cabo en 1947-1948 (Farré, com. pers.), el río ha incidido 1,5 cm/año de media en este punto.

La pasarela de Vielha que cruza el Garona a la altura del hospital fue construida entre 1996 y 1997, según muestran las ortofotos históricas del ICC. En ese periodo de tiempo el río ha erosionado hasta 0,5 m los materiales del lecho fluvial en las columnas del puente, es decir, 2,7-2,9 cm/año.

Entre todas las tasas calculadas, la que corresponde a la incisión de la terraza alta es la más representativa, ya que las tasas calculadas en las instalaciones hidráulicas y puente están condicionadas por la erosión local debido a dichas estructuras, con lo que la erosión se magnifica aguas abajo de estos puntos.

9. Discusión

9.1. Riesgo residual y predicción de los efectos

El análisis geomorfológico nos ha permitido hacer un estudio evolutivo del medio fluvial, mediante observaciones en el cauce, márgenes y zonas bajas del valle del Garona. Sin embargo, para entender el riesgo de inundación de la zona es necesario combinar estos resultados tanto con las observaciones de los efectos de la avenida como con la influencia de las actuaciones antrópicas. De hecho, el riesgo de inundación de una zona cambia con el tiempo y estos cambios en el régimen de inundación dependen tanto de las fluctuaciones climáticas como de las modificaciones humanas. La actividad antrópica es una de las principales causas que aumenta el riesgo, ya que causa cambios en los usos del suelo (e.g. impermeabilización en zonas urbanizadas), en la recepción de aguas (e.g. presas), en el transporte de sedimento a la red de drenaje (e.g. minería y agricultura). En general, desde la última mitad del siglo XX se ha agravado la tendencia del Garona a una aceleración de la incisión vertical y una disminución de los fenómenos de desbordamiento, debido por ejemplo a las canalizaciones.

La comparación entre la situación “natural” del sistema fluvial y la situación “antropizada” actual nos ha permitido evaluar cualitativamente el riesgo residual en el tramo estudiado del río Garona. Es evidente que se ha producido un aumento del riesgo de inundaciones en la zona, debido a un mayor impacto de los factores vulnerabilidad y exposición. De este modo, con una peligrosidad intrínseca, el riesgo ha aumentado principalmente por exposición asociada a la actividad humana.

Las principales causas son la ocupación del terreno en zonas inundables y las actuaciones en el cauce. En cuanto a la ocupación del terreno, la actividad humana ha ocupado zonas del territorio que son inundables por la dinámica natural del sistema fluvial, como zonas de antiguo cauce, terrazas bajas y conos de deyección. Además, en los cambios en los usos del suelo, como el uso urbano, impermeabiliza el suelo y aumenta la escorrentía, agravando

los efectos de las avenidas extremas. En general, las modificaciones antrópicas del suelo pueden producir cambios en la escorrentía. En lo que a las actuaciones en el cauce se refiere, a lo largo de los años diversas actividades antrópicas se han llevado a cabo en la zona del cauce principal. Por un lado, las estructuras hidráulicas como puentes y presas puede provocar importantes daños, ya que el infradimensionamiento o la incapacidad de absorber todo el caudal agravan los efectos de las inundaciones. Por otro lado, las canalizaciones e impermeabilizaciones del lecho provocan una falsa sensación de seguridad a la vez que el confinamiento del caudal y el aumento de la velocidad (disminución de la rugosidad del lecho por la ausencia de vegetación y sedimentos en el cauce). Es más, las canalizaciones provocan cambios en la escorrentía, caudal y morfología del canal, como se muestra en el estudio de Steiger *et al.* (1998) en la zona alta del Garona en territorio francés, provocando cambios funcionales en la llanura aluvial. Estos últimos elementos antrópicos impiden el desbordamiento pero aumentan el riesgo aguas abajo, tendiendo a inundar las llanuras situadas al final de los tramos canalizados, como en el caso de Vielha.

En cuanto a la anchura del cauce, se ha comprobado que río vuelve a recuperar su espacio vital, el cual ha sido reducido a lo largo de los años en muchas zonas. Actividades como el uso agrícola han reducido en algunas zonas la anchura del cauce, haciéndolas más vulnerables a los efectos de erosión, como es el caso de la zona de Casarilh. En otros casos, parte del cauce natural está ocupado por un relleno antrópico, como el parking a la entrada de Arties. Estas zonas rellenas muestran un alto riesgo de erosión.

De este modo, la integración de la cartografía geomorfológica, los puntos críticos asociados a la actividad humana y el impacto de la avenida del 2013, nos permite conocer los cambios de la zona y hacer una aproximación a los efectos predecibles en una próxima avenida extraordinaria.

Las zonas preferentes de erosión serán las áreas que pertenecen a la parte distal de los conos, la parte de las terrazas bajas cercana al cauce, las zonas de antiguo cauce, los meandros pronunciados, los cimientos laterales de los puentes, la salida de las presas y estaciones de aforo, los puntos débiles de las canalizaciones y las zonas de relleno en el cauce.

Las zonas preferente de desbordamiento son las terrazas bajas, las zonas de antiguo cauce, las confluencias, parcialmente las áreas urbanas (Arties y Vielha especialmente) y las zonas adyacentes a puentes y tramos canalizados.

Las zonas preferentes de acumulación son generalmente aquellas que corresponden a zonas de antiguo cauce, confluencias con torrentes de alta carga sólida, parte distal de conos obstruidos por “barreras” antrópicas o disminuciones de pendiente.

Por lo tanto, el río tiende a recuperar su espacio vital, el cual en muchas zonas ha sido invadido por actividades antrópicas, confirmando la hipótesis inicial de que el río recupera su dinámica natural en las avenidas. Es decir, en los eventos extraordinarios el cauce en general tiende a pasar por zonas de antiguo cauce e inundar llanuras aluviales.

9.2. Dinámica de encajamiento e implicaciones en la gestión

La gestión del riesgo de inundaciones ha de tener en cuenta, además del fenómeno físico, el comportamiento actual de la red fluvial y los cambios antrópicos. De este modo, los efectos causados por un evento extraordinario dependen en gran parte de la dinámica de los ríos y por ello, la gestión del riesgo ha de considerar este factor a la hora de tomar medidas.

En nuestra área de estudio, se ha observado que el Garona presenta una dinámica de encajamiento por lo menos desde el fin de la última glaciación. Sin embargo, la ordenación del territorio y las actuaciones antrópicas en el cauce no están basadas en la consideración de esta tendencia, lo cual provoca que el control de la erosión sea un problema crucial en esta zona de la Val d'Aran. Además, en algunos casos los efectos antropogénicos provocan un mayor estrechamiento del fondo de valle y un aumento en la tasa de incisión vertical.

La socavación continuada de la red de drenaje a largo plazo y gran escala provoca cambios en la magnitud (energía de la inundación y extensión de las áreas inundadas por desbordamiento del cauce fluvial) y frecuencia (periodo de retorno de los eventos) de las inundaciones (Macklin *et al.*, 2013). Así mismo, condiciona los efectos que provocarán estos eventos extremos de inundación, por lo que la gestión del río debe considerar esta tendencia erosiva.

Las estructuras hidráulicas como presas y estaciones de aforo han de tener en cuenta la erosión continuada del río para impedir que a la salida de estas se erosionen los materiales fluviales hasta llegar al descalzamiento de la plataforma cementada, como el caso de la presa de Arties. Además, los cimientos de los diques laterales de protección de las canalizaciones deben ser lo suficientemente profundas, ya que la tendencia a la socavación del lecho se intensifica en los tramos canalizados, ya que los diques impiden la erosión de los márgenes. La identificación de los tramos de erosión lateral importante implica consecuencias en la localización de los muros de escolleras. En cuanto a los puentes, son una de las estructuras más vulnerables a los procesos de erosión. Generalmente conllevan una reducción de la sección del cauce y los pilares tienden a ser erosionados continuamente. Por ello, estas obra ingenieriles han de considerar el encajamiento del río y los efectos locales provocados por el propio puente. Además, todas estas actuaciones en el cauce han de tener un seguimiento periódico de vigilancia, para detectar puntos afectados por la socavación continuada del lecho que pongan en peligro la estabilidad de la estructura. Si esta incisión local no está previamente detectada, la incisión provocada por una riada puede ser devastadora.

En cuanto a los usos del suelo y la ocupación del territorio, ha de haber un control de la urbanización de las zonas de llanura aluvial. Estas zonas de riesgo deben de ser destinadas para usos agrícolas, jardines, parques y zonas de ocio descubiertas.

Finalmente, cabe mencionar algunas de las medidas tomadas tras el evento del 18 de junio de 2013. Las obras de restitución llevadas a cabo por la Confederación

Hidrográfica del Ebro se encaminan a mejorar la capacidad portante del río, dotando de continuidad a la anchura del cauce (Moreno *et al.*, 2013). Durante el trabajo de campo se ha observado que la gestión de las zonas afectadas se ha centrado en la reconstrucción de los diques laterales de canalizaciones (e.g. en Arties), reparación de carreteras (e.g. C-28 a la altura del cono de Salider), presas hidroeléctricas (e.g. presa de Arties), relleno de zonas erosionadas (e.g. meandro a la entrada de Vielha) y delimitación del cauce del Garona con muros de escollera (cementados o no cementados) o terraplenes de grava y tierra. Sin embargo, en cuanto a los tramos en los que el cauce se ha delimitado con escollera o terraplenes, es una medida poco efectiva. Por un lado, la anchura que se le ha dado al cauce es casi exactamente el anterior al que tenía antes de la avenida, con lo que el río tenderá a erosionar los márgenes. Por otro lado, en muchos casos los materiales empleados son fácilmente erosionables e incorporados al río. Por ejemplo, a la altura del polígono de Vielha se ha construido unos terraplenes con tierra y gravas arrastradas por la riada. En este punto, se han observado erosiones de hasta un metro generados en menos de un año.

Por tanto, el análisis específico de indicadores de encajamiento nos ha permitido confirmar las hipótesis de que el Garona tiene una dinámica generalizada de encajamiento desde el fin del último periodo glacial que condiciona la dinámica actual de incisión, aunque localmente encontramos zonas de acumulación preferente.

9.3. Relación efectos-encajamiento

En la zona analizada, la evolución del cauce será el resultado de la dinámica de incisión. Así pues, los efectos provocados por eventos extremos están condicionados en gran parte por la tendencia al encajamiento del río Garona, como ocurrió en el caso de la avenida del 18 de junio de 2013.

En este contexto, los eventos extremos de inundación tendrán efectos de erosión lateral y ensanchamiento en algunas zonas (por ejemplo, entre Arties y Garós), de incisión y estrechamiento en otras (por ejemplo, entre Escunhau y Betrán) y de acumulación en zonas determinadas (por ejemplo, a la salida de Arties). Las zonas de erosión y acumulación están en gran parte asociadas a los cambios en la pendiente del Garona y a las confluencias de los tributarios. Las figuras 18 y 19 relacionan la topografía de la red de drenaje (pendiente de los tributarios y cambios de pendiente del Garona) con las zonas principales de incisión y acumulación, aunque en el caso de los afluentes, solo se representan los últimos 500 m de los principales tributarios, sin incluir aquellos que no han generado cono o son poco significativos.

En el gráfico de incisiones (Fig. 19) se observa que los conos antiguos incididos se encuentran en confluencias de torrentes de pendiente muy pronunciada. Se concentran en el tramo más alto, la primera parte del tramo intermedio y al comienzo del tramo bajo del Garona en la zona estudiada. En la primera parte del tramo bajo también se encuentra la terraza alta incidida (escarpe de 15 m) y el encajamiento del Garona en el substrato Paleozoico (escarpe de 15-20 m), lo

cual indica que es un tramo de importante incisión fluvial. Por último, los tramos de mayor encajamiento tienden a coincidir con zonas de mayor pendiente, como por ejemplo los conos de los torrentes de Cal y Bargadera. En las zonas de menor pendiente, sin embargo, encontramos conos de 1ª generación que enlazan con el cauce, indicando la

compensación del encajamiento por la acumulación y recubrimiento de los conos (aporte de sedimento > tasa de encajamiento), por ejemplo en los conos del río Nere y barranco de Casau en Vielha.

El gráfico de acumulación (Fig. 20) muestra que los torrentes que más material aportan al Garona están en el

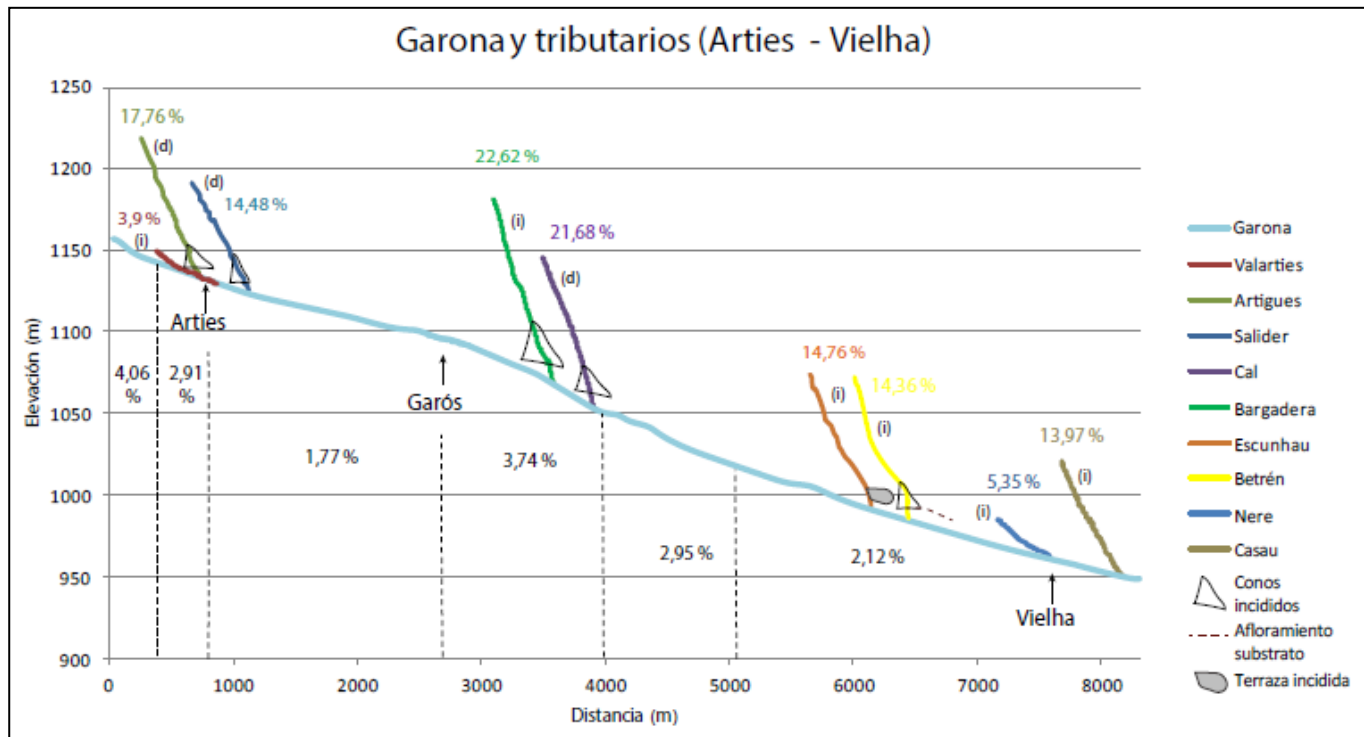


Figura 19. Gráfico de incisiones en el que se muestra los principales municipios, la red de drenaje, las pendientes de los cursos fluviales (considerando los últimos 500 m en el caso de los principales tributarios) y los principales indicadores de encajamiento en elementos geomorfológicos (conos antiguos con escarpe de incisión, terraza alta incidido y encajamiento en el substrato rocoso). (i) Margen izquierdo del Garona; (d) Margen derecho del Garona.

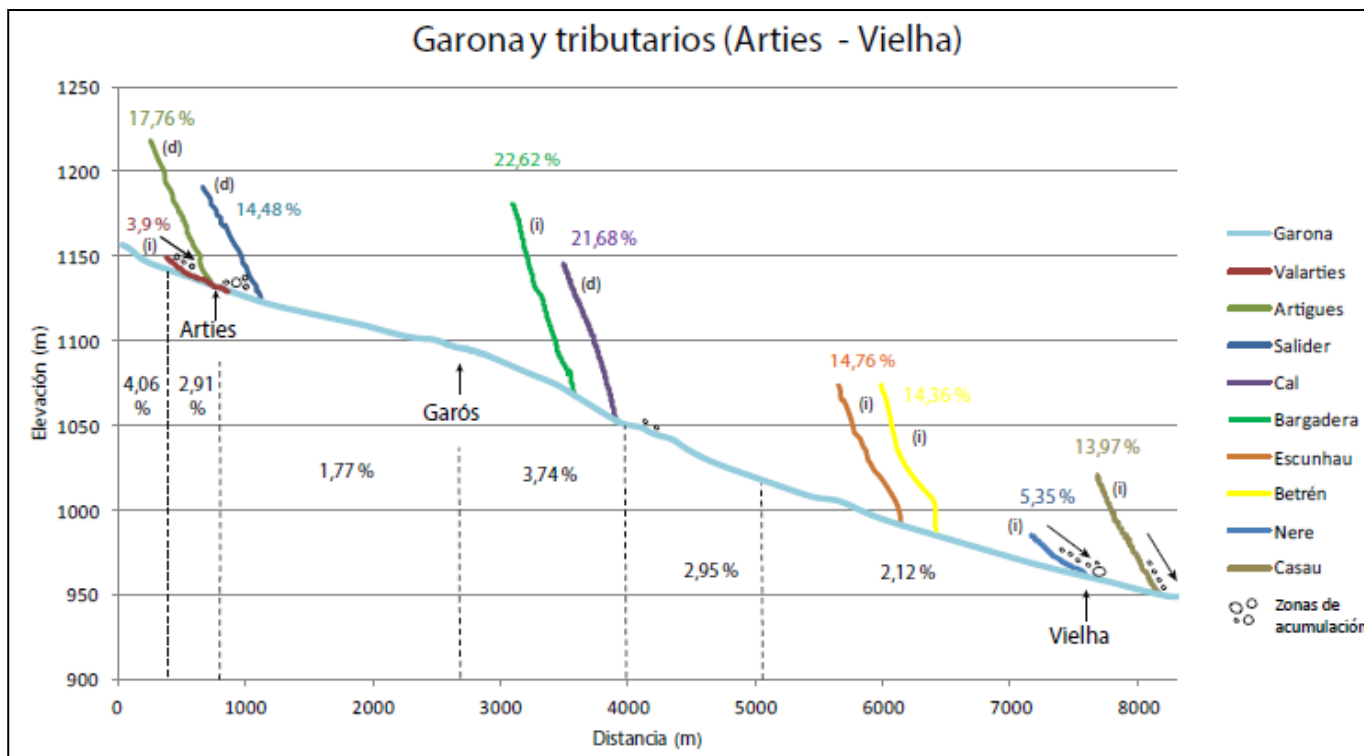


Figura 20. Gráfico de acumulación en el que se muestra los principales municipios, la red de drenaje, las pendientes de los cursos fluviales (considerando los últimos 500 m en el caso de los principales tributarios), las principales zonas de acumulación y los ríos y torrentes con un alto transporte de material. (i) Margen izquierdo del Garona; (d) Margen derecho del Garona.

margen izquierdo del río. El mapa geológico 1:50.000 del ICGC muestra que en las cabeceras de los torrentes del margen izquierdo aún hay mucho material de origen glaciar disponible (e.g. cabeceras de los ríos Valarties y Nere), mientras que en el margen derecho hay poco. Esta disponibilidad de material podría explicar el mayor transporte de carga sólida de los torrentes del margen izquierdo. En cuanto a las zonas de acumulación, se sitúan después de las confluencias de ríos de alta carga sólida (e.g. Valarties), los cuales depositan el material transportado al disminuir su pendiente. También se encuentran acumulaciones en tramos del Garona de menor pendiente y por tanto menor velocidad de la corriente (e.g. tramo intermedio después de los torrentes de Cal y Bargadera). En este contexto de encajamiento de la red fluvial, la dinámica de incisión predominante genera un aumento en la profundidad y energía de los ríos y torrentes, con lo que el transporte de material de tamaño grava será importante debido tanto a la socavación de los márgenes como a la incisión vertical. Estos materiales se depositaron en zonas de pérdida de energía, como en cambios de pendiente y zonas de desbordamiento.

Si comparamos la importancia relativa entre los efectos de erosión y los de desbordamiento, se ve una predominancia de la erosión. De hecho, además de la tendencia erosiva a largo plazo, los eventos extremos generan un encajamiento episódico y relativamente corto. Los efectos de la avenida de junio de 2013 reflejan esta hipótesis de dinámica de encajamiento, por ejemplo, el encajamiento del cauce en zonas canalizadas y el descalzamiento de puentes.

Esta dinámica de incisión se refleja en la extensión de la zona inundada. Comparando los efectos de la riada de 2013

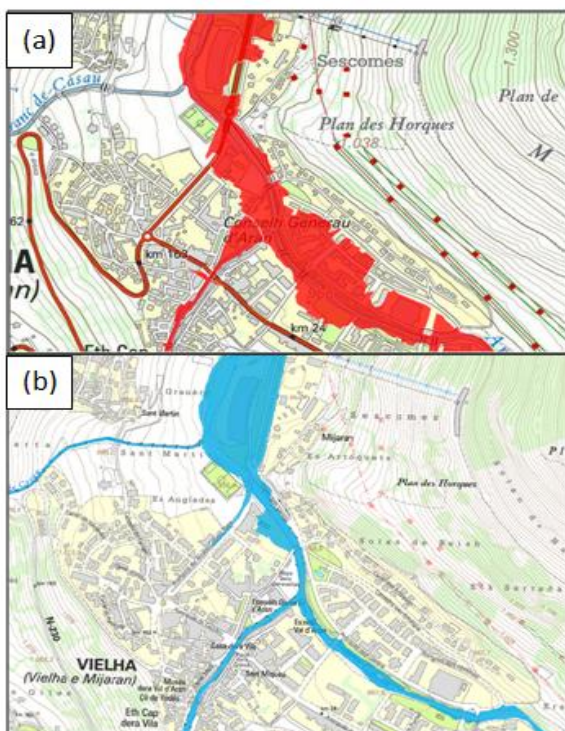


Figura 20. Comparación en el municipio de Vielha entre (a) el área inundada por avenidas de periodos de retorno de 50 años según el ACA, sobre el mapa topográfico 1:25.000 del ICGC; (b) área inundada en la avenida del 18 de junio de 2013, sobre el mapa topográfico 1:10.000 del ICGC.

con el área inundada en avenidas de Tr 50 años calculada por el ACA (Mapa de Protección Civil) vemos que en la realidad los puntos de desbordamiento son mínimos (Fig. 21). Por lo tanto, a la hora de valorar el riesgo de inundación de la zona es necesario tener en cuenta la importancia de los efectos erosivos.

10. Conclusiones

La Val d'Aran se encuentra en un contexto de montaña en el que el riesgo principal son las avenidas de tipo flash flood y las avenidas torrenciales. En este contexto de régimen de alta montaña, las causas de las crecidas son las fuertes precipitaciones y la fusión nival en épocas de deshielo (abril, mayo y junio). Los efectos geomorfológicos más significativos (en base a la inundación de 2013) son los efectos en cursos fluviales (principalmente erosión), las zonas de acumulación, puntualmente la actividad de laderas (e.g. deslizamientos superficiales) y también puntualmente la actividad en conos de deyección.

El riesgo de inundaciones de la Val d'Aran está en gran parte asociado a la modificación de la dinámica natural del río debido a la antropización del río y las zonas próximas ocurrida principalmente posteriormente a la mitad del siglo XX. De este modo, los devastadores efectos de la avenida del 18 de junio de 2013 son consecuencia de la alta vulnerabilidad y exposición por la ocupación del terreno en zonas inundables, más que ser un problema de gran crecida del caudal.

Tal y como indica la Guía metodológica para el desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zona Inundables, la información de partida en este estudio han sido las fotografías aéreas de 1956-1957, las ortofotos disponibles, los MDT, el conocimiento de los elementos y/o infraestructuras antrópicas y los usos del suelo. La integración de esta información con los efectos del último evento conocido nos ha permitido estimar cualitativamente el riesgo residual. De este modo, se ha observado que el río Garona tiende a recuperar su espacio vital durante los eventos extraordinarios, afectando de forma especialmente grave las zonas de antiguo cauce y llanura aluvial.

Unos de los efectos más generalizados fue la erosión de los márgenes, lo cual se puede explicar tanto por la tendencia del río a recuperar su espacio vital como por la tendencia incisiva de la red de drenaje desde el fin del último periodo glacial. La evolución geomorfológica y fluvial de la zona desde finales del Mioceno y, especialmente durante el periodo post-glacial, es el resultado de una diversidad de factores, entre los cuales cabe destacar el clima (periodo interglacial), la tectónica activa (levantamiento isostático) y la interferencia humana. Tras la fase de vaciado post-glacial y generación de grandes conos de deyección, se dio una disminución en el aporte de sedimentos por lo torrentes al canal del río Garona, pasando a una tendencia incisiva. La erosión progresiva durante el Holoceno ha modelado el paisaje. El encajamiento post-glacial del Garona es 1,07 mm/año aproximadamente. Esta tendencia a la incisión provoca cambios en el potencial de inundabilidad, ya que las inundaciones tienden a estar centrada en "canales" estrechos y los desbordamientos son mínimos comparando con los efectos de erosión. Un claro ejemplo son las incisiones en las

estructuras ingenieriles. Esta dinámica de encajamiento supone un reto en la gestión del riesgo de inundación.

En conclusión, la actividad antrópica provoca una alteración de la dinámica fluvial y en muchos casos los cambios generados por el efecto humano son irreversibles. El aumento de la vulnerabilidad de los elementos expuestos por la construcción en zonas inundables (e.g. llanura aluviales) y las actuaciones en el cauce (delimitación del cauce con muros de canalizaciones) suponen un aumento del riesgo. En cuanto a la ocupación urbanística de espacios fluviales inundables, existe una falta de aplicación de la norma de ocupación de zonas inundables establecida en el reglamento de la Ley de Urbanismo (ACA, 2014).

Finalmente, algunas recomendaciones futuras son la gestión basada en medidas no estructurales (e.g. ordenación del territorio, mapas de zonificación del riesgo), la visión de futuros cambios del suelo, el mantenimiento y vigilancia de las estructuras hidráulicas y la limpieza de laderas y vegetación del río.

11. Agradecimientos

El presente trabajo ha sido realizado bajo la supervisión de Gloria Furdada, a quién me gustaría agradecer por haber hecho posible llevar a cabo este estudio y por toda la ayuda que me ha prestado. Además muestro mi agradecimiento a aquellos que me han proporcionado datos necesarios para la investigación, como Jordi Gavaldà del Conselh Generau d'Aran y Carlos Farré de Endesa.

También me gustaría dar las gracias a mi familia y a mis compañeros de máster, que me han acompañado y apoyado durante todo el proceso.

Por último, agradecer a todas las personas que me han ayudado de una manera u otra en el trabajo de campo, tanto por su compañía como por su colaboración desinteresada.

12. Referencias bibliográficas

Angulo M. y Martín, S. (2001) Val d'Aran. Cuadernos Pirenaicos, Sua edizioak, Bilbao.

ACA (2014) *Introducció als estudis de Planificació de l'espai fluvial. Memòria*. Agència Catalana de l'Aigua, Generalitat de Catalunya, 30 pp.

Beaumont, C., Muñoz, J.A. y Philippe, F. (2000) *Factors controlling the Alpine evolution of the central Pyrenees inferred from a comparison of observations and geodynamical models*. Journal of Geophysical Research B: Solid Earth and Planets 105, pp. 8121–8141.

Bordonau, J. (1985) *Estudi geomorfològic del sector suboccidentanl de la Vall d'Aran. L'evolució Quaternaria de les vall dels rius Jòeu i Nere*. Tesis de licenciatura, Departament de Geomorfologia y Tectònica, Universitat de Barcelona.

Bordonau, J. (1992) *Els complexos glacio-lacustres relacionats amb el darrer cicle glacial als Pirineus*. Tesis doctoral, Departament de Geologia Dinàmica, Geofísica i Paleontologia, Universitat de Barcelona, 294 pp.

Brisset, E., Miramont, C., Anthony, E.J. y Bruneton, E. (2014) *Sediment budget quantification of a sub-Alpine river*

catchment since the end of the last glaciation. Catena 114, pp. 169-179.

CHEbro (2008) *Plan Hidrológico de la cabecera del río Garona. Borrador: documentación previa para su análisis*. Gobierno de España, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Confederación Hidrográfica del Ebro, V2.0, diciembre de 2008.

Díez-Herrero, A., Laín-Huerta, L. y Llorente-Isidro, M. (2008) *Mapas de peligrosidad por avenidas e inundaciones. Guía metodológica para su elaboración*. Serie Riesgos Geológicos/Geotecnia, nº 1, Madrid, 190 pp.

García Silvestre, M. (2014) *L'avinguda de juny de 2013 al sector d'Era Bordeta-Les (Val d'Aran): efectes i dinàmica*. Ingeniería geológica, trabajo de fin de grado, UPC-UB.

Huggett, R.J. (2007) *Fundamentals of geomorphology. Second Edition*. Routledge Fundamentals of Physical Geography. 466pp.

ICC (1994) *Atles de la Vald'Aran*. Institut Cartogràfic de Catalunya, Generalitat de Catalunya, 126 pp.

IGC (2013) *Informe preliminar dels efectes dels aiguats i riuada del 18 de juny de 2013 a la conca de la Garona*. Institut Geològic de Catalunya, Generalitat de Catalunya, 81 pp.

INUNCAT (2012) *Pla Especial d'Emergències per Inundacions*.

Lacan, P. y Ortuño, M. (2012) *Active tectonics of the Pyrenees: a review*. Journal of the Iberian Geology 38, pp. 11–33.

Macklin, M.G., Lewin, J. y Jones A.F. (2013) *River entrenchment and terrace formation in the UK Holocene*. Quaternary Science Reviews 76, pp. 194-206.

MAGRAMA (2011) *Guía metodológica para el desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables*. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural Marino, Gobierno de España, Madrid, 349 pp.

Mazzorana, B., Comiti, F. y Suchs, S. (2013) *A structured approach to enhance flood hazard assesment in mountain streams*. Nat Hazards 67, pp. 991-1009.

Moreno, M.L., Cobos, G. y Ferrer, C. (2013) *Afectación del espacio fluvial y efectos sobre las infraestructuras*. Jornada "La gestió de les inundacions, Barcelona, 27 -28 de noviembre de 2013.

Oller, O., Pinyol, J., González, M., Ripoll, J. y Micheo, M.J. (2013) *Efectes geomorfològics de l'aiguat i riuada del 18 de juny de 2013*. Jornada "La gestió de les inundacions, Barcelona, 27 -28 de noviembre de 2013.

Ortuño, M. (2013) *Aigües mogudes a l'Aran un mes després de les inundacions del riu Garona*. Directa 327, pp. 8-9.

Ortuño, M., Martí, A., Martín-Closas, C., Jiménez-Moreno, G., Martinetto, E. y Santanach, P. (2013) *Palaeoenvironments of the Late Miocene Prüedo Basin: implications for the uplift of the Central Pyrenees*. Journal of the Geological Society 170, pp. 79-92.

Pineda, N., Prohom, M., Serra, A., Martí, G., Garcia, C., Velasco, E. y Gracia, A. (2013) *Causes que van provocar la riuada a la Val d'Aran el 18 de juny de 2013*. Jornada "La gestió de les inundacions, Barcelona, 27 -28 de noviembre de 2013.

Piris Casasnovas, G. (2013) *Inundacions del 18 de juny a la Vall d'Aran*. Ingeniería geológica, asignatura de riesgos geológicos, UPC-UB.

Protección Civil (2011) *Plan Estatal de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones*. Dirección General de Protección Civil y Emergencias, Ministerio de Interior Gobierno de España, Madrid, 38 pp.

Rosique, T. (1997) *Détritisme et morphogenèse à la fin du Würm dans les Alpes françaises meridionales*. Quaternaire 8, pp. 39-48.

Serrat, D. y Vilaplana, J.M. (1992) *Història Natural dels Països Catalans. El glaciariisme*. Enciclopedia Catalana, Barcelona, pp. 439-460.

Stange, K.M., van Balen, R.T., Vandenberghe, J. y Carcaillet, J. (2014) *Linking morphology across the glaciofluvial interface: A ¹⁰Be supported chronology of glacier advances and terrace formation in the Garonne River, northern Pyrenees, France*. *Geomorphology* 207, pp. 71-95.

Steiger, J., James, M y Gazelle, F. (1998) *Channelization and consequences on floodplain system functioning on the Garonne river, SW France*. *Regulated rivers: Research & Management* 14, pp. 13-23.

Turu i Michels, V. y Peña Monné, J.L. (2006) *Las terrazas fluviales del sistema Segre-Valira (Andorra-La Seu d'Urgell-Organyà, Pirineos Orientales): relación con el glaciario y la tectónica activa*. *Geomorfología y territorio*, Universidad de Santiago de Compostela, IX Reunión Nacional de Geomorfología, pp. 113-128.

Vandenbergue, J. (1995) *Timescales, climate and river development*. *Quaternary Science Reviews* 14, pp. 631-638.

Vandenbergue, J. (2002) *The relation between climate and river processes, landforms and deposits during the Quaternary*. *Quaternary International* 91, pp. 17-23.

Vandenbergue, J. (2003) *Climate forcing of fluvial system development: an evolution of ideas*. *Quaternary Science Reviews* 22, pp. 2053-2060.

Vilaplana, J.M., Serrat, D. y Bordonau, J. (1986) *Formaciones sedimentarias cuaternarias de origen glaciar en el Pirineo: Tills, ssedimentos glaciolacustres y sedimentos glaciofluviales*. In: Anadón, P. y Cabrera, LI (Eds.): *Guía de las excursiones del XI Congreso Español de Sedimentología*, Barcelona, pp. 1.1-1.21.

Enlaces

Agència Catalana de l'Aigua
<https://aca-web.gencat.cat/aca/>
 Hemeroteca de La Vanguardia
www.lavanguardia.com/hemeroteca/

Institut d'Estadística de Catalunya (IDESCAT)

www.idescat.cat/es/

Mapa de Protecció Civil de Catalunya

<http://taure.icc.cat/pcivil/map.jsp>

OrtoXpres del ICGC

www.ortoxpres.cat/

Protecció Civil, Generalitat de Catalunya

www.gencat.cat/interior/protecciocivil/

Vissir del ICGC

www.icc.cat/vissir3/

Mapas topográficos, mapas geológicos, ortofotos y modelos de elevaciones del terreno

Mapa topográfico 1:40.000, Vall d'Aran. Consejo Superior Geográfico, Registro General de Cartografía. Editorial Alpina, Edición 1983.

Mapa topográfico 1:40.000, Val d'Aran. Instituto Geográfico Nacional – Centro Nacional de Información Geográfica. Editorial Alpina, Edición 2012/2013.

Mapa topográfico 1:50.000, Val d'Aran (Montgarri-Montardo). Miguel Angulo. Sua edizioak, 2001.

Mapa topográfico 1:10.000 del ICGC, en formato SID.

Base topográfica 1:5.000 del ICGC, en formato SID.

Cartografía topográfica 1:1.000 del ICGC, en formato SHP.

Ortofoto 25 cm del ICGC, en formato SID.

Base de datos geológicos 1:50.000 del ICGC, en formato SID.

Modelos de elevaciones del terreno de 5 m del ICGC.

Servidores WMS del ICGC para análisis SIG

WMS de mapas y ortofotos vigentes

http://geoserveis.icc.cat/icc_mapesbase/wms/service?

WMS de ortofotos históricas

http://geoserveis.icc.cat/icc_ortohistorica/wms/service?

WMS ortoXpres

http://geoserveis.icc.cat/icc_ortoxpres/wms/service?

13. Anexos

Anexo I: Cartografía geomorfológica

Anexo II: Cartografía de los efectos

Anexo III: Mapas comparativos del riesgo residual

Anexo IV: Cortes transversales al Garona.

Anexo V: Puntos críticos.

Anexo VI: Fotografías.