



## XVIII Congreso Peruano de Geología

# ESTUDIO INTEGRAL DIRIGIDO A LA EVALUACIÓN DE EVENTOS GEO-HIDROLÓGICOS Y CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CIUDAD DE ABANCAY (PERÚ)

Sandra Villacorta<sup>1</sup>, Fluquer Peña<sup>1</sup>, Fredy Jaimes<sup>1</sup>, Clara Rodríguez<sup>2</sup>, Carlos Luza<sup>1</sup>, Walter Pari<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Instituto Geológico Minero y Metalúrgico- INGEMMET, Lima-Perú. (svillacorta@ingemmet.gob.pe)

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

## 1. Introducción

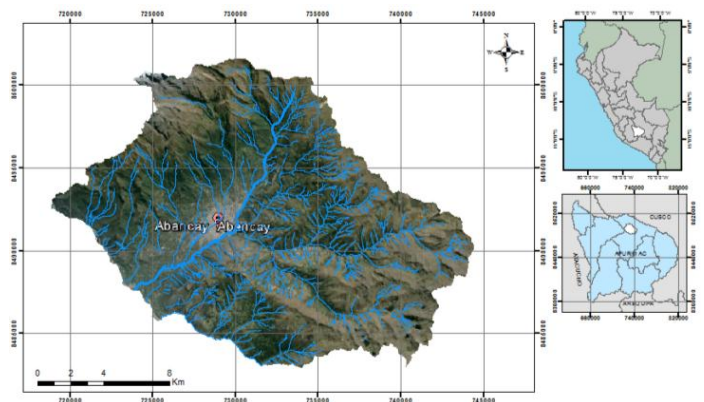
Actualmente, la ciudad de Abancay presenta un desarrollo continuo reflejado tanto en su crecimiento poblacional como en la infraestructura construida, producto del que se tiene la ocupación de nuevas áreas para vivienda y cultivo sin considerar las características geodinámicas y climáticas de la zona. Las constantes lluvias, en algunos casos, extremas; generan diversos fenómenos geohidrológicos que afectan a la ciudad y poblados aledaños. En tal sentido el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico como parte del proyecto GA44B "Estudio de Peligros en la ciudad de Abancay" en colaboración con la Universidad de Geneva (Suiza) eligió a la micro-cuenca del río Mariño en Abancay (Apurímac) para desarrollar estudios geológicos, hidrogeológicos, geofísicos y dendrocronológicos a escala de detalle (1:10 000), a fin de prever futuros escenarios de riesgo de desastres en su ámbito. Los resultados del estudio permitirán proponer medidas para una adecuada gestión del riesgo de desastres en la ciudad de Abancay y la micro-cuenca del río Mariño.

**PALABRAS-CLAVE:** Movimientos en masa, Peligros geológicos, Prevención de desastres.

## 2. Generalidades

El área de estudio corresponde a la micro-cuenca del río Mariño ubicada en el área central y oriental del territorio peruano, en la provincia de Abancay de la región Apurímac (figura 1). Políticamente comprende parte de los distritos de Tamburco y Abancay. Cuenta con un área

aproximada de 200 km<sup>2</sup> y se ubica entre las coordenadas UTM: Norte: 8502000- 8484000, Este: 721000 – 745000.



*Figura 1. Localización de la cuenca del río Mariño en Abancay - Apurímac.*

La micro-cuenca del río Mariño presenta una fisiografía abrupta con montañas que separan las aguas hacia los ríos Apurímac y Pachachaca, donde destaca el ex nevado Ampay con una altura de 5190 msnm, hoy considerado como Santuario Nacional por el Servicio Natural de Áreas Naturales Protegidas (SERNANP). Al pie del nevado 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. Respecto al 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.

### 3. Aspectos Geológicos y Geomorfológicos

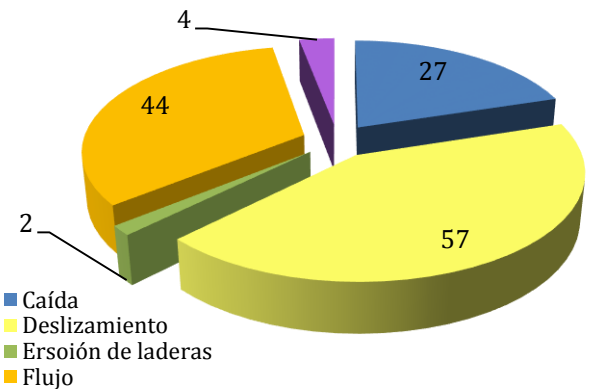
En el área de estudio destacan los relieves abruptos con una fuerte influencia de geoformas glaciares, gravitacionales y aluviales. Dentro de las geoformas glaciares se destacan el nevado Ampay que actualmente ha reducido su extensión debido a su progresivo deshielo. Otros rasgos glaciares son las morrenas que funcionan como diques naturales 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, destacando los grandes deslizamientos y avalanchas como la de Ccocha y Pumarana que arrasó dichos poblados en 1997 o la avalancha del cerro Chuyllurpata que afectó la ciudad en 1951 y 2012. Hacia la zona baja de la quebrada Sahuanay (valle del Olivo) se tiene 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 et al, 2013).

Respecto a las unidades geológicas, la cuenca del río Mariño, está conformada por rocas desde las antiguas (Paleozoico) a los materiales más recientes (Cuaternario; Marocco, 1975). En la sección de la carretera Abancay – Huanipaca, la sucesión inicia 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 (Pensilvaniano). 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 tiene areniscas masivas feldespáticas intercaladas con flujos piroclásticos de origen volcánico pertenecientes al Grupo Mitu (Permo-Triásico). La columna descrita esta plegada por anticlinales y sinclinales de dirección NE-SO, los cuales se encuentran paralelos a la quebrada Mariño, y en menor medida por pliegues transversales de dirección NO-SE. Asimismo, es notoria la influencia del sistema de fallas normales de dirección NE-SO denominado Patacancha-Tamburco (Carlotto et al, 2006).

### 4. Peligros Geológicos

De acuerdo a los datos del INDECI y la del inventario nacional de peligros geológicos del INGEMMET (visualizable por el GEOCATMIN) se han registrado 141 peligros geológicos, de los cuales se puede desglosar una mayor ocurrencia de deslizamientos, caída de rocas y flujo de detritos (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Los procesos más relevantes por su afectación, registrados entre 1951 y 2014, se encuentran señalados en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. 1.**

Gráfico 1. Registro porcentual de los peligros geológicos registrados en Abancay (Fuente:



INGEMMET, 2014).

Tabla 1. Eventos más desastrosos en la ciudad de Abancay y cuenca del río Mariño (INGEMMET, INDECI)

Paraje/lugar	Evento	Peligro	Vulnerabilidad	Fecha
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	1951, 2012
Ccocha Pumarana	Movimiento Complejo	Muy Alto	Muy alto	1997
Asillo	Deslizamiento	Alto	Alto	Abril 2012

### 5. Investigaciones desarrolladas

#### 5.1. Caracterización hidrogeológica y geofísica

Las aguas subterráneas tienen una función condicional para la generación de movimientos en masa debido a que las características hidrogeológicas de los materiales (permeabilidad, transmisividad) contribuyen a su activación. Esto se evidencia claramente en los materiales encontrados en el cerro Chuyllurpata, margen derecha de la quebrada Sahuanay. En dicho sector la presencia de calizas altamente fracturadas del Grupo Copacabana inferior, el cual constituye un acuífero fisurado-kárstico; sumada a la elevada precipitación pluvial genera infiltración en el subsuelo volviendo inestable los terrenos. El ingreso de las aguas de lluvia en las calizas que tiene puntos de surgencia en la parte baja en numerosos manantiales (56 inventariados). En contacto con las lutitas y areniscas del Grupo Copacabana superior y con las areniscas y lutitas rojas del Grupo Mitu, estas dos unidades tienen características impermeables y se clasifican como acuitardos.

En el área de la quebrada Sahuanay, se tiene hasta 4 surgencias, una de las cuales está relacionada a la avalancha de detritos de marzo del 2012. Dicha surgencia en época de lluvia alcanza un caudal de 0.51 m<sup>3</sup>/s (aforado en marzo del 2015). La quebrada Sahuanay actualmente se viene canalizando con estructuras

hidráulicas inadecuadamente diseñadas. Así puede verse como se ha encajado el cauce con un ancho de 4 m demasiado estrecho pues no se ha considerado la dimensión del volumen que podría mobilizarse con una nueva avalancha de detritos (fotos 1 y 2).



Fotos 1 y 2. 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 (fotos: Fluquer Peña, 2015).

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. Así por ejemplo, los resultados en el área de la avalancha del cerro Chuyllurpata, muestra en el perfil TM02 (figura 2) resistividades discontinuas de un lado correspondiendo a las rocas del substrato y una anomalía baja a 55 m de profundidad con valores menores a 200 Ohm-m. Esto indicaría la acumulación del material suelto en la parte central de un cuerpo fracturado (sector donde se infiltra el agua).

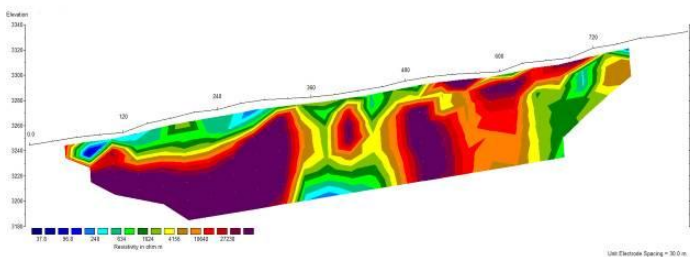


Figura 2. Perfil eléctrico TM02 sector cerro Chuyllurpata, cerca al escarpe principal de la avalancha del 2012. Se ha determinado una anomalía de muy baja resistividad que correspondería a la presencia de una debilidad con filtración de agua.

**5.2. Análisis de susceptibilidad por movimientos en masa y modelización de peligro por flujos**

Esta evaluación se ha basado en un modelo heurístico multivariado (Villacorta, et al, 2007; Santacana et al, 2003). Las variables analizadas fueron: características geológico-estructurales, a escala 1:10,000 del INGEMMET; datos geomorfológicos recopilados en campo; características hidrogeológicas basadas en las lito-permeabilidades de las unidades geológicas; 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. Del modelo resultante (figura 3) se puede observar que gran parte de la cuenca del río Mariño presenta susceptibilidad media a muy alta a la generación de deslizamientos, derrumbes y flujos de detritos.

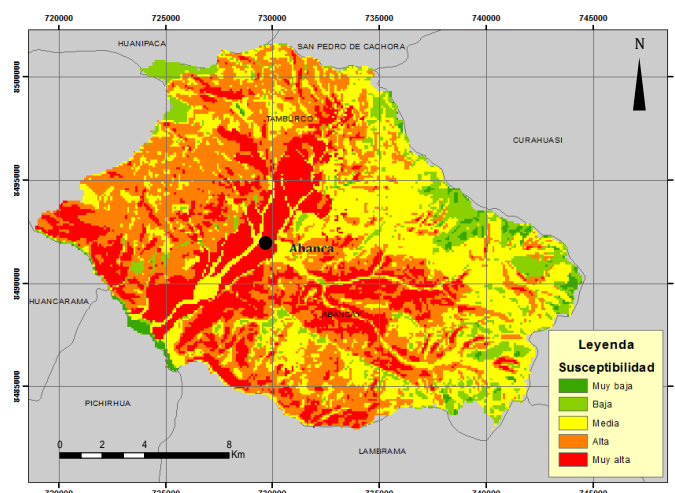


Figura 3. Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa de la cuenca del río Mariño.

Siendo las avalanchas, uno de los eventos que más han impactado a la ciudad y con una alta probabilidad de seguir afectándolos; se analizó la dinámica de los flujos mediante la simulación numérica, para lo cual se empleó el modelo bidimensional FLO-2D (1 (O' Brien, 2004). Los parámetros reológicos del flujo se estimaron en base a las características geológicas y 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.

El resultado de la simulación para un evento extremo de 36 Mm3, donde se buscó replicar la avalancha de detritos del cerro Chuyurpata-Quebrada Sahuanay del 18 de febrero de 1951, permitió observar una futura afectación por flujos en parte de los distritos de Tamburco y Abancay (Figura 4). Las alturas de flujo estimadas alcanzan hasta 7 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.

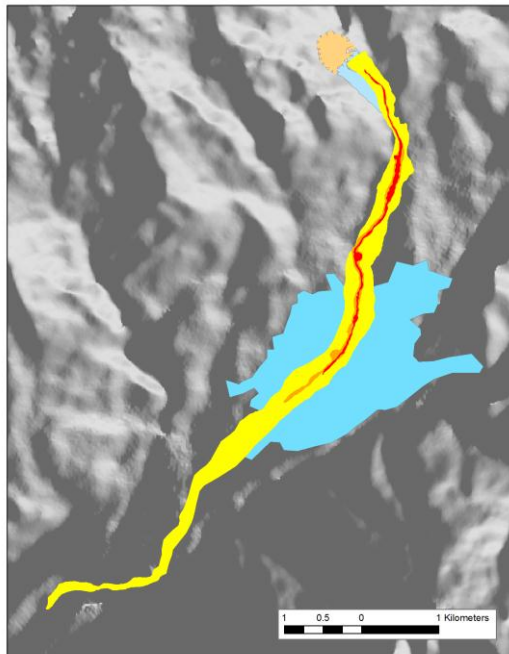


Figura 4. Área de posible afectación en la ciudad de Abancay (celeste) por flujos de detritos (avalanchas, huaycos). En amarillo: evento extremo de 36 Mm3 (similar al de 1951). En rojo: avalancha de detritos de marzo del 2012. Modificado de: Valderrama (2012).

**Caracterización geomecánica del macizo rocoso**

La caracterización 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, espaciamiento de la discontinuidad, y la presencia de agua subterránea. En la tabla 2 se muestra los resultados de la clasificación geomecánica de los macizos rocosos analizados, cuyas estaciones geomecánicas se muestran en la tabla 3. Los resultados del análisis permiten indicar que los macizos rocosos en Abancay presentan una

Tabla 2. Calidad del macizo rocoso mediante el RMR.

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

calidad de regular a buena, disminuyendo esta hacia el oeste de la cuenca del río Mariño.

**5.4. Análisis de estabilidad de macizos rocosos**

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) cuyos resultados son resumidos en la tabla 3 mostrando que 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. De acuerdo con los resultados de esta caracterización geomecánica se ha elaborado una zonificación geomecánica preliminar de la cuenca Mariño (figura 3).

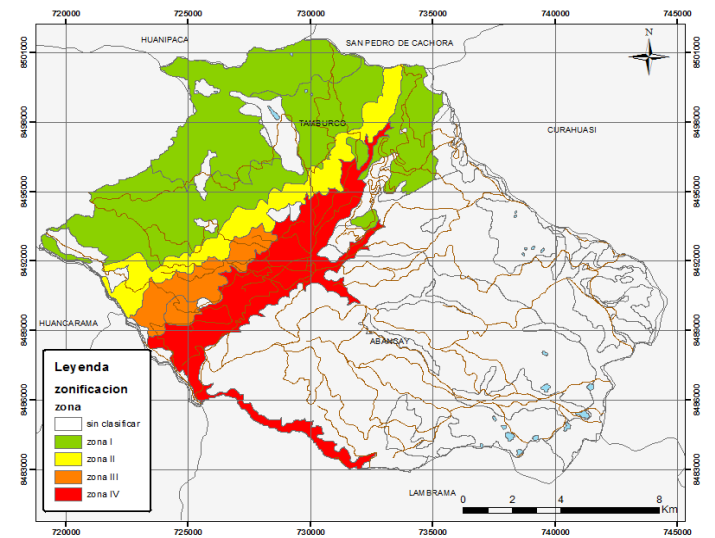


Figura 3. Zonificación geomecánica preliminar de la cuenca Mariño

Se debe considerar que los macizos rocosos evaluados muestran un agrietamiento particularmente denso. El espaciamiento observado contribuye a un incremento de la meteorización, así como en la disminución de la estabilidad de los mismos, ya que el agua de lluvias al ingresar en las discontinuidades meteoriza las paredes de la roca formando arena o arcilla. Así mismo la arcilla puede viajar en el interior de las juntas, suspendida en el agua, pudiendo rellenar las discontinuidades disminuyendo la estabilidad de los macizos.

Tabla 3. Análisis de estabilidad de los macizos rocosos en la cuenca del río Mariño

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

**5.5 Dendrocronología**

Esta línea de investigación surge de la necesidad de completar el registro sistemático climático existente en

Abancay así como aportar datos sobre la magnitud del huayco de 2012. Bajo esta perspectiva, los anillos de los árboles pueden proporcionar un registro paleo-climático continuo y anual, útil para la comprensión de los cambios climáticos pasados y que funcionan como base para el estudio de patrones actuales y futuros, así como información geomorfológica de los procesos que ocurren en su entorno inmediato.

Entre septiembre y octubre de 2015, se tomaron muestras de árboles *Podocarpus glomeratus* (localmente llamado Intimpa) en el área del Santuario Nacional de Ampay situada en el distrito de Tamburco entre 2880-3800 m.s.n.m., el cual cuenta con una extensión 600 ha correspondientes a bosques de Intimpa. Estos árboles crecen en las laderas y fondos de valle, cubriendo antiguos depósitos morrénicos y de movimientos en masa. Un total de 130 muestras de 80 árboles que crecen en altitudes entre 3.300 hasta 3.600 m.s.n.m., fueron muestreadas. Además, se muestrearon eucaliptos creciendo a lo largo de la quebrada Sahuanay y que fueron afectados por la avalancha del 2012 aportando información sobre el tamaño y caudal aproximado de este evento.

Los resultados preliminares del estudio de dendroclimatología muestran picos negativos de crecimiento de anillos coincidentes con años documentados de sequías en la región (figura 4). Por lo que aunque el estudio aún se encuentra en su primera fase de realización, podríamos especular que efectivamente las Intimpas 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 (foto 3).

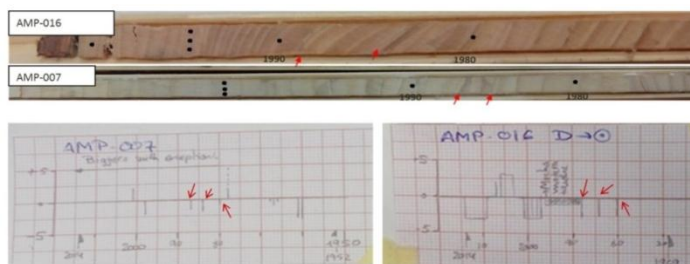


Figura 4. Dos ejemplos de la reducción en anillos de árbol presumiblemente relacionados con las sequías en Abancay

Respecto al uso de los eucaliptos como paleo-indicadores de la magnitud de la avalancha de 2012, este estudio aún está en proceso. La idea básica es emplear estas señales en los árboles para calibrar los parámetros de fricción en la modelización de este evento y en la simulación de otros bajo diferentes escenarios (Figura 6).

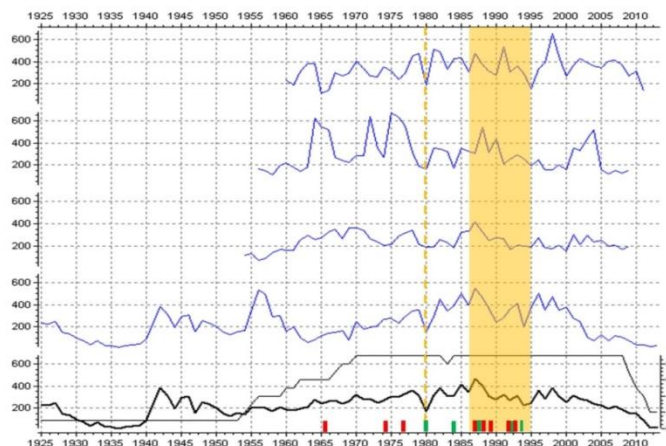


Figura 5. Cronología preliminar (en negro) de la zona de Abancay. El registro de la sequía es representada con rectángulos rojos (sequías anuales) y verde (marzo-mayo sequías) en la parte inferior. Este registro sólo está disponible desde 1964. La correlación con el registro de anillos resalta las crisis 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 ir hacia abajo.



Foto 3. 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.

## 6. 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 teniendo como principales factores la elevada meteorización, vegetación, pendiente, hidrología, geomorfología, topografía; que influyen en la formación de suelos residuales, así como en la estabilidad de los macizos rocosos.

Los macizos evaluados muestran un agrietamiento particularmente denso cuyo espaciado contribuye a un incremento de la meteorización. Su calidad varía de regular a buena, de acuerdo con el RMR.

La mayoría de los problemas geodinámicos se presentan en la capa de suelos por la circulación de flujos sub-superficiales (incremento de la presión de poros) los cuales se incrementan en los periodos de lluvias.

Según la geofísica, en el sector de la corona de la avalancha del cerro Chuyllurpata, se ha encontrado a 55

metros de profundidad una anomalía de muy baja resistividad con valores menores a 200 Ohm-m que correspondería a la presencia de una fractura o falla con infiltración de agua.

Los árboles son una valiosa fuente de información en las zonas de montaña donde no se dispone de un registro sistemático de información climática. Las Intimpas del área del Santuario Ampay han demostrado ser sensibles a las variaciones en la precipitación por lo que podrían usarse para completar el registro climático de la ciudad de Abancay.

La dinámica de los flujos (avalanchas, huaycos) en Abancay es compleja y violenta, lo cual se ve reflejado en el resultado de la modelización de flujos del cerro-Chuyllurpata-quebrada Sahuanay, tomando como base el episodio de 1951. El resultado señala una probable afectación de Tamburco y Abancay sobre todo de las viviendas ubicadas en el cauce que sería alcanzada por flujos con una altura máxima de 7 metros sobre el área del cauce.

La quebrada Sahuanay requiere de medidas urgentes que puedan reducir la vulnerabilidad de la población ante el elevado peligro por avalanchas existente. Actualmente se viene canalizando el agua con estructuras hidráulicas inadecuadamente diseñadas.

## Referencias

- 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.
- Carlotto, V., Tintaya, D., Cárdenas, J., Carlier, G., Rodríguez, R. 2006. Fallas transformantes permo-triásicas: la falla Patacancha-Tamburco (Sur del Perú). Resúmenes XIII Congreso Peruano de Geología.
- INDECI. 2013. Compendio estadístico del INDECI 2013, en la preparación, respuesta y rehabilitación ante emergencias y desastres. Reporte. Lima. 103 p.
- 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.
- INGEMMET. 2014. Especificaciones técnicas: Leyenda y Simbología de Peligros Geológicos. Instituto geológico minero y metalúrgico. 3p.
- O' BRIEN, J.S. 2004. FLO-2D User's Manual. Versión 2004.6.1, Nutrioso, Arizona.
- Santacana, N.; Baeza, B.; Corominas, J.; Paz, A.D. Marturiá, J. 2003. A GIS-based multivariate statistical analysis for shallow landslide susceptibility mapping in La Pobla de Lillet Area (Eastern Pyrenees, Spain). Natural Hazards, Vol. 30, 281-295
- Villacorta, S. 2007. Análisis de la Susceptibilidad por Movimientos de Ladera en la Cuenca del Río Llaminchan, (Cajamarca-Perú). Tesis. Master Internacional Aprovechamiento Sostenible de los Recursos Minerales. RED: ALFA-DESIR
- Villacorta, S., Vasquez, E., Valderrama, P., Madueño, M. 2013. Segundo reporte de Zonas críticas por peligros

geológicos y geo-hidrológicos en la región Apurímac. Informe técnico DGAR-INGEMMET. 46 p. 3 mapas.

Valderrama, P., Villacorta, S., Madueño, M., 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, XVI Congreso Peruano de Geología, 2012.