

Caracterización geodinámica y dendrocronología como base para la evaluación de procesos geohidrológicos en la cuenca del río Mariño, Abancay (Perú)

Sandra VILLACORTA¹, Clara RODRIGUEZ², Fluquer PEÑA³, Fredy JAIMES⁴ y Carlos LUZA⁵

Resumen: *CARACTERIZACIÓN GEODINÁMICA Y DENDROCRONOLOGÍA COMO BASE PARA LA EVALUACIÓN DE PROCESOS GEOHIDROLÓGICOS EN LA CUENCA DEL RÍO MARIÑO, ABANCAY (PERÚ).* Actualmente, la ciudad de Abancay (ubicada en Apurímac, región del sur del Perú) presenta un crecimiento poblacional desordenado, producto de la ocupación de áreas para vivienda y cultivo sin considerar las características geográficas, geodinámicas y climáticas de la zona. Las constantes lluvias, en algunos casos extremas, generan diversos fenómenos geo-hidrológicos que afectan a la ciudad y sus poblados aledaños. Ante esta situación y como parte del “Programa nacional de riesgos geológicos”, el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico del Perú (INGEMMET) en colaboración con la Universidad de Geneva (Suiza), eligió la micro-cuenca del río Mariño en Abancay para desarrollar estudios geológicos, hidrogeológicos, geofísicos y dendrocronológicos a escala de detalle, a fin de evaluar potenciales desastres geo-hidrológicos que pudiesen ocurrir en el futuro en el área. Los primeros resultados del estudio muestran que gran parte de la cuenca del río Mariño es altamente susceptible a la generación de movimientos en masa y que los principales condicionantes son i) la abrupta topografía del área, ii) la presencia de antiguos movimientos en masa que frecuentemente son reactivados por la infiltración de agua y circulación de flujos sub-superficiales, durante la época de lluvias y iii) la alta meteorización del sustrato rocoso que facilita la tendencia a la fracturación y creación de cavidades. Además, a raíz de la modelización del flujo de detritos de 1951 se ha podido concluir que los distritos de Tamburco y Abancay son especialmente sensibles ante una situación similar y que las actuales medidas estructurales llevadas a cabo en la quebrada de Sahuanay no serían suficientes para controlar dicho fenómeno. Por otro lado los resultados preliminares derivados del estudio dendrocronológico muestran que *P. Glomeratus* podría ser útil para completar la falta de datos climáticos existente en el área de Abancay. Igualmente, los eucaliptos situados a lo largo de la quebrada de Sahuanay son útiles como indicadores de la magnitud del flujo de detritos que sucedió en 2012 y servirán para calibrar modelizaciones futuras de dicho evento y otros posibles escenarios. Los resultados obtenidos serán puestos a consideración de las autoridades y población local para una adecuada gestión del riesgo de desastres en la ciudad de Abancay.

Abstract: *GEODYNAMIC CHARACTERIZATION AND DENDROCHRONOLOGY AS BASELINE FOR THE EVALUATION OF GEOHYDROLOGIC PROCESSES IN THE MARIÑO RIVER BASIN, ABANCAY (PERU).* In the last times, the city of Abancay (located in Apurímac, a region of southern Peru) has experimented a very fast population growth which has led to do an improper land use by occupying geodynamically unstable areas. These areas are prone to suffer geo-hydrological processes often triggered by extreme rainfalls which generate important personal and economic losses in Abancay and its surrounding villages. Regarding this situation, the Geological, Mining and Metallurgical Institute of Peru, together with the University of Geneva (Switzerland), within the framework of the “National Program of Geological Risks”, chose the micro-basin Mariño River to develop geological, hydrogeological, geophysical and dendrochronological studies in order to evaluate future potential geo-hydrological events in the area. First results show that large part of the Mariño River basin is highly susceptible to the occurrence of geo-hydrological events. This susceptibility is mainly related with three factors i) the steep topography, ii) the strong weathering suffer by the bedrock which facilitate the fissure and caves formation and iii) the presence of ancient mass movements often reactivated during the rainy season due to the water infiltration and subsurface flow. Furthermore, from the simulation of the debris flow event occurred in 1951, it can be observed that Tamburco and

¹⁾ Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico, Av. Canadá 1470 San Borja, Lima, Perú.

²⁾ Climatic Change and Climate Impacts, Institute for Environmental Sciences, University of Geneva, Boulevard Carl-Vogt 66, 1205, Geneva, Switzerland (Clara.Rodriguez@unige.ch)

³⁾ Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, Perú

E-mail: spvillacorta@gmail.com.

Abancay districts are especially sensitive to the debris flow occurrence. From this simulation we can extract also that the current structural measures implemented in the Sahuayanay stream might not be enough to control a new event similar to the 1951 event. Also preliminary results from the dendrochronological survey shows that P. Glomeratus trees could be useful in order to fill the lack of climatic data in the Abancay area as well as the trees located along the Sahuayanay stream in order to get information about the debris flow magnitude occurred in 2012. The ultimate goal of this study is to share these results with the local authorities in order to improve the current plans of risk management.

Palabras clave: Movimientos en masa. Peligros geológicos. Prevención de desastres.

Key words: Mass movements. Geological hazard. Disasters prevention.

Introducción

Aparte de los sismos, los procesos geo-hidrológicos (i.e. inundaciones, flujos de detritos, avenidas torrenciales y deslizamientos asociados a lluvias) han causado en Perú grandes pérdidas. Sólo entre 1970 y 2006, más de 12000 eventos de este tipo ocurrieron en Perú causando más de 7600 muertes y la afectación de más de 244000 propiedades siendo casi 60000 totalmente destruidas (Comunidad Andina, 2008; DesInventar, 2015).

Las lluvias son un factor decisivo en la ocurrencia de los desastres geo-hidrológicos (Borga *et al.*, 2014) por lo que su estudio es una parte importante en su evaluación. El Tyndall Centre for Climate Change Research y algunos trabajos como el de Andres *et al.* (2014) asocian el calentamiento global con la alteración en el patrón de precipitaciones lo que repercutirá directamente en la ocurrencia de fenómenos geo-hidrológicos. En este sentido, Perú se encontraría entre los 10 países más vulnerables ante el cambio climático global (Vargas, 2009). Se sabe además que la ocurrencia de flujos de detritos, avenidas torrenciales y deslizamientos ocurre preferentemente en zonas montañosas del país (Comunidad Andina 2008), donde el acceso a un registro climático sistemático de calidad no siempre es fácil (Andres *et al.*, 2014; Schaward *et al.*, 2011; Salzmann *et al.*, 2009). Este es el caso de la ciudad de Abancay, situada en el valle del río Mariño, en Apurímac una región del sur del Perú. Abancay cuenta con un amplio historial de ocurrencia de desastres asociados fundamentalmente con deslizamientos y flujos de detritos (INDECI, 2013; Baca *et al.*, 2007; Villacorta *et al.*, 2013).

En la zona de estudio se han realizado diversos estudios que abordan la temática de la prevención de desastres, entre los cuales destacan: Inspección de riesgo geológico en el área de Ccocha y Pumarana (Dávila y Zavala, 1997), Riesgos Geológicos del Perú Franjas N°2 y N°3 (INGEMMET, 2002 y 2003), Mapa de Peligros de la ciudad de Abancay (Baca *et al.*, 2007); Informe de estimación de riesgo del sector de FONAVI distrito Abancay (Apaza *et al.*, 2010); Inspección de la Seguridad Física del sector Ampay (Madueño, 2011); el Primer reporte de Zonas críticas por peligros geológicos de la región Apurímac (Villacorta *et al.*, 2012). Así pues esta área está considerada como crítica según el INGEMMET (INGEMMET, 2002, 2003; Villacorta *et al.*, 2013) por lo que esta institución ha visto la necesidad de generar información de calidad sustentada en registros e información validada, que permitan sustentar una adecuada toma de decisiones en relación a la gestión de desastres para este sector del territorio peruano. A esta iniciativa se ha sumado la Universidad de Ginebra (Suiza) con el fin de aplicar nuevas metodologías como la dendrocronología basada en la información recabada de los anillos de los árboles del área del Santuario Nacional de Ampay.

El objetivo de este trabajo es evaluar los factores que determinan la ocurrencia de procesos geo-hidrológicos en dicho sector del Perú; así como reconstruir un registro paleo-climático continuo y anual, que permita completar el existente, empleando para ello la dendrocronología,

técnica útil para la comprensión de los patrones climáticos pasados, actuales y futuros que se correlacionan además con la evolución geomorfológica del área.

Área de estudio

El área de estudio pertenece a una parte de la cordillera oriental hacia el sur del territorio peruano y corresponde a la micro-cuenca del río Mariño de la provincia de Abancay, región Apurímac (Fig. 1). Políticamente comprende parte de los distritos de Tamburco y Abancay. Cuenta con un área aproximada de 200 km² y abarca las coordenadas geográficas: 13°33'S a 13°42' Latitud Sur, y 72°58'30" a 72°44'40" Longitud Oeste.

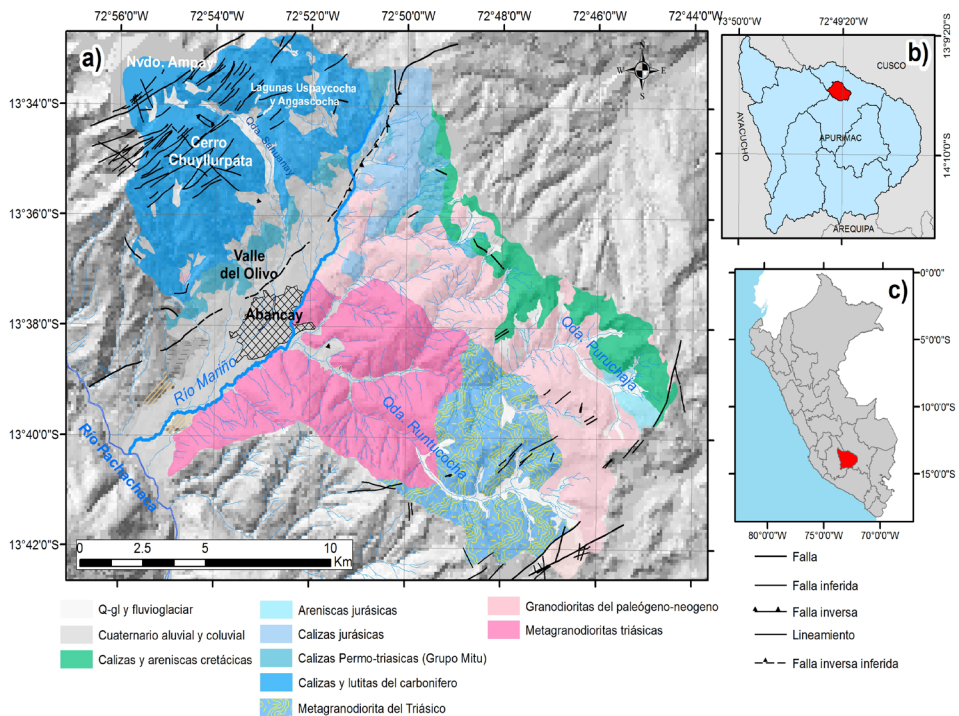


Figura 1. A) Esquema geológico de la cuenca del río Mariño. **B)** su ubicación en la provincia de Abancay (región Apurímac). **C)** Localización de la región Apurímac en la República del Perú. / **Figure 1. A)** Geologic sketch of Mariño basin. **B)** Its location in the province of Abancay (Apurímac region) **C)** Location of the Apurímac region in the Republic of Peru.

La micro-cuenca del río Mariño presenta una fisiografía abrupta con montañas que alcanzan los 5190 msnm, donde destaca el nevado de Ampay que presenta vertientes hacia los ríos Apurímac y Pachachaca. Al pie del nevado de Ampay, hoy considerado como Santuario Nacional por el Servicio Natural de Áreas Naturales Protegidas (SERNANP) se encuentra la ciudad de Abancay. Los elevados relieves son erosionados por numerosos ríos y quebradas entre los cuales destacan el río Mariño y sus tributarios, las quebradas Sahuanay, Ampay, Puruchaja, entre otros. El clima del área se caracteriza por presentar una temporada lluviosa muy marcada entre los meses de diciembre a marzo, con temperaturas promedio de 16°C; y una temporada de estiaje el resto del año, con temperaturas con máximas de 25°C y mínimas de 8°C.

Aspectos geomorfológicos y geológicos

En el área de estudio destacan los relieves abruptos con una fuerte influencia de geformas glaciales, gravitacionales y aluviales. Dentro de las geformas glaciales se destacan el nevado Ampay que actualmente ha reducido su extensión debido a su progresivo deshielo. Otros rasgos glaciales son las morrenas que funcionan como diques naturales semi-permeables de las lagunas Angascocha y Uspaycocha. Los valles glaciares se encuentran en la cabecera de la quebrada Sahuanay en el pie del nevado Ampay y en el cerro Runtucocha. La zona montañosa presenta fuertes pendientes con afloramientos rocosos cuyas laderas muchas veces se encuentran cubiertas por vegetación. Se puede observar una variedad de formas gravitacionales producto de los grandes deslizamientos como el de Ccocha-Pumaranra que arrasó los poblados del mismo nombre en 1997 o la avalancha del cerro Chuyllurpata que afectó a la ciudad de Abancay en 1951 y 2012. Hacia la zona baja de la quebrada Sahuanay (valle del Olivo) se ubican terrazas fluvio-aluviales adyacentes al cauce principal, sobre las cuales se desarrollan áreas de cultivo y se ubican las viviendas del distrito de Tamburco (Villacorta y Valderrama, 2012).

Respecto a las unidades geológicas, la cuenca del río Mariño está conformada por rocas que van desde el Paleozoico al Cuaternario (Marocco, 1975). La sucesión inicia (Fig. 1) por una secuencia de lutitas negras en estratos gruesos de más de 100 m de espesor, las que se intercalan con delgados niveles de calizas bituminosas muy compactas de hasta 30 cm y areniscas de grano fino con slumps, correspondientes al Grupo Tarma (Carbonífero). Estas secuencias pasan progresivamente a calizas masivas intensamente fracturadas, intercaladas con delgados niveles de lutitas negras con nódulos calcáreos y areniscas feldespáticas correspondientes al Grupo Copacabana (Carbonífero). Sobre la secuencia descrita se ubican areniscas masivas feldespáticas intercaladas con flujos piroclásticos de origen volcánico pertenecientes al Grupo Mitu (Permo-Triásico). Sobre esta se ubica a las calizas y areniscas jurásicas (Formación Socosani, Formación Labra) que afloran en la parte norte de la Cuenca del río Mariño. Sobreyacen a esta secuencia las areniscas y calizas cretácicas (Formación Hualhuani, Murco y Arcurquina). Sobre la sucesión descrita se ubican los depósitos cuaternarios (morrénicos, coluviales y aluviales).

Estructuralmente se ha identificado anticlinales y sinclinales de dirección NE, los cuales se encuentran paralelos a la quebrada Mariño y en menor medida por pliegues transversales de dirección NO. Destaca el anticlinal del Ampay. Asimismo, es notoria la influencia del sistema de fallas normales de dirección NE denominado Cusco-Abancay (Carlotto, *et al.*, 2006).

Peligros geológicos

De acuerdo a los datos del Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI) y del inventario nacional de peligros geológicos del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET) se han identificado en la cuenca del río Mariño 141 peligros geológicos, de los cuales se puede desglosar una mayor ocurrencia de deslizamientos, caída de rocas y flujo de detritos (en especial avalanchas; Fig. 2). Los procesos más relevantes por su afectación, registrados entre 1951 y 2014, se encuentran señalados en la tabla 1. De estos eventos destacan el aluvión de la quebrada Sahuanay en 1951 con 10 viviendas colapsadas y 11 muertos (Amézquita *et al.*, 1988), la avalancha de Ccocha y Pumaranra en 1997 que causó la muerte de 122 pobladores y 60 viviendas colapsadas (Dávila y Zavala, 1997) y la avalancha del cerro Chuyllurpata del 2012 que produjo 13 viviendas colapsadas, 265 damnificados y 4 fallecidos (Villacorta y Valderrama, 2012).

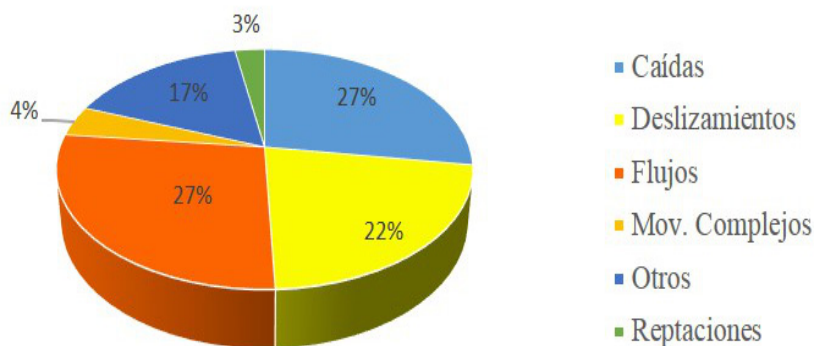


Figura 2. Registro porcentual de los peligros geológicos registrados en Abancay (Fuente: Villacorta *et al.*, 2013)./
Figure 2. Percentage corresponding to each type of geological risk recorded in Abancay.

Paraje/lugar	Evento	Peligro	Vulnerabilidad	Fecha
Cerro Chuyllurpata	Movimiento Complejo	Alto	Muy alto	1951
Ccocha Pumarana	Movimiento Complejo	Muy Alto	Muy alto	1997
Limapata, Puchurcco	Deslizamiento	Alto	Alto	2010
Qda. Puyo-Huayco	Flujo	Alto	Alto	2010
Espinoza Alto	Deslizamiento	Alto	Alto	2011
Cerro Chuyllurpata	Movimiento Complejo	Alto	Muy alto	Marzo 2012
Asillo	Deslizamiento	Alto	Alto	Abril 2012

Tabla 1. Eventos más desastrosos en la ciudad de Abancay y cuenca del río Mariño (INDECI, 2013; Villacorta *et al.*, 2013) **Table 1.** Most harmful events recorded in Abancay and Mariño river.

Metodología

Los métodos de trabajo han incluido la ejecución de diferentes estudios. En la fase de investigaciones básicas, desarrollada en el 2014, se realizó un cartografiado geológico a escala 1:25 000, así como un mapa geomorfológico detallado (1:10 000) tomando como base imágenes satelitales de WorldView-3 y GeoEye-1 (2015) donde se identificaron las unidades de relieve complementando con observaciones de campo. A partir de esta información, en una segunda fase desarrollada entre 2014 y 2015, se realizaron la caracterización hidrogeológica, el estudio geofísico y caracterización geomecánica, insumos del mapa de susceptibilidad por movimientos en masa de la cuenca evaluada. Se complementó con la modelización numérica para el caso de flujos de detritos por ser los eventos que causaron más daños a la ciudad de Abancay. Paralelamente se desarrolló el estudio dendrocronológico para reconstruir el registro paleo-climático y establecer relaciones con la recurrencia de los eventos descritos.

Caracterización hidrogeológica

La caracterización hidrogeológica parte de un análisis de la litología, según su grado de permeabilidad, de un inventario detallado de fuentes de aguas subterráneas (manantiales y los ensayos de infiltración). Estos datos nos han permitido clasificar a las calizas del Grupo Co-

pacabana Inferior como acuífero fisurado, en proceso de karstificación (evidencia de dolinas, y lapiares) y al Grupo Mítu como un acuitardo. Los análisis químicos de las aguas nos indican predominio Bicarbonatado Cálcico ($\text{HCO}_3\text{-Ca}$), que corresponde a aguas que proviene de calizas del Grupo Copacabana.

Geofísica

El estudio de Prospección Geofísica aplicando el método de Resistividad-Tomografía Eléctrica 2D se realizó a fin de determinar el espesor del material de remoción en masa, definir la topografía del subsuelo y localizar discontinuidades en la roca (fracturas y fallas) que se correlacionen con probables áreas de infiltración de agua y/o humedad.

Caracterización geomecánica del macizo rocoso

Fue realizada de acuerdo a la clasificación RMR (Rock Mass Rating) de Bieniawski (1989), la cual permite estimar la calidad del macizo rocoso en base a ciertos parámetros, como la resistencia a la compresión simple, el RQD (Rock Quality Designation), condiciones de la discontinuidad, espaciamento de la discontinuidad, y la presencia de agua subterránea. La ocurrencia de los diferentes tipos de ruptura que podrían darse en los diferentes macizos fueron analizados mediante el programa Dips 5.0 (Rocscience, 2010).

Análisis de susceptibilidad por movimientos en masa

Se ha basado en un modelo heurístico multivariado (Santacana *et al.*, 2003; Villacorta, 2007). Las variables analizadas fueron: características geológico-estructurales, a escala 1:10 000 del INGEMMET; datos geomorfológicos recopilados en campo; caracterización hidrogeológica; pendiente de los terrenos a partir de un modelo de elevación de la base topográfica del IGN a escala 1:25 000; cobertura vegetal a partir de los datos de MINAM (2015). Cada capa de información ha sido evaluada teniendo en cuenta su relación con la ocurrencia de movimientos en masa y empleando el software ArcGis de ESRI en su versión 10.1.

Simulación de flujos de detritos

Se analizó la dinámica de los flujos mediante la simulación numérica, para lo cual se empleó el modelo bidimensional FLO-2D (O' Brien, 2004). Los parámetros reológicos del flujo se estimaron sobre la base de las características geológicas de la zona y a datos recolectados en el campo, empleándose valores de número de Manning en el cauce del río y áreas aledañas de 0,057 y 0,075, donde se buscó replicar la avalancha de detritos del cerro Chuyllurpata-Quebrada Sahuanay del 18 de febrero de 1951.

Dendrocronología

Para el estudio dendro-climático, entre septiembre y octubre de 2015 se recogieron muestras de *P. glomeratus* (localmente llamado Intimpa) en el área del Santuario Nacional de Ampay. Un total de 130 muestras entre 1 y 2 muestras por árbol de un total de 80 árboles) fueron obtenidas mediante el uso de barrena y sin dañar los árboles, en altitudes entre 3.300 hasta 3.600 msnm. Las muestras fueron posteriormente preparadas en el laboratorio puliendo su superficie para observar el grosor real de los anillos. El ancho de los anillos fue medido con

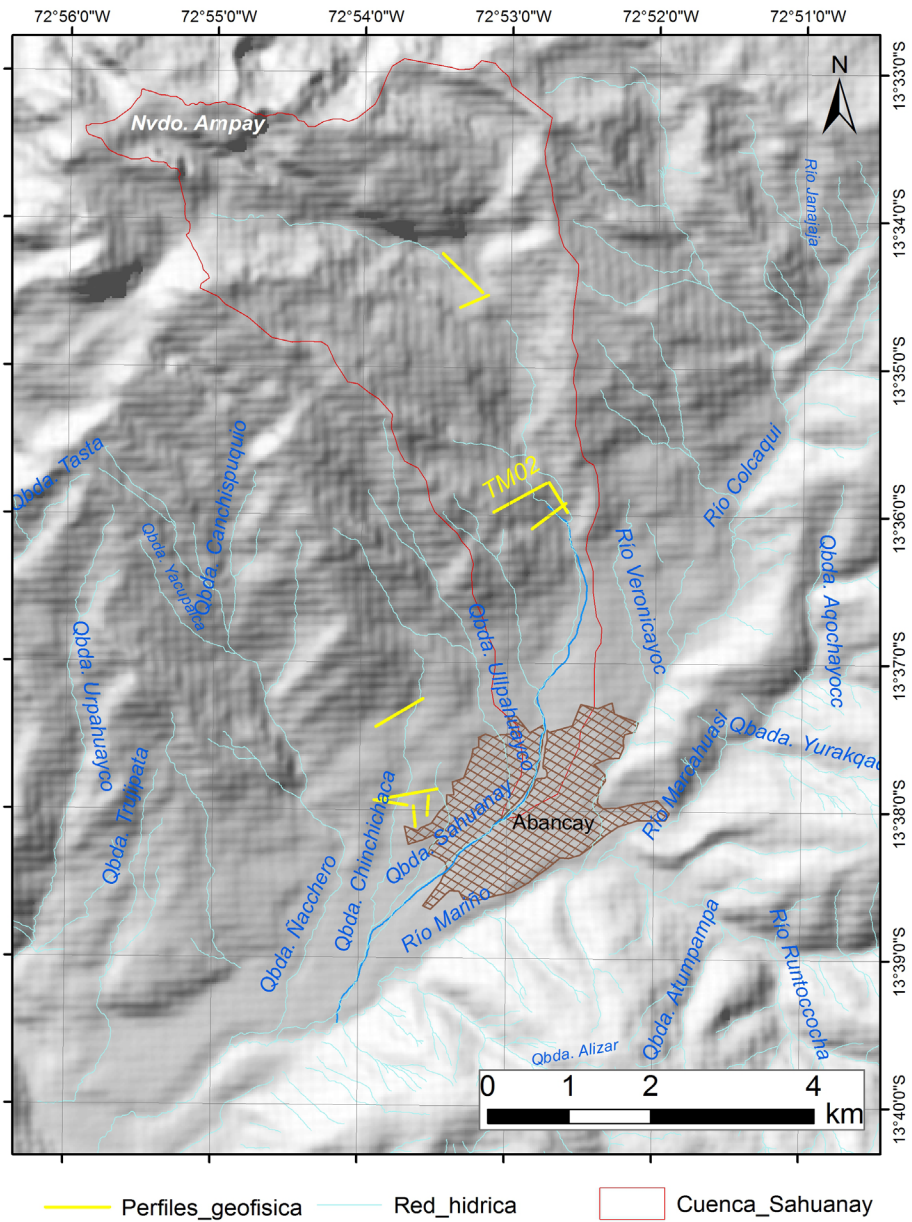


Figura 3. Ubicación de perfiles eléctricos en la micro-cuenca Sahuanay sector cerro Chuyllurpata. / **Figure 3.** Electric profiles location in the Sabuanay- Chuyllurpata sector.

el sistema Lintab (Rinntech, Germany) a una resolución de 0.01mm. La crosdatación de las muestras se hizo con la ayuda del programa TSAP-Win (Rinn, 2003).

Para el estudio dendro-geomorfológico se muestrearon eucaliptos creciendo a lo largo de la quebrada Sahuanay y que fueron afectados por el flujo de detritos de 2012. Estas muestras fueron entonces analizadas siguiendo los procedimientos estándar en dendro-geomorfología descritos en Stoffel y Bollschweiler (2008).

Resultados

Caracterización hidrogeológica

El trabajo de campo ha permitido identificar en el cerro Chuyllurpata, (margen derecha de la quebrada Sahuanay) calizas altamente fracturadas del Grupo Copacabana inferior, el cual constituye un acuífero fisurado-kárstico. Esta formación está en contacto en la base con el acuitardo formado por las areniscas y lutitas rojas del Grupo Mitu que tienen características impermeables. Se han inventariado 56 puntos de surgencia de aguas subterráneas en la parte baja en el contacto entre las calizas y el acuitardo y en el área de la quebrada Sahuanay se han localizado 4 surgencias de aguas subterráneas.

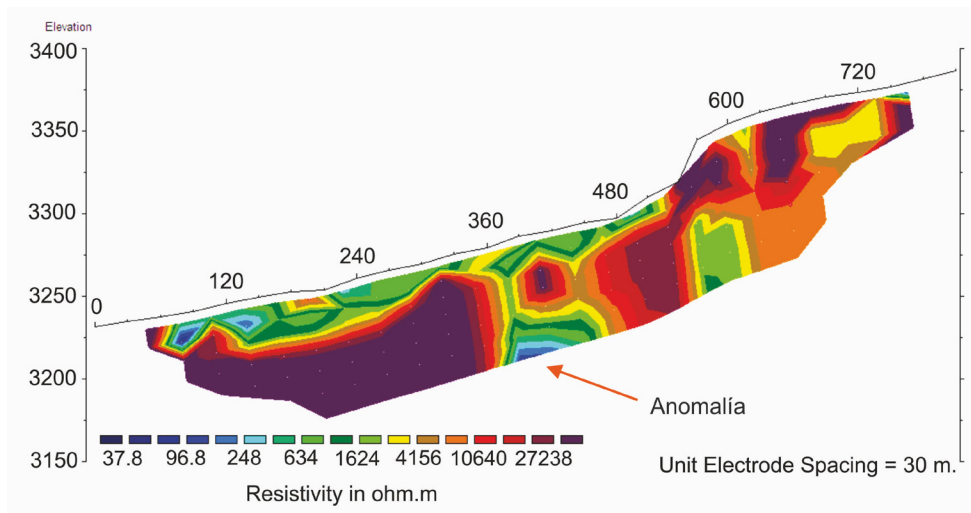


Figura 4. Perfil eléctrico TM02 sector cerro Chuyllurpata, cerca al escarpe principal de la avalancha del 2012. Se ha determinado una anomalía de muy baja resistividad que correspondería a la presencia de una debilidad con filtración de agua. / **Figure 4.** Electric profile TM02 in Chuyllurpata sector, close to the scar generated during the 2012 event. A very low resistivity anomaly has been detected corresponding to a fault with water infiltration.

Caracterización geofísica

Los resultados en el área de la avalancha del cerro Chuyllurpata, muestra en el perfil TM02 (Figs. 3 y 4) resistividades discontinuas. De un lado altas resistividades en dos zonas separadas que corresponderían a las rocas del substrato y una anomalía baja (valores menores a 200 Ohm - m) a 55 m de profundidad (Fig. 4). Esto indicaría la acumulación de un espesor de 30 a 40 m de material suelto en la parte central, presencia de fracturas y saturación de aguas subterráneas (sector donde se infiltra el agua).

Caracterización geomecánica y análisis de estabilidad del macizo rocoso

En la tabla 2 se muestra los resultados de la clasificación geomecánica de los macizos rocosos analizados. Los resultados del análisis permiten indicar que los macizos rocosos en Abancay presentan una calidad de regular a buena, disminuyendo esta hacia el suroeste de la cuenca del río Mariño.

Estación	RMR(%)	Calidad de la roca
01	72	Buena
02	70	Buena
03	66	Buena
04	72	Buena
05	43	Regular
06	44	Regular
07	75	Buena
08	72	Buena

Tabla 2. Calidad del macizo rocoso mediante el RMR./**Table 2.** *Rocky massifs RMR quality.*

La tabla 3 muestra los resultados derivados del análisis de estabilidad del macizo rocoso. Los macizos de la estación 01 se encuentran estables, mientras que las demás estaciones presentan la posibilidad de al menos un tipo de ruptura. De los resultados obtenidos se puede señalar que los macizos rocosos que afloran en la región son más estables en la dirección Oeste – Este y de Sur a Norte.

A partir de la caracterización geomecánica se muestra una zonificación de la cuenca del río Mariño (Fig. 5) en cuatro categorías:

Estación	Angulo de fricción (°)	Tipo de ruptura para taludes de roca		
		Plana	Cuña	Tumbamiento
01	40	No	No	No
02	30	Si	Si	No
03	45	Si	Si	No
05	35	No	No	Si
06	35	Si	Si	Si
07	35	Si	Si	Si
08	35	Si	No	No

Tabla 3. Análisis de estabilidad de los macizos rocosos en la cuenca del río Mariño./**Table 3.** *Río Mariño rocky's massifs stability analysis.*

Zona I: Corresponde a las rocas de mejor calidad. Por un lado se tiene calizas compactas en bancos gruesos, y areniscas. De otro lado dacitas, granitos, monzogranitos y monzonitas e intrusivos metamorfozados. El RMR está estimado en 72 % (estaciones 01 y 08) Presenta una resistencia a la compresión entre 85 y 100 Mpa. En la figura 5 se puede visualizar en color verde.

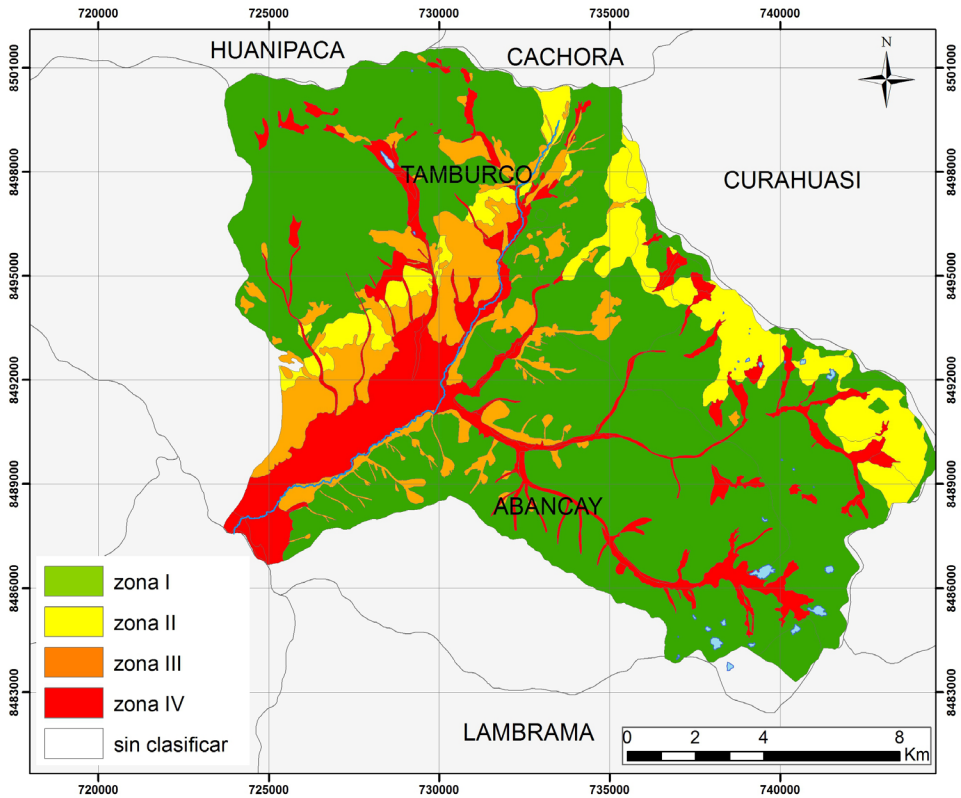


Figura 5. Zonificación geomecánica preliminar de la cuenca Mariño./**Figure 5.** Preliminary geomechanical zoning in the Mariño basin.

Zona II: Corresponde a lavas andesíticas basálticas, areniscas y calizas. El RMR está estimado en 71 % (estaciones 02, 03 y 05) lo cual permite clasificar a esta unidad litológica como una roca de calidad “buena”. Aunque en algunos sectores disminuye su resistencia y calidad, debido a la intercalación de limolitas y lutitas, cercanía a zonas de falla y fuerte argilización supérgena por procesos meteóricos. En la figura 5 se puede visualizar en color amarillo.

Zona III: Aunque la resistencia a la compresión de los afloramientos de calizas ubicados en esta zona haya resultado elevada (85 Mpa), el bajo RMR (68 %, estaciones 06 y 07) permite clasificar a las rocas con calidad “regular”. Esto se debe a que la mayoría de ellos se presenta en bancos delgados intercalados con limolitas. Además están cubierto con fragmentos inconsolidados pobremente graduados. En la figura 5 se puede visualizar en color anaranjado.

Zona IV: Esta zona corresponde a los materiales inconsolidados producto de los diferentes movimientos en masa que se han acumulado hasta por decenas de metros en diferentes sectores de la cuenca, sobretudo en laderas y en ambas márgenes de los cursos de agua identificados. Los materiales referidos comprenden a una mezcla polimictica de fragmentos rocosos heterométricos en matriz limo-arcillosa. Aunque sus características geomecánicas son variables en general presentan muy baja capacidad de carga y baja permeabilidad, por tanto se le asigna una baja calidad a dichos materiales. En la figura 5 se puede visualizar en color rojo.

Análisis de susceptibilidad por movimientos en masa y modelización de peligro por flujos

El modelo de la susceptibilidad por movimientos en masa generado para la cuenca del río Mariño (Fig. 6) muestra cinco grados de susceptibilidad por movimientos en masa: muy baja,

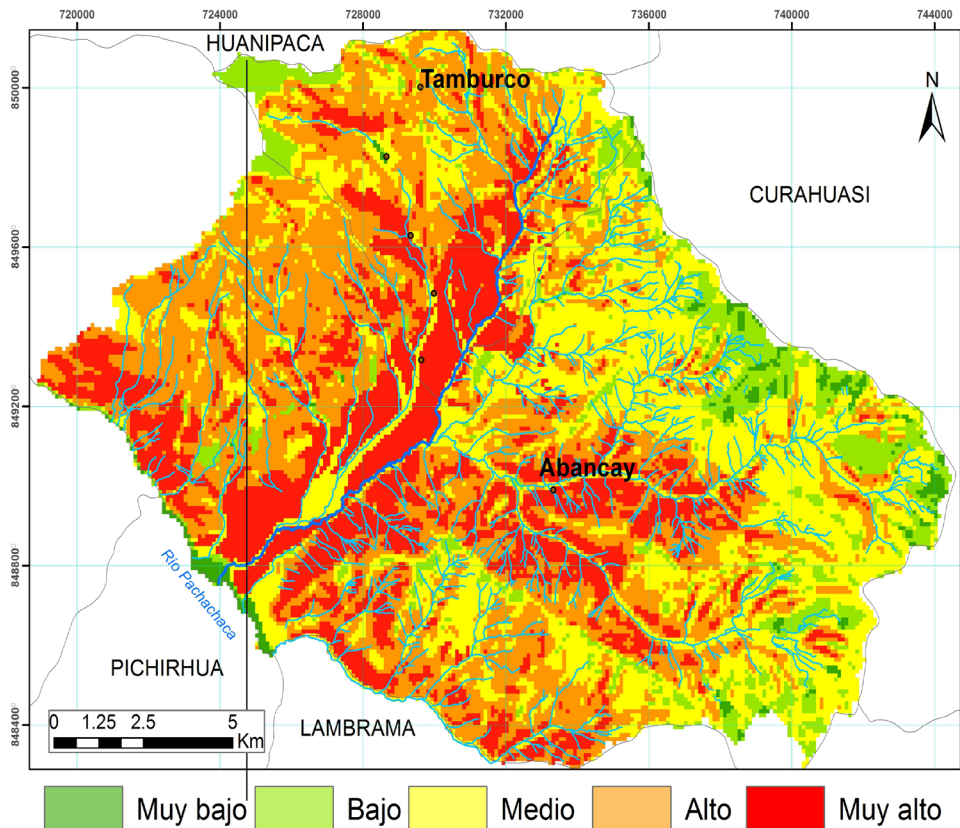


Figura 6. Mapa de Susceptibilidad a movimientos en masa en la cuenca del río Mariño./**Figure 6.** Mass movements susceptibility map in the Mariño river basin.

baja, media, alta y muy alta. En resumen señala una propensión media a muy alta a la generación de deslizamientos, derrumbes y flujos de detritos en ambas márgenes del río Mariño y hacia la zona noroeste de la cuenca del río Mariño. Asimismo se puede notar elevada susceptibilidad a tales procesos en la margen derecha del río Pachachaca y en ambas márgenes de las quebradas Puruchaja y Runtucocha.

Respecto al resultado de la simulación para el flujo de detritos de 1951, considerando la movilización de 36 Mm³ de materiales, permitió observar una alta probabilidad de afectación por flujos en parte de los distritos de Tamburco y Abancay (Fig. 7). Las alturas de flujo estimadas alcanzan hasta 7 metros sobre el área del cauce. La mayoría de viviendas afectadas serían las asentadas sobre el cauce de la quebrada Sahuanay en su ingreso al río Mariño.

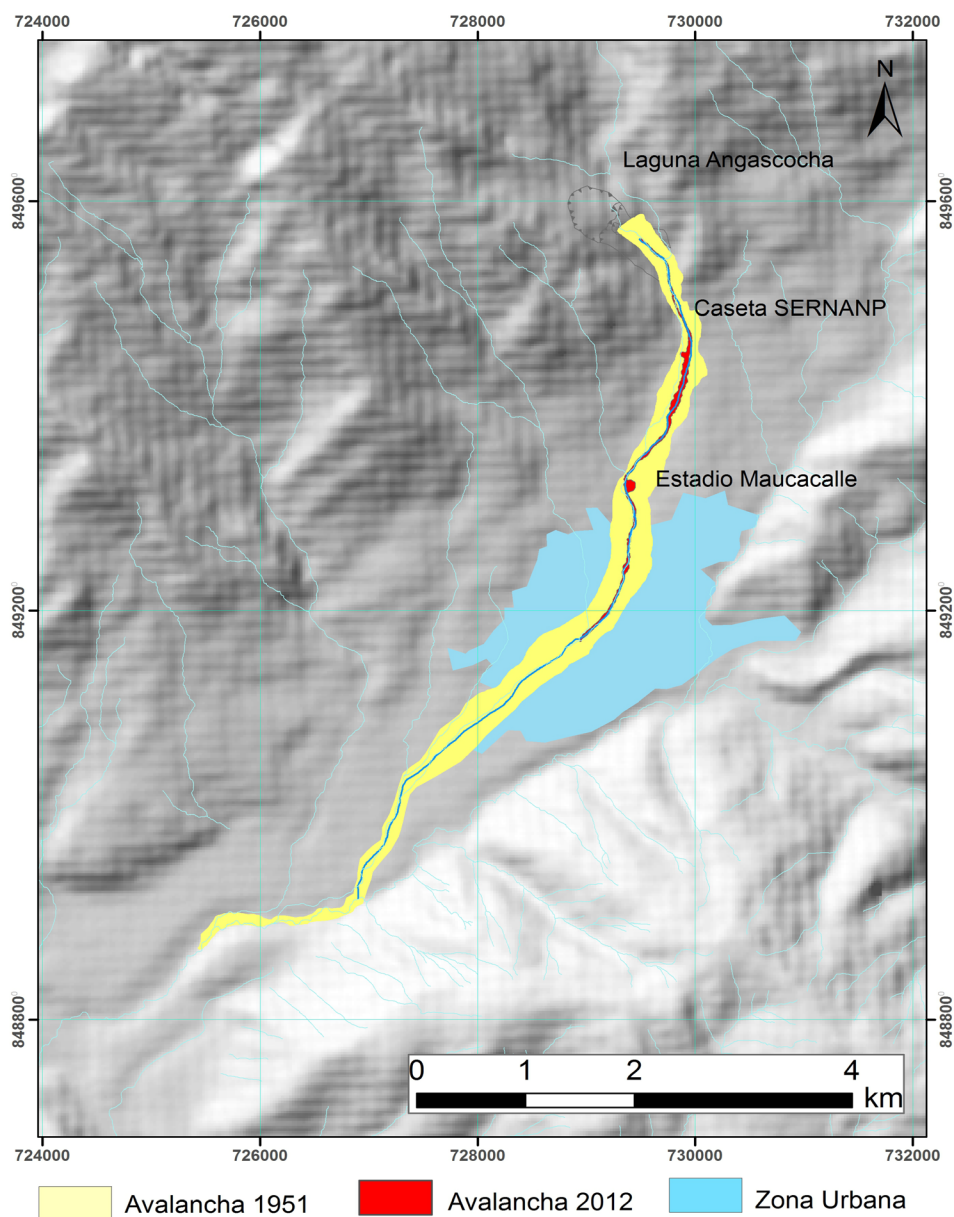


Figura 7. En amarillo y rojo se observan las áreas de posible afectación en la ciudad de Abancay (celeste) por flujos de detritos. En amarillo: evento extremo de 36 Mm³ (similar al de 1951). En rojo: avalancha de detritos de marzo del 2012. Modificado de: Valderrama (2012)./ **Figure 7.** Yellow shows the most potential affected areas in Abancay city (in blue) during the simulation of a debris flow similar to the one occurred in 1951 (36 mM³). Red colours shows the affected areas during the 2012 event.

Dendrocronología

Un total de 130 muestras de 80 árboles fueron muestreadas. Los resultados preliminares del estudio de dendro-climatología muestran picos negativos de crecimiento de anillos coincidentes con años documentados de sequías en la región (Fig. 8).

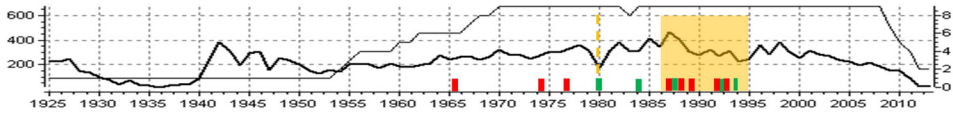


Figura 8. Cronología preliminar de la zona de Abancay. El registro de la sequía es representada con rectángulos rojos (sequías anuales) y verde (marzo-mayo sequías) en la parte inferior. Este registro sólo está disponible desde 1964. La correlación con el registro de anillos resalta las crisis en 1980 y entre 1986 y 1994. Una pequeña recuperación en el crecimiento parece suceder en 1990, pero la tendencia general desde finales de los 80' s parece ser negativa. / **Figure 8.** Preliminary chronology in Abancay area. Red (annual droughts) and green rectangles (march to may droughts) are representing the recorded droughts since 1964. These dates are correlated with the tree ring record showing drought crisis during 1980 and between 1986 to 1994. A small recuperation seems to appear during 1990, however the general trend is negative.

Respecto al uso de los eucaliptos como paleo-indicadores de la magnitud de la avalancha de 2012, este estudio aún está en proceso. La investigación de campo permitió identificar varios árboles afectados por el material arrastrado durante el flujo de detritos de 2012. Estas señales en los árboles se emplearán para calibrar los parámetros de fricción en la modelización de este evento y en la simulación de otros bajo diferentes escenarios (Fig. 9).



Figura 9. Detalle de eucaliptos dañados durante la avalancha de detritos del cerro Chuyllurpata del 2012. La altura del impacto sirve para calibrar la modelización del evento teniendo un indicador real de la altura que alcanzó el flujo en diversos puntos a lo largo de la quebrada de Sahuanay. / **Figure 9.** Eucalyptus trees damaged after the debris flow of 2012. The position and height of the scars in several points along the channel will permit to calibrate the event model.

Discusión y conclusiones

A partir de los estudios realizados se muestra que gran parte de la cuenca del río Mariño es altamente susceptible a los movimientos en masa. En este sentido, parece que los elementos determinantes para la ocurrencia de eventos geo-hidrologicos en el área son por un lado el agrietamiento particularmente denso que muestran los macizos estudiados, la presencia de depósitos de remoción antiguos asociados a la actividad glaciaria pre-existente en la zona estudiada y la acción del agua tanto superficial -en forma de escorrentía-, como sub-superficial proveniente de la infiltración. Estos elementos junto con las elevadas pendientes del área justifican la inestabilidad de los materiales (Hervás, 2002; Moreiras, 2009). El proceso específico que genera esta inestabilidad deriva en parte de la infiltración del agua de lluvia en las discontinuidades y fracturas de la roca meteorizando sus paredes y formando arena o arcilla. Estos materiales finos pueden viajar en suspensión por el interior de las juntas, rellenando las discontinuidades y disminuyendo la estabilidad de los macizos (Bieniawski, 1989; Perri, 1992).

Desde el punto de vista hidrogeológico, el estudio reveló que las aguas subterráneas podrían tener un papel fundamental en la generación de procesos geo-hidrologicos. Como ya se ha indicado anteriormente esto ocurre específicamente en las calizas de la cuenca, las cuales están altamente fracturadas, lo que les otorga permeabilidad y transmisibilidad elevada que las convierten en acuíferos potenciales. Estas limitan en la parte inferior (base del acuífero), con una intercalación de lutitas y areniscas del Grupo Mitú, de característica impermeable y clasificado como acuitardo. Esta condición se evidencia por la presencia de numerosas surgencias de agua en el límite entre el acuífero y el acuitardo. Una de estas surgencias está relacionada a la avalancha de detritos del cerro Chuyllurpata del 2012 y se ubica en la base del deslizamiento, la misma que en época de lluvia alcanza un caudal de $0.51 \text{ m}^3/\text{s}$ (aforado en marzo del 2015).

Efectivamente esta relación entre la ocurrencia de procesos geo-hidrologicos y la presencia de aguas subterráneas y aguas sub-superficiales es evidenciada por los estudios geofísicos llevados a cabo en el sector de la cabecera del flujo de detritos de 2012 que se originó en el cerro Chuyllurpata y se desplazó a lo largo de la quebrada Sahuanay. La anomalía de baja resistividad (valores menores a $200 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$), que correspondería a la presencia de una fractura con infiltración de agua, es coherente con la hipótesis de que el flujo de detritos de 2012 fue desencadenado por flujos sub-superficiales, que incrementaron la presión de poros, favorecidos por las lluvias continuas de los días previos. A esta complejidad en la génesis de flujo de detritos, se une su violenta dinámica que ampliamente quedó evidenciada en los daños generados por el flujo de 2012. Este evento movilizó 3.6 millones de m^3 de material que afectó a 173 viviendas dejando 265 damnificados y 4 fallecidos (Villacorta y Valderrama, 2012). Ocurrió además en el mismo lugar que el de 1951 por lo que asumimos que fue una reactivación del mismo aunque de menor tamaño, pues este último en términos de material movilizado (teniendo en cuenta el tamaño de la cicatriz en la cabecera) ha sido más violento y supone un precedente para la posibilidad de ocurrencia de un evento similar en el futuro. Sin embargo las consecuencias en la actualidad pueden ser peores que las que tuvieron lugar en 1951 debido al desarrollo poblacional de Abancay y Tamburco. De hecho, la modelización de este evento señala una probable afectación de los distritos de Tamburco y Abancay, especialmente de las viviendas ubicadas en las proximidades del cauce que serían alcanzadas por un flujo estimado en la modelización con una altura de 7 m.

Actuar sobre la quebrada de Sahuanay es por tanto un punto clave en la prevención de desastres asociados a flujos de detritos en el área de estudio. Tras el evento de 2012 una estructura hidráulica de 4 m de ancho fue construida a lo largo del cauce con el objetivo de canalizar

la corriente y controlar futuros flujos de detritos. Desde su construcción, tras el evento, esta estructura ha sido deteriorada por la propia corriente que ha erosionado las paredes del canal, indicando esto un desequilibrio en el sistema del río. Así mismo la modelización del evento de 1951, evidenció que un futuro evento de magnitud similar sobrepasaría la canalización actual por lo que los autores de este trabajo opinan que la estructura está inadecuadamente diseñada y que no se tuvo en cuenta la dimensión del volumen que podría movilizarse con una nueva avalancha de detritos de gran dimensión (Figs. 10 y 11).



Figuras 10. Canalización de la quebrada Sahuanay construida en el 2014-2015 (vistas hacia aguas arriba y aguas abajo). Obsérvese como el agua viene erosionando las paredes del canal (fotos: Fluquer Peña, 2015).-/ **Figures 10.** Sabuanay stream channeling built in 2014-2015. Left picture: upstream; right picture: downstream. It is possible appreciate how the stream is eroding the bounds of the channel.

Es evidente que la presencia de agua tanto superficial (escorrentía) como subterránea es fundamental en la ocurrencia de fenómenos geo-hidrológicos en Abancay. La lluvia por tanto juega un papel importante en la generación de estos eventos por lo que un buen conocimiento del registro climático del área es fundamental para entender la frecuencia y magnitud de los procesos que allí suceden. Sin embargo, como ya se ha comentado, en las zonas de montaña en general, y en Abancay en concreto, este tipo de registros son muy limitados por lo que estable-

cer relaciones directas entre precipitación y eventos es muy complicado. Es por esto que parte de este estudio está dedicado a paliar esta falta de datos mediante el uso de la dendrocronología. En este sentido, y aunque el estudio dendrocronológico se encuentra aún en una fase preliminar, se podrá especular que efectivamente las Intimpas (*P. glomeratus*) son sensibles a la precipitación y que podrían funcionar bien como proxy de esta variable que está altamente asociada a la ocurrencia de fenómenos geohidrológicos. Del mismo modo, la ausencia de estaciones de aforo fijas en el área dificulta el estudio de la dinámica y magnitud de los flujos de detritos, sin embargo la presencia de árboles dañados durante el evento a lo largo del cauce puede dar una medida de la altura que alcanzó el flujo y así ayudar a calibrar nuestros modelos.



Figuras 11. Canalización de la quebrada Sahuanay construida en el 2014 - 2015 (vistas hacia aguas arriba y aguas abajo). Obsérvese como el agua viene erosionando las paredes del canal (fotos: Fluquer Peña, 2015)./ **Figures 10.** Sabuanay stream channeling built in 2014 - 2015. Left picture: upstream; right picture: downstream. It is possible appreciate how the stream is eroding the bounds of the channel.

Como conclusión y a modo de sumario, de este estudio puede extraer que la ocurrencia de desastres geo-hidrológicos en el área de Abancay está asociada a las características geomecánicas e hidrogeológicas de los materiales del área así como a la precipitación, pues dichos factores condicionan las tasas de infiltración y escorrentía que funcionan como agentes detonantes

de los eventos. Por otro lado se concluye que la estructura hidráulica actual en la quebrada Sahuanay es insuficiente de cara a eventos similares a los que ya han ocurrido y que requiere de medidas urgentes que puedan reducir la vulnerabilidad de la población ante el elevado peligro de flujos de detritos existente. Es importante recalcar que más esfuerzo es necesario para caracterizar el clima del área y así poder establecer una relación directa entre ocurrencia de eventos y precipitación. En este sentido pensamos que las Intimpas han demostrado ser sensibles a las variaciones en la precipitación por lo que se seguirá trabajando para establecer si su uso aportaría información para completar el registro climático de la ciudad de Abancay y por ende de este sector central del territorio peruano.

Agradecimientos

Esta investigación es financiada por el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico y la Universidad de Geneva (Suiza). Los autores agradecen a la Ing. Maribel Madueño del Gobierno Regional de Apurímac por sus observaciones al documento, así como al Ing. Walter Pari, por los aportes con el estudio geofísico y a la bachiller Norma Sosa por su asistencia en los trabajos de campo.

Referencias

- Amézquita, A., Gutiérrez, S. y Concha, M. 1988. El Imponente Nevado Ampay y la Expuesta Ciudad de Abancay. Informe técnico inédito. Corporación de Desarrollo de Apurímac. Abancay. 9 pp.
- Andres, N., Vegas Galdos, F., Lavado Casimiro, W. S., y Zappa, M. (2014). Water resources and climate change impact modelling on a daily time scale in the Peruvian Andes. *Hydrological Sciences Journal*, 59(11), 2043-2059.
- Apaza, F., Bello, W., Jara, W., Tume, C., Corahua, S., Palomino, D., y Chavez, J. (2010). Informe de estimación de riesgo del sector de FONAVI distrito Abancay prov. Abancay – Región Apurímac. Informe técnico inédito, 30 p.
- Baca, C., Benavente, R., Loayza, C., y Acurio, H. (2007). Estudio: mapa de peligros de la ciudad de Abancay. PROYECTO INDECI: PNUD PER/02/051 00014426 - Ciudades Sostenibles. Apurímac. 300p.
- Bieniawski, Z. T. (1989). Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering. John Wiley & Sons. (Eds). 251 p.
- Borga, M., Stoffel, M., Marchi, L., Marra, F. y Jakob, M. (2014). Hydrogeomorphic response to extreme rainfall in headwater systems: flash floods and debris flows. *Journal of Hydrology*, 518, 194–205.
- Carlotto, V., Tintaya, D., Cárdenas, J., Carlier, G. y Rodríguez, R. (2006). Fallas transformantes permo-triásicas: la falla Patacancha-Tamburco (Sur del Perú). *Resúmenes 13º Congreso Peruano de Geología*.
- Comunidad Andina, (2008) Pérdidas por desastres en Perú entre 1970–2006. <http://www.comunidadandina.org/predecan/doc/r2/osso/Cons025-2006-CorporacionOSSO-Articulo-Peru.pdf>. Accessed 2 September 2016
- Dávila, S. y Zavala, B. (1997). Inspección de riesgo geológico en el área de Ccocha y Pumarana (Distrito de Tamburco, provincia de Abancay y departamento de Apurímac). Informe técnico INGEMMET. Dirección de Geotecnia. 24 p. 1 mapa, Lima.
- DesInventar, (2015). DesInventar – Inventory system of the effects of disasters, Corporación OSSA, Cali, Colombia. <http://desinventar.org>. Accessed 12 December 2015
- Hervás, J. (2002). Elaboración de mapas de susceptibilidad de deslizamientos mediante SIG, teledetección y métodos de evaluación multicriterio: aplicación a la depresión de Tirajana (Gran Canaria).
- INDECI, (2013). Compendio estadístico del INDECI 2013, en la preparación, respuesta y rehabilitación ante emergencias y desastres. Reporte. Lima. 103 p.
- INGEMMET, (2002). Estudio de Riesgos Geológicos del Perú Franja N° 2. INGEMMET, Serie C: Geología e Ingeniería Geológica, Boletín N° 27, Dirección de Geología Ambiental, 368 p., 20 figs., 145 fotos., 27 mapas, Lima.
- INGEMMET, (2003). Estudio de Riesgos Geológicos del Perú Franja N°3, INGEMMET, Serie C: Geología e Ingeniería Geológica, Boletín N° 28, Dirección de Geología Ambiental, 373 p., 21 figs., 159 fotos., 17 mapas, Lima.
- Madueño, M. (2011). Inspección de la Seguridad Física del sector Ampay. Informe técnico, Subgerencia de Defensa Civil Apurímac. 16 p. Inédito.

- Marocco, R. (1975). Geología de los cuadrángulos de Andahuaylas, Abancay y Cotabambas. Instituto de Geología y Minería. Lima - Perú. 58 p.
- MINAM, (2015). Mapa nacional de cobertura vegetal: memoria descriptiva / Ministerio del Ambiente, Lima: 108 p.
- Moreiras, S. M. (2009). Análisis Estadístico Probabilístico de las variables que condicionan la inestabilidad de las laderas en los valles de los ríos Las Cuevas y Mendoza. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 65(4), 780-790.
- O' Brien, J.S. (2004). FLO - 2D User's Manual. Versión 2004.6.1, Nutrioso, Arizona.
- Perri, G. (1992). Una Extensión de la Metodología de Bieniawski-Romana para Estimar la Estabilidad de Taludes en Rocas.
- Rinn, F. (2003). TSAP - Win: Time Series Analysis and Presentation for Dendrochronology and Related Applications. Version 0.55 User reference. Heidelberg, Germany (<http://www.rimatech.com>). Salzmänn, N., et al., 2009. Integrated assessment and adaptation to climate change impacts in the Peruvian Andes. *Advances in Geosciences*, 22, 35 - 39.
- Santacana, N., Baeza, B., Corominas, J., Paz, A.D. y Marturiá, J. (2003). A GIS-based multivariate statistical analysis for shallow landslide susceptibility mapping in La Poblada de Lillet Area (Eastern Pyrenees, Spain). *Natural Hazards*, Vol. 30, 281 - 295.
- Schwarb, M., Schwarb M., Acuña D., Konzelmänn T., Rohrer M., Salzmänn N., Serpa Lopez B., y Silvestre E. (2011). A data portal for regional climatic trend analysis in a Peruvian High Andes region. *Advances in Science Research*, 6, 219 - 226.
- Stoffel M. y Bollschweiler M. (2008). Tree-ring analysis in natural hazards research - an overview. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 8, 187 - 202.
- Vargas, P. (2009). El cambio climático y sus efectos en el Perú. BCRP-Docmento de Trabajo, (2009-14).
- Valderrama, P., Villacorta, S., Madueño, M. y Chumbes, R. (2012). Origen y dinámica de los flujos de detritos del cerro Chuyllurpata y su implicación en la seguridad física de la ciudad de Abancay - Apurímac. Presentación en PowerPoint. Lima, *16º Congreso Peruano de Geología*, 2012.
- Villacorta, S. (2007). Análisis de la Susceptibilidad por Movimientos de Ladera en la Cuenca del Río Llamínchan, (Cajamarca-Perú). Tesis. Master Internacional Aprovechamiento Sostenible de los Recursos Minerales. RED: ALFA-DESIR
- Villacorta, S., Valderrama, P., y Roa, R. (2012). *Primer reporte de Zonas críticas de la región Apurímac*. Informe técnico DGAR-INGEMMET.
- Villacorta, S. y Valderrama, P. (2012). *Evaluación del flujo de detritos de Tamburco, provincia de Abancay región de Apurímac*. Informe técnico A6595. NGEMMET. 29 p. 1 mapa.
- Villacorta, S., Vasquez, E., Valderrama, P. y Madueño, M. (2013). *Segundo reporte de Zonas críticas por peligros geológicos y geohidrológicos en la región Apurímac*. Informe técnico DGAR-INGEMMET. 46 p. 3 mapas.

Recibido: 09 de Setiembre del 2016

Aceptado: 28 de Noviembre del 2016