

REPÚBLICA DEL PERÚ

SECTOR ENERGÍA Y MINAS

INSTITUTO GEOLOGICO MINERO Y METALURGICO

INFORME TECNICO
Geología Ambiental

**GEOLOGÍA, GEODINAMICA Y PELIGROS EN LA QUEBRADA
RUNTUMAYO (CUSCO): AVALANCHA Y ALUVION
DEL 12 DE OCTUBRE DEL 2005**

Jose Cardenas
Victor Carlotto
Patricio Valderrama
Leonardo Castillo
Lionel Fidel
Daniel Tintaya

CONVENIO INGEMMET - UNSAAC



LIMA - Perú
Diciembre - 2005

REPÚBLICA DEL PERÚ

SECTOR ENERGÍA Y MINAS

INSTITUTO GEOLOGICO MINERO Y METALURGICO

INFORME TECNICO
Geología Ambiental

**GEOLOGÍA, GEODINAMICA Y PELIGROS EN LA QUEBRADA
RUNTUMAYO (CUSCO): AVALANCHA Y ALUVION
DEL 12 DE OCTUBRE DEL 2005**

Jose Cardenas
Victor Carlotto
Patricio Valderrama
Leonardo Castillo
Lionel Fidel
Daniel Tintaya

CONVENIO INGEMMET - UNSAAC



LIMA - Perú
Diciembre - 2005



RESUMEN

Un alud o avalancha producto de un desprendimiento de hielo y rocas del nevado Verónica (5,893 metros de altura), ocurrió el día 12 de octubre del 2005. Esta avalancha se convirtió, aguas abajo, en la quebrada Runtumayo en un flujo de detritos ó aluvión (huayco) que al llegar al río Vilcanota represó parcialmente sus aguas y afectó unos 400 metros de la línea del ferrocarril. Igualmente, afectó terrenos agrícolas, sistemas de riego y agua potable, felizmente, no se registraron víctimas en el incidente. Esta noticia llamó la atención nacional e internacional debido al bloqueo de la línea férrea y por lo tanto de los turistas que viajaban a Machu Picchu.

El Nevado Verónica se ubica en plena Cordillera Oriental del Sur del Perú donde afloran rocas metamórficas del Paleozoico inferior. La Quebrada Runtumayo es un afluente por la margen derecha del río Vilcanota y nace en el Nevado Verónica. Los estudios geológicos, geodinámicos y de peligros llevado a cabo en colaboración entre el INGEMMET y la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco muestran que el cono ó abanico aluvial de Runtumayo es producto de la superposición de varios depósitos aluviales, muchos de los cuales en relación a aludes o avalanchas. Los estudios de geodinámica del aluvión del 12 de octubre y además la aplicación del modelo numérico bidimensional FLO-2D permitieron construir un Mapa de Peligros.

Las causas de la avalancha están en relación a la ruptura del equilibrio, mecánico o térmico de una parte del nevado. En este caso es muy posible que el detonante haya sido la elevación de la temperatura en la vertiente sur del nevado. Durante esta época de mucha temperatura, días antes del alud se produjo un friaje y en la zona nevó, produciendo sobreacumulaciones de nieve que pudo romperse dando lugar a un alud. Como vemos las causas no están determinadas exactamente pero una combinación de estas pudo desencadenar el alud. A esto hay que añadir el calentamiento global que está produciendo el retroceso rápido de los glaciares y en particular del nevado Verónica que durante los últimos 40 años muestra un retroceso fuerte de decenas de metro de altitud.

La magnitud del aluvión a lo largo de los 6 km ha sido cuantificado, tomando en cuenta las escarpas y desniveles del escarpe de algunos derrumbes pequeños, y sobretodo por el material depositado en el río Vilcanota que es de aproximadamente 48,000 m³.

Una evaluación detallada del nevado Verónica no solo a la altura de Runtumayo sino también de las otras quebradas que nacen en esta montaña es de suma importancia para descartar o confirmar la presencia de grandes aludes futuros. Por lo tanto la realización de estudios glaciológicos es de gran importancia no solo para conocer las características y comportamiento del Verónica, sino también de todos los nevados de la zona.

INTRODUCCION

Las noticias periodísticas informaron que un alud de lodo y piedras bloqueó el jueves 13 de Octubre del 2005, un tramo de la vía férrea hacia la ciudadela inca de Machu Picchu, al sureste de Perú, y dejó aislados a unos 1,750 turistas, en su mayoría extranjeros.

En realidad, el alud o avalancha y el aluvión sucesivo se produjeron el día miércoles 12 de octubre en la noche y afectó unos 500 metros de la línea del ferrocarril, que quedó sumergida en ciertas partes bajo dos metros de agua. Igualmente, afectó terrenos agrícolas, sistemas de riego y agua potable, felizmente, no se registraron víctimas en el incidente.

El aluvión se originó por el desprendimiento (avalancha) de un bloque pequeño de glaciar del nevado Verónica (5,893 metros de altura), el que se transformó aguas abajo en un aluvión de mediana a baja magnitud. Las avalanchas constituyen un peligro latente en la región donde se ubica la ciudadela inca de Machu Picchu. En abril del año pasado un aluvión en las cercanías de ese complejo, precisamente en Aguas Calientes que es la antesala de Machu Picchu, dejó 11 muertos, 6 heridos y 1,500 turistas aislados.

La ciudadela de Machu Picchu está enclavada en el cañón del Urubamba, a unos 100 kilómetros al noroeste del Cusco y sólo se llega a ella mediante vía férrea o en helicóptero.

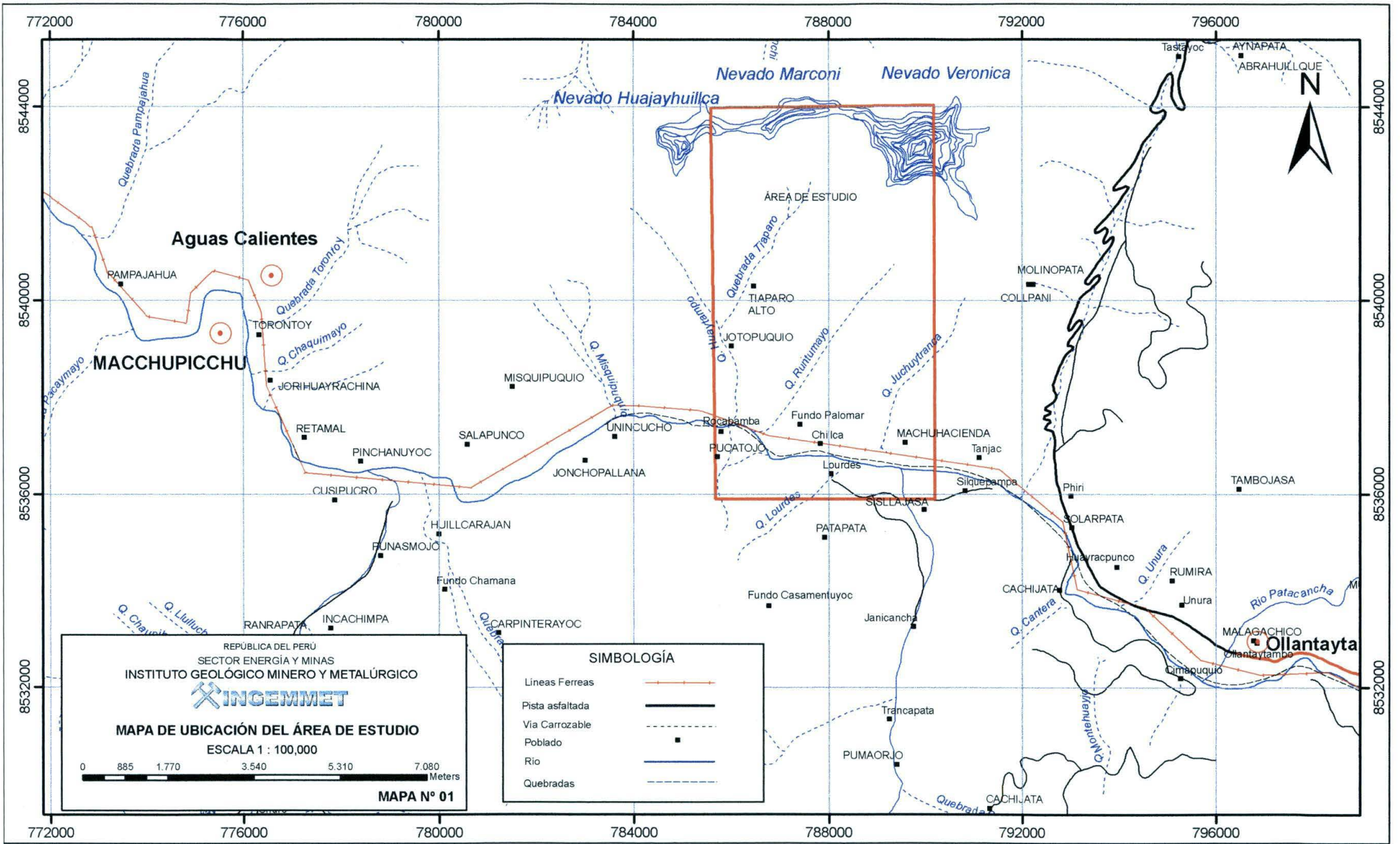
Esta noticia cuyo impacto fue el bloqueo de la línea férrea y por lo tanto de los turistas a Machu Picchu, llamó la atención nacional e internacional, por lo que un equipo de geólogos de la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC), Defensa Civil e INGEMMET, realizaron un sobrevuelo en helicóptero para evaluar preliminarmente la zona de desastre. Posteriormente, geólogos de INGEMMET y la UNSAAC realizaron la evaluación de este evento teniendo como marco el proyecto GA-5 Mapa Geológico, Geodinámico y de Peligros de la Ciudadela Inca de Machu Picchu llevado a cabo por el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET), en convenio con la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC).

OBJETIVOS

El objetivo del presente trabajo fue estudiar la geología, geodinámica y evaluar los daños del aluvión del 12 de Octubre del 2005 ocurrido en la quebrada Runtumayo. Además se planteó construir un mapa de peligros ya que la quebrada atraviesa un cono aluvial sobre el que se sitúan las comunidades de Palomar (margen izquierda) y Tiaparo (margen derecha), donde la actividad productiva principal es la agricultura y la ganadería. Para la elaboración de un mapa de peligros nos hemos basado en la determinación y cartografía geológica de aluviones y además en la aplicación del modelo numérico bidimensional FLO-2D.

UBICACION Y ACCESIBILIDAD

El Alud ocurrido el 12 de Octubre del 2005 se localiza en la quebrada de Runtumayo, que nace en el nevado Verónica (5893 msnm) y que es un afluente por la margen derecha del río Vilcanota (Foto 1). Este sector se ubica en el distrito de Ollantaytambo, provincia de Urubamba y departamento del Cusco (Coordenadas UTM WGS84:



REPÚBLICA DEL PERÚ
 SECTOR ENERGÍA Y MINAS
INGEMMET
MAPA DE UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO
 ESCALA 1 : 100,000
 0 885 1.770 3.540 5.310 7.080 Meters
MAPA N° 01

SIMBOLOGÍA	
Lineas Ferreas	
Pista asfaltada	
Via Carrozable	
Poblado	
Rio	
Quebradas	

0787070-8537589). Se encuentra al Oeste del Conjunto Arqueológico de Ollantaytambo y constituye el límite oriental del Santuario Histórico de Machu Picchu, denominada Zona de Amortiguamiento (Mapa 1).

La quebrada Runtumayo presenta un canal natural de 25 metros de ancho promedio y 06 a 08 metros de altura, por donde circulan aguas muy cristalinas y frías con un caudal promedio de 20 lt/s, procedentes del nevado Verónica. Estas aguas son captadas mediante canales para el consumo humano y agricultura de la zona. Además, en esta quebrada existe un puente carrozable, un puente peatonal y un puente pequeño por donde atraviesa la línea férrea Cusco-Machu Picchu..



Foto 1: Vista aérea del Nevado Verónica mostrando la quebrada Runtumayo

El acceso al área de estudio se realiza por la carretera asfaltada del circuito Valle Sagrado de los Incas: Cusco-Urubamba-Ollantaytambo (70 km). A partir de Ollantaytambo se puede seguir la carretera afirmada a Chilca pasando por la quebrada Runtumayo y que finalmente llega hasta Piscaycucho. Igualmente la línea Férrea que sale de Cusco a Machu Picchu pasa por la quebrada Runtumayo (km 78), en ambos casos existen puentes que fueron cubiertos por el aluvión del 12 de octubre.

MAPAS UTILIZADOS

Para el presente estudio se ha utilizado mapas topográficos del PETT a escala 1:25,000 de Tanca (27-r-IV SE) y 1:10,000 (19-35-8535-112) del Proyecto Vilcanota. También se utilizaron los mapas topográficos a escala 1:100,000 del IGN y geológico de Urubamba (27 r) del INGEMMET.

Fueron de mucha importancia las fotos aéreas de vuelo alto del IGN e imágenes satelitales Landsat J033-2544. A partir de las imágenes satelitales se construyeron

Modelos de Elevación Digital 3D a escala 1:100,000 y 1:25,000, los que se utilizaron en varias etapas del estudio.

MORFOLOGIA

Desde el punto de vista morfológico la zona de estudio se ubica en plena Cordillera Oriental de los Andes del Sur del Perú. La cordillera aquí es atravesada en dirección Sur-este a Nor-oeste por el río Vilcanota o Urubamba formando el valle o cañón del mismo nombre. En efecto, ambas márgenes forman laderas muy empinadas y se coronan con los nevados Verónica en la margen derecha y Huayanay-Paljay en la margen izquierda (Figura 1). Estos nevados sobrepasan los 5500 msnm, en cambio el río Vilcanota pasa aquí por los 2700 msnm, haciendo un desnivel de aproximadamente 3000 metros.

Localmente se han diferenciado 4 unidades: nevado Verónica, quebrada Runtumayo, cono aluvial Runtumayo y el valle del río Vilcanota.

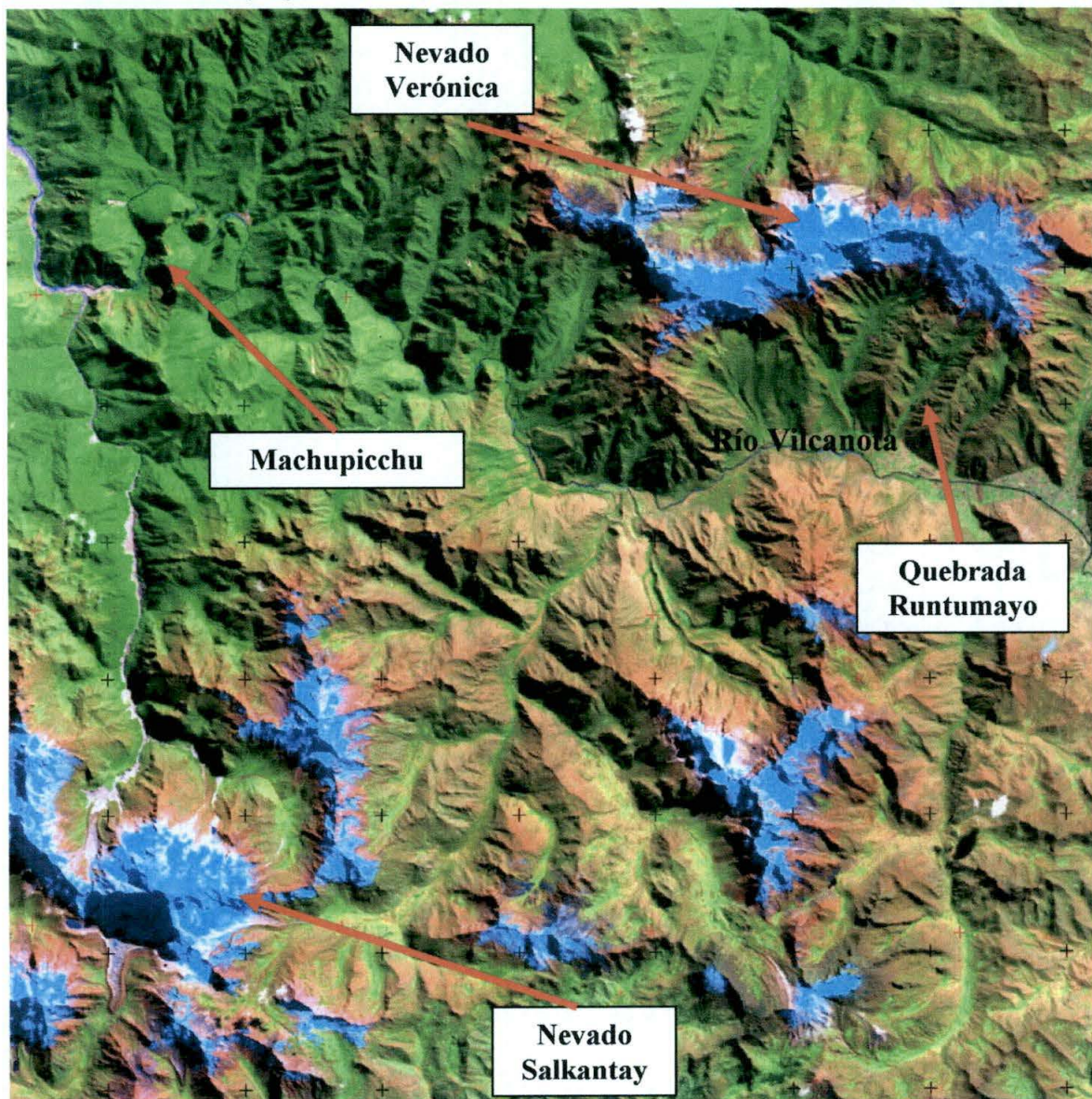


Figura 1. Imagen satélite Landsat mostrando los rasgos morfológico de la zona de estudio y la ubicación de sitios principales

El nevado Verónica denominado también Wakaywillque tiene una altura de 5893 msnm, una longitud con más 10 km en dirección Noroeste-Sureste y ancho de 2 km. Aquí se han desarrollado glaciares de montaña cuya altura mínima de nieves es en promedio los 4600 msnm. Este nevado se caracteriza por tener una topografía muy agreste con pendientes altas a muy altas que pasan los 40 grados, que lo hace propenso a desarrollar aludes.

La quebrada Runtumayo tiene una dirección N-S, es de origen glaciar, nace de los deshielos del nevado Verónica (Foto 2). Tiene una longitud de 6.5 km, una pendiente promedio de 20 %. Desemboca en el río Vilcanota a 2730. Tiene una forma en “V” por la erosión glaciar y posterior aluvial. En su cauce, desde los 4500 hasta los 2900 msnm se aprecia material morrénico producto de glaciares antiguos, aunque pueda que se trate de material redepositado por acción de agua (fluvioglacial).

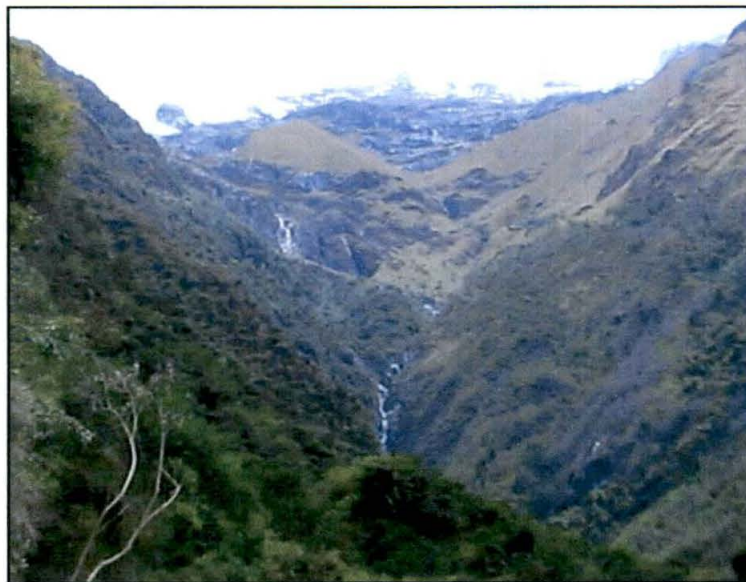


Foto 2: Vista de la parte alta de la quebrada Runtumayo y el nevado Verónica



Foto 3: Vista aérea mostrando la desembocadura de la Quebrada Runtumayo en el Vilcanota. Además se aprecia el cono aluvial con agricultura.

En la desembocadura del Runtumayo al Vilcanota se ha formado un cono o abanico aluvial típico producto de varios flujos aluviónicos desde épocas históricas antiguas. Está compuesto por gravas y grandes bloques de roca en una matriz limo arcillosa. Es posible que muchos aluviones que formaron el cono estuvieron relacionados con aludes. La altura del cono va desde 3000 a 2930 msnm y tiene un relieve algo plano con poca pendiente. Es sobre este cono que se sitúan las comunidades Palomar y Tiaparo que aprovechan esta morfología casi plana para desarrollar labores de agricultura y ganadería (Foto 3).

El río Vilcanota se caracteriza por tener un piso de valle con un ancho promedio de 800 m, formado por conos aluviales como el Runtumayo o terrazas fluviales producto de los depósitos del río Vilcanota. Este valle por su riqueza agrícola y arqueológica es conocido con el nombre de Valle Sagrado de los Incas.

GEOLOGIA

De acuerdo al Mapa Geológico a escala 1:100,000 de Urubamba que hace parte de la Carta Geológica INGEMMET (Carlotto et al., 1996) las unidades principales que afloran en la zona de estudio son las siguientes (Mapa 2):

Formación Ollantaytambo

Se trata de rocas metamórficas que afloran desde las ruinas incas de Ollantaytambo y se extiende hacia el norte y oeste, hasta cerca del Abra de Málaga y los nevados Verónica y Bonanta. Está compuesta por 50 a 100 metros de brechas volcánicas y conglomerados, seguida por areniscas cuarcíticas, la que es suprayacida por 150 a 200 metros de andesitas, de color oscuro, que afloran al pie de las ruinas de Ollantaytambo. Encima vienen lutitas verdes intercaladas con bancos de cuarcitas y niveles cineríticos verdes, con un espesor aproximado de 700 a 800 metros. El espesor aflorante es de aproximadamente 1000 metros. Son rocas bastante resistentes aunque las pizarras y esquistos lo son menos. La edad asignada es Cámbrico-Ordovícico.

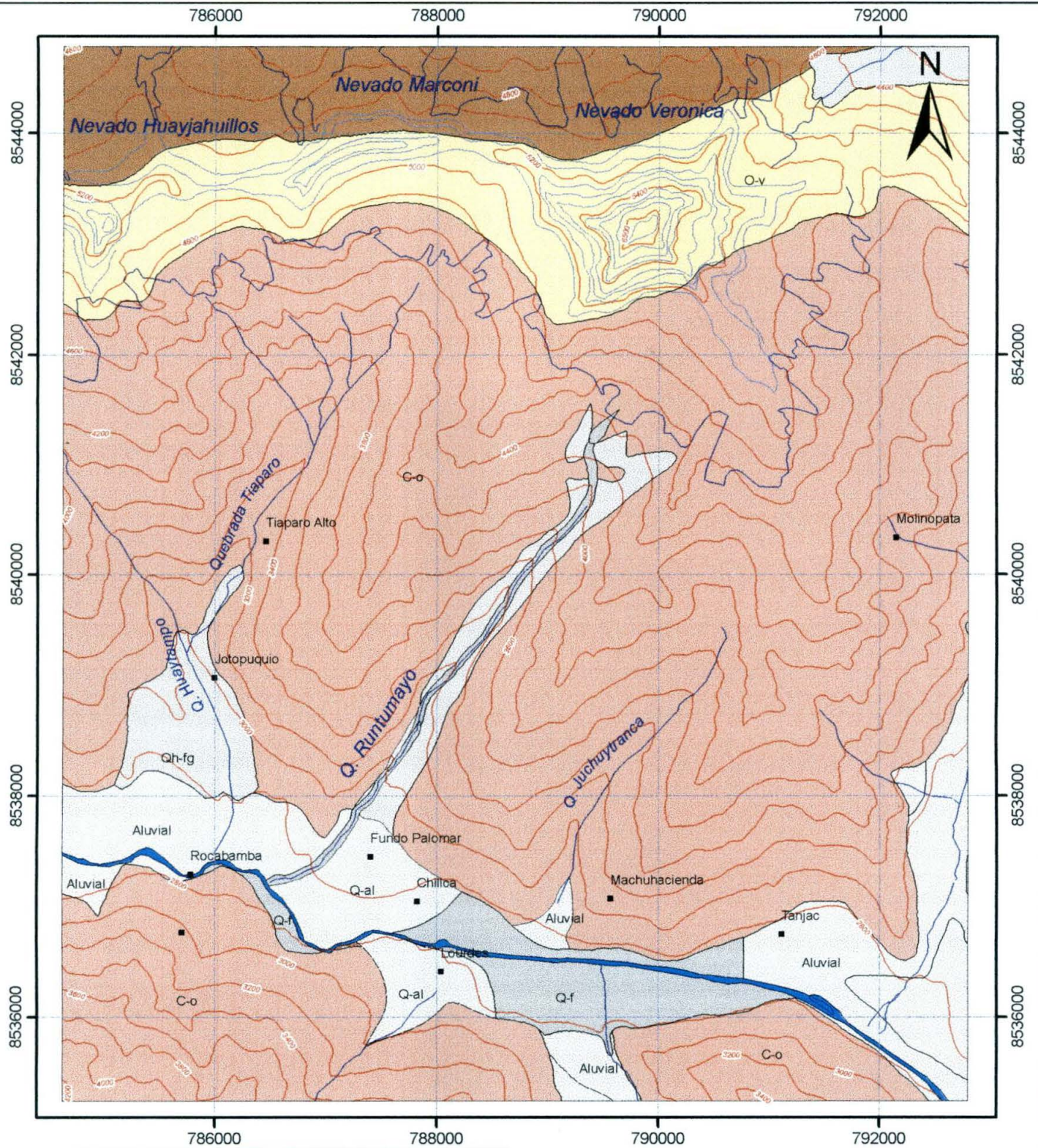
Formación Verónica

La Formación Verónica aflora en el nevado Verónica, de donde toma su denominación y se prolonga hacia el Este, pasando por la carretera Ollantaytambo-Abra de Málaga. Está constituida por conglomerados bien compactos y resistentes, con clastos de cuarcita bien redondeada y matriz arenosa. El espesor es de alrededor 500 m y su edad es Cámbrica-Ordovícica.

Formación San José

Aflora al norte de del nevado Verónica y está constituida por pizarras y cuarcitas de varios cientos metros de espesor. Son rocas poco resistentes, excepto las cuarcitas. Su edad es Ordovícica.

Depósitos Cuaternarios:



ERATEMA	SISTEMA	SERIE	UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS
CENOZOICA	CUATERNARIO		Depósitos fluviales Q-f
			Depósitos aluviales Q-al
			Depósitos glaciales Q-gl
PALEOZOICA	ORDOVICICO	MEDIO	Fm. San José Om-s
		INFERIOR	Fm. Verónica O-v
	CAMBRICO		Fm. Ollantaytambo C-o

REPUBLICA DEL PERU
 SECTOR ENERGÍA Y MINAS
 INSTITUTO GEOLÓGICO MINERO Y METALÚRGICO
MAPA GEOLÓGICO REGIONAL DE LA QDA. RUNTUMAYO
 ESCALA 1 : 50,000
 Tomado (Carlotto et, al., 1996, modificado)

0 380 760 1520 2280 3040 Meters

MAPA N° 02

Sobre las unidades rocosas existen formaciones superficiales cuaternarias de origen glacial, aluvial y fluvial (Mapa 3).

Depósitos Glaciares

Los depósitos morrénicos son producto de la erosión y acumulación de los glaciares. En la zona de estudio son los más importantes y más antiguos, se observan en ambos márgenes de la quebrada Runtumayo, desde los 4500 hasta los 2900 msnm. Es en el margen izquierdo donde se tienen los mayores espesores que van de 300 a 400 metros y están constituidos por grandes bloques de rocas con diámetros máximos de 8 metros (Foto 4). Estos bloques están envueltos por gravas en una matriz areno-limosa-arcillosa. Es posible que este material morrénico haya sufrido una removilización por efectos de las aguas y que en realidad sean depósitos fluvio-glaciares.

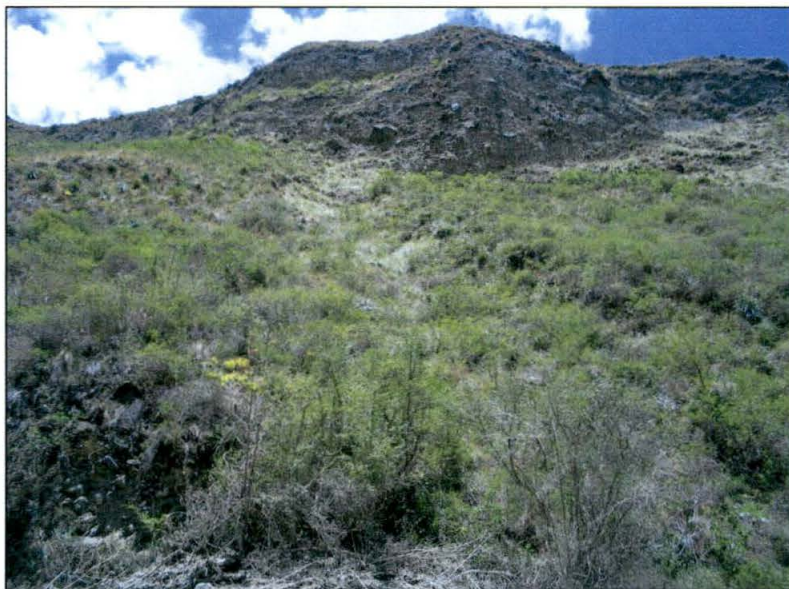


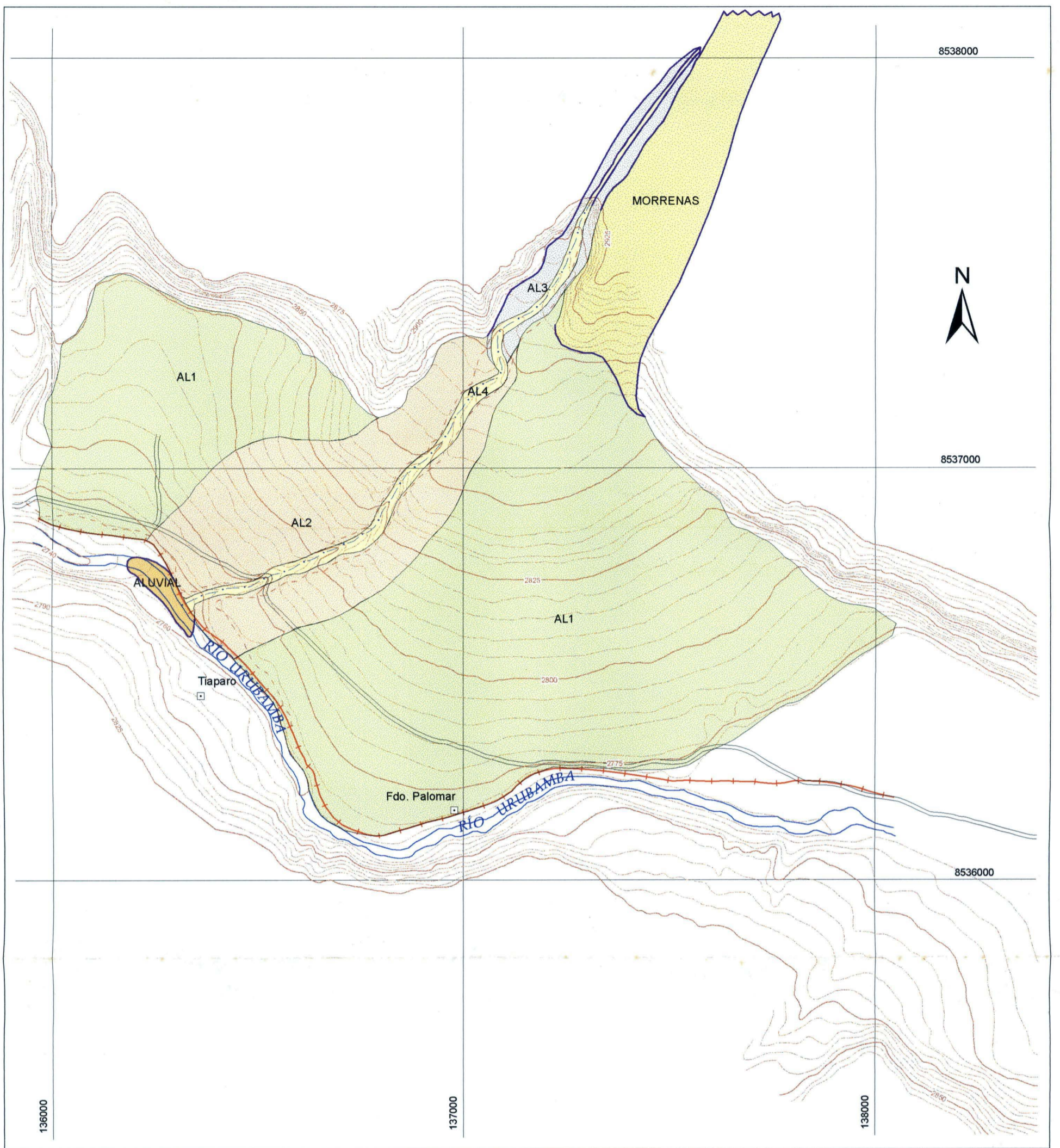
Foto 4: Margen izquierda de la Quebrada Runtumayo, mostrando depósitos morrénicos

Depósitos Aluviales

La quebrada Runtumayo ha formado en su desembocadura al Vilcanota un cono aluvial de 2 x 1.2 km aproximadamente. Este cono es el resultado de la superposición de varios eventos aluviónicos relacionados principalmente a aludes producidos en el nevado Verónica. Se pueden distinguir:

AL1

El más antiguo y el principal, ocupa la mayor superficie, de aproximadamente 2 x 1.2 km. El espesor observado en ambos márgenes de la quebrada Runtumayo es de 6 a 10 metros. Está compuesto por bloques de rocas y clastos en una matriz areno limo-arcillosa. Los bloques llegan a diámetros de 4 a 5 metros, mientras que los clastos tienen promedio de 10 a 20 centímetros en una matriz más fina de 2 cm y finos (Foto 5).



LEYENDA

- Represamiento 12 Octubre/2005
- Depósito aluvial AL4
- Depósito aluvial AL3
- Depósito aluvial AL2
- Depósito aluvial AL1
- Depósito. morrenico y/o fluvioglacial

Símbolos

- Vías
- Curvas de nivel
- Camino
- Drenaje principal
- Línea ferrea

SECTOR ENERGÍA Y MINAS
 INSTITUTO GEOLÓGICO MINERO Y METALÚRGICO

INGEMMET

MAPA DEL CONO ALUVIAL DE LA QDA. RUNTUMAYO

400 200 0 400 m

Escala 1:10 000 MAPA N° 03



Foto 5. Margen derecha de la quebrada Runtumayo mostrando los depósitos aluviales AL1.

AL2

Las fotos aéreas nos muestran un cono aluvial AL2, posterior y sobre AL1 que en realidad corresponde al desborde de un aluvión que no soportó el canal natural de la quebrada Runtumayo. En superficie se aprecia bloques de rocas y efectos de flujos de lodo poco importantes que siguió sobre parte de la superficie de AL1 (Foto 6). La agricultura ha borrado parcialmente las evidencias.

Foto 6. Límite de influencia del aluvión AL2.



AL3

Depósitos de aluviones que denominamos AL3 por ser más reciente a AL1 y AL2, se evidencian claramente entre 3100 y 3200 msnm y en el cauce de la quebrada. Su espesor es de 1 a 2 metros con clastos máximos de 15 cm en una matriz limo-arcillosa roja que predomina. Restos de troncos se conservan en la masa aluvial (Foto 7) por lo

que pensamos se trate de un evento reciente pero anterior al ocurrido el 12 de Octubre del 2005.



Foto 7: Deposito aluvial AL3, mostrando en su masa bloques, clastos y resto de un tronco

AL4

Son los productos del aluvión del 12 de Octubre del 2005. Está caracterizado por clastos de tamaño promedio de 20 cm de cuarcitas, esquistos e intrusivos, en una matriz limo-areno-arcillosa. Los bloques tienen diámetros máximos promedio a los 2 metros (Foto 8).



Foto 8: Material transportado y depositado por el último aluvión del 12 de octubre del 2005

Depósitos Fluviales

Corresponden a cantos rodados y arenas que han sido depositados a manera de terrazas por el río Vilcanota. Igualmente, en condiciones normales, el cauce del río Runtumayo deposita arenas y gravas fluviales.

GEODINAMICA EXTERNA

Antes de realizar la descripción de los fenómenos ocurridos en Runtumayo haremos una breve definición para que el lector pueda entender de manera simple los objetivos de este informe.

AVALANCHA

Un alud avalancha es el desprendimiento de una masa de nieve con unas dimensiones y recorrido variables que se pone en movimiento por la ladera de una montaña, bajo la acción de la gravedad. La formación de un alud depende de la naturaleza y perfil del terreno, la calidad de la nieve y la temperatura. Las superficies lisas o rocas pulidas son superficies propicias a los aludes por su carácter resbaladizo. Las pendientes convexas son más peligrosas que las pendientes cóncavas terminadas en llano. Asimismo, la inclinación permite la sustentación de una masa de nieve en función de su cohesión. Cuanto más vertical sea la ladera de la montaña más dura deberá ser la nieve. Las nieves más frescas y las nieves no adherentes son las más inestables. Así, cuando la temperatura se eleva la nieve se humedece y se hace más pesada lo que aumenta su inestabilidad. Por el contrario, el frío la estabiliza al entrecruzarse los cristales de hielo.

El desarrollo de un alud y aluvión consecuente permite definir tres zonas principales del recorrido (Figura 2): Zona de salida, Zona de trayecto y Zona de depósito.

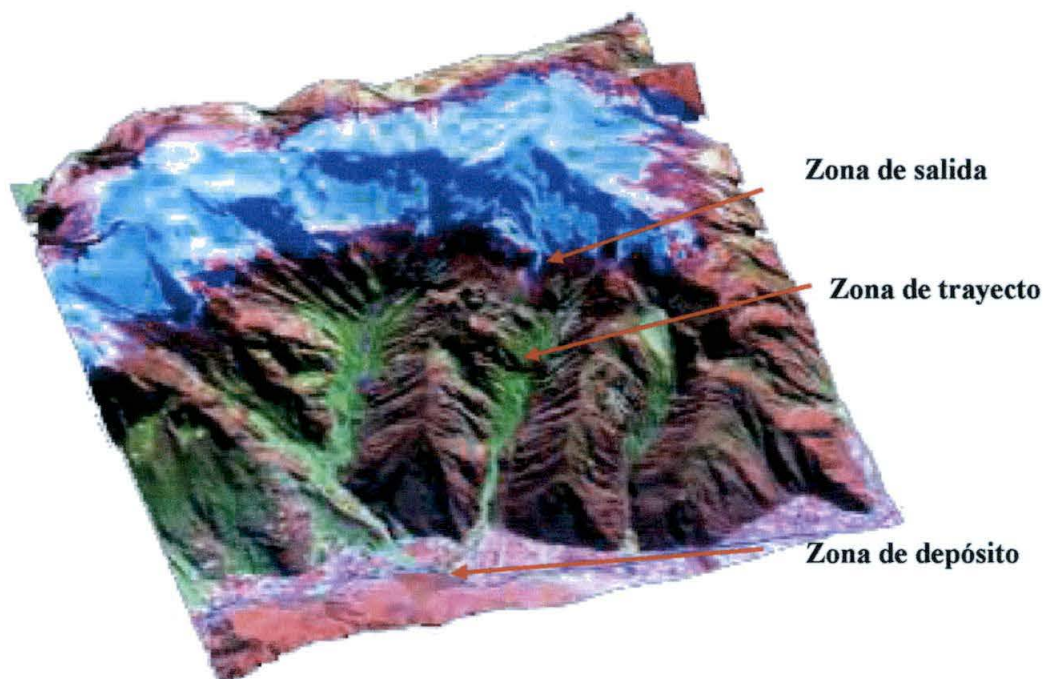


Figura 2. Imagen de elevación digital de la quebrada Runtumayo y el nevado Verónica indicando las zonas que comprende el alud (avalancha) y aluvión asociado

AVALANCHA Y ALUVIÓN DEL 12 DE OCTUBRE DEL 2005

El 12 de Octubre del 2005, aproximadamente a las 22 horas, ocurrió un alud en la parte alta de la quebrada Runtumayo a los pies del Nevado La Verónica. (Mapa 4).

La **Zona de Salida** es la zona donde la nieve inestable empieza a moverse, por aceleración significativa de la masa de nieve. Se localiza entre los 4300 y más de 4500 msnm, correspondiente a una topografía muy abrupta con pendiente de más de 20 grados (Foto 9). Las imágenes satélites Landsat J033-2544 (Figura 2 y 3), del año 2001 muestran para esta zona una pequeña lengua o restos de glaciar. Igualmente, más abajo se aprecia una coloración azul tenue en la banda 7,4,2 que indicaría la presencia de una laguna muy pequeña. La lengua de glaciar mencionada anteriormente se desprendió y originó el alud. En las fotos aéreas del año 1963 no se aprecia la laguna, mas si una depresión, tal vez seca por la época en que fue tomada.

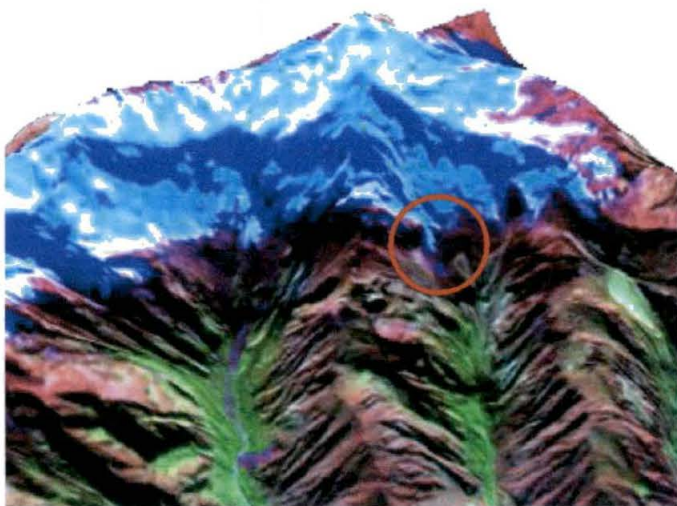
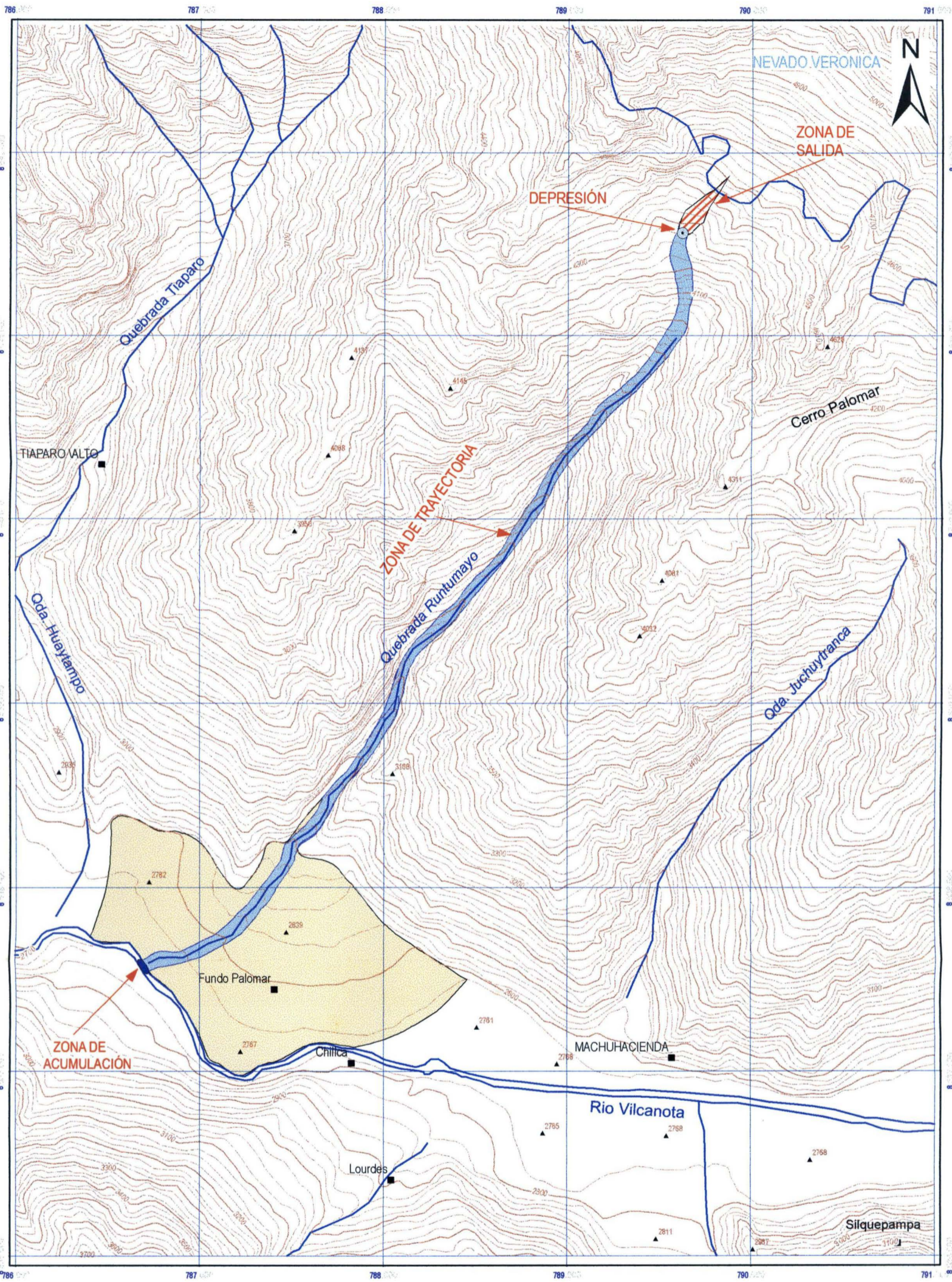


Figura 3: Imagen satelital de elevación digital (año 2001) donde aparece una pequeña lengua que posiblemente sea la que se desprendió y originó el aluvión del 12 de octubre del 2005



Foto 9: Vista aérea mostrando la zona de arranque del alud del 12 de octubre del 2005

La **Zona de Trayecto** es la pendiente bajo la zona de salida que conecta esta con la zona de depósito. La velocidad del alud que ahora se comporta como flujo (aluvión) alcanza su máximo valor. En esta zona se producen las incorporaciones y/o pérdidas de nieve, así como de material sólido. Corresponde en gran parte a la quebrada Runtumayo desde los 4300 hasta los 2720 msnm donde es la confluencia del río Runtumayo y el río Vilcanota. La pendiente es muy variada, así desde los 4300 a los 3500 tiene una pendiente fuerte de 23° y de 3500 a los 3000 pendiente baja de 15° y de los 3000 a 2720 es más suave de solo 10°. El alud conformado por nieve y algo de roca, originado en la zona de salida, al bajar por la pendiente muy fuerte se transforma en un flujo de agua,



SECTOR ENERGÍA Y MINAS
 INSTITUTO GEOLÓGICO MINERO Y METALÚRGICO

INGEMMET

**MAPA GEODINÁMICO DEL ALUVIÓN DE LA
 QUEBRADA RUNTUMAYO**

0 0,25 0,5 0,75 1 1,25
 Km

Escala 1 : 25,000

MAPA 04

- LEYENDA**
- Cono Aluvial
 - Zona de Salida
 - Zona de Trayectoria
 - Curvas de Nivel
 - cota
 - Pueblo
 - Drenaje

lodo y detritos, erosionando el canal de la quebrada Runtumayo e incorporando material a su masa haciéndola mas densa.

La **Zona de Depósito** es el área donde la desaceleración es rápida, el flujo se deposita y se detiene. En este caso es el río Vilcanota donde el alud transformado en flujo de detritos (aluvión o huayco) se desaceleró por la poca pendiente y se depositó en el río Vilcanota originando un represamiento o embalse parcial de las aguas de este río (Foto 10). El dique de represamiento tiene las medidas aproximadas siguientes: altura de 6 metros, ancho de 40 metros y una longitud de 200 metros, lo que hace un aproximado de 48,000 m³ de material depositado.



Foto 10: Vista aérea de la desembocadura de la Quebrada Runtumayo, mostrando la zona de represamiento en el río Vilcanota

DAÑOS

Los daños que provocó el alud y los aluviones asociados, fueron la erosión y cubrimiento de la línea férrea Ollantaytambo-Machupicchu en un tramo de 200 metros, erosión y cubrimiento del puente carrozable Ollantaytambo-Piscacucho (Foto 11), la destrucción con caída de los pilares del puente peatonal Tiaparo-Palomar (Foto 12), así como la erosión y destrucción de las obras de captación de aguas para las comunidades Palomar y Tiaparo ubicadas en la margen izquierda y derecha del río Runtumayo respectivamente (Foto 13). También fueron afectados plantaciones de árboles de eucalipto de las terrazas más bajas o bordes del río (Foto 14). El desborde del aluvión afectó unos pocos terrenos de cultivo; pero sin embargo, algunos bordes de la quebrada Runtumayo fueron erosionados y se destruyeron otros terrenos de cultivo.



Foto 11: Puente carrozable que cruza la quebrada Runtumayo, con daños de erosión y cubrimiento por material aluviónico del 12 de octubre del 2005.



Foto 12: Puente peatonal Tiaparo-Palomar inhabilitado debido a la destrucción de sus pilares.



Foto 13: Margen derecha del río Runtumayo mostrando canales provisionales ya que las obras de captación fueron destruidas.



Foto 14: Margen izquierda de la Quebrada Runtumayo, se observa plantaciones de eucaliptos, algunos fueron destruidos.

Otro problema mayor fue el represamiento parcial del río Vilcanota, por efecto del flujo aluviónico (Foto 15). Este represamiento provocó la inundación de la línea férrea hasta una altura de 1.50 metros y un espejo longitudinal de aproximadamente 400 metros y un ancho de 50 metros. Este represamiento parcial necesitó de 3 días para ser desembalsado con ayuda de maquinaria pesada que re-encauzó el río Vilcanota, a su cauce normal evitando la erosión lateral, particularmente de su margen izquierda.



Foto 15: Vista parcial del represamiento parcial del río Vilcanota por efecto del aluvión del 12 de octubre del 2005 y que destruyó además parte de la línea férrea Cusco-Machu Picchu.1

Las noticias e informes de Defensa Civil indican que el primer día el represamiento dejó aislados a unos 1,750 turistas, en su mayoría extranjeros. La Región Cusco apoyó con maquinaria pesada para limpiar el material aluviónico. Felizmente, no se registraron víctimas en el incidente.

CAUSAS

Para averiguar las causas de este fenómeno, se realizó un vuelo en helicóptero el día 15 de octubre del 2005. En el flanco meridional del nevado Verónica, aproximadamente entre 4500 y 4300 msnm, por debajo del nivel de nieves, se observa claramente la huella de una avalancha de hielo y rocas que rellena una depresión que posiblemente era ocupada por una pequeña laguna, cuyas aguas se desbordaron.

Por las diferencias de coloración es posible que hayan ocurrido varios aludes asociados al desplome de masas de hielo y rocas. Esta hipótesis se argumenta también en el hecho de haberse producido al menos tres grandes oleadas de aluviones indicados por los pobladores y por las evidencias de campo.

En un primer análisis e interpretación en base a las observaciones aéreas y de campo, la avalancha ha podido estar activándose entre la cota 4300 y 4500 msnm, cayendo una gran masa antes de las 10 p.m. del día 12 de Octubre. Esta masa produjo el rebalse de una pequeña laguna y las aguas bajaron por la fuerte pendiente originando el aluvión a partir de los 4000 m. Este flujo se alimentó de material morrénico cuaternario.

El flujo aluviónico, en la zona del cono aluvial, alcanzó alturas dentro del cauce de 4 a 5 (Foto 16) metros, en la margen izquierda, mientras que en la margen derecha llegó inclusive hasta los 6 metros donde encontró muros naturales transversales que amortiguaron la velocidad de los flujos. La erosión en algunos lugares fue de 3 a 4 metros, pero que en general los flujos aluviónicos se adaptaron a la sección actual de la quebrada Runtumayo (Foto 17). El aluvión llegó al río Vilcanota donde represó parcialmente las aguas, produciendo una erosión lateral incipiente que fue evitado con el desembalse artificial.



Foto 16: Manchas de lodo que son los rastros del aluvión del 12 de octubre del 2005 (Márgenes del río Runtumayo)



Foto 17: Margen derecha de la Quebrada Runtumayo, se observa la erosión así como la altura y desborde de los flujos del aluvión

La magnitud del aluvión a lo largo de los 6 km podría cuantificarse, tomando en cuenta las escarpas y desniveles del escarpe de algunos derrumbes pequeños, y sobretodo por el material depositado en el río Vilcanota que es de aproximadamente 48,000 m³.

Se ha considerado la existencia de una pequeña laguna que se desembalsó por el alud. Sin embargo, nosotros no pudimos ver la laguna, pero incluso sin este elemento, el alud al bajar con mucha fuerza por la ladera se transformó en aluvión al atravesar las morrenas que las erosionaba y al mismo tiempo las englutía formando las masa del huayco. Los fenómenos de aludes son normales en zonas de retroceso glacial, los que están en relación al calentamiento global.

Los detonantes que desencadenaron la avalancha hay que buscarlas en la ruptura del equilibrio, mecánico o térmico (deshielo), entre las fuerzas que favorecen el movimiento como es el peso de la nieve y las que se le oponen como son la cohesión interna de la nieve, las fuerzas de rozamiento, las fuerzas de anclaje, etc. Las causas y situaciones en las que se rompe el equilibrio son muy variables y por tanto se pueden dar muchos tipos de avalanchas.

En este caso, es muy posible que el detonante sea la elevación de la temperatura al ser muy sensible a los efectos térmicos. Estos son frecuentes en vertientes fuertes. Además ha debido influir la forma muy agreste de la topografía donde la nieve posiblemente no se ha adherido a la capa inferior y ha descendido deslizándose por una rotura de su equilibrio, por una causa mecánica o térmica. En efecto durante esta época de mucha temperatura, días antes del alud se produjo un friaje y en la zona nevó, produciendo sobreacumulaciones de nieve que pudo romperse dando lugar a un alud. Como vemos las causas no están determinadas exactamente pero una combinación de varios pudo desencadenar el alud.

Sin embargo, no hay que olvidar que el calentamiento global es la que está produciendo el retroceso rápido de los glaciares y en el caso del Verónica no es la excepción como se aprecia en la figura 4. En efecto, la línea amarilla registra el nivel máximo del glaciar en el año 1963, y el color celeste muestra el glaciar al año 2001, es decir se aprecia un retroceso fuerte de decenas de metro de altitud. Nevados cercanos como el Salkantay o el Chicón muestran los mismos efectos de retroceso y además con aludes y aluviones asociados poniendo en riesgo la infraestructura y las poblaciones.

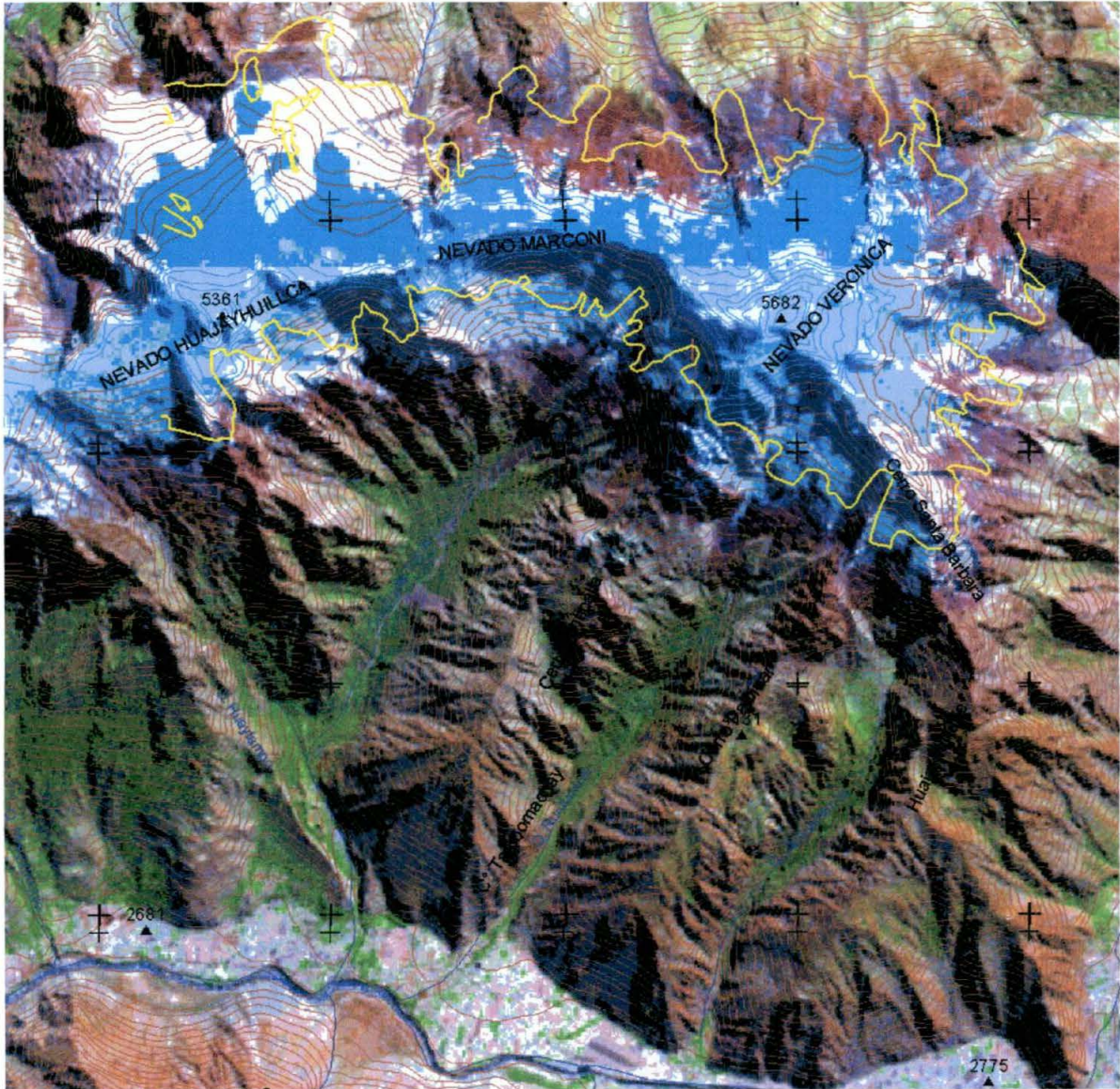


Figura 4. Imagen satelital con elevación digital de terreno mostrando el retroceso del Nevado Verónica. Línea Amarilla es la cartografía del Nevado en el año 2003 a partir de fotos aéreas y en celeste el es Nevado en el 2001 obtenido de la imagen Landsat.

MAPA DE PELIGROS

En base a la cartografía de los diferentes conos aluviales, el estudio del alud del 12 de Octubre del 2005 y la aplicación del modelo numérico bidimensional FLO-2D de simulación digital, se ha realizado una zonificación de peligros a aluviones producto de aludes en la zona de Palomares y Tiaparo.

Se tienen antecedentes geológicos de grandes aluviones e inundaciones de esta zona, los que se ven en los cortes de afloramientos de suelos.

Simulación del flujo hiperconcentrado en la quebrada Runtumayo: Modelo FLO-2D (Leonardo Castillo)

El FLO-2D es un modelo numérico bidimensional que permite la consideración de topografías complejas sobre áreas urbanizadas y planicies de inundación. El modelo se puede utilizar para simular flujos hiperconcentrados, ya sea, flujo de detritos (aluvión), inundaciones de barro y flujos de barro.

Como datos de entrada se requiere la topografía digital del terreno, la geometría del canal, valores estimados de la rugosidad del canal y de la planicie de inundación, los hidrogramas de entrada de la creciente, y/o las características de la lluvia de diseño, y las propiedades reológicas de la mezcla sedimento-agua.

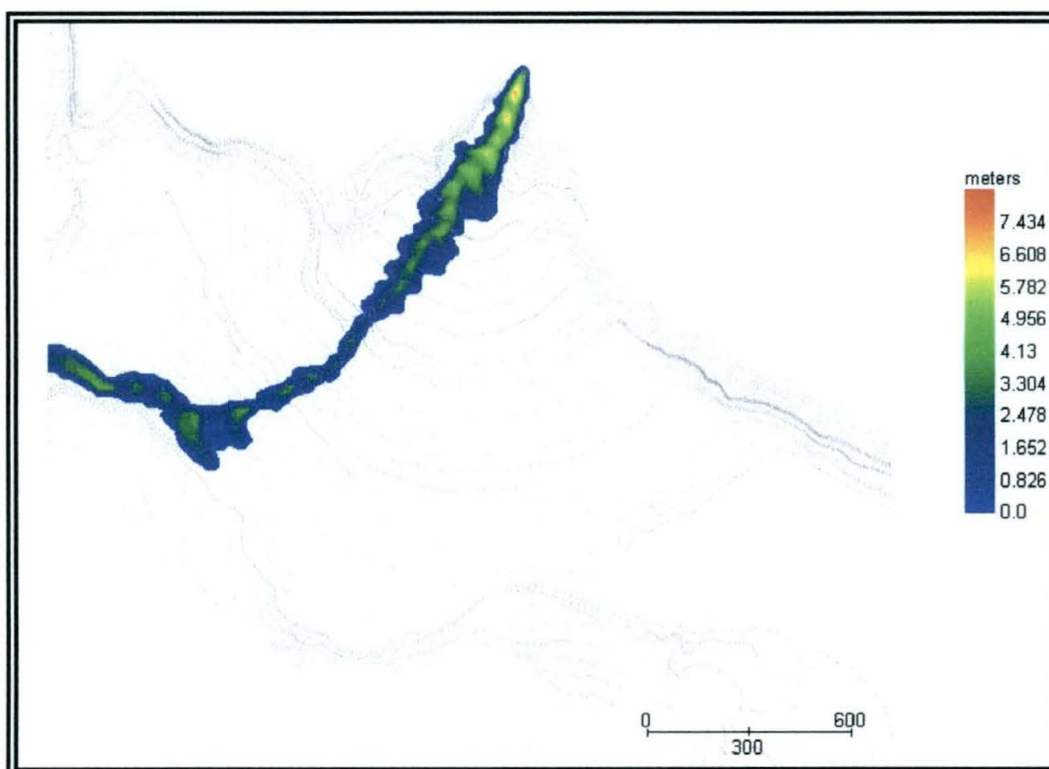
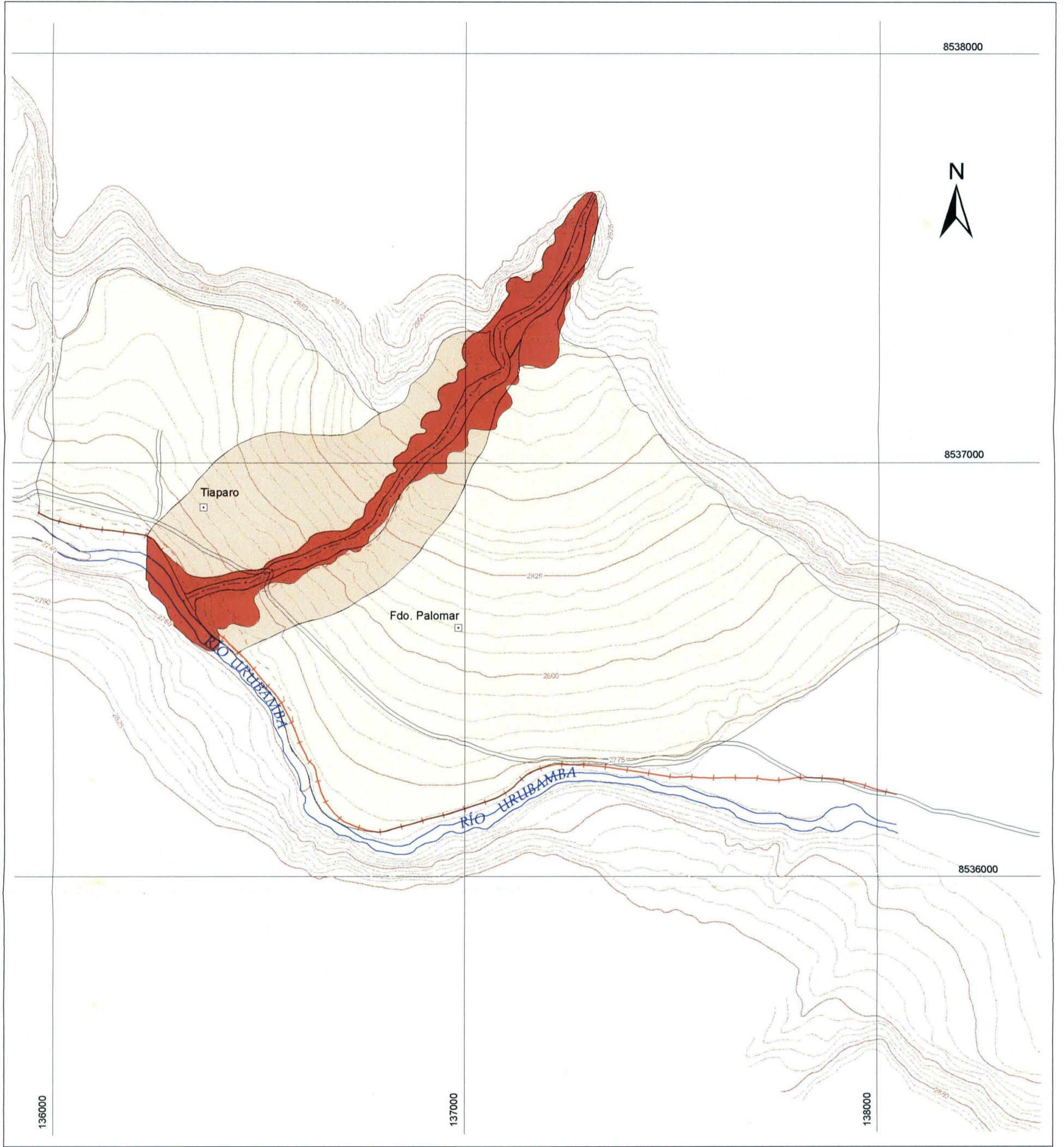


Figura 5. Profundidades de flujo máximas. Caudal $Q_{lp} = 10.33 \text{ m}^3/\text{s}$

De los resultados observados para la quebrada Runtumayo y más específicamente en el cono aluvial (Figura 5), se aprecia en la parte superior, mayor presencia de tirantes de huayco que van desde los 4 a los 7.5 metros. También se observa un pequeño desborde del flujo a ambos márgenes del cauce principal. En la parte baja de la quebrada se



LEYENDA

- Peligro muy alto
- Peligro alto
- Peligro medio

Símbolos

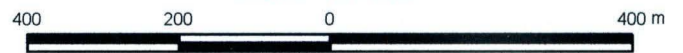
- Vías
- Curvas de nivel
- Camino
- Drenaje principal
- Línea ferrea

SECTOR ENERGÍA Y MINAS
 INSTITUTO GEOLÓGICO MINERO Y METALÚRGICO



MAPA DE PELIGROS DE LA QDA. RUNTUMAYO

Escala 1:10 000



MAPA N° 05

aprecia tirantes de huayco de 3 a 4 metros. Estas alturas del flujo han sido comparadas con las evidencias de campo y el comportamiento del flujo simulado ha sido similar a los puntos de control dentro de la quebrada. Por otro lado, en la zona de represamiento, se observan los tirantes de hasta 6 metros, lo que se asemeja a lo visto en campo. Se produce un represamiento del río Vilcanota hacia aguas abajo. En esta zona de confluencia se encuentran las mayores velocidades de 3.5 m/s (Figura 6). Es decir, los resultados muestra que el modelo teórico respecto al flujo (aluvión) es similar a lo ocurrido el 12 de octubre del 2005 (Ver fotografías Anexo1)

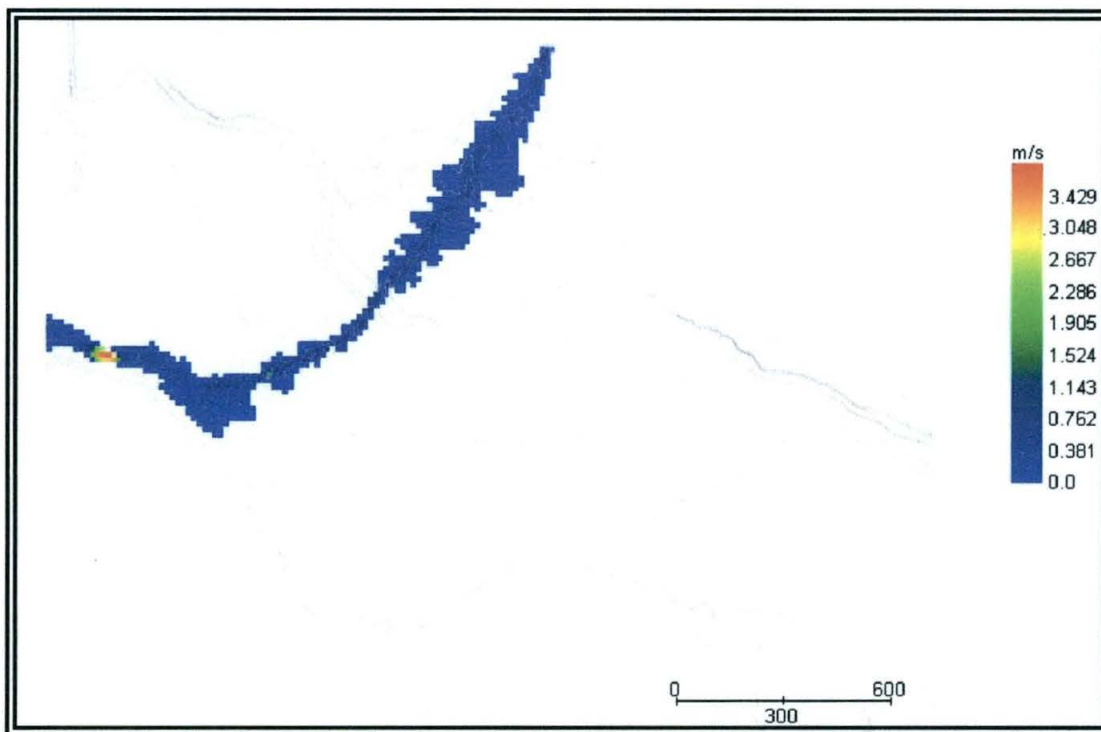


Figura 6. Velocidades del flujo máximas. Caudal $Q_{ip}=10.33 \text{ m}^3/\text{s}$

Además se ha realizado 4 escenarios posibles con mayores flujos hipoconcentrado que puedan afectar la quebrada y se determinó el peligro inminente de las poblaciones y terrenos de cultivo aledaños (Anexo 1).

ZONIFICACION

Las comunidades de Palomar y Tiaparo están localizadas sobre el cono aluvial antiguo del Runtumayo, el que está relacionado a la superposición de varios flujos aluviónicos antiguos, (Mapa 3) de las cuales se tienen varios antecedentes geológicos de inundaciones y aluviones.

En bases a estos antecedentes, el modelo Flo 2D y además, teniendo en cuenta los efectos últimos se ha establecido 03 zonas de peligros (Mapa 5)

a) Peligro Muy Alto

En caso de ocurrir un aluvión similar al 12 de Octubre del 2005 la zonas mas afectadas sería el cauce actual del río Runtumayo y los bordes de este cauce /canal, ya que se pueden formar nuevos represamientos y desembalses desviando el aluvión, afectando

principalmente los terrenos de cultivo. Los límites de la zona de Peligro Muy alto vienen del modelo.

b) Peligro Alto

Un aluvión similar al AL2 que originó un cono superficial sobre AL1, afectaría esta zona. En ese caso sería una zona de peligro muy alto, pero por la frecuencia de presentarse (es algo antigua) pasaría a ser una zona de Peligro Alto. En este caso un alud de mayor dimensión al ocurrido el 12 de Octubre sobrepasaría el canal natural de la quebrada Runtumayo y saldría de una manera similar a AL2, afectando no solo terrenos de cultivo y la ganadería sino algunas construcciones existentes poniendo en riesgo la vida de algunas personas.

c) Peligro Medio

Corresponde a las zonas aledañas a la de peligro alto y son las márgenes de cono aluvial de Runtumayo, es decir todo el cono aluvial de Runtumayo. Un fenómeno de grandes dimensiones que no está descartado, provocaría el desprendimiento de una gran masa de nieve y roca en relación por ejemplo a un sismo, ocasionaría un flujo también de grandes dimensiones afectando todo el cono.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El Alud y aluvión asociado el 12 de Octubre del 2003 es un fenómeno de origen geológico climático en relación al retroceso del nevado Verónica. Si bien este fenómeno es de pequeñas dimensiones sin embargo, puede ser un llamado de atención para otras quebradas adyacentes o relacionadas con nevados cercanos como el Salkantay o Chicon, este ultimo que puede afectar a la ciudad de Urubamba.

Como ejemplo y modelo a seguir se ha realizado un mapa de peligros a aluviones de la quebrada Runtumayo, donde se toma como base la geología de aluviones antiguos y el modelo numérico de flujos.

La utilización de los modelos numéricos, en este caso Flo 2D es importante pues ha sido testado y da valores similares al aluvión del 12 de Octubre del 2005.

Una evaluación detallada del nevado Verónica no solo a la altura de Runtumayo sino también de las otras quebradas que nacen en esta montaña es de suma importancia para descartar o confirmar la presencia de grandes aludes futuros.

La realización de estudios glaciológicos, es de gran importancia no solo para conocer las características y comportamiento del nevado Verónica, sino también de todos los glaciares de la zona.

Se recomienda la evaluación geológica de las otras quebradas utilizando el Flo 2D.

BIBLIOGRAFIA

Carlotto, V.; Gil, W.; Cárdenas, J.; Chávez, R. (1996). Geología de los cuadrángulos de Urubamba y Calca. Boletín N° 65 Serie A: Carta Geológica Nacional. (Hojas 27r y 27s). INGEMMET. Lima-Perú.

MAPAS

ANEXO1

SIMULACION DEL FLUJO HIPERCONCENTRADO EN LA QUEBRADA RUNTUMAYO LEONARDO CASTILLO

SIMULACION DEL FLUJO HIPERCONCENTRADO EN LA QUEBRADA RUNTUMAYO

Este informe consiste en la simulación del flujo hiperconcentrado en la quebrada Runtumayo, aplicando el modelo numérico bidimensional FLO-2D (O'Brien) versión 2004.10.

El FLO-2D permite la consideración de topografías complejas sobre áreas urbanizadas y planicies de inundación. El modelo puede utilizarse para simular flujos hiperconcentrados, ya sea, flujo de detritos, inundaciones de barro y flujos de barro.

Como datos de entrada se requiere la topografía digital del terreno, la geometría del canal, valores estimados de la rugosidad del canal y de la planicie de inundación, los hidrogramas de entrada de la creciente, o las características de la lluvia de diseño, y las propiedades reológicas de la mezcla sedimento-agua.

1. Problemática.

El 12 de Octubre del 2005 un alud de lodo y piedras bloqueó un tramo de 500 metros de la vía férrea hacia la ciudadela incaica de Machu Picchu, al sureste de Perú y represó el río Vilcanota o Urubamba. Igualmente, afectó terrenos agrícolas, sistemas de riego y agua potable en la zona.

El aluvión se originó por el deshielo de una parte del nevado Verónica (5,893 metros de altura) provocando la activación de la quebrada y desarrollándose el flujo de lodo y escombros a lo largo del cauce principal.

2. Información Básica

La microcuenca Runtumayo, está ubicada en el distrito de Ollantaytambo, Provincia de Urubamba, Departamento de Cusco. La zona de estudio se halla en plena Cordillera Oriental de los Andes del Sur del Perú. La cordillera es atravesada en dirección SE a NO por el río Vilcanota o Urubamba formando el valle o cañón del mismo nombre.

La extensión que posee esta microcuenca es de 10.5 km². Presenta una altitud mínima de 2370 m.s.n.m y una máxima de 5893 m.s.n.m. Su longitud de eje del cauce principal es de 6.5 km con una pendiente promedio de 10%.

Esta quebrada tiene sus nacientes en el Nevado Verónica o Wakaywillque a la altura de los 5893 m.s.n.m y desemboca en el río Vilcanota a 2730 m.s.n.m. En la desembocadura del Runtumayo al Vilcanota se presenta un cono aluvial típico y que se ha formado por varios flujos aluviónicos desde épocas históricas antiguas, compuesto por gravas y grandes bloques de roca en una matriz limo

arcillosa. El cono presenta una altura que va desde 3000 a 2930 msnm y tiene un relieve algo plano de poca pendiente. Es sobre este cono que se sitúan las comunidades El Palomar y Tiaparo que aprovechan esta morfología casi plana para desarrollar labores de agricultura y ganadería.

3. Información Topográfica

Para el presente estudio se ha utilizado los mapas topográficos a escala 1:100,000 del Mapa Geológico del Cuadrángulo de Urubamba y un plano 1:10,000 del Proyecto Vilcanota. El primer plano ha sido utilizado para la delimitación de la cuenca y el cálculo de los parámetros geomorfológicos. Y el segundo plano, ha sido empleado para la modelación.

A continuación se especifican los planos topográficos utilizados.

Tabla 1. Planos Topográficos

Carta o Plano	Escala	Procedencia
27-r-IV	1:25,000	INGEMMET
19-35-8535-112	1:10,000	Proyecto Vilcanota

4. Caracterización Hidrológica

Para la simulación de flujos de lodo y escombros aplicando el FLO-2D, es necesario conocer las características hidrológicas de la cuenca y su repuesta ante una tormenta específica. La respuesta a estos fenómenos climáticos, se representa en un hidrograma líquido.

Para la estimación del hidrograma líquido, utilizaremos como apoyo el modelo hidrológico HEC-HMS. Además se empleará la metodología del Soil Conservation Service (SCS) debido a que es uno de los métodos más sencillos para el cálculo de un hidrograma.

Como datos iniciales se requiere, la precipitación máxima en 24 horas (P24), el tiempo de retardo (t_{lag}) y el número curva (CN) representativo de la cuenca.

Como dato de precipitación máxima en 24 horas (P24) se tiene un valor de 64 mm, según el estudio hidrológico de Aguas Calientes.

En el cálculo del tiempo de retardo (t_{lag}) se emplea la ecuación de Horner y Flynt (1934) para condiciones de montaña de elevadas altitudes sin una buena base de datos de tormenta de fenómenos severos.

$$t_{lag} = 26K_n \left(\frac{LL_{ca}}{S^{0.5}} \right) \quad (1)$$

donde L es igual longitud del eje principal en millas, L_{ca} es la distancia del centro de gravedad a la desembocadura en millas, S es la pendiente promedio en pies/millas, y K_n es igual a 0.073 para intensidades altas.

De la ecuación (1) se obtiene un tiempo de retardo para la quebrada Runtumayo de 1.4 horas.

Adicionalmente, se asumirá un número de curva (CN) igual a 80 teniendo en cuenta la condición de una cuenca con un área relativamente pequeña y de características de laderas de fuerte pendiente, vegetación de escasa a moderada que inciden en una mayor escorrentía.

Con todos los datos anteriormente mencionados, mediante el modelo hidrológico HEC-HMS se obtiene nuestro hidrograma líquido para quebrada Runtumayo, con un caudal pico de $10.33 \text{ m}^3/\text{seg}$.

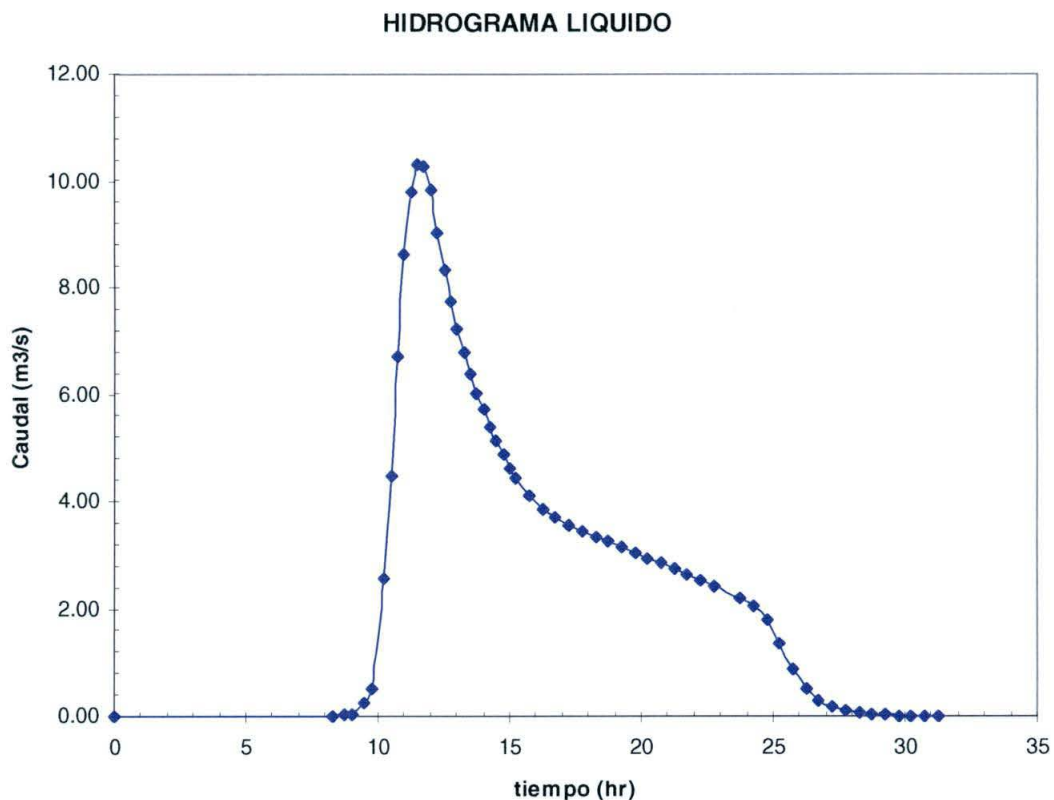


Figura 1. Quebrada Runtumayo. Hidrograma líquido. $Q_{ip}=10.33 \text{ m}^3/\text{s}$

5. Información de campo y gabinete

Una evidencia se observó en el río Vilcanota donde el alud transformado en flujo de detritos se desaceleró por la poca pendiente y se depositó en el río Vilcanota originando un represamiento. El dique de represamiento tiene aproximadamente 6 metros de altura máxima, 40 metros de ancho y una

longitud de 200 metros, lo que hace un aproximado de 48,000 m³ de material depositado.



Foto1.
Zona de represamiento en el río
Vilcanota. Tirantes de flujo de hasta
5 metros.

Otras evidencia observadas se encuentran en las márgenes del río Runtumayo, como se observan en las siguientes fotografías.



Foto2.
Se muestra desbordes de flujos de
lodo en la margen derecha del río
Runtumayo provocados por el
aluvión del 12 de octubre del 2005.
Estas alturas alcanzan los 4 metros



Foto3.
En las márgenes del río Runtumayo
se observan manchas blancas de
lodo que son los rastros del aluvión
del 12 de octubre del 2005. Se
alcanzan alturas de 7 metros
aproximadamente



Foto4.

Sobre la parte baja de la quebrada se observa erosión de 3 a 4 metros en el margen derecha de la quebrada.

6. Definición de parámetros para la simulación

El plano base topográfico para la simulación es el plano 19-35-8535-112 del Proyecto Vilcanota con curvas cada 5 metros. El tramo simulado es de longitud aproximada de 1.5 kilómetros hacia aguas arriba desde la confluencia con el río Vilcanota o Urubamba. Sobre el plano mencionado se generó una malla de 11 985 celdas de 15m x 15m cada una, cubriendo parte de la garganta y la confluencia con el río Vilcanota.

Como dato de entrada se introdujeron el hidrograma de caudal líquido proveniente de la hidrología con su respectiva distribución de concentración de sedimentos, las propiedades del sedimento, y los parámetros reológicos.

Los parámetros característicos del sedimento y reológicos, se fijaron de acuerdo a la experiencia en otros países, donde se han calibrado con cuencas experimentales (O'Brien et al, 2000).

Las siguientes características (parámetros de entrada) son empleadas para la simulación:

- Se aplicó el modelo bidimensional FLO-2D para la simulación del flujo hiperconcentrado de barro y escombros, utilizando las ecuaciones que gobiernan el movimiento en su expresión más completa (onda dinámica).
- Para la simulación se consideraron concentraciones de sedimentos que varían entre 25 % y 50 %.
- El hidrograma de caudal líquido con la respectiva concentración volumétrica de sedimento, se coloca como condición de borde en la celda 8668 donde la quebrada alcanza la cota 2905 m.s.n.m.
- Se asume la rugosidad "n" de Manning igual a 0.065.
- Los parámetros reológicos de la mezcla (viscosidad y esfuerzo de cedencia) se encuentran en función de muestras experimentales analizadas por O'Brien y Julien (1988). Ellos proponen diversas ecuaciones para diferentes tipos de muestra. La muestra utilizada para la modelación y que se ajusta al desarrollo del flujo es una muestra tipo

Aspen Pit 1, cuyo resultado es conservador. Por lo tanto las ecuaciones de viscosidad y esfuerzo de cedencia utilizadas para el modelo son:

$$\eta = 0.0360e^{22.1C_v} \quad (2)$$

$$\tau_y = 0.181e^{25.7C_v} \quad (3)$$

- La Gravedad específica (Gs) del sedimento es igual a 2.65
 - Se asume una resistencia de la planicie al flujo laminar (K) igual a 4000.
 - Se analiza un tiempo de simulación de 36 horas
7. Simulación y calibración.

La simulación se ha basado en una serie de pruebas previas para obtener los tirantes vistos en campo del flujo de lodo y escombros. Los parámetros de entrada en el modelo, son los anteriormente mencionados.

En la Figura 2 se muestra el hidrograma líquido y la distribución de la concentración de sedimentos para la quebrada Runtumayo, utilizada como condición de borde en el modelo.

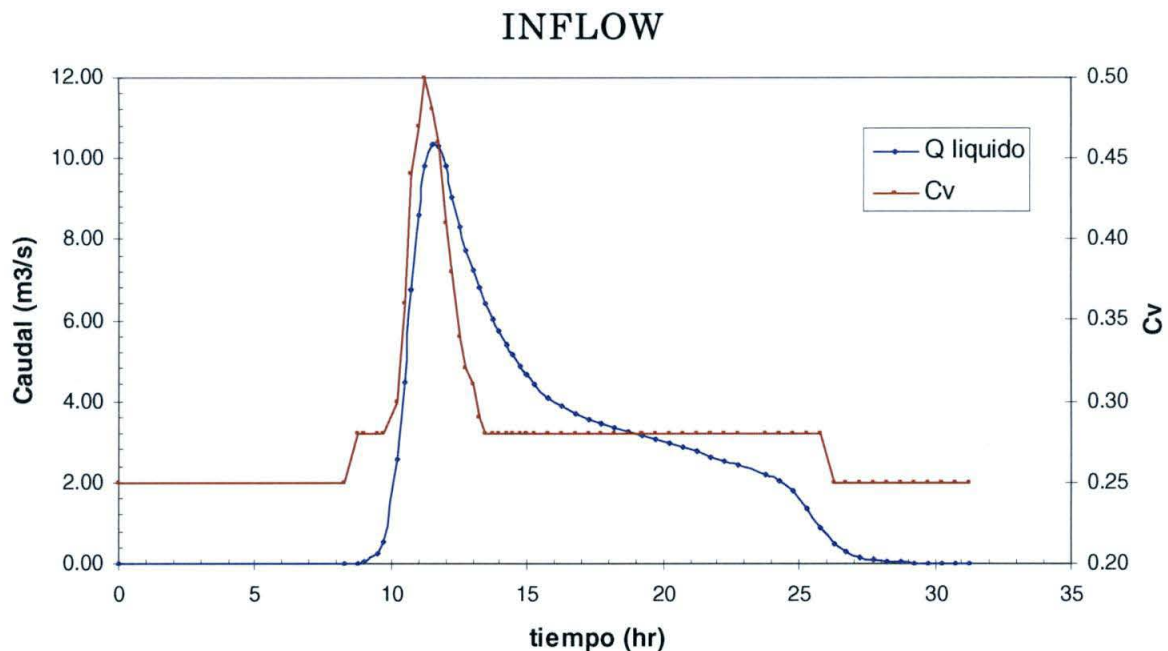


Figura 2. Hidrograma líquido y sólido. $Q_{lp}=10.33 \text{ m}^3/\text{s}$

El escenario plantea una creciente con caudal líquido pico de $10.33 \text{ m}^3/\text{seg}$, y una concentración volumétrica de 25 % en la rama ascendente del hidrograma y un valor máximo de 50 % en el intervalo anterior al pico, que luego disminuye a 25 % y permanece constante hasta el final del hidrograma.

Los volúmenes reportados por el modelo FLO-2D son:

Tabla 2. Salidas del programa FLO-2D ($Q_{lp}=10.33 \text{ m}^3/\text{s}$)

FLUJO (M ³)	AGUA (M ³)	BULKED WITH SEDIMENT (M ³)
Hidrograma de entrada (Inflow)	241 086.61	362 692.18
Almacenamiento dentro del área de análisis	72 315.42	118 412.43
Flujo fuera del área de análisis (Outflow)	168 772.06	244 279.75

El volumen total de la crecida simulada es de 0.6 millones de m³, de los cuales 0.24 millones de m³ son agua y 0.36 millones de m³ corresponden a sedimento (volumen almacenado + volumen fuera del área de simulación). El área de inundación reportado por el modelo es de 191 744 m².

Se aprecian tirantes máximos de 8.5 m con velocidades de hasta 2 m/s en el cauce de la quebrada y tirantes de 5 m con velocidades de hasta 4 m/s en la confluencia con el río Urubamba. (Ver Figura 3 y 4).

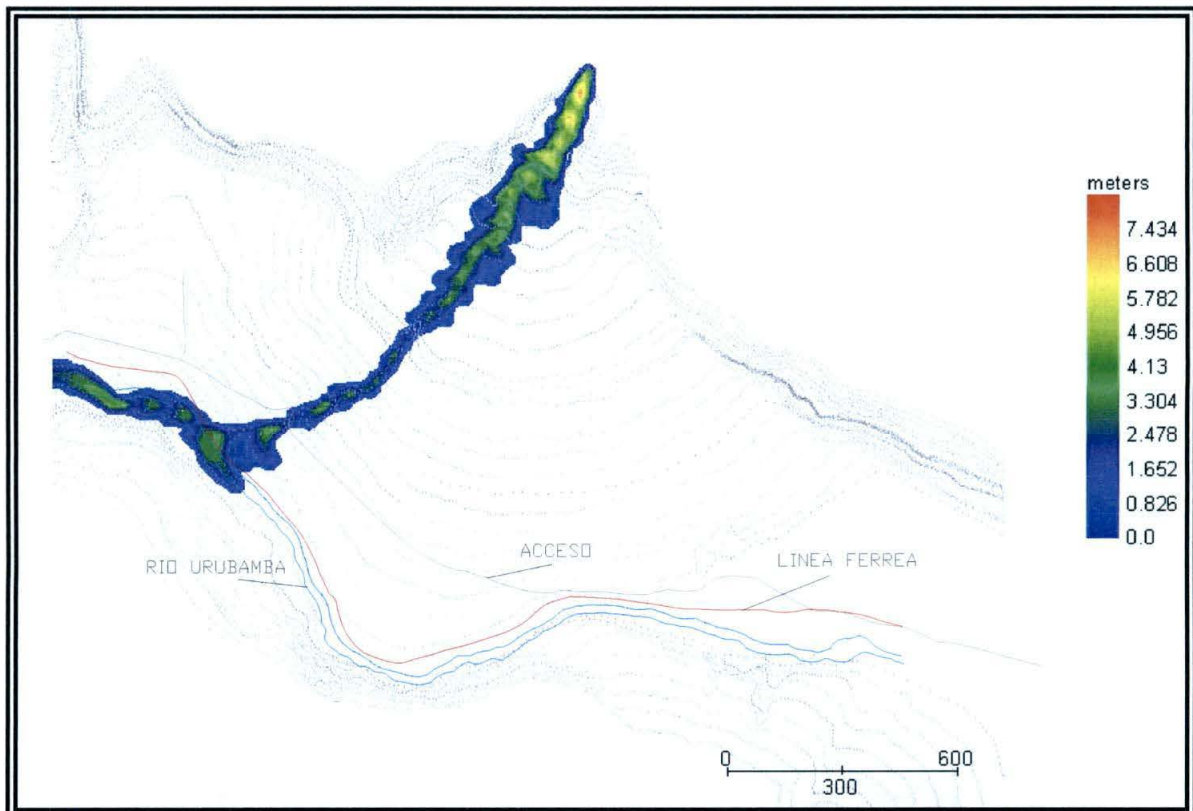


Figura 3. Profundidades de flujo máximas. $Q_{lp}=10.33 \text{ m}^3/\text{s}$

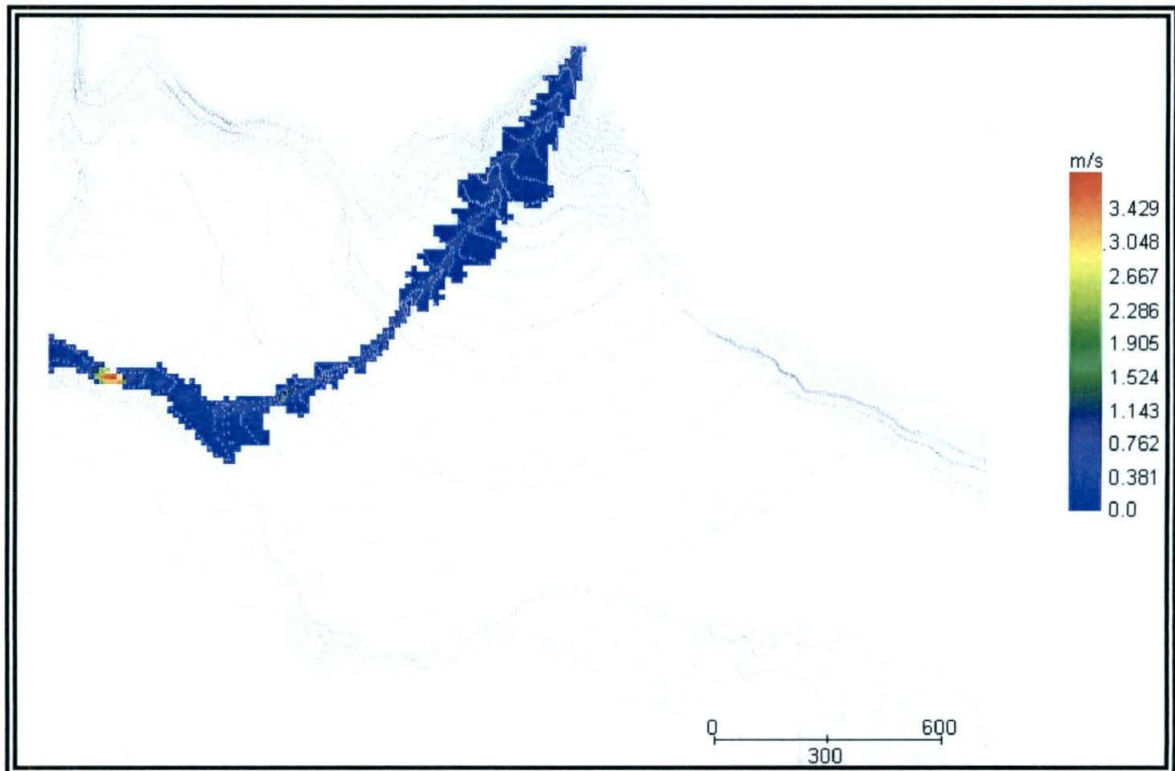


Figura 4. Velocidades del flujo máximas. $Q_{lp}=10.33 \text{ m}^3/\text{s}$

8. Análisis e interpretación de resultados.

De los resultados observados en la Figura 3, se aprecia en la parte superior, mayor presencia de tirantes de huayco que van desde los 4 a los 7.5 metros. También se observa un pequeño desborde del flujo a ambos márgenes del cauce principal. En la parte baja de la quebrada se aprecia tirantes de huayco de 3 a 4 metros. Estas alturas del flujo han sido comparadas con las evidencias de campo y el comportamiento del flujo simulado ha sido similar a los puntos de control dentro de la quebrada (fotografías anteriores).

También en la zona de represamiento, se observan los tirantes de hasta 6 metros, lo que se asemeja a lo visto en campo. Se produce un represamiento del río Urubamba o Vilcanota hacia aguas abajo. En esta zona de confluencia se encuentran las mayores velocidades de 3.5 m/s (ver Figura 4).

El modelo FLO-2D ha reportado como volumen de agua igual a $24\,1087 \text{ m}^3$ de los cuales se presume que es el volumen de agua proporcionado por la lluvia y por el bloque de hielo que activo el flujo de lodo y escombros. Se ha considerado que el caudal pico líquido del hidrograma de entrada es igual al caudal provisto de ambos fenómenos. También el modelo ha reportado un volumen de sedimentos dentro de la quebrada igual a $118\,412 \text{ m}^3$ que viene ha ser el volumen de represamiento en el río y el volumen depositado a lo largo del cauce principal.

De la simulación se observa un cierre de la línea férrea de 200 metros aproximadamente por material proveniente del huayco en la zona de desembocadura de la quebrada Runtumayo.

9. Escenarios posibles

A continuación se analizarán 2 escenarios para un aumento en el *caudal líquido pico* (Q_{lp}) a $15 \text{ m}^3/\text{s}$ y a $20 \text{ m}^3/\text{s}$.

Los parámetros reológicos y la concentración de sedimentos serán los mismos utilizados anteriormente.

- Descarga líquida de $15 \text{ m}^3/\text{s}$ producido por una avalancha del Glaciar Verónica

La Figura 5 muestra el hidrograma líquido y la distribución de la concentración de sedimentos utilizada como condición de borde en el modelo.

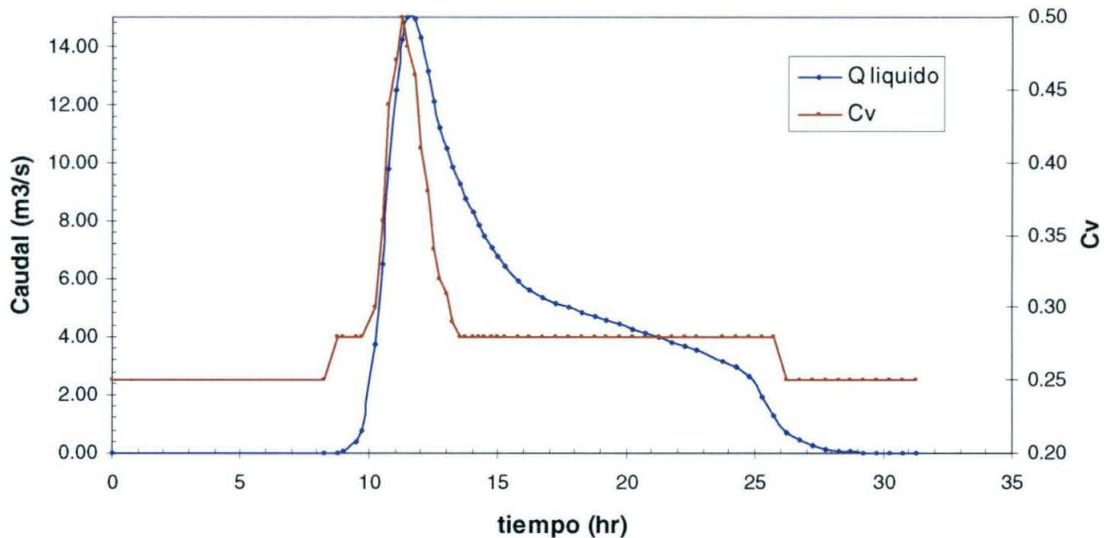


Figura 5. Hidrograma líquido y sólido. $Q_{lp}=15 \text{ m}^3/\text{s}$

Los volúmenes reportados por el modelo FLO-2D son:

Tabla 3. Salidas del programa FLO-2D ($Q_{lp}=15 \text{ m}^3/\text{s}$)

FLUJO (M^3)	AGUA (M^3)	BULKED WITH SEDIMENT (M^3)
Hidrograma de entrada (Inflow)	350 042.44	526 609.43
Almacenamiento dentro del área de análisis	85 755.81	142 207.80
Flujo fuera del área de análisis (Outflow)	264 288.00	384 401.63

El volumen total de la creciente simulada es de 0.88 millones de m^3 , de los cuales 0.35 millones de m^3 son agua y 0.53 millones de m^3 corresponden a sedimento (volumen almacenado + volumen fuera del área de simulación). El área de inundación reportado por el modelo es de $224\,256 \text{ m}^2$.

Se aprecia mayor influencia del huayco sobre el cauce y mayor represamiento en la zona de confluencia. Tenemos tirantes máximos de 9 m con velocidades

de hasta 2 m/s en el cauce de la quebrada y tirantes de 6 m con velocidades de hasta 5.5 m/s en la confluencia con el río Urubamba. (Ver Figura 6 y 7).

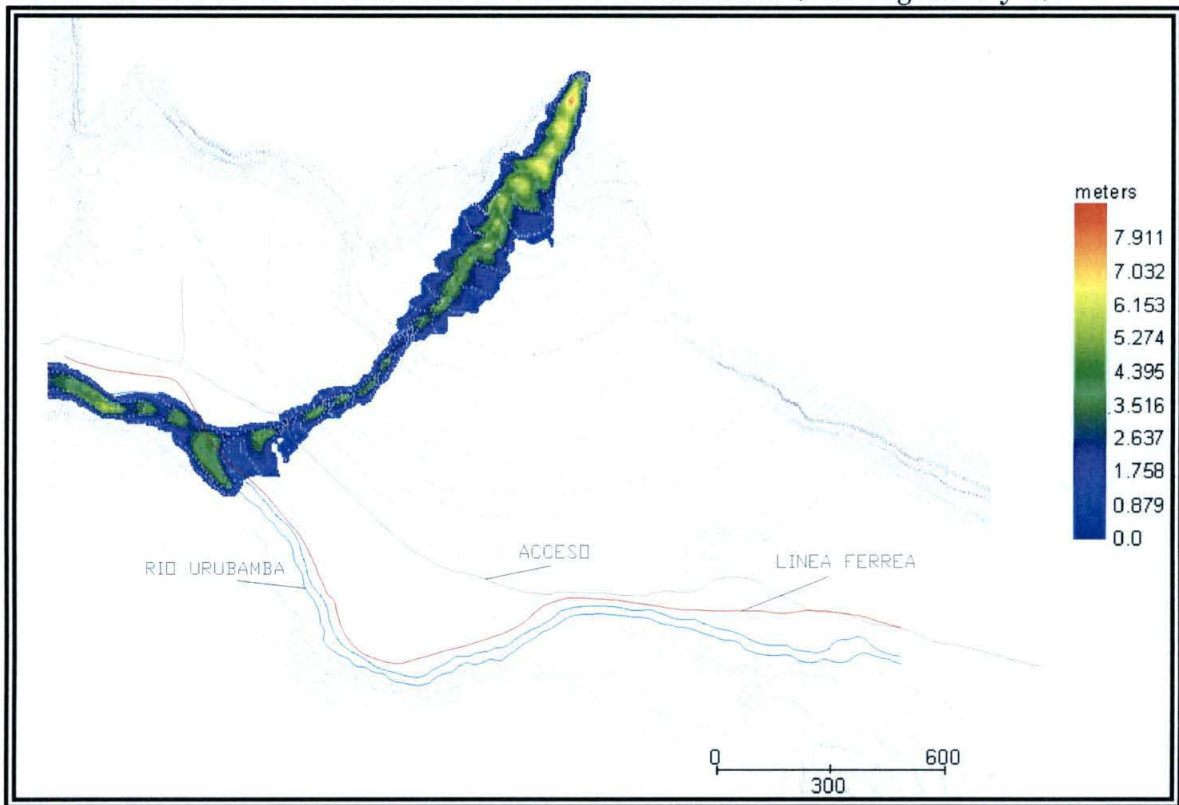


Figura 6. Profundidades de flujo máximas. $Q_{lp}=15 \text{ m}^3/\text{s}$

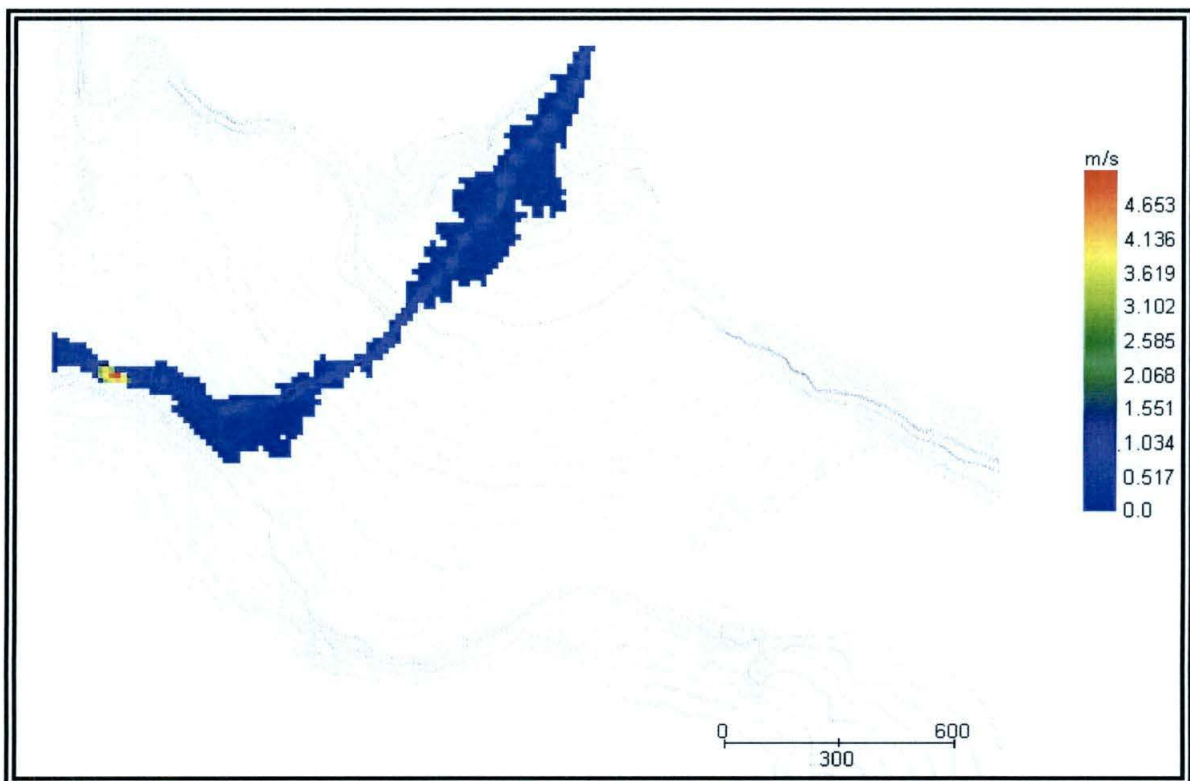


Figura 7. Velocidades del flujo máximas. $Q_{lp}=15 \text{ m}^3/\text{s}$

- Descarga líquida de 20 m³/s producido por una avalancha del Glaciar Verónica

La Figura 8 muestra el hidrograma líquido y la distribución de la concentración de sedimentos utilizada como condición de borde en el modelo.

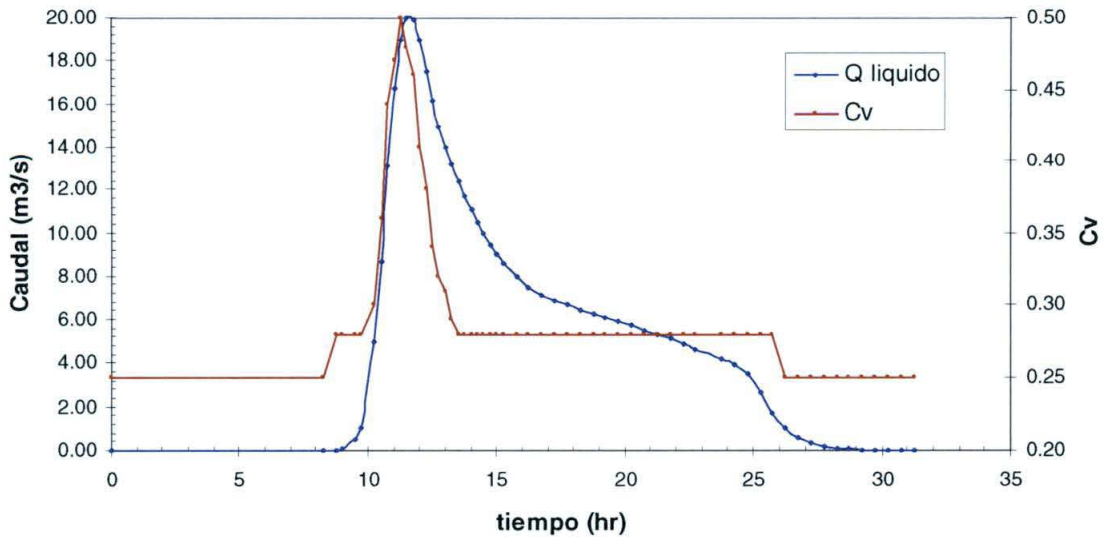


Figura 8. Hidrograma líquido y sólido. $Q_{lp}=20 \text{ m}^3/\text{s}$

Los volúmenes reportados por el modelo FLO-2D son:

Tabla 4. Salidas del programa FLO-2D ($Q_{lp}=20 \text{ m}^3/\text{s}$)

FLUJO (M ³)	AGUA (M ³)	BULKED WITH SEDIMENT (M ³)
Hidrograma de entrada (Inflow)	466 752.03	702 187.05
Almacenamiento dentro del área de análisis	100 119.11	167 977.14
Flujo fuera del área de análisis (Outflow)	366 634.42	534 209.92

El volumen total de la creciente simulada es de 1.17 millones de m³, de los cuales 0.47 millones de m³ son agua y 0.70 millones de m³ corresponden a sedimento (volumen almacenado + volumen fuera del área de simulación). El área de inundación reportado por el modelo es de 248 576 m².

Se aprecia mucha mayor influencia del huayco sobre el cauce y mayor represamiento en la zona de confluencia. El cauce principal se llega a colmatar con el flujo del huayco. Tenemos tirantes máximos de 9.5 m con velocidades de hasta 2 m/s en el cauce de la quebrada y tirantes de 7 m con velocidades de hasta 5.5 m/s en la confluencia con el río Urubamba. (Ver Figura 9 y 10).

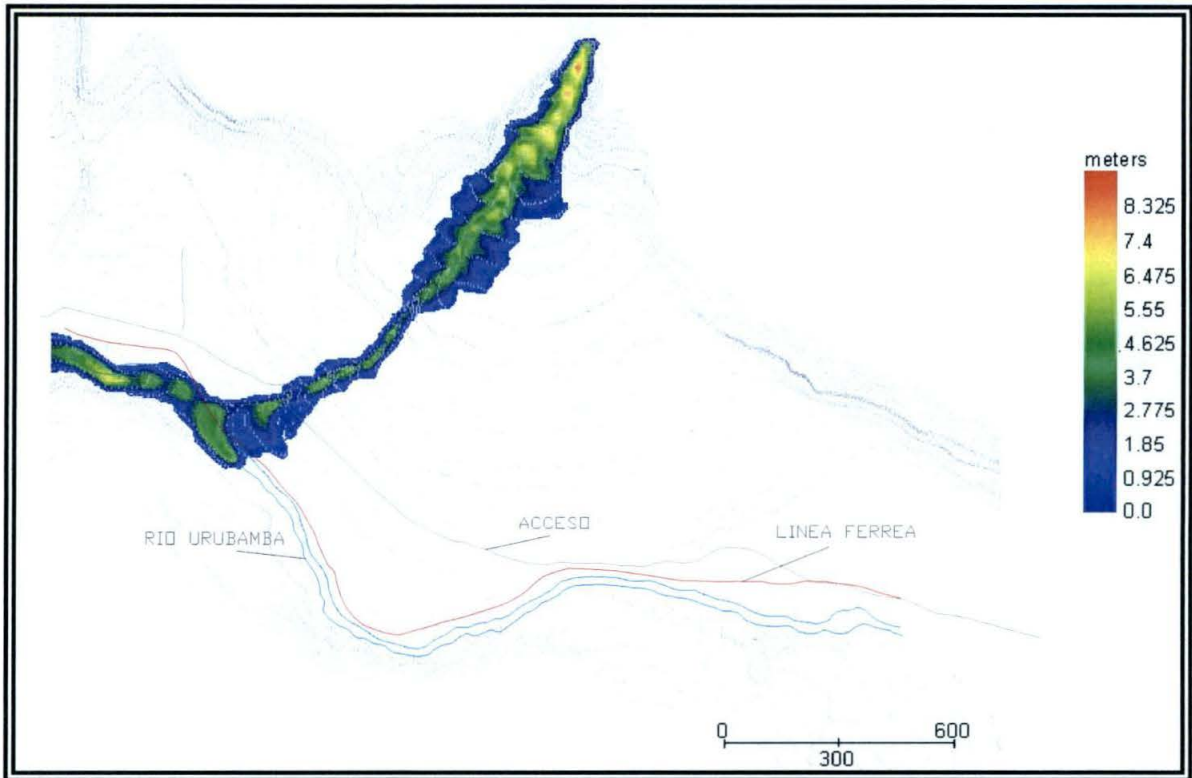


Figura 9. Profundidades de flujo máximas. $Q_{lp}=20 \text{ m}^3/\text{s}$

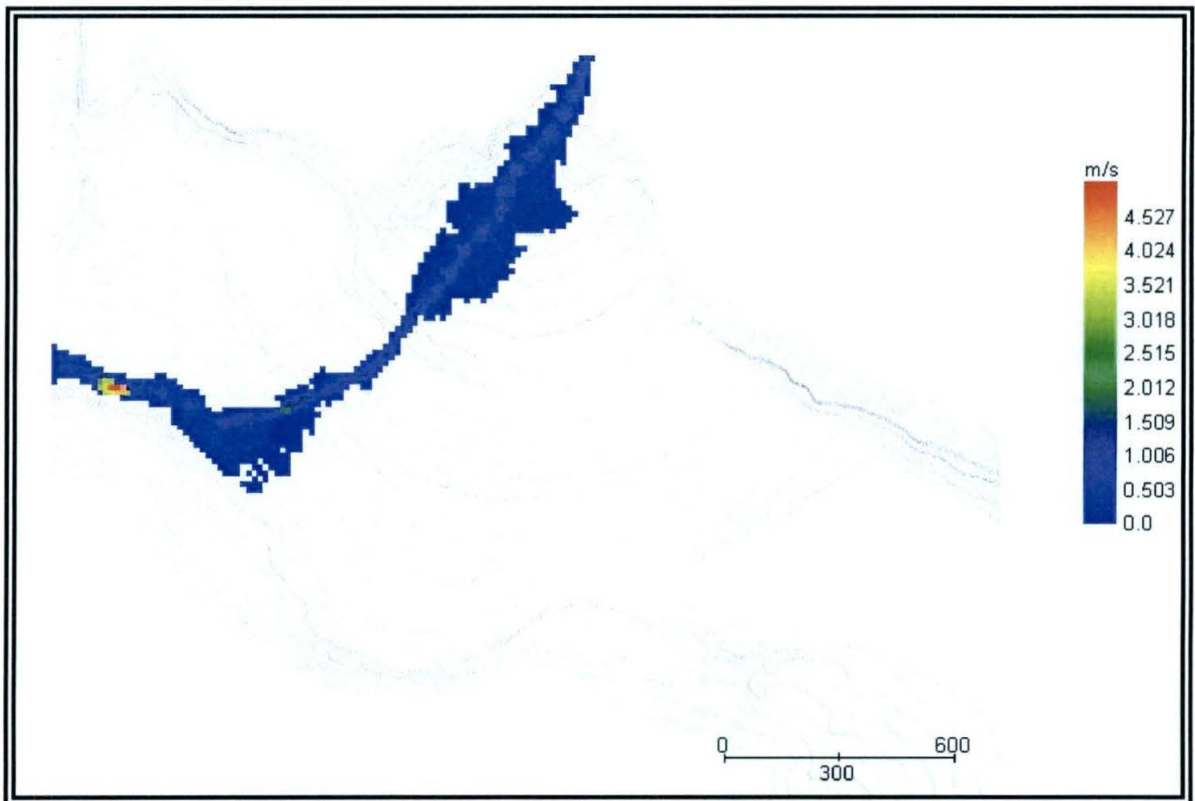


Figura 10. Velocidades del flujo máximas. $Q_{lp}=20 \text{ m}^3/\text{s}$

- Descarga líquida de 50 m³/s producido por una avalancha del Glaciar Verónica

La Figura 11 muestra el hidrograma líquido y la distribución de la concentración de sedimentos utilizada como condición de borde en el modelo.

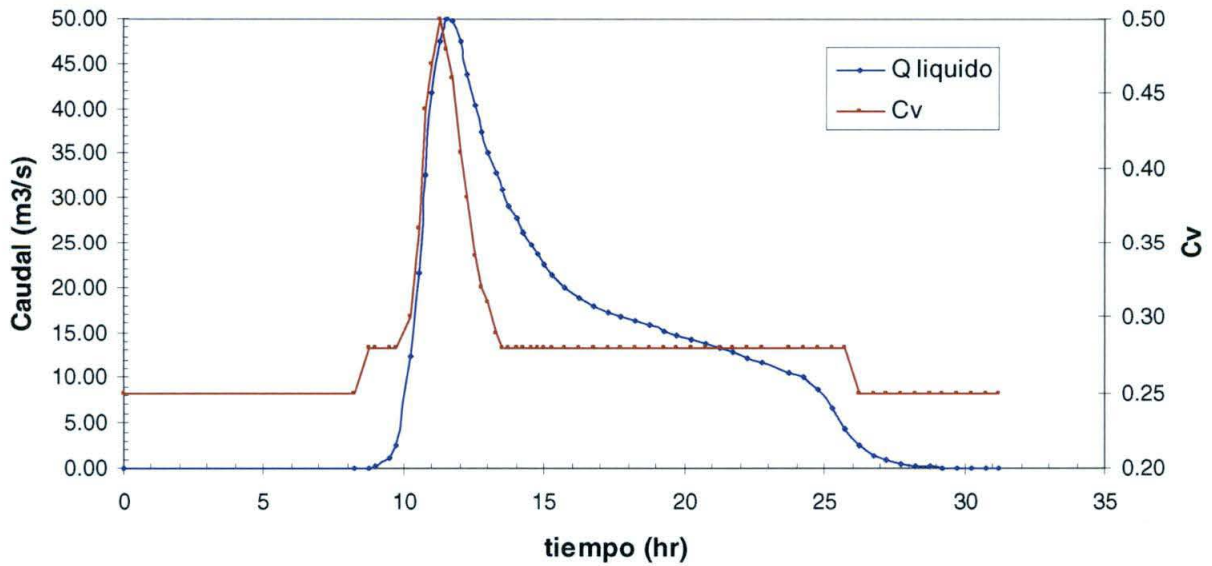


Figura 11. Hidrograma líquido y sólido. $Q_{lp}=50 \text{ m}^3/\text{s}$

Los volúmenes reportados por el modelo FLO-2D son:

Tabla 4. Salidas del programa FLO-2D ($Q_{lp}=50 \text{ m}^3/\text{s}$)

FLUJO (M ³)	AGUA (M ³)	BULKED WITH SEDIMENT (M ³)
Hidrograma de entrada (Inflow)	1 167 064.63	1 755 729.81
Almacenamiento dentro del área de análisis	174 810.33	303 320.19
Flujo fuera del área de análisis (Outflow)	992 255.36	1 452 409.63

El volumen total de la creciente simulada es de 3 millones de m³, de los cuales 1.17 millones de m³ son agua y 1.76 millones de m³ corresponden a sedimento (volumen almacenado + volumen fuera del área de simulación). El área de inundación reportado por el modelo es de 360 192 m².

Se aprecia que el cauce principal se encuentra completamente colmatado y en la zona de confluencia el represamiento es total en el río. Tenemos tirantes mayores a 10 m con velocidades de hasta 3 m/s en el cauce de la quebrada y tirantes de hasta 8.5 m con velocidades de hasta 8 m/s en la confluencia con el río Urubamba. (Ver Figura 12 y 13).

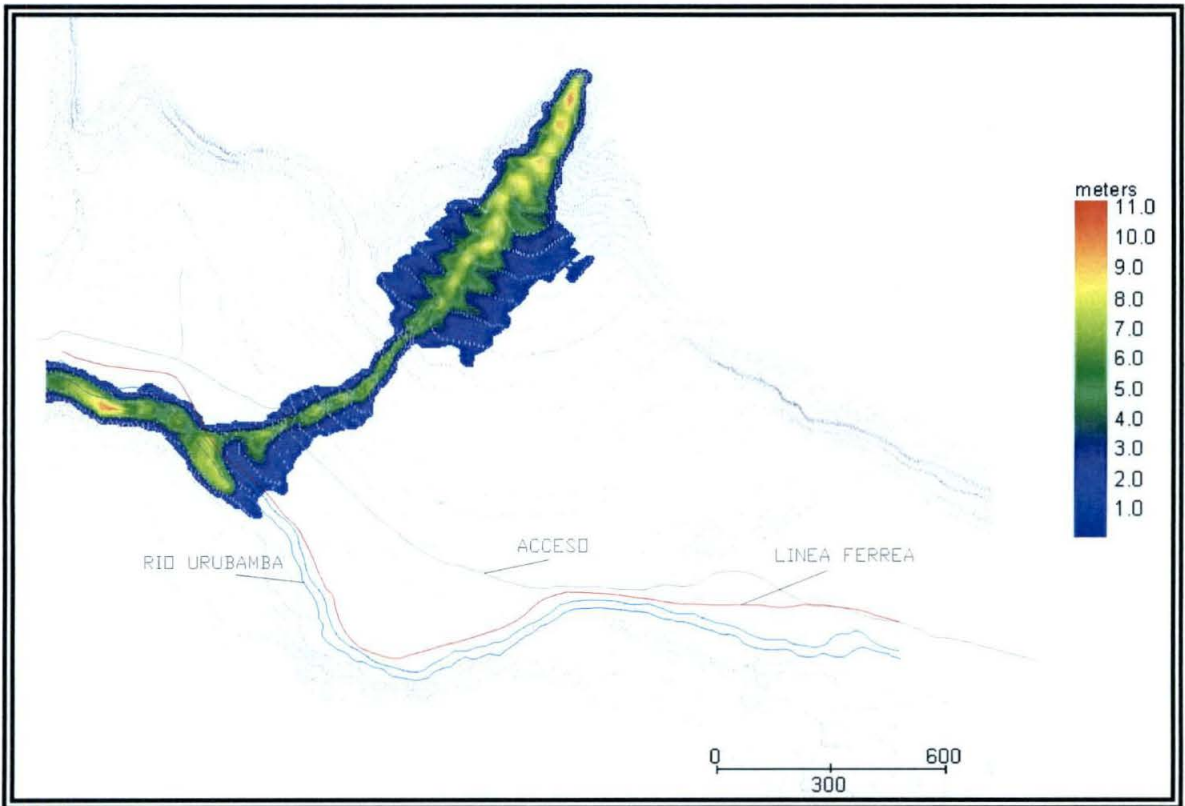


Figura 12. Profundidades de flujo máximas. $Q_{lp}=50 \text{ m}^3/\text{s}$

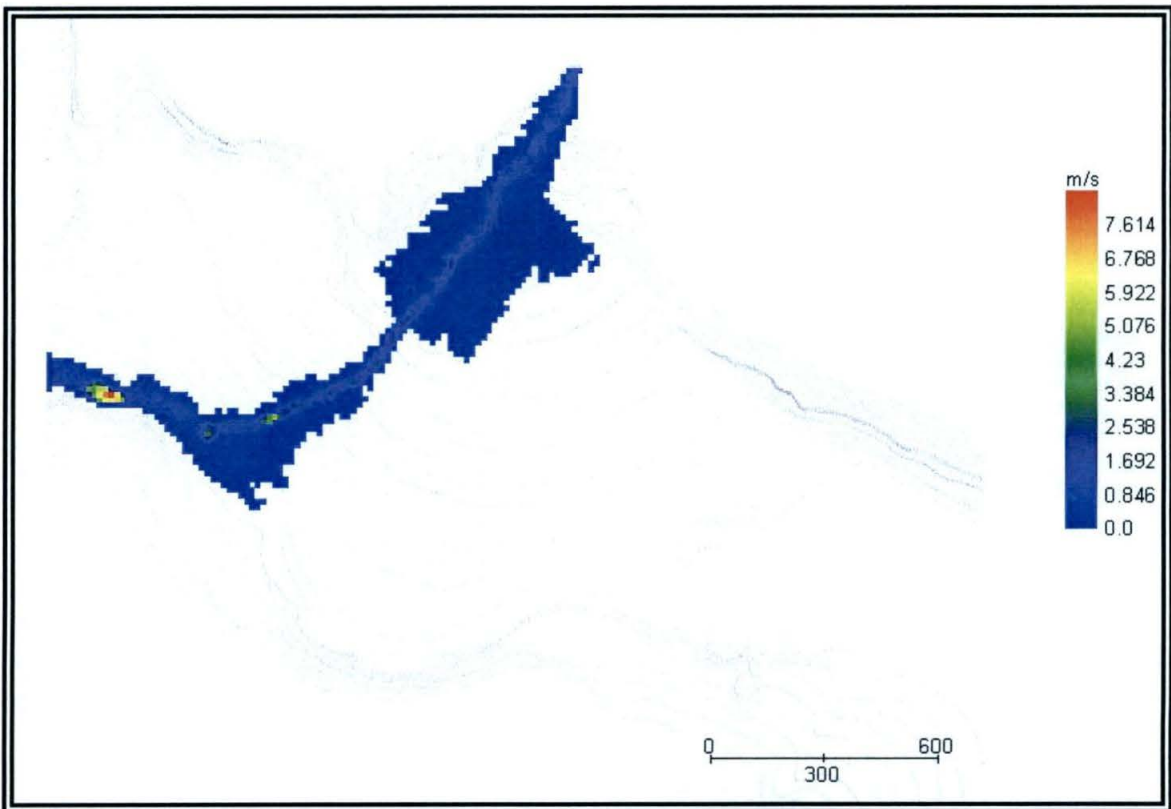
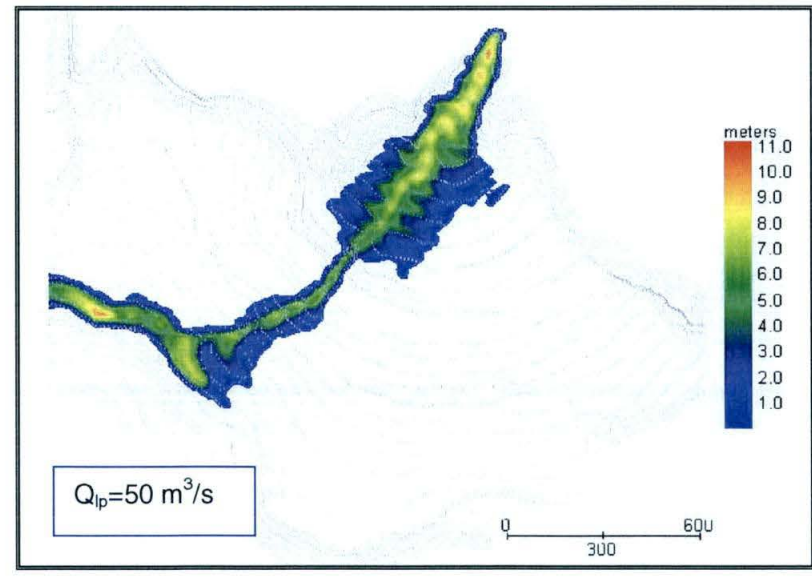
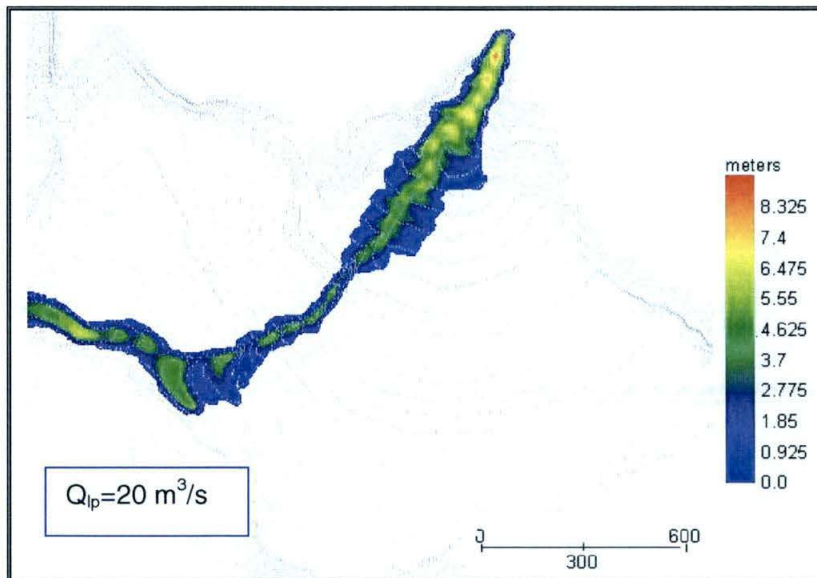
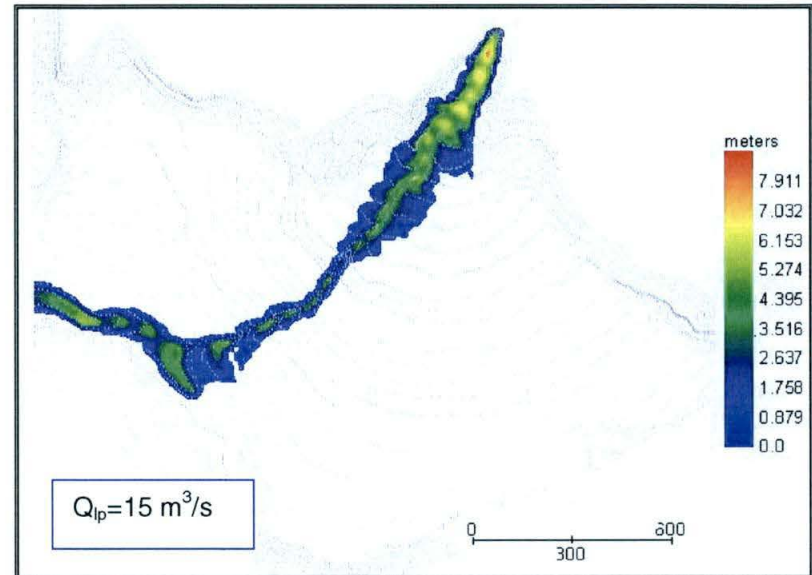
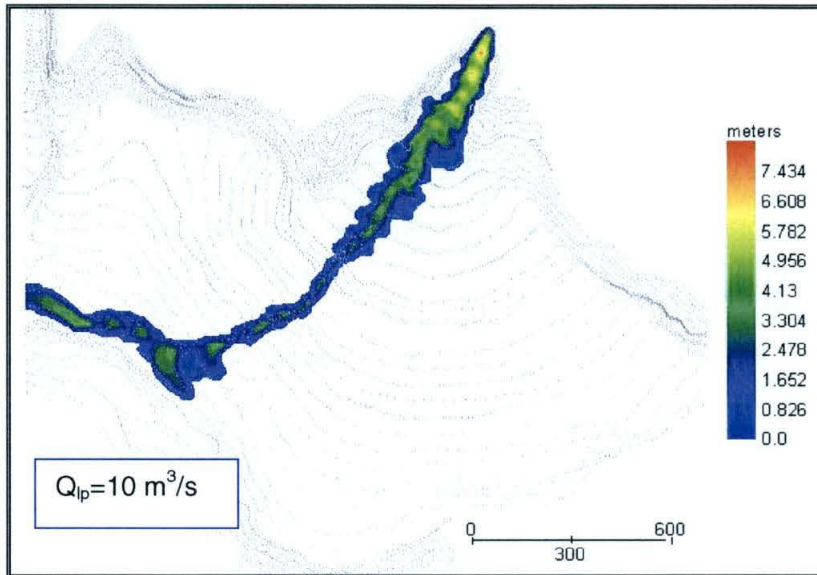


Figura 13. Velocidades del flujo máximas. $Q_{lp}=50 \text{ m}^3/\text{s}$



10. Bibliografía.

Castillo N., Leonardo F. 2005. **Aplicación de un Modelo Numérico de flujos de lodo y escombros en una quebrada en el Perú.** Tesis de Antegrado, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería.

Chow, Ven te., Maidment, David R. y Mays, Larry W. 1994. **Hidrología Aplicada.** Ediciones McGraw-Hill.

Horner, W.W y F.L Flynt. 1934. **Relation Between Rainfall and Runoff from Small Urban Basins.** ASCE Proceedings, vol 60, pp. 1135-1178.

Instituto de Mecánica de Fluidos (IMF). 2000. **Evaluación del flujo de escombros en las quebradas Costeras de Venezuela.** Proyecto AVILA, Venezuela.

Julien, P.Y. & Y.Q. Lan. 1991. **On the rheology of hyperconcentrations.** J. of Hyd. Eng., ASCE, 117(3), pp 346-353.

O'Brien J.S & Pierre Y. Julien. 1988. **Laboratory Analysis of Mudflow Properties.** Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 114, No 8, ASCE

O'Brien J.S, P.Y Julien and W.T. Fullerton. 1993. **Two dimensional water flood and mudflood simulation.** J. of Hyd. Eng., ASCE, 119(2), 224-259.

O'Brien J.S. 2000. **FLO-2D User's Manual, Version 2000.10,** Nutrioso, Arizona. Ubicación: <http://www.flo-2d.com>