

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA EN GEOLOGÍA Y PETRÓLEOS

OBTENCIÓN DE PARÁMETROS CUANTITATIVOS DE LAHARES EN LA QUEBRADA PALMAURCU DEL VOLCÁN TUNGURAHUA MEDIANTE LA CALIBRACIÓN DE LOS DETECTORES DE TIPO ACOUSTIC FLOW MONITOR AFM

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO GEÓLOGO

ALMEIDA MORILLO STEFANIE LUCÍA

stfy_almeid@hotmail.com

DIRECTOR: DR. ANDRADE VARELA SANTIAGO DANIEL

dandrade@igepn.edu.ec

Quito, Febrero 2016

DECLARACIÓN

Yo, STEFANIE LUCÍA ALMEIDA MORILLO, declaro bajo juramento que el trabajo aquí escrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual, correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Stefanie Lucía Almeida Morillo

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por STEFANIE LUCÍA ALMEIDA MORILLO, bajo mi supervisión.

Dr. Santiago Daniel Andrade Varela
DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTO

A mi madre Silvana y a mi hermana Ibeth por su amor y sacrificio. Han sido el motor que me ha permitido seguir adelante.

A mi padre, Armando, por el apoyo y confianza depositados en mí.

Al Dr. Daniel Andrade por sus enseñanzas y consejos. Mi gratitud por las oportunidades que me ha brindado, pero sobre todo por su amistad y confianza. Ha sido una luz.

Al Instituto Geofísico y todo su personal, especialmente al área de Volcanología. Al Dr. Benjamin Bernard y la MSc. Patricia Mothes por su tiempo para leer este manuscrito y por sus valiosos comentarios. A la Dra. Silvana Hidalgo y el Ing. Patricio Ramón por su amistad, por compartir sus conocimientos y anécdotas profesionales.

A todos mis profesores de carrera, que no solo me han transmitido sus conocimientos, sino también me han ayudado a definir los caminos que deseo seguir.

A Sergio, con quien compartí toda mi época universitaria.

A mis amigos de toda la vida Cris y Johy.

A mis valiosos amigos: Francisco Vásconez por ser como un hermano mayor (aunque a veces actúa como el menor), Camilo Zapata por su amistad paciencia y sus particulares ocurrencias, Diego Narváez por su ayuda y todas las charlas enriquecedoras, Mayra Zúñiga por su sinceridad y confianza, Juver Játiva y Johnny García la complicidad y el compañerismo de todos estos años de universidad, Marco Almeida y Wilmer Merino por todas las experiencias compartidas.

A Mateo Vega, Paula Noroña, Daniel Sierra y Karo Tamayo por todo el tiempo que me han brindado, y por hacer más amena mi estadía en la universidad.

DEDICATORIA

A mis padres y hermana.

A mi papi Hu.

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. ANTECEDENTES	1
1.2. JUSTIFICATIVOS	2
1.3. OBJETIVOS	4
1.3.1. OBJETIVO GENERAL	4
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
1.4. ALCANCE	4
1.5. UBICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO	5
2. CONTEXTO TEÓRICO	7
2.1. LAHARES (FLUJOS DE LODO)	7
2.2. TIPOS DE FLUJO	8
2.2.1. FLUJOS DE ESCOMBROS (DEBRIS FLOWS)	8
2.2.2. FLUJOS HIPERCONCENTRADOS	8
2.3. ORIGEN DE LOS FLUJOS DE LODO	9
2.3.1. LAHARES PRIMARIOS	10
2.3.2. LAHARES SECUNDARIOS	11
2.4. COMPORTAMIENTO DEL FLUJO	12
2.5. MONITOREO INSTRUMENTAL DE LAHARES	17
2.5.1. DETECTORES DE LAHARES DE TIPO AFM	17
2.5.2. IMPORTANCIA DEL MONITOREO INSTRUMENTAL DE LAHARES	20
2.5.2.1. Emisión de Alertas Tempranas	21
2.5.2.2. Cuantificación de parámetros del flujo	21
3. MONITOREO DE LAHARES EN EL VOLCÁN TUNGURAHUA	22
3.1. LAHARES GENERADOS EN EL VOLCÁN TUNGURAHUA DESDE SU REACTIVACIÓN EN 1999	22
3.2. LA RED DE AFM DEL VOLCÁN TUNGURAHUA	28
3.3. DATOS GENERADOS POR LOS ACOUSTIC FLOW MONITOR AFM	31
3.4. EMISIÓN DE ALERTAS TEMPRANAS EN EL VOLCÁN TUNGURAHUA	34
4. METODOLOGÍA DE OBTENCIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS	37
4.1. CREACIÓN DE BASE DE DATOS	37

4.1.1.	INFORMES SEMANALES DEL OBSERVATORIO DEL VOLCÁN TUNGURAHUA	37
4.1.2.	DATOS GENERADOS POR LOS AFM (JUIVE) DE LA QUEBRADA PALMAURCU	38
4.1.3.	SELECCIÓN DE EVENTOS	41
4.2.	ADQUISICIÓN DE PARÁMETROS FÍSICOS EN EL CAMPO	41
4.3.	ESTIMACIÓN DE CAUDALES DE LOS LAHARES OCURRIDOS EN LA QUEBRADA PALMAURCU	44
4.3.1.	ESTIMACIÓN DEL ÁREA DE LA SECCIÓN MOJADA	47
4.3.2.	ESTIMACIÓN DE LA VELOCIDAD DEL FLUJO	50
4.3.3.	ESTIMACION DEL CAUDAL	56
5.	RESULTADOS	58
5.1.	MONITOREO DE OCURRENCIA DE LAHARES EN LA QUEBRADA PALMAURCU	58
5.2.	CLASIFICACIÓN DE LOS LAHARES OCURRIDOS EN LA QUEBRADA PALMAURCU	63
5.3.	CALIBRACIÓN DE LOS INSTRUMENTOS	66
5.3.1.	ESTACIÓN JUI-01	68
5.3.2.	ESTACIÓN JUI-02	71
5.3.3.	ESTACIÓN JUI-03	73
5.4.	ESTIMACIÓN DE CAUDALES Y VOLÚMENES DE LOS LAHARES OCURRIDOS EN LA QUEBRADA PALMAURCU DEL VOLCÁN TUNGURAHUA	76
6.	DISCUSIÓN	81
6.1.	LOS AFM COMO INSTRUMENTOS DE DETECCIÓN Y DE CUANTIFICACIÓN DE LAHARES	81
6.2.	LOS AFM Y LOS SISTEMAS DE ALERTAS TEMPRANAS EN CASO DE LAHAR	83
6.3.	CLASIFICACIÓN DE LAHARES A PARTIR DE LOS REGISTROS DE LOS AFM	86
6.4.	INCERTIDUMBRES EN LA APLICACIÓN DEL MÉTODO DE SOBRE ELEVACIÓN PARA EL CÁLCULO DE VELOCIDADES DE LAHARES	88
6.5.	INCERTIDUMBRES ASOCIADAS A LA ESTIMACIÓN DE VOLÚMENES DE LAHARES	91
7.	CONCLUSIONES	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Esquema de la red de drenaje del volcán Tungurahua dentro de la cual se encuentra la quebrada Palmaurcu, objeto de estudio.....	6
Figura 2.1: Modelo esquemático mostrando los ejemplos de tipos de lahares más comunes de acuerdo a su origen. Lahares primarios generados durante una erupción explosiva importante con capacidad de producir fusión de un glaciar (izquierda) y lahares secundarios generados por intensas lluvias que remobilizan material piroclástico depositado previamente (derecha). Tomado de Andrade et al. (2005).....	10
Figura 2.2: Modelo esquemático de un lahar desplazándose aguas abajo mostrando la transición de fases que puede producirse en secuencia (Tomada de Vallance, 2001) ...	12
Figura 2.3: Imágenes mostrando a) desbordamiento de un lahar del volcán Merapi - Indonesia inundando una planicie (AvcanBlog website), b) lahar del Mount Ruapehu (Nueva Zelanda) confinado por el drenaje (MTU volcanoes page), c) lahar del volcán Tungurahua erosionando los depósitos laterales durante su transporte (OVT-IGEPN), y d) lahar acarreando grandes bloques en el río Vazcún en el volcán Tungurahua (Defensa Civil Baños 2005)	13
Figura 2.4: Diagrama esquemático mostrando como la segregación de partículas gruesas hacia la superficie de un debris flow resulta en la acumulación preferencial de las partículas gruesas hacia el frente (a) y márgenes (b) del flujo. Note que el marco de referencia se muestra en movimiento a la velocidad media del flujo. Tomado de Vallance, 2005.....	16
Figura 2.5: Respuesta a la vibración del suelo de un sismómetro estándar y de un acoustic flow monitor (USGS, 2008).....	18
Figura 2.6: Esquema simplificado de los componentes de una estación AFM (Tomado de LaHusen, 2005)	19

Figura 3.1: Número de lahares ocurridos en el volcán Tungurahua por año en el periodo comprendido entre 2000-2014 (Actualizado de Mothes and Vallance, 2015).....	23
Figura 3.2: Diagrama mostrando el promedio de lahares por mes ocurridos en el volcán Tungurahua entre 2000-2014	24
Figura 3.3: Imágenes de la zona del balneario “El Salado” ubicado en el margen del río Vazcún, el 12 de febrero de 2005 a) minutos antes de la llegada del lahar al sitio (13h30), b) tránsito del lahar minutos después de la alerta y una rápida evacuación (13h42). Fotografía: Defensa Civil de Baños.....	25
Figura 3.4: Daños ocasionados al balneario “El Salado” y a viviendas ubicadas en las riberas del río Vazcún por el lahar ocurrido el 23 de agosto de 2008. Fotografía Jorge Bustillos (OVT-IGEPN)	26
Figura 3.5: Diagrama mostrando el número de lahares ocurridos en los diferentes drenajes del volcán Tungurahua. (Modificado de McFarlin et al., 2011).....	27
Figura 3.6: Distribución en número y tamaño relativo de los 886 lahares generados por lluvias registrados durante 2000-2011. El aumento de eventos en el 2007 se debe a la removilización de los aproximadamente 50 Mm ³ de material volcanoclástico que fue depositado en los flancos del Tungurahua durante las erupciones de julio y agosto del 2006. (Tomado de Mothes and Vallance, 2015).....	28
Figura 3.7: Mapa de ubicación de las estaciones que conforman la actual red de AFMs del volcán Tungurahua.....	31
Figura 3.8: Interfaz del software Descartes Omniserver Developer que se ejecuta para recibir y almacenar los datos en bruto de la red de AFMs del volcán Tungurahua en tiempo real.....	32
Figura 3.9: Interfaz del software OPC Systems que permite visualizar gráficamente los datos registrados por los AFM.....	33
Figura 3.10: Esquema básico del funcionamiento del Sistema de Alerta Temprana ejecutado en el volcán Tungurahua para ocurrencia de lahares (Modificado de Andrade et al., 2006).....	35
Figura 4.1: Ubicación de las estaciones AFM de la quebrada Palmaurcu en el volcán Tungurahua.....	39

Figura 4.2: Esquema del funcionamiento de un detector de lahares AFM cuando desciende un lahar por el cauce (Tomado de Andrade et al, 2005).....	40
Figura 4.3: Imagen del telémetro láser TruPulse 360B utilizado para realizar las mediciones de campo.....	42
Figura 4.4: Esquema que muestra las medidas de los diferentes parámetros obtenidos con el telémetro láser. Los parámetros marcados con línea continua representan los valores medidos directamente y los marcados con línea de puntos representan los valores calculados.....	44
Figura 4.5: Esquema mostrando los parámetros que intervienen en la relación de velocidad basada en el principio de sobre – elevación a) radio de curvatura, b) diferencia de altura entre los bordes de la sección mojada y longitud de la sección mojada.....	46
Figura 4.6: Esquema de la realización de un perfil en el campo de acuerdo a la huella mojada dejada por el lahar durante su transporte. Las líneas de puntos azules corresponden al perímetro mojado y la de puntos blancos a la superficie libre del flujo; en su conjunto determinan la sección transversal del flujo. Las flechas indican los puntos inicial y final del perfil entre los cuales se tomaron los puntos que determinan la sección.....	48
Figura 4.7: diagrama mostrando el perfil de la sección mojada con los puntos tomados mediante el uso del telémetro.....	49
Figura 4.8: diagrama mostrando la triangulación del polígono que determina la sección transversal para el cálculo de su área.....	49
Figura 4.9: Diagrama mostrando el cálculo de la diferencia de altura en base al perfil transversal realizado con mediciones de campo.....	50
Figura 4.10: Diagrama mostrando el cálculo de la longitud de la sección mojada en base al perfil transversal realizado con mediciones de campo.....	51
Figura 4.11: Medición en el campo de la ubicación de varios puntos a lo largo de una curva transitada por el lahar. La línea de puntos roja representa el eje de la trayectoria seguida por el lahar que se toma como referencia.....	52
Figura 4.12: Diagrama mostrando la construcción de todos los triángulos posibles con los puntos que definen la curva.....	52

Figura 4.13: Diagrama mostrando el circuncentro y circunradio de un triángulo.....	53
Figura 4.14: Gráfico mostrando la ubicación espacial de los puntos tomados en el campo que definen la curva transitada por un lahar y la ubicación del centro de su radio de curvatura (Cr)	55
Figura 4.15: Gráfico mostrando la ubicación espacial de todos los circuncentros asociados a todos los triángulos formados de acuerdo al número de puntos que definen la curva transitada por un lahar el 5 de mayo del 2013. Nótese la dispersión de los cincuncentros obtenidos, debido a que la curva medida en el campo no corresponde exactamente a un arco de círculo.....	55
Figura 4.16: Determinación del perfil transversal y la curva transitada (necesarios para la estimación del caudal) en diferentes puntos de la quebrada para un mismo evento.....	57
Figura 5.1: Número de lahares ocurridos por mes en la quebrada Palmaurcu, durante el periodo de estudio.....	58
Figura 5.2: Relación HB/FB vs LB/FB para dos lahares ocurridos en la quebrada Palmaurcu. En el diagrama se puede observar que para el lahar ocurrido el 9 de julio de 2013 los valores tienden a ser mayores para la relación HB/FB respecto al lahar del 1 de diciembre de 2012, indicando un flujo con mayor concentración de agua a la cual la High Band es más sensible.....	64
Figura 5.3: Registro AFM con cada una de sus bandas para un lahar ocurrido el 1 de diciembre de 2012 correspondiente a un debris flow, en el cual se puede apreciar el incremento brusco de los valores produciendo un pico bien marcado, y los máximos valores en Low Band. Su duración es relativamente corta.....	65
Figura 5.4: Registro AFM con cada una de sus bandas para un lahar ocurrido el 9 de julio de 2013 correspondiente a un flujo hiperconcentrado, en el cual se puede apreciar un incremento paulatino de los valores dando lugar a varios picos en el registro pero menos bruscos, y los máximos valores de Low Band siendo en muchos instantes superados por los de High Band. Son en general de larga duración.....	66
Figura 5.5: Comparación entre los registros de las amplitudes obtenidas en la Banda baja (Low Band) y la Banda completa (Full Band) para un lahar registrado el 04-05-2013. Se puede observar la zona de saturación de la banda baja donde se pierde la correlación lineal de los registros.....	67

Figura 5.6: Diagrama de dispersión obtenido para la banda Full Band del AFM JUI-01, para cada ejemplo se puede observar la desviación estándar de los valores medios de caudal pico obtenidos para cada lahar de la distribución muestral. Se muestra la recta de regresión lineal que correlaciona las variables y su ecuación correspondiente.....69

Figura 5.7: Diagrama de dispersión obtenido para la banda Low Band del AFM JUI-01, para cada ejemplo se puede observar la desviación estándar de los valores medios de caudal pico obtenidos para cada lahar de la distribución muestral. Se muestra la recta de regresión lineal que correlaciona las variables y su ecuación correspondiente.....70

Figura 5.8: Diagrama de dispersión obtenido para la banda Full Band del AFM JUI-02, se puede observar la desviación estándar de los valores medios de caudal pico obtenidos para cada lahar de la distribución muestral. Se muestra la recta de regresión lineal que correlaciona las variables y su ecuación correspondiente.....71

Figura 5.9: Diagrama de dispersión obtenido para la banda Full Band del AFM JUI-02, se puede observar la desviación estándar de los valores medios de caudal pico obtenidos para cada lahar de la distribución muestral. Se muestra la recta de regresión lineal que correlaciona las variables y su ecuación correspondiente.....72

Figura 5.10: Diagrama de dispersión obtenido para la banda Full Band del AFM JUI-03, se puede observar la desviación estándar de los valores medios de caudal pico obtenidos para cada lahar de la distribución muestral. Se muestra la recta de regresión lineal que correlaciona las variables y su ecuación correspondiente.....74

Figura 5.11: Diagrama de dispersión obtenido para la banda Low Band del AFM JUI-03, se puede observar la desviación estándar de los valores medios de caudal pico obtenidos para cada lahar de la distribución muestral. Se muestra la recta de regresión lineal que correlaciona las variables y su ecuación correspondiente.....75

Figura 5.12: Diagrama mostrando la transformación de los registros AFM de un lahar (arriba) a su respectivo hidrograma (abajo) para obtener de él su volumen.....77

Figura 6.1: Diagrama de los registros AFM correspondientes a las tres bandas de frecuencia para un lahar ocurrido el 11 de marzo de 2014, en el cual se puede apreciar el desarrollo de dicho lahar en el tiempo87

Figura 6.2: Diagrama representando las relaciones HB/FB vs LB/FB para un lahar ocurrido el 11 de marzo de 2014. En él se puede apreciar dos zonas de concentración diferentes de la dispersión de puntos.....88

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Identificación de las estaciones AFM que se encuentran en operación actualmente en el volcán Tungurahua.....	29
Tabla 2: Detalle de todos los lahares ocurridos en la quebrada Palmaurcu del volcán Tungurahua entre marzo de 2012 y marzo de 2015, y los datos disponibles proporcionados por los detectores de lahares AFM asociados a los mismos. En la sección de registros se ha usado la siguiente nomenclatura para indicar los casos en los que no se cuentan con datos de lahares en las fechas indicadas: FT= instrumentos han experimentado fallas técnicas, ND= debido a fallas del sistema de almacenamiento no se cuenta con estos datos.....	59
Tabla 3: En base a los registros de los AFM de Juive es posible precisar su hora de ocurrencia, duración, hora de descarga pico, y en base a las correlaciones obtener parámetros como caudal medio, caudal pico y volumen para cada evento (y sus respectivos errores estándar ee).....	78

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: Estimación de caudal del lahar ocurrido el 01-12-2012 en la Quebrada Palmaurcu (Sección 1).....	102
ANEXO 2: Estimación de caudal del lahar ocurrido el 01-12-2012 en la Quebrada Palmaurcu (Sección 2).....	104
ANEXO 3: Estimación de caudal del lahar ocurrido el 08-02-2013 en la Quebrada Palmaurcu (Sección 1).....	106
ANEXO 4: Estimación de caudal del lahar ocurrido el 04-05-2013 en la Quebrada Palmaurcu (Sección 1).	108
ANEXO 5: Estimación de caudal del lahar ocurrido el 04-05-2013 en la Quebrada Palmaurcu (Sección 2).....	110
ANEXO 6: Estimación de caudal del lahar ocurrido el 09-07-2013 en la Quebrada Palmaurcu (Sección 1).....	112
ANEXO 7: Estimación de caudal del lahar ocurrido el 11-05-2014 en la Quebrada Palmaurcu (Sección 1).....	114
ANEXO 8: Estimación de caudal del lahar ocurrido el 01-06-2014 en la Quebrada Palmaurcu (Sección 1).....	116
ANEXO 9: Estimación de caudal del lahar ocurrido el 01-06-2014 en la Quebrada Palmaurcu (Sección 2).....	118

ANEXO 10: Estimación de caudal del lahar ocurrido el 01-06-2014 en la Quebrada Palmaurcu (Sección 3).....	120
ANEXO 11: Estimación de caudal del lahar ocurrido el 01-06-2014 en la Quebrada Palmaurcu (Sección 4).....	122
ANEXO 12: Estimación de caudal del lahar ocurrido el 15-09-2014 en la Quebrada Palmaurcu (Sección 1).....	124
ANEXO 13: Estimación de caudal del lahar ocurrido el 15-09-2014 en la Quebrada Palmaurcu (Sección 2).....	126
ANEXO 14: Estimación de caudal del lahar ocurrido el 15-09-2014 en la Quebrada Palmaurcu (Sección 3).....	128
ANEXO 15: Estimación de caudal del lahar ocurrido el 07-12-2014 en la Quebrada Palmaurcu (Sección 1).....	130
ANEXO 16: Estimación de caudal del lahar ocurrido el 07-12-2014 en la Quebrada Palmaurcu (Sección 2).....	132

RESUMEN

En este estudio se presenta la obtención de parámetros cuantitativos de los lahares secundarios ocurridos entre marzo de 2012 y marzo de 2015 en la quebrada Palmaurcu del volcán Tungurahua.

Tres instrumentos de tipo Acoustic Flow Monitor (AFM) se encuentran ubicados a lo largo de este drenaje para la detección de lahares. Previamente permitían realizar solo apreciaciones cualitativas, pero mediante una calibración de los instrumentos fue posible cuantificar los lahares.

Se generó una base de datos de todos los eventos ocurridos durante el periodo de estudio de acuerdo a la información comprendida en los boletines semanales emitidos por el personal del Observatorio del Volcán Tungurahua y una comparación con los registros de los detectores de lahares.

Para poder calcular el caudal de los lahares, posteriormente a su tránsito, fue necesario realizar mediciones de campo. El método utilizado para la estimación de velocidad fue la ecuación de vórtice forzado que considera el principio de sobre elevación. Las variables necesarias se adquirieron mediante la ayuda de un telémetro láser, al igual que la determinación de las secciones transversales inundadas.

Se relacionó los caudales pico con la amplitud máxima registrada por los instrumentos para varios eventos. El resultado es una correlación lineal cuya ecuación permite la transformación de los registros en caudales instantáneos.

Mediante un análisis de significancia se determinó que las regresiones correspondientes a dos de las estaciones permiten realizar estimaciones válidas, mientras que la ecuación para la tercera estación no es útil en la actualidad.

Para cada lahar fue posible estimar su caudal medio, caudal máximo y volumen. Adicionalmente se estimó el volumen total de los lahares producidos.

Por otra parte, mediante un análisis de los registros se propone un método de clasificación de los lahares de acuerdo a su comportamiento (flujos hiperconcentrados y flujos de escombros).

ABSTRACT

Quantitative flow parameters have been obtained for the secondary lahars occurred between March 2012 and March 2015 in the Palmaurcu drainage at Tungurahua volcano.

Three instruments of Acoustic Flow Monitor type (AFM) are located along this drainage for detecting lahars. Previously, they only allowed to perform qualitative assessments, but after a calibration of the instruments was possible to quantify lahars.

A database of all events that occurred during the study period was generated, according to the information contained in the weekly bulletins issued by the staff of the Tungurahua Volcano Observatory and a comparison with the records of the lahar detection system.

In order to calculate the lahar discharge, after its occurrence, field measurements were needed. The method used for estimating the speed was the vortex forced equation that considers the super elevation principle. The necessary variables were purchased by using a laser telemeter, also to determine the flooded cross sections.

Peak flow discharge is related to the maximum amplitude recorded by the instruments for several lahars. The result is a linear correlation equation which allows the processing of AFM records in instant flow discharge.

Through an analysis of significance it was determined that the regressions for two stations allow valid estimates, while the equation for the third station is not useful under present conditions.

For each lahar it was possible to estimate the average flow discharge, the peak flow discharge and its volume. In addition, the total volume of all produced lahars was estimated.

Moreover, by analyzing the AFM records, a method to classify lahars according to their behavior (hyperconcentrated flows and debris flows) is proposed.

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

El actual periodo eruptivo del volcán Tungurahua inició en octubre de 1999 y persiste hasta el momento, distinguido principalmente por episodios intermitentes de actividad explosiva con la ocurrencia de erupciones estrombolianas y vulcanianas y una erupción sub-pliniana. Las primeras caracterizadas por la ocurrencia de explosiones pequeñas pero frecuentes, acompañadas de eyección de bloques balísticos y caídas de ceniza; mientras que las vulcanianas han sido explosiones mucho más energéticas que han dado lugar a la generación de flujos piroclásticos (*Eychenne et al., 2012; Hall et al., 2013*).

Uno de los fenómenos volcánicos más comunes que se han producido asociados a la actividad del Tungurahua, es la formación de lahares (flujos de lodo y escombros) en los ríos y numerosos drenajes del volcán. Estos desembocan en los ríos Chambo (oeste), Puela (sur) y Pastaza (norte) que lo drenan. Los valles profundos de los ríos Vascún y Ulba descienden directamente de la cumbre cortando los flancos norte y nororiental del cono, respectivamente, hasta desembocar en el río Pastaza (*Le Pennec et al., 2005*).

En el Tungurahua el mecanismo principal de iniciación de los lahares es la interacción en las zonas altas del cono del agua de lluvia con los depósitos piroclásticos frescos, disponibles debido a la actividad explosiva que le caracteriza (*Jones et al., 2015*).

Las fuertes pendientes también contribuyen a la formación de estos flujos, los cuales corren laderas abajo, atravesando incluso zonas pobladas o infraestructuras. Un caso muy palpable ha sido el de la red vial alrededor del volcán, que en innumerables ocasiones ha sido inhabilitada, por intersectarse o

estar muy próxima a la densa red de drenajes que canalizan los lahares. La carretera principal que conecta la ciudad de Baños con la Panamericana y otras ciudades atraviesa algunos de los drenajes del flanco norte del Tungurahua que son propensos a ser afectados por el tránsito de lahares, y vías más pequeñas atraviesan los drenajes occidentales (*Sorenson et al., 2003; Le Pennec et al., 2005*).

Por lo mencionado anteriormente, desde la reactivación del volcán se ha establecido un observatorio permanente operado por el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional IG-EPN. El Observatorio del Volcán Tungurahua (OVT) se encuentra ubicado aproximadamente a 13 km al noroccidente del cráter del volcán, y desde ahí se monitorea continuamente su actividad. En este sitio estratégico se reciben las señales de todos los instrumentos instalados en los flancos del volcán, además un factor importante en el monitoreo es la colaboración de voluntarios locales de cada una de las comunidades asentadas alrededor del volcán conocidos como “vigías”, que reportan sus observaciones visuales y auditivas vía radio (*Stone et al., 2014; Mothes et al., 2015*).

Particularmente, para detectar y registrar la ocurrencia de lahares (que son más frecuentes en los flancos N y NW) el IG ha desarrollado a partir del año 2000 un sistema de alerta temprana que se basa en instrumentos sísmicos conocidos como Acoustic Flow Monitor (AFM). Estos permiten detectar en tiempo real el tránsito de lahares en un drenaje (*Marcial et al., 1996; Lavigne et al., 2000; Andrade et al., 2006*).

1.2. JUSTIFICATIVOS

El Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional mantiene un programa de vigilancia dedicado especialmente al volcán Tungurahua desde el inicio de su actual periodo eruptivo en el año 1999, el mismo que incluye proveer información en tiempo real sobre la ocurrencia de lahares (flujos de lodo y escombros) en los drenajes del volcán, los cuales constituyen uno de los fenómenos más recurrentes (*Le Pennec et al., 2005*).

Su elevada frecuencia se debe a la alta precipitación anual y la actividad eruptiva frecuente que restituye habitualmente suministros de material piroclástico no consolidado en el volcán y el riesgo es aún mayor por las empinadas laderas del Tungurahua. Durante los 15 años de actividad eruptiva se ha registrado la ocurrencia de más de 1000 lahares en las diferentes quebradas del volcán (*OVT-IGEPN, 2012-2015*).

Se estima que ocurren aproximadamente 80 lahares al año en todas las quebradas del volcán, siendo la quebrada Palmaurcu en la que se producen con mayor frecuencia: aproximadamente el 20% del total de lahares se originan en ella (*Mothes y Vallance, 2015; OVT-IGEPN, 2012-2015*). Este drenaje cuenta con instrumentación que permite su monitoreo, siendo la única quebrada del volcán con tres estaciones de detección de lahares. En sus cercanías se desarrollan actividades económicas y su cauce se intersecta con la carretera principal que conduce a la ciudad de Baños.

La detección de estos fenómenos se consigue mediante el uso de instrumentos especializados conocidos como Acoustic Flow Monitor (AFM) que han sido instalados en varios drenajes del volcán, los cuales registran incrementos en la vibración del suelo durante el paso de un lahar (*Marcial et al., 1996; Lavigne et al., 2000; Andrade et al., 2006*).

Estos instrumentos han mostrado ser muy útiles ya que permiten determinar la ocurrencia o no de un lahar en tiempo real, pero hasta la actualidad sus registros solo han permitido realizar evaluaciones cualitativas sobre los lahares. Sin embargo, el potencial uso de sus registros puede ser mucho más extenso, pudiendo incluso proveer información cuantitativa sobre el flujo, como caudal instantáneo, velocidad promedio, velocidad instantánea, volumen, calado e incluso composición volumétrica aproximada (*Tuñgol y Regalado, 1996; Lavigne et al., 2000; Andrade et al., 2006*).

Para que el registro de un sensor de tipo AFM pueda ser transformado en información cuantitativa sobre el flujo, es necesario que se realice una calibración del instrumento que consiste esencialmente en transformar el registro del AFM en un hidrograma del lahar (*Andrade et al., 2004*). Esto se consigue relacionando los

registros obtenidos con el caudal máximo de flujo de los lahares, el cual debe ser medido en el campo durante o después de su ocurrencia.

Esta calibración aportará de manera significativa al monitoreo de la actividad volcánica, permitiendo obtener datos de gran valor para la emisión de alertas tempranas y aportará al conocimiento de la fenomenología de estos flujos.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

- Contribuir a la comprensión de la dinámica de los flujos de lahares, mediante la obtención de parámetros cuantitativos de lahares en la quebrada Palmaurcu del volcán Tungurahua mediante la calibración de los detectores de tipo Acoustic Flow Monitor AFM.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- i. Generar una base de datos de todos los lahares registrados por los AFM instalados en la quebrada.
- ii. Realizar medidas de sobre-elevaciones (run-up) y secciones transversales de lahares ocurridos en la quebrada Palmaurcu.
- iii. Correlacionar los registros de los AFM con el flujo de descarga estimado.
- iv. Hacer una estimación del volumen de materiales transportados por los lahares ocurridos en la quebrada Palmaurcu.
- v. Realizar una clasificación de los lahares ocurridos en la quebrada Palmaurcu a partir de los registros de AFM.

1.4. ALCANCE

Este trabajo se basa en el análisis de los eventos ocurridos entre marzo de 2012 y marzo de 2015, utilizando los informes semanales del Observatorio del Volcán Tungurahua y los datos de los AFM que se registran en la central del observatorio en tiempo real. Todos estos datos serán usados para generar una base de datos.

Los datos de los instrumentos que se incluirán en este estudio corresponden a los tres AFM que se encuentran instalados en la quebrada Palmaurcu del volcán y que forman parte de la red instrumental de monitoreo de lahares del volcán Tungurahua.

Se realizarán cálculos de los caudales máximos para algunos eventos ocurridos en la quebrada Palmaurcu durante el transcurso del desarrollo del presente proyecto, en base a mediciones de campo de sobre-elevación (run-up) de los flujos y sus áreas inundadas posteriormente a su tránsito por la quebrada. Para esto se utilizará un distanciómetro láser.

La estimación del volumen de los lahares ocurridos durante el periodo de estudio se efectuará una vez que se haya determinado la relación entre los registros de los AFMs con los caudales máximos calculados, es decir una vez que los registros AFM puedan ser transformados en hidrogramas.

1.5. UBICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

El presente proyecto se realizará en el volcán Tungurahua (Lat. 01°28'S; Long. 78°27'W), un estrato-volcán andesítico de 5023msnm, que se localiza en la Cordillera Real del Ecuador, aproximadamente a 120 km al sur de Quito, 33 km al SE de Ambato y tan sólo a 8 km de la ciudad de Baños. Está caracterizado por su forma cónica, con un diámetro basal de 14km y un gran relieve entre su base y cráter (3200m) con pronunciadas pendientes (30-35°) de sus flancos (*Le Pennec et al., 2008; Hall et al., 1999; Hall et al., 2013*).

Se ha escogido como sitio de estudio la quebrada Palmaurcu, también conocida como “La Pampa”, ubicada en el flanco norte del volcán Tungurahua (Fig. 1.1), debido a que en ella se han instalado instrumentos AFM desde el año 2012 y a menudo se registran lahares. Adicionalmente esta quebrada permite obtener fácilmente los datos de campo que son necesarios para el proceso de calibración de los instrumentos, por ejemplo realizar mediciones de secciones transversales

de áreas inundadas y sobre-elevaciones producidas en el cauce (Johnson y Rodine, 1984; Znamensky, 2000; Vásconez, 2006).

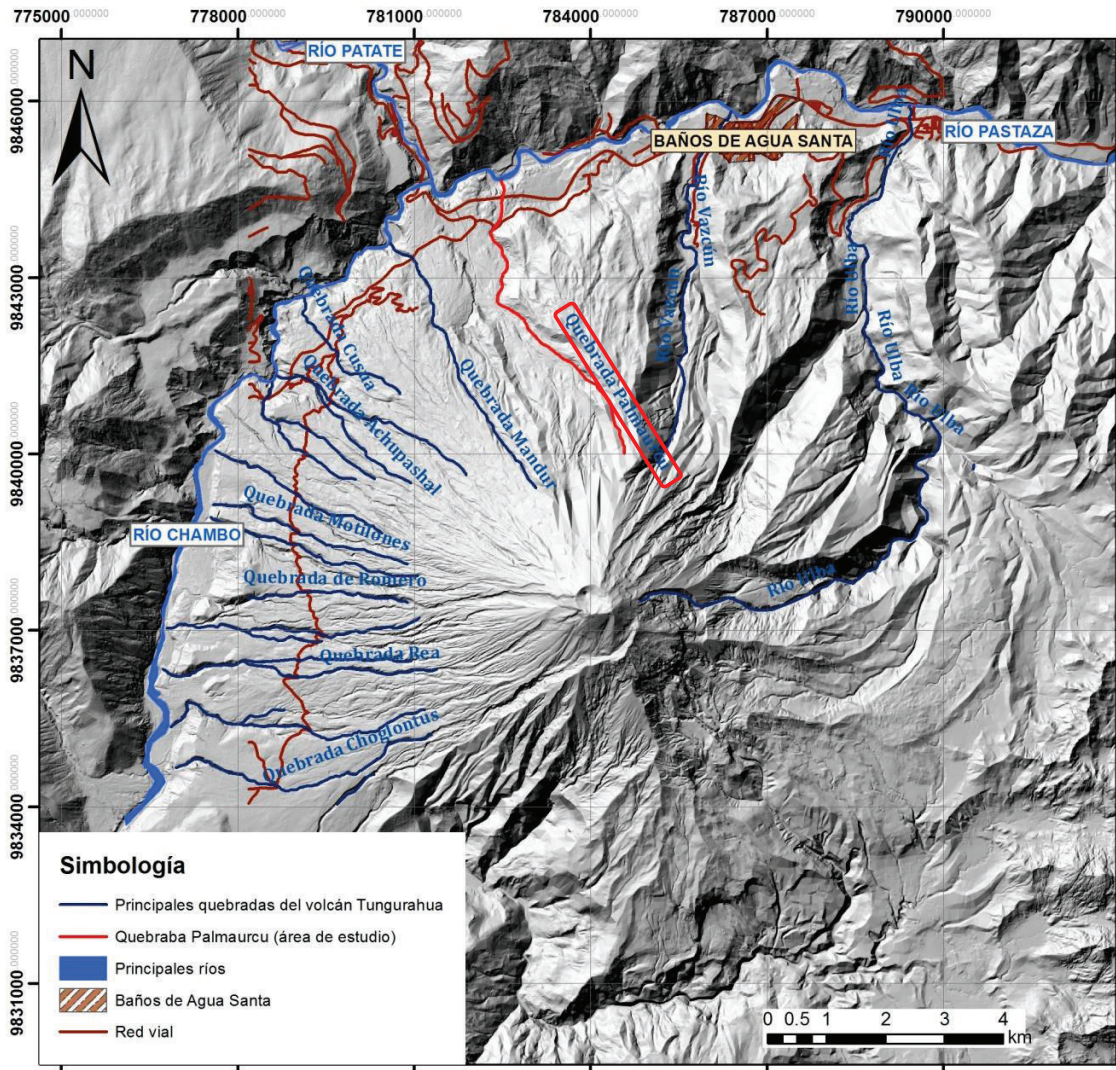


Figura 1.1: Esquema de la red de drenaje del volcán Tungurahua dentro de la cual se encuentra la quebrada Palmarcu, objeto de estudio.

CAPÍTULO 2

2. CONTEXTO TEÓRICO

2.1. LAHARES (FLUJOS DE LODO)

Lahar es un término de origen indonesio, usado para describir mezclas fluidas saturadas en agua, altamente concentradas en sedimentos y escombros de rocas volcánicas y que se desplazan rápidamente pendiente abajo en los volcanes, bajo la influencia de la gravedad (*Vallance, 2001; Waitt, 2013*).

Estos fenómenos pueden generarse directa o indirectamente por efectos de la actividad volcánica, pueden ocurrir durante una erupción, o de forma impredecible a través de otros procesos superficiales relacionados a los terrenos volcánicos (sismos, deslizamientos, intensas lluvias).

Durante la ocurrencia de un lahar pueden producirse varios procesos que determinarán su comportamiento: erosión y *bulking* que consiste en la incorporación de sedimentos y escombros a medida que se mueven aguas abajo, procesos de segregación de partículas (por tamaño y densidad), dilución y transformación de fases aguas abajo, *debulking* y procesos deposicionales en los cuales los lahares depositan de forma selectiva ciertas partículas del flujo (*Vallance, 2001; Fagents y Baloga, 2006*).

Aunque algunos flujos lodosos están genéticamente relacionados con eventos de lahar, la mayoría no lo son, en teoría el término lahar no se extiende en general a incluir dichos flujos. De acuerdo a la literatura volcanológica el término lahar incluye solamente: debris flows, flujos hiperconcentrados, y las transiciones entre ellos (*Vallance, 2001; Vallance, 2005; Fagents and Baloga, 2006; Doyle et al., 2010*).

2.2. TIPOS DE FLUJO

El comportamiento de los lahares puede variar con el tiempo y distancia aguas abajo, dependiendo de si pueden incorporar suficiente sedimento para convertirse en debris flows (>60% de sedimento por volumen) o flujos hiperconcentrados (20-60% de sedimento por volumen), de acuerdo a la cantidad de sedimentos finos y/o gruesos que tengan en suspensión (*Pierson et al., 1996; Fagents and Baloga, 2006; Doyle et al., 2010*).

Cabe recalcar que la concentración de sedimentos no es definitiva porque el comportamiento depende también de otros factores tales como la distribución de tamaño de sedimentos y la energía del flujo (grado de agitación); por lo cual es complejo definirlos con total precisión.

2.2.1. FLUJOS DE ESCOMBROS (DEBRIS FLOWS)

Son una mezcla saturada en agua con gran concentración de sedimentos, muy pobremente sorteados, con tamaños de partícula desde arcilla hasta grandes bloques (escombros).

A estos flujos les caracteriza una mezcla muy uniforme de las fases sólida y líquida en los perfiles verticales (que los distingue de los más ricos en agua), relacionadas a fuerzas que actúan en conjunto entre sus fases. Tienen consistencia de concreto húmedo y alta viscosidad, presentan generalmente flujo laminar y pueden tener grandes velocidades (*Pierson et al., 1996; Vallance, 2001; Vallance, 2005*).

La literatura sugiere un límite de gradación de 60% en adelante de sedimento por volumen para diferenciar los flujos de escombros (debris flows) de los flujos hiperconcentrados.

2.2.2. FLUJOS HIPERCONCENTRADOS

Son suspensiones densas de sedimentos en agua, estos flujos son pobremente sorteados pero caracterizados principalmente por arena gruesa a grava fina (*Pierson et al., 1996*).

Los distingue una mezcla no uniforme de los sedimentos y el agua, con un contenido de agua mayor que el de los debris flows pero menor que la de los “flujos de agua lodosos”. Cierta variación con la profundidad de la fracción de sólidos los caracteriza y diferencia de los debris flows. Su consistencia es similar a la de aceite de motor sucio, poseen características fluviales, sin embargo, llevan cargas muy altas de sedimentos pero no tienen la misma capacidad de llevar en suspensión grandes bloques como los debris flows y su flujo es característicamente turbulento (*Pierson et al., 1996; Vallance, 2001; Vallance, 2005*).

La literatura reporta concentraciones de sólidos entre 20 y 60% para los flujos hiperconcentrados.

2.3. ORIGEN DE LOS FLUJOS DE LODO

Los lahares pueden ser primarios (*syneruptivos*) o secundarios (*posteruptivos*), de acuerdo a si están relacionados directa o indirectamente a las erupciones volcánicas (Fig. 2.1).

Cada caso particular requiere independientemente para su generación:

- Una fuente de agua adecuada
- Abundante material (escombros volcánicos) no consolidado
- Pendientes acentuadas y un relieve considerable en la fuente
- Un mecanismo desencadenante

Las fuentes de agua disponibles y los mecanismos que dan lugar a la génesis de los lahares pueden ser variadas. El material generalmente proviene de la ocurrencia de erupciones explosivas, las cuales depositan abundantes escombros sueltos como flujos piroclásticos o depósitos de caída.

Entre las fuentes de agua que pueden inducir la formación de lahares se incluyen: el agua de los poros, nieve y hielo derretidos rápidamente, el agua subglacial atrapada, lagos de cráter u otros lagos adyacentes y el agua de las lluvias e incluso agua del sistema hidrotermal o freático del volcán.

Algunos de los mecanismos desencadenantes más comunes que pueden originar estos flujos se encuentran: erupciones, sismos, inestabilidad de los edificios que puede dar lugar a colapsos sectoriales y pueden posteriormente evolucionar a lahares (Vallance, 2001).

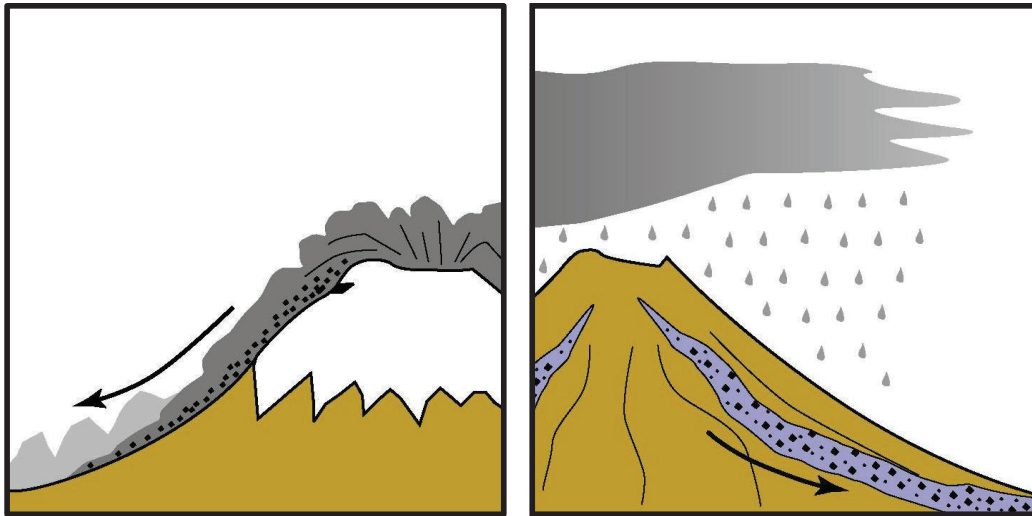


Figura 2.1: Modelo esquemático mostrando los ejemplos de tipos de lahares más comunes de acuerdo a su origen. Lahares primarios generados durante una erupción explosiva importante con capacidad de producir fusión de un glaciar (izquierda) y lahares secundarios generados por intensas lluvias que remobilizan material piroclástico depositado previamente (derecha). Tomado de Andrade et al. (2005).

2.3.1. LAHARES PRIMARIOS

Están directamente relacionados a actividad eruptiva, el agua flujo de agua resulta como una consecuencia directa. Se producen principalmente cuando durante un evento eruptivo el material incandescente produce el derretimiento de grandes volúmenes de nieve y hielo de los glaciares que se encuentran cubriendo la cima o gran parte del edificio de algunos volcanes (Andrade et al., 2005; Vallance, 2005; Mothes and Vallance, 2015), generando una mezcla de estos materiales formando lahares que fluyen aguas abajo bajo la influencia de la gravedad (Fig. 2.1).

Estos pueden también ocasionarse por ruptura o expulsión del agua de lagos cratéricos durante las erupciones. Adicionalmente los colapsos sectoriales en los

edificios volcánicos tienen la capacidad de generar mezclas enormes de sólidos y agua que pueden transformarse en lahares.

Los lahares primarios tienden a ser muy voluminosos (magnitudes entre 10^7 - 10^9 m³) y tienen las mayores velocidades y descargas registradas: hasta más de 20 m/s y comúnmente caudales pico de 10^3 - 10^5 m³/s. Estas características les otorga la capacidad de fluir grandes distancias, a veces cientos de kilómetros aguas abajo (*Mothes and Vallance, 2015*).

2.3.2. LAHARES SECUNDARIOS

Los lahares secundarios incluyen principalmente lahares generados por lluvias, las cuales proporcionan una fuente imprevista de agua que puede inducir su formación posteriormente o durante eventos eruptivos, los cuales depositan volúmenes considerables de material piroclástico que al ser no consolidado ni vegetado puede ser fácil y regularmente removido (Fig. 2.1). Estos lahares pueden ocurrir con mucha frecuencia, y generalmente son de menor magnitud respecto a los primarios, sin embargo su volumen y nivel de riesgo es difícil de anticipar.

Los lahares desencadenados por lluvias pueden producirse debido a varios mecanismos específicos: por ejemplo por escorrentía y erosión como resultado del aumento del flujo superficial por la saturación en agua de los depósitos, o por deslizamientos superficiales debido al soporte de flotación proporcionado por la elevada presión del agua sub-superficial dentro de los depósitos saturados.

Otros procesos adicionales que pueden participar en la generación de lahares desencadenados por lluvias son los de erosión laminar y el desprendimiento de partículas de la superficie causado por erosión por salpicadura que bajo ciertas condiciones puede tener alto potencial erosivo (*Vallance, 2005*).

Los lahares originados por lluvias son relativamente pequeños, su descarga y volumen se ven limitados por la intensidad, duración y acumulación de la lluvia y la incorporación del material disponible. Su volumen se encuentra en general en el rango de 10^4 - 10^6 m³ y sus descargas en el orden de 10^2 - 10^3 m³/s, con distancias de recorrido menores a 10 km habitualmente (*Mothes y Vallance,*

2015). No obstante los lahares ocurren con mucha frecuencia durante periodos lluviosos, e incluso pueden aumentar en tamaño y recurrencia semanas y meses después de la erupción primaria, para luego decrecer paulatinamente (Vallance, 2005).

El origen de los lahares secundarios puede deberse también, aunque no tan comúnmente, a rupturas de lagos o represamientos que al producirse provocan la removilización de ceniza y otros restos volcanoclásticos que se encuentran concentrados en las laderas de los volcanes y sus drenajes. Los lahares generados por estos mecanismos pueden ser de mayor magnitud que los lahares inducidos por lluvias alcanzando volúmenes de 0.1 km³ o más y recorriendo distancias de aproximadamente 10 – 100 km (Mothes y Vallance, 2015).

2.4. COMPORTAMIENTO DEL FLUJO

Los lahares pueden comprender uno o más tipos de flujo diferentes durante un mismo evento. Los flujos de escombros pueden por ejemplo convertirse en flujos hiperconcentrados (más ricos en agua) después de recorrer ciertas distancias aguas abajo, esto depende de la velocidad que tenga el flujo, que a su vez depende de la pendiente del cauce (Scott *et al.*, 1996; Vallance, 2001). Así los lahares pueden incluir varias fases (de flujo de escombros, flujo hiperconcentrado y fases incluso más acuosas de *streamflow*) en secuencia (Fig. 2.2).

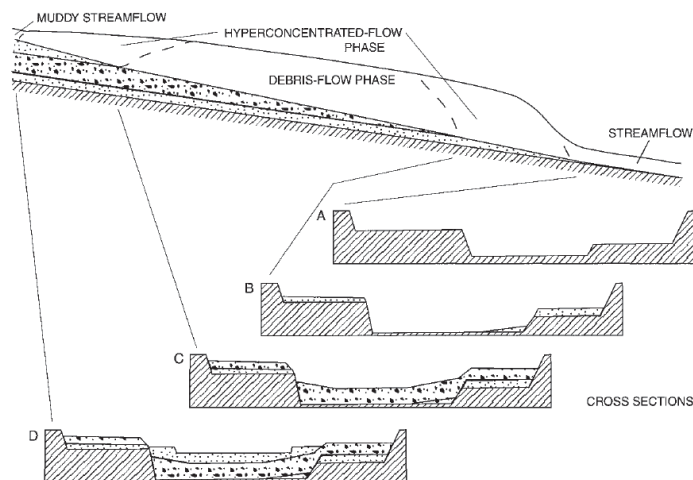


Figura 2.2: Modelo esquemático de un lahar desplazándose aguas abajo mostrando la transición de fases que puede producirse en secuencia (Tomada de Vallance, 2001).

Los lahares se componen de dos fases, una sólida y otra líquida, y se tornan más densos cuando tienen más partículas finas en suspensión y su viscosidad depende de la cantidad de espacios intersticiales que exista entre el agua y el material sólido.

Su movimiento está controlado especialmente por la gravedad, la topografía del cauce, su volumen y reología. Los lahares están normalmente confinados por los bordes de los valles y quebradas (Fig. 2.3b y 2.3c), pero cuando sobrepasan la capacidad de estos cauces, se desbordan e inundan las planicies adyacentes (Fig. 2.3a). Su densidad y viscosidad permite que fluyan con menor turbulencia que el agua, y que tengan gran capacidad de erosionar (debido a su gradiente hidráulico) e incluso transportar grandes clastos en suspensión (Fig. 2.3d) (Pierson et al., 1996; Vallance, 2001).



Figura 2.3: Imágenes mostrando **a)** desbordamiento de un lahar del volcán Merapi - Indonesia inundando una planicie (AvcanBlog website), **b)** lahar del Mount Ruapehu (Nueva Zelanda) confinado por el drenaje (MTU volcanoes page), **c)** lahar del volcán Tungurahua erosionando los depósitos laterales durante su transporte (OVT-IGEPN), y **d)** lahar acarreando grandes bloques en el río Vazcún en el volcán Tungurahua (Defensa Civil Baños 2005).

En la primera etapa de transporte el flujo puede tener gran capacidad de erosión, típicamente el frente del flujo y los picos siguientes son los más erosivos. Luego, la parte del flujo que continúa es menos erosiva y comúnmente deposita sedimentos en lugar de erosionar. El flujo menguante (etapa final) es típicamente más acuoso y erosivo, pero menos caudaloso que en la etapa anterior (*Costa, 1984; Pierson, 1985; Iverson, 1997; Vallance, 2001; Vallance, 2005*).

La principal forma en que los lahares erosionan es por la incorporación de sedimento al socavar pendientes fuertes, escarpes de terrazas laterales y por el arrastre de materiales de sus lechos. La erosión se produce con mayor intensidad en tramos empinados y sobre sedimentos clásticos no consolidados, aumentando su volumen (*Vallance, 2001*).

En general, fases hiperconcentradas ricas en agua son típicamente más erosivas ya que son más turbulentas y agitadas que las fases de debris flow ricas en sedimentos. Sin embargo puede producirse erosión local durante cualquier fase de flujo.

El flujo pierde energía debido a la fricción interna y fricción entre el fluido y el contorno. En cambio el grado de movimiento del flujo está relacionado con las fuerzas que ejerce el fluido sobre el contorno del cauce, en razón de la fricción y de la sinuosidad del cauce.

La fricción en el cauce retarda el desplazamiento de los lahares y causa perfiles verticales en que las velocidades son menores en la base y aumentan gradualmente hacia arriba. Partículas de baja densidad migrarán hacia arriba, hacia la superficie, donde las velocidades son mayores que el promedio y entonces migrarán hacia delante, hacia los márgenes de flujo (Fig. 2.4).

En un flujo con una mezcla de tamaños de grano operan fuerzas en diferentes direcciones y no necesariamente de acuerdo a un tamaño preferencial. En los lahares las partículas se pueden segregar por tamaño o densidad, pero el proceso de segregación más importante está dado por la fracción de sólidos, proporción de partículas gruesas y densidad del fluido, esta última determinada a su vez por la proporción de partículas finas en suspensión (*Vallance, 2005*).

Una mayor fracción de sólidos puede favorecer el proceso de percolación, el cual es un proceso que contrarresta la sedimentación preferencial de partículas grandes. Las partículas más finas bajo la influencia de fuerzas gravitacionales se mueven hacia abajo a través de los agujeros que se abren bajo ellas, cuando las partículas más grandes se rozan o chocan en una mezcla.

La gradación inversa se debe entonces al proceso de tamizado cinético, cuyo resultado es que las partículas pequeñas migran hacia abajo y de esta manera desplazan a las grandes, las cuales migran progresivamente hacia arriba. Luego, las partículas grandes migran hacia los márgenes frontales y superiores del flujo (Fig. 2.4), porque las velocidades son mayores cerca de la superficie. El proceso de tamizado cinético por tanto, no sólo puede causar la clasificación vertical inversa que es común en el movimiento de los flujos de escombros (*Pierson et al., 1996; Vallance, 2001*), sino que también puede causar la acumulación de partículas grandes en los perímetros de flujo.

La velocidad es mayor en superficie debido a la fricción basal que retarda el movimiento de los lahares, por lo tanto se producen perfiles verticales donde las velocidades incrementan gradualmente hacia arriba, y en superficie son mayores que el promedio.

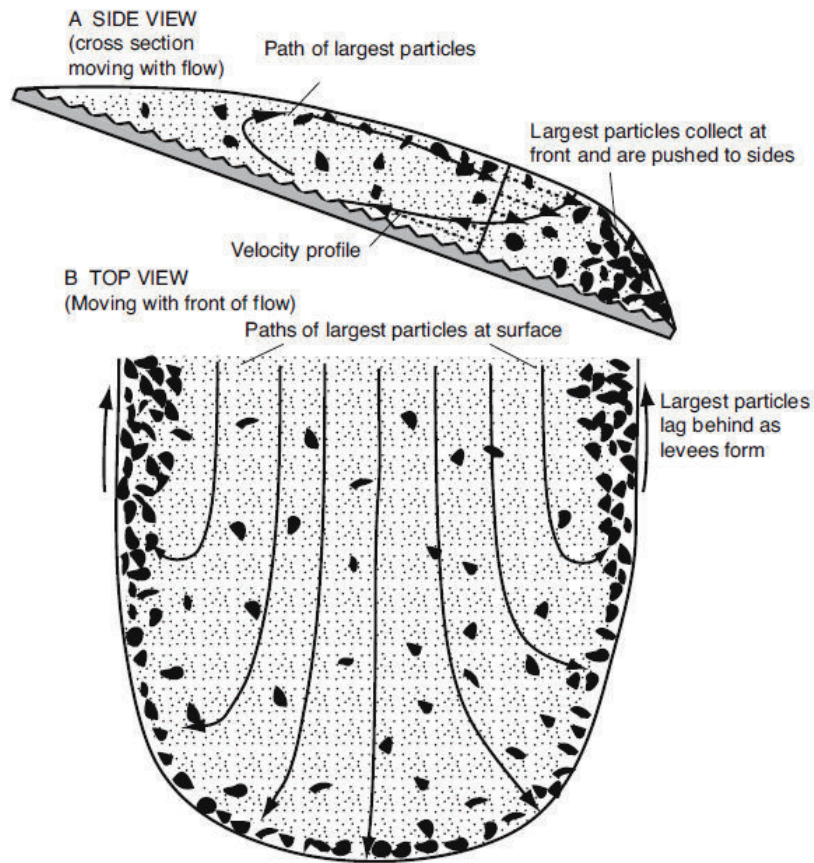


Figura 2.4: Diagrama esquemático mostrando cómo la segregación de partículas gruesas hacia la superficie de un debris flow resulta en la acumulación preferencial de las partículas gruesas hacia el frente (a) y márgenes (b) del flujo. Note que el marco de referencia se muestra en movimiento a la velocidad media del flujo. Tomado de Vallance, 2005.

Con el tiempo y la distancia aguas abajo, una dilución progresa desde el frente del lahar hacia su parte media y esto causa una pérdida progresiva de su capacidad de carga, cambiando su naturaleza y comportamiento, con una descarga menor que los estados que le preceden. Finalmente se depositan en zonas donde pierden energía, cuando alcanzan una pendiente relativamente baja o en áreas de disminución de confinamiento como en abanicos aluviales en la desembocadura de pequeñas cuencas y cañones. Al llegar a un abanico, la propagación lateral del flujo provoca una disminución del espesor que necesitan para fluir. En términos físicos esto sucede cuando el esfuerzo cortante interno (asociado a su espesor) es excedido por la resistencia a la deformación del flujo.

Sus depósitos pueden ser normal o inversamente gradados, dependiendo de la naturaleza dominante del flujo. Es común también que estos flujos entren en un río mucho más grande donde se diluyen totalmente y se pierden sin dejar un depósito representativo, pero incluso si esto sucede, generalmente es posible observar las huellas de inundación en las paredes del cauce en algunas zonas a lo largo del recorrido del flujo.

2.5. MONITOREO INSTRUMENTAL DE LAHARES

2.5.1. DETECTORES DE LAHARES DE TIPO ACOUSTIC FLOW MONITOR AFM

En los años 80 científicos en China y Japón instalaron acelerómetros de amplio espectro para investigar la naturaleza de la vibración del suelo producida por los flujos de escombros en los volcanes Yakedake, Sakurajima y Dongchuan. Independientemente de las distintas características de los sitios, los resultados de estos estudios revelaron que las vibraciones generadas por estos flujos muestran un amplio espectro, con las más intensas ocurriendo predominantemente en el rango de 20-50 Hz, alcanzando incluso 80 Hz (*Suwa y Okuda, 1985; LaHusen, 1996*).

Se ajustó la sensibilidad de los instrumentos a estas particularidades con el fin de discriminar las señales producidas por estos flujos. Esto permitió que pudieran ser más sensibles a fuentes de vibración cercanas al canal donde fueran instalados y no a las señales de baja frecuencia provenientes de otras fuentes más distantes. Esta diferencia en frecuencia permite distinguir las señales producidas entre lahares y otros fenómenos naturales que también producen vibración del suelo (Fig. 2.5) como sismos, tremor volcánico o erupciones explosivas que son generalmente <6 Hz.

Es así que científicos del USGS (United States Geological Survey) desarrollaron un sistema diseñado para detectar específicamente las anomalías sísmicas generadas por los lahares en movimiento, conocidos como Acoustic Flow Monitor AFM (*Hadley y LaHusen, 1995; LaHusen, 1996*).

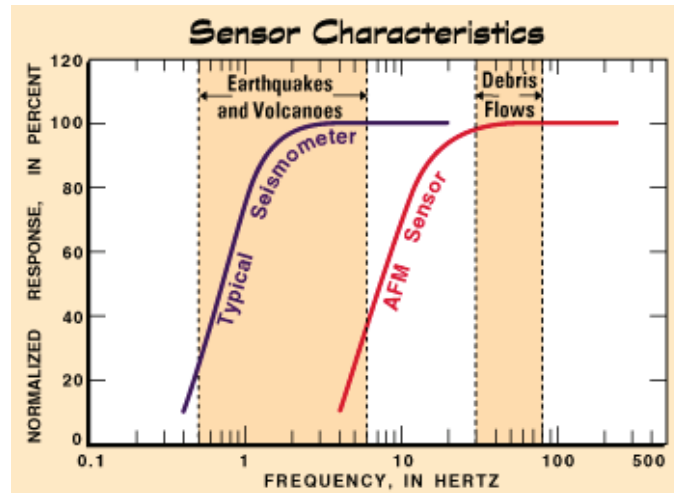


Figura 2.5: Respuesta a la vibración del suelo de un sismómetro estándar y de un acoustic flow monitor (USGS, 2008).

Un Acoustic Flow Monitor (AFM) es un sismómetro sensible a la vibración del suelo en frecuencias más altas que un sismómetro convencional usado para detectar sismos o actividad volcánica. Un AFM detecta un rango de frecuencias entre 10-300 Hz (Marcial et al., 1996; Lavigne et al., 2000), mientras que un sismómetro estándar, generalmente tiene un rango de frecuencia menor a 10 Hz.

Cada estación AFM consta de (Fig. 2.6):

- Un sismómetro (sensor en la ilustración), que detecta las vibraciones del suelo producidas por un lahar acercándose y pasando.
- Un microprocesador electrónico, que analiza la señal.
- Una radio en la estación, que envía y recibe información de una estación base
- El panel solar que alimenta el sistema.
- Una batería de 12 V, cargada por el panel solar.

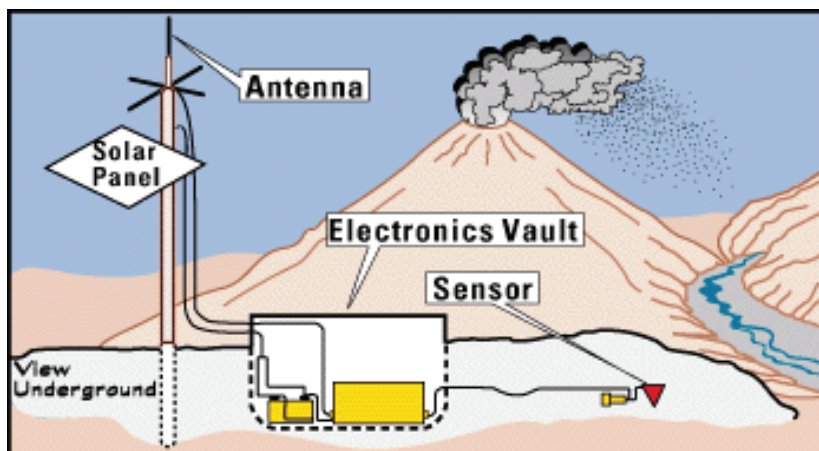


Figura 2.6: Esquema simplificado de los componentes de una estación AFM (LaHusen, 2005).

El sistema utiliza sensores sísmicos de tipo L10-AR, de bajo costo (Lavigne et al., 2000; Cole et al., 2009), con un rango dinámico de $\sim 3.8 \cdot 10^{-3}$ cm/s de velocidad vertical del suelo (Marcial et al., 1996), la cual se convierte a una señal de voltaje de corriente alterna. Un amplificador en el extremo del cable del sensor amplifica la señal, que luego se filtra en tres componentes. La unidad de microprocesamiento (MPU) convierte la señal analógica en digital. Los datos se transmiten a una estación receptora por telemetría de radio utilizando una antena de microondas (Hadley & LaHusen, 1995).

La amplitud de la señal sísmica producida por la vibración del suelo es procesada continuamente en tres bandas de frecuencia: Banda completa (Full Band, 10-300 Hz), Banda baja (Low Band, 10-100 Hz) y Banda alta (High Band, 100-300 Hz); y esta información se envía a la estación base a intervalos regulares de tiempo.

La MPU compara continuamente la amplitud de la señal para la banda de baja frecuencia (Low Band) con un valor "umbral" predeterminado, almacenado en la memoria. Si el nivel de la señal excede dicho umbral, el MPU comienza el seguimiento del tiempo transcurrido en que el nivel de entrada se mantiene por encima del umbral. Este tiempo transcurrido se compara también con un valor 'duración crítica' almacenado igualmente en la memoria, y si este último valor es superado, el MPU desencadena un modo de alerta que resulta en un conjunto de datos de transmisión inmediata que está marcado para indicar una "alerta". El

AFM permanecerá en modo de alerta y continuará enviando datos en intervalos de 1 minuto, mientras que la señal permanezca por encima del umbral, pero se reanudará el funcionamiento “**normal**” cuando la señal caiga por debajo del umbral (*Marcial et al., 1996; Lavigne et al., 2000*) y enviará nuevamente datos a los intervalos de tiempo usuales (5, 10, 15, 20 min).

El umbral, la duración, y el intervalo de tiempo para adquisición de datos son parámetros ajustables que se pueden variar dependiendo del lugar donde se sitúen los instrumentos.

Por lo expuesto anteriormente, el sistema de detección AFM ofrece diferentes ventajas sobre otros sistemas (*Smith et al., 2009*):

- Su sensor y microprocesador han sido ajustados para analizar específicamente las vibraciones características producidas por los lahares, y descartan otras señales o ruidos que podrían afectar a los sismógrafos normales.
- Los flujos son monitoreados mientras se acercan, durante su paso, y a medida que se alejan de los sitios específicos monitoreados.
- El equipo está listo para detectar flujos posteriores inmediatamente, sin necesidad de mantenimiento adicional.

2.5.2. IMPORTANCIA DEL MONITOREO INSTRUMENTAL DE LAHARES

Esencialmente, el monitoreo instrumental es una opción para disminuir el riesgo. Ayuda a evitar o reducir fatalidades (*Pierson et al., 2014*), ya que el tiempo es un desafío cuando se producen eventos que podrían comprometer la seguridad de las personas e infraestructura que pueden encontrarse a su paso, debido a que no es sencillo prever su ocurrencia.

El monitoreo y procesamiento de los datos obtenidos generados por los AFM tiene dos utilidades principales: 1) Emisión de alertas tempranas en caso de lahar 2) Cuantificación de parámetros del flujo de lahares (*Andrade et al., 2006*).

2.5.2.1. Emisión de Alertas Tempranas

El principal objetivo en caso de ocurrencia de lahares es la emisión de alertas tempranas. El proceso de emisión de una alerta temprana tiene generalmente tres componentes básicos (*Pierson et al, 2014*): a) Sensores que detectan un lahar aproximándose b) adquisición y transmisión de datos para su evaluación inmediata y c) sistemas de notificación de alerta en caso de que efectivamente se produzca el descenso de un lahar.

En el caso de los AFM las alertas pueden ocurrir automáticamente cuando un umbral en el nivel de detección sea superado. Por otra parte se puede también involucrar personal para que sea posible corroborar la validez de la señal de detección previamente a la emisión de una alerta, por lo que en muchos casos es fundamental la coordinación entre múltiples organismos para obtener resultados exitosos de estos sistemas.

2.5.2.2. Cuantificación de parámetros del flujo

Desde la primera vez que fueron utilizados, durante la crisis del volcán Pinatubo en 1990 (*Marcial et al., 1996*), fue claro que los datos generados por los AFM tenían mayor potencial que el de simplemente detectar la ocurrencia o no de un lahar. Sus registros pueden servir para cuantificar ciertos parámetros del flujo. Más precisamente, los registros de los AFM representan pseudo-hidrogramas del lahar que, con una buena calibración, pueden ser transformados en verdaderos hidrogramas, ya que se ha comprobado que la amplitud sísmica medida por el AFM es directamente proporcional al caudal instantáneo del lahar (*Tuñgol y Regalado, 1996; Andrade et al., 2005*).

CAPÍTULO 3

3. MONITOREO DE LAHARES EN EL VOLCÁN TUNGURAHUA

3.1.LAHARES GENERADOS EN EL VOLCÁN TUNGURAHUA DESDE SU REACTIVACIÓN EN 1999

Todos los lahares formados en el Tungurahua a partir de Octubre de 1999 son secundarios, su formación es inducida por las lluvias originadas después de las erupciones explosivas que producen volúmenes considerables de piroclastos. Durante los últimos 15 años el volcán ha generado un suministro casi continuo de escombros frescos que han sido removilizados regularmente por las precipitaciones (*Mothes y Vallance, 2015*).

Desde 1999 hasta 2014 el Tungurahua ha experimentado períodos de baja actividad eruptiva intermitente, caracterizada principalmente por episodios estrombolianos, pero intercalados en ocasiones con varios episodios vulcanianos de intensidad significativa. Explosiones, eyección de bloques incandescentes, y caídas de ceniza frecuentes han caracterizado la actividad estromboliana, mientras que el descenso de flujos piroclásticos se ha producido durante la actividad vulcaniana. Toda esta actividad ha aportado el material necesario para la generación de lahares secundarios posteriormente.

Además de las altas precipitaciones anuales y de la frecuente actividad eruptiva, los lahares son un fenómeno frecuente en el Tungurahua debido a las acentuadas pendientes de los flancos del edificio, las cuales son de 28° en promedio (*Hall et al., 2013*).

La distribución de lluvias en la zona es heterogénea, a nivel territorial y durante el año. En general los meses de mayor precipitación van de febrero a julio, destacándose los meses de mayo y junio. La precipitación de verano en la zona

se caracteriza por fuertes lluvias intermitentes, mientras que la precipitación invernal está caracterizada por lloviznas sostenidas que dan una mayor precipitación total (Le Pennec et al., 2012). Es así que se tiene una alta tasa debido a las precipitaciones regionales y a tormentas localizadas que se producen ocasionalmente pero que generan los lahares más grandes, principalmente cuando ocurren sobre las zonas altas de los flancos del volcán.

La generación de estos lahares en el Tungurahua depende entonces de la mezcla correcta de sedimento (fácilmente disponible) y de si las lluvias precedentes producen una descarga de agua apropiada de acuerdo a su duración e intensidad.

Entre 2000 y 2011 un mínimo de 886 lahares generados por lluvias se habían registrado en el Tungurahua (McFarlin et al., 2011; Mothes and Vallance, 2014), hasta 2014 el número asciende a un total de 1222 eventos. Este registro (Fig. 3.1) considera solamente los lahares que han sido detectados por el sistema de AFM que emplea el IGEPN para su monitoreo, así como mediante observaciones directas realizadas por parte del personal del OVT-IGEPN y reportes de los vigías ubicados en algunos sectores alrededor del volcán; debido a que no todos los drenajes del volcán cuentan con dicha instrumentación, la mayoría de las quebradas del flanco occidental no disponen de AFMs.

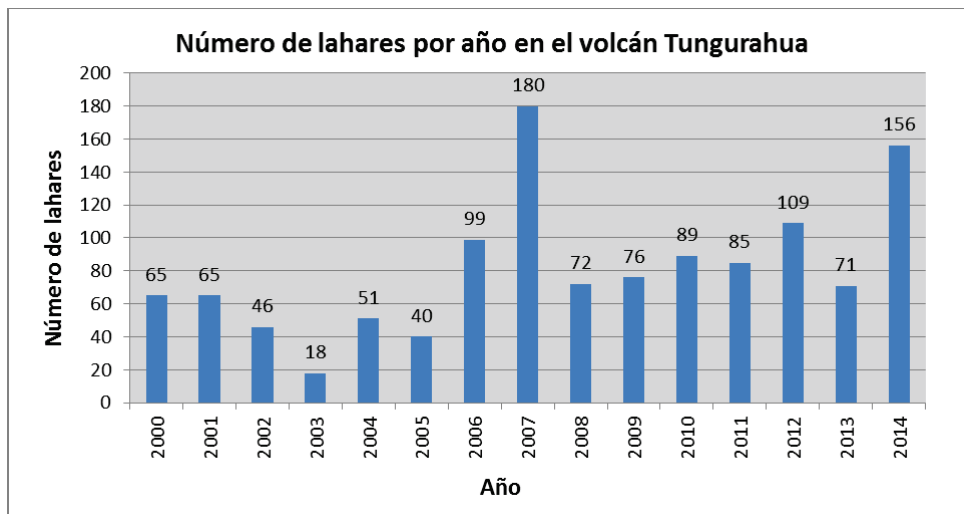


Figura 3.1: Número de lahares ocurridos en el volcán Tungurahua por año en el periodo comprendido entre 2000-2014 (Actualizado de Mothes and Vallance, 2015).

El promedio global de lahares ocurridos por año hasta 2014 es de 81 eventos, alcanzando los máximos en 2007 y 2014 con 180 y 156 eventos respectivamente (en los meses siguientes a las dos mayores erupciones del Tungurahua), mientras el mínimo número de estos flujos se produjo en 2003 con apenas 18 eventos registrados (Fig. 3.1).

En general los meses en que se registran el mayor número de eventos se correlacionan con los meses en que ocurre mayor cantidad de precipitaciones (Fig. 3.2), los picos de generación de lahares se producen entre marzo y junio, y un segundo pico más pequeño se produce aparentemente entre octubre y noviembre.

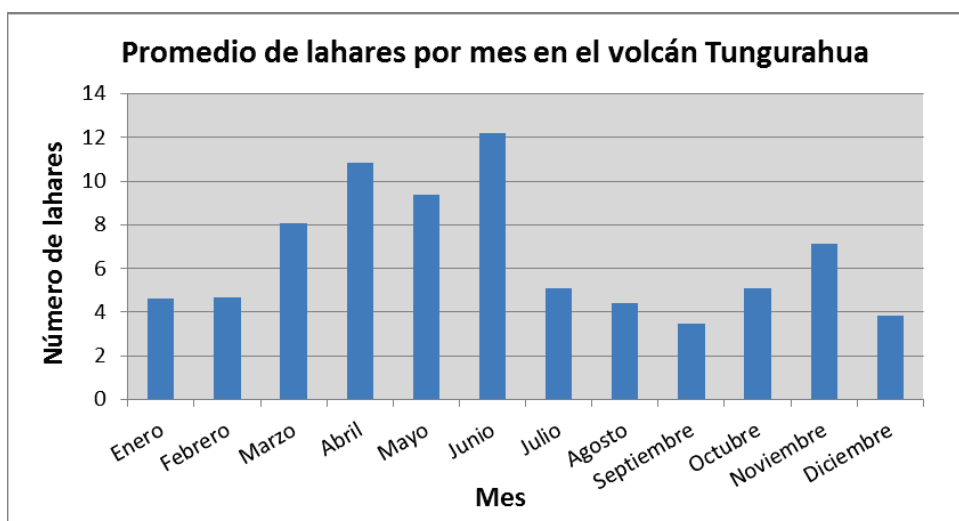


Figura 3.2: Diagrama mostrando el promedio de lahares por mes ocurridos en el volcán Tungurahua entre 2000-2014.

Los caudales de estos flujos se encuentran comúnmente en el rango de las decenas a centenas de m³/s, sus volúmenes son generalmente inferiores a 100000 m³, sus distancias de recorrido son de menos de 10 kilómetros y sus velocidades de unos pocos m/s (OVT-IGEPN, 2000-2015).

Dos de los mayores eventos registrados en el Tungurahua se produjeron en el río Vazcún, uno de ellos se generó el 12 de febrero de 2005 (Fig. 3.3) alrededor de las 13h00(TL) con una duración de aproximadamente 1h15. Mediciones de campo

realizadas posteriormente mostraron que su caudal pico fue alrededor de 100 m³/s y que las velocidades de flujo fueron 3-7 m/s (*Williams et al., 2008*), con un volumen total estimado del orden de 50000-70000 m³ (*OVT- IGEPN, 2005; Andrade et al., 2006; Mothes and Vallance, 2015*).



Figura 3.3: Imágenes de la zona del balneario “El Salado” ubicado en el margen del río Vazcún, el 12 de febrero de 2005 **a)** minutos antes de la llegada del lahar al sitio (13h30), **b)** tránsito del lahar minutos después de la alerta y una rápida evacuación (13h42). Fotografía: Defensa Civil de Baños.

El otro evento de magnitud importante se desató el 23 de agosto de 2008 debido a intensas lluvias, asociado a un deslizamiento que previamente represó el río durante 10 días aproximadamente. La velocidad del flujo fue de 4,7-6,7 m/s, transportando bloques de hasta 3m de diámetro y su caudal pico se estimó en 650 m³/s (más de 6 veces el evento de 2005); causando graves daños al balneario de El Salado (ubicado en el lado oriental del Vazcún) y al antiguo puente de ingreso a Baños, destrucción de dos viviendas en las riberas del río (Fig. 3.4) y ocasionando dos víctimas fatales (*OVT – IGEPN, 2008*).



Figura 3.4: Daños ocasionados al balneario “El Salado” y a viviendas ubicadas en las riberas del río Vazcún por el lahar ocurrido el 23 de agosto de 2008. Fotografía Jorge Bustillos (OVT-IGEPN).

Debido a la dirección del viento, la morfología del cono y la ubicación del cráter, la mayor parte del material piroclástico se acumula en el lado noroeste del volcán durante las fases eruptivas. Adicionalmente, la pendiente en esta zona del cono es muy empinada y puede drenar rápidamente, por lo que los lahares ocurren repetidamente sobre todo en los canales de esta parte del volcán.

En general los drenajes donde más frecuentemente han ocurrido lahares son: La Pampa, Achupashal, Bilbao y Vazcún en la parte norte-noroccidental y Mapayacu al suroccidente; mientras la afectación en los demás drenajes se ha dado en menor medida (Fig. 3.5). Los lahares más voluminosos en su mayoría han fluido por las quebradas de La Pampa y Achupashal y el río Vazcún (bordeando el sector occidental de Baños).

Casi en su totalidad los lahares han sido encausados dentro de las quebradas hasta llegar al río Pastaza (*Mothes and Vallance, 2015*) ocasionando daños durante su trayecto principalmente en las zonas atravesadas por las carreteras, en especial la vía Baños – Penipe que con frecuencia ha resultado afectada.

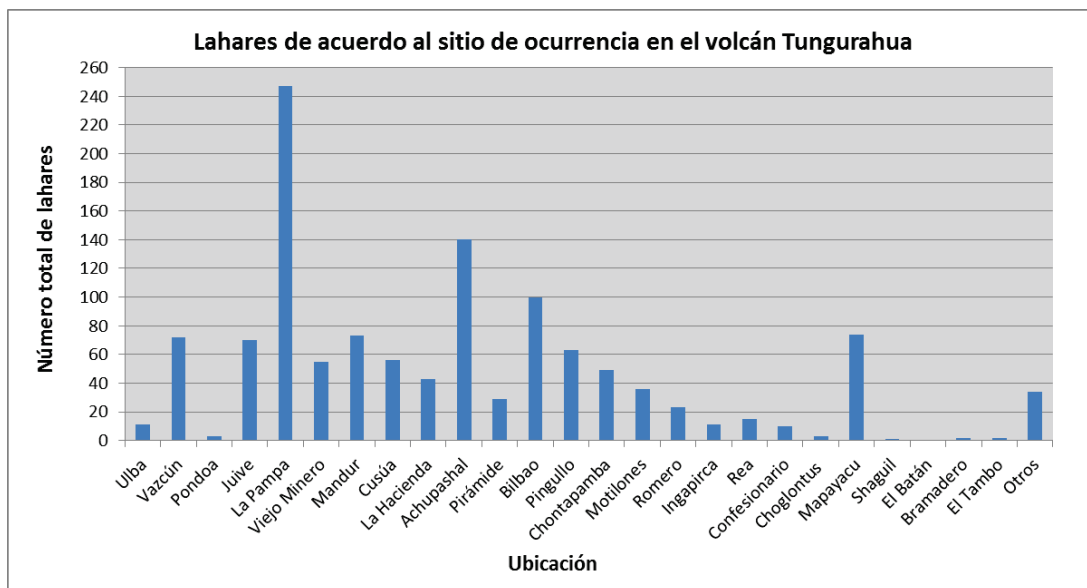


Figura 3.5: Diagrama mostrando el número de lahares ocurridos en los diferentes drenajes del volcán Tungurahua. (Modificado de McFarlin et al., 2011)

La información estadística sobre la amenaza de lahares en el Tungurahua se recopilaba y clasificaba previamente solo a partir de los informes semanales que se elaboran en el Observatorio del Volcán Tungurahua desde 2000, en los que se reúne toda la información de los acontecimientos relacionados al volcán. En el caso de los lahares se señala el número de eventos, ubicación, hora, en algunos casos duración, características granulométricas y sus consecuencias; todo esto definido en base a observaciones y apreciaciones visuales.

En vista de que la magnitud de los eventos en muy pocos casos podía ser cuantificada, anteriormente se los clasificó de acuerdo de acuerdo al tamaño de clastos que los flujos hayan sido capaces de transportar (McFarlin et al., 2011; Mothes and Vallance, 2015), de la siguiente manera (Fig. 3.6):

- Lahares de tamaño pequeño: eventos que hayan cargado clastos de menor o igual tamaño a 20 cm de diámetro, y no hayan producido afectación social de ningún tipo. En este grupo se incluían también los acontecimientos de los cuales no había especificación alguna sobre sus características o magnitud.

- Lahares de tamaño medio: eventos que hubiesen llevado rocas de diámetro entre 20-50 cm, o eventos descritos como “moderados” que resultaran en el cierre de una vía.
- Lahares de tamaño grande: eventos transportando bloques con diámetros entre 50 cm hasta 1 m, o descritos como “grandes”.
- Lahares de tamaño muy grande: cualquier evento que haya transportado bloques de tamaño mayor a 1 m y cuyas consecuencias hayan tenido afectaciones sociales severas como vehículos atrapados o daños a viviendas.

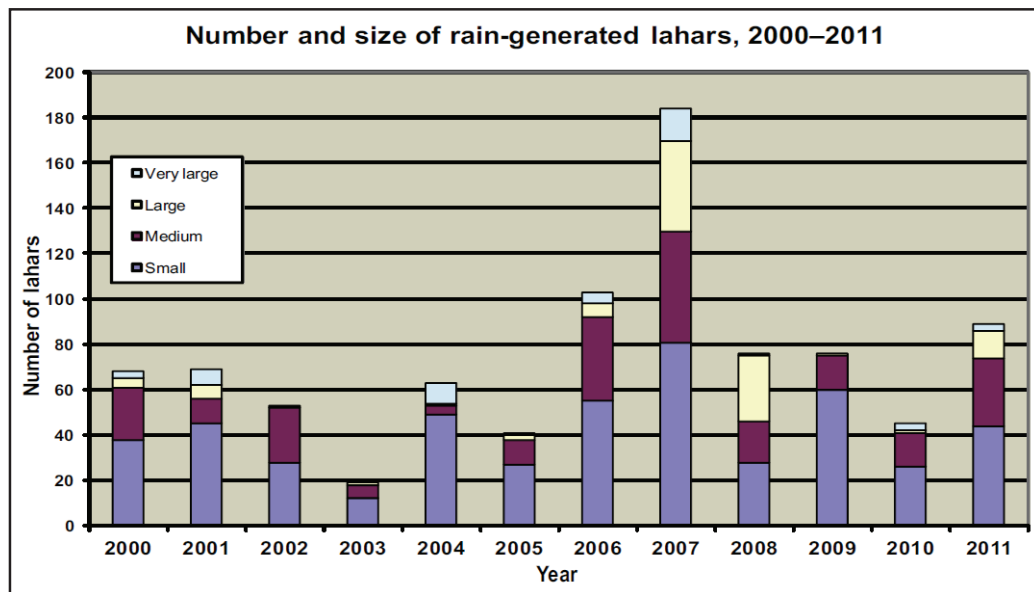


Figura 3.6: Distribución en número y tamaño relativo de los 886 lahares generados por lluvias registrados durante 2000-2011. El aumento de eventos en el 2007 se debe a la removilización de los aproximadamente 50 Mm³ de material volcanoclástico que fue depositado en los flancos del Tungurahua durante las erupciones de julio y agosto del 2006. (Tomado de Mothes and Vallance, 2015)

3.2. LA RED DE AFM DEL VOLCÁN TUNGURAHUA

Debido a la potencial peligrosidad de los lahares del Tungurahua, desde el inicio del periodo eruptivo se ha considerado importante la existencia de un sistema de detección, el cual se ha basado en instrumentos sísmicos de tipo AFM. Estos proporcionan una señal de alerta inicial, y la interpretación de estas señales por parte de los científicos en el OVT y la rápida comunicación a través de un sistema

de radio han hecho posible la emisión de advertencias confiables sobre el descenso de un lahar por los drenajes monitoreados.

Inicialmente la red de detectores de lahares del volcán Tungurahua estuvo conformada por dos estaciones AFM que fueron instaladas en marzo de 2000 y fueron llamados “AFM-Juive” y “AFM-Vazcún” que operaron con éxito durante varios años. El AFM-Juive vigilaba los lahares ocurridos en la quebrada Palmaurcu y que solían interrumpir la carretera Ambato-Baños en la zona de “La Pampa”, mientras que el AFM-Vazcún vigilaba los lahares en el río Vazcún y que serían peligrosos para el balneario de “El Salado” y para una parte de la ciudad de Baños (*Andrade et al., 2004; Andrade et al., 2006*).

En diciembre de 2000 el AFM de Vazcún fue robado quedando temporalmente sin sistema de detección, y fue remplazado poco después. Posteriormente, en agosto de 2006, el “AFM-Juive” fue destruido durante las grandes erupciones explosivas del Tungurahua.

Nuevos instrumentos fueron incorporándose progresivamente a la red de monitoreo, y en la actualidad está integrada por 11 estaciones AFM situadas en algunas de las quebradas más importantes del volcán, principalmente en los flancos norte y noroccidental, y que son más propensas a la ocurrencia de lahares. Las quebradas monitoreadas constantemente por este sistema son: Palmaurcu, Achupashal, Bilbao, Mapayacu y adicionalmente los ríos Vazcún y Ulba (Fig. 3.7).

Identificación	Nombre
ST01	JUI-01
ST02	PON-01
ST03	PMA-01
ST04	VAZ-01
ST05	MAP-01
ST06	BIL-01
ST07	JUI-02
ST08	VAZ-02
ST09	JUI-03
ST12	ACH-01
ST14	ULB-02

Tabla 1: Identificación de las estaciones AFM que se encuentran en operación actualmente en el volcán Tungurahua.

Actualmente la red de AFM del volcán Tungurahua está integrada por las siguientes estaciones (Fig. 3.7):

La estación “BIL-01” fue instalada en la quebrada de Bilbao en el sector del mismo nombre en septiembre de 2006. Las estaciones “PMA-01” y “PON-01” se encuentran en Palmar Alto y Pondoá, y se instalaron en octubre y noviembre de 2006 respectivamente.

La antigua estación “AFM-Juive”, que fue destruida en agosto de 2006, se trasladó a un nuevo sitio ubicado también en la quebrada Palmaurcu (sector de Juive Grande) en junio de 2007 y se le denominó “JUI-01”.

En septiembre de 2009 para monitorear la ocurrencia de lahares en el río Ulba en el flanco nororiental del volcán se instaló la estación “ULB-02” y en el flanco suroccidental en la quebrada Mapayacu la estación denominada “MAP-01”.

En el río Vazcún al norte del volcán en septiembre de 2011 se instaló una segunda estación en el afluente oriental del río llamada “VAZ-02”, para complementar a la estación existente previamente “VAZ-01” ubicada en el afluente occidental.

En mayo de 2012 se integró a la red la estación “ACH-01” en la quebrada Achupashal en la cual también se registra un alto porcentaje de ocurrencia de lahares, y que afectan directamente a la vía Baños - Penipe.

Finalmente las últimas estaciones que se incorporaron a esta red de monitoreo de lahares fueron “JUI-02”, “JUI-03” y “JUI-04” entre agosto y septiembre de 2012, para incrementar el control en la zona de Juive Grande en la quebrada Palmaurcu, sin embargo, la estación “JUI-04” fue destruida por un flujo piroclástico durante la erupción del 1 de febrero de 2014 y no pudo ser remplazada, las otras estaciones de esta quebrada resultaron parcialmente afectadas pero fueron reparadas y volvieron a operar.

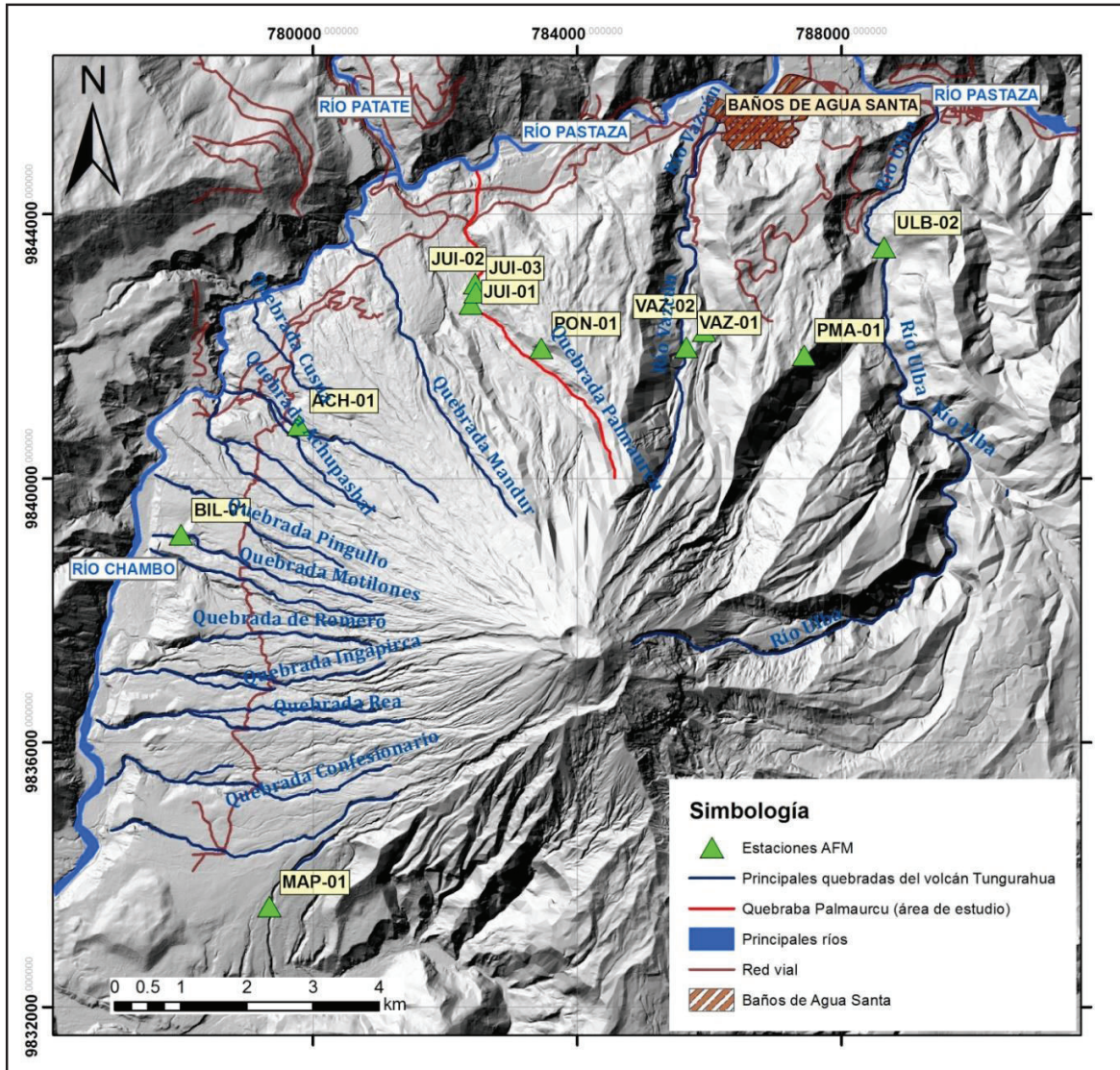


Figura 3.7: Mapa de ubicación de las estaciones que conforman la actual red de AFMs del volcán Tungurahua.

3.3. DATOS GENERADOS POR LOS ACOUSTIC FLOW MONITOR AFM

Los datos de AFM se pueden visualizar en forma de gráfico o en modo de datos en bruto en la pantalla de ordenador (Figs. 3.8 y 3.9). El equipo muestra la fecha y hora de transmisión de datos, identidad del canal, y datos de vibración del suelo. El sistema AFM ofrece una grabación completa y continua a medida que un lahar pasa cerca del sitio donde está ubicado el instrumento.

Los datos generados por los AFM se reciben en el Observatorio del Volcán Tungurahua en tiempo real y son mostrados en pantalla por medio de los softwares “*Descartes Omniserver Developer*” y “*OPC Systems*”. *Descartes* se encarga de recibir y almacenar los datos, mientras que *OPC* se encarga de graficarlos en tiempo real (Figs. 3.8 y 3.9). Para una buena adquisición de los datos, ambos programas se ejecutan simultáneamente en la computadora que se encuentra en el OVT.

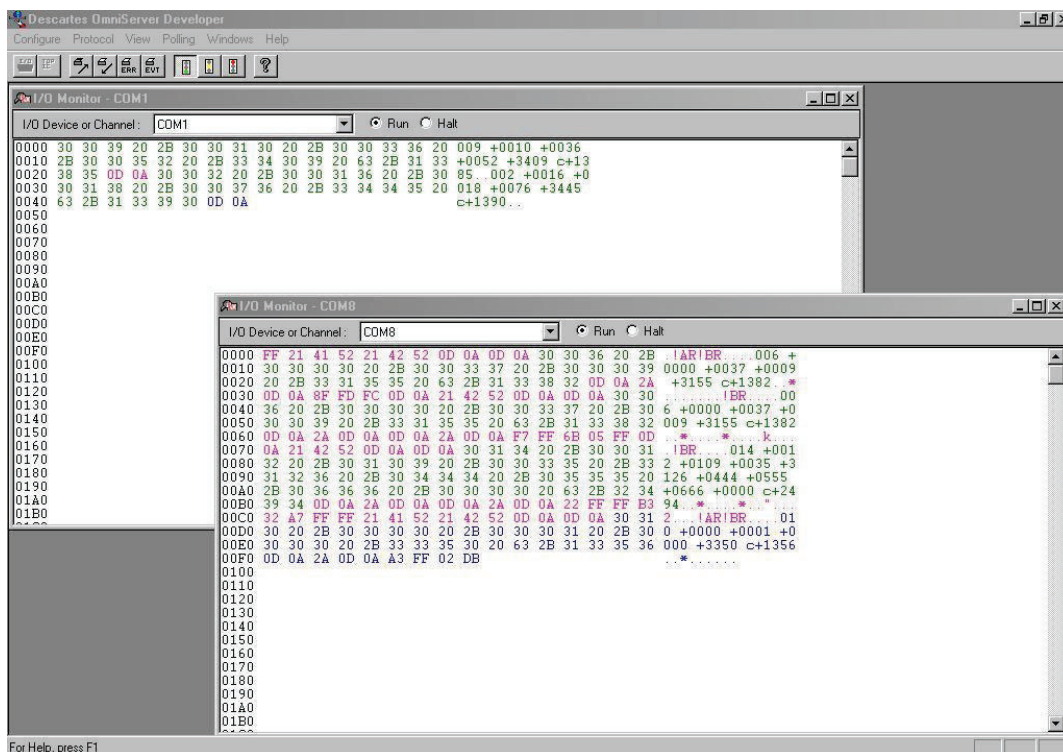


Figura 3.8: Interfaz del software *Descartes Omniserver Developer* que se ejecuta para recibir y almacenar los datos en bruto de la red de AFMs del volcán Tungurahua en tiempo real.

El programa *Descartes* genera cinco archivos diarios para cada estación AFM, donde cada archivo corresponde a uno de los diferentes parámetros medidos por la estación: 1) Banda completa (Full Band), 2) Banda baja (Low Band), 3) Banda alta (High Band); 4) voltaje de la batería y 5) estado de funcionamiento de la estación (0= “estado normal”; 1= “estado de alerta”).

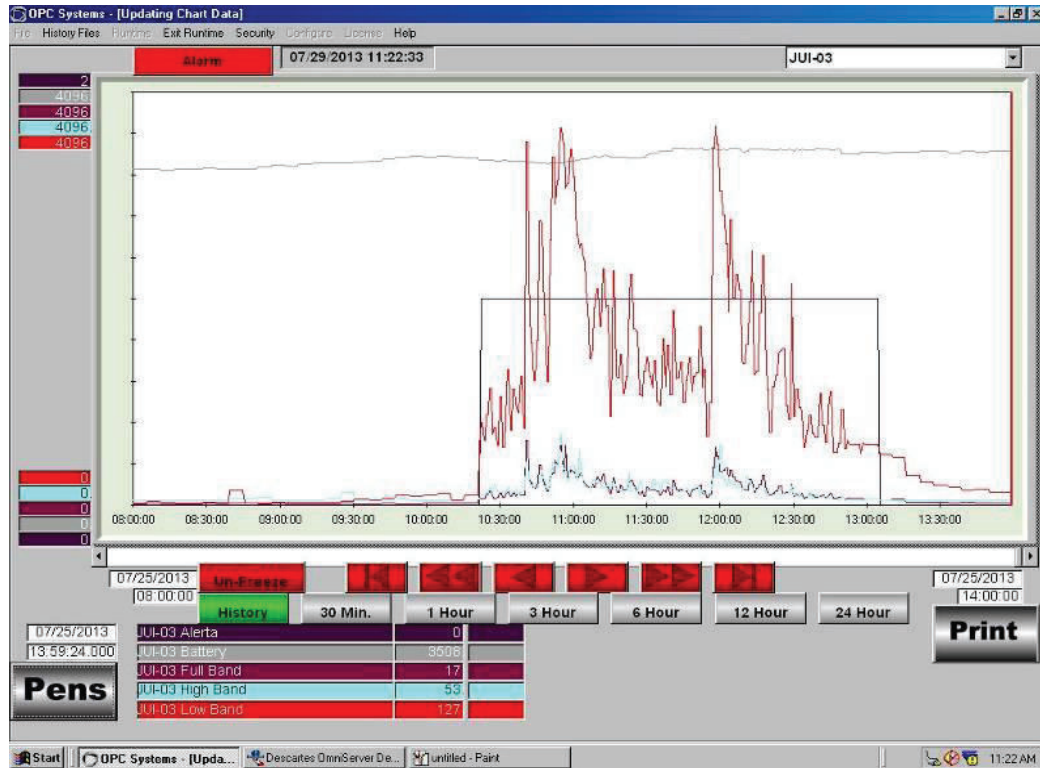


Figura 3.9: Interfaz del software OPC Systems que permite visualizar gráficamente los datos registrados por los AFM.

Los archivos que contienen la información en bruto de los AFM, son generados automáticamente por el programa *Descartes* al principio de cada día (en tiempo local) y son refrescados también automáticamente cada cierto tiempo a medida que los datos van llegando desde las estaciones. Para diferenciarlos, en el nombre de cada archivo se incluye el nombre de la estación, la correspondencia de los datos y la fecha.

Finalmente, cada día se genera un archivo complementario, que es guardado junto con el resto de archivos diarios, y que corresponde a un listado de las horas durante el día en que el umbral de alerta de una estación cualquiera fue rebasado. Este archivo está en formato de texto (".txt") y lleva su nombre según la fecha a la que corresponda, por ejemplo el archivo del 25 de enero de 2013 se llama "*Alarm20130125*".

Cada archivo de formato “.csv” (“comma separated values”) tiene un tamaño de entre 20 y 40 Kb para un día normal de registros de un AFM de la red del Tungurahua.

3.4. EMISIÓN DE ALERTAS TEMPRANAS EN EL VOLCÁN TUNGURAHUA

El principal objetivo del monitoreo de lahares llevado a cabo por el IGEPN en el volcán Tungurahua mediante su red de AFM es la integración de esta base instrumental a un Sistema de Alerta Temprana (SAT). Para cumplir con este propósito la interpretación de los datos generados por los AFM se realiza de forma instantánea y en general el personal que trabaja en el OVT tiene conocimiento sobre la interpretación de datos anómalos generados durante la ocurrencia de lahares y el funcionamiento de este sistema. En el caso del Tungurahua este proceso se puede sintetizar de la siguiente manera (Fig. 3.10):

1) Un estado de “pre-alerta”, dado por la ocurrencia de lluvias en la zona del volcán. Habitualmente esto se puede confirmar en forma visual directamente desde el OVT o mediante reportes de parte de los vigías del volcán y adicionalmente por los registros observados en tiempo real de un pluviómetro ubicado en la zona de Pondoá.

Bajo estas circunstancias se procede a prestar atención permanente a los registros en tiempo real de las estaciones AFM. La tendencia de los datos también puede ser un indicador del aumento de la probabilidad de ocurrencia de un lahar.

2) El estado de “alerta” está determinado por la ocurrencia de valores anómalos observados en los registros de los AFM. Estos datos deben ser analizados por el personal de turno presente en el OVT y si se determina una verdadera alerta se procede a comunicar inmediatamente con la Secretaría de Gestión de Riesgos (SGR) a través del sistema de radio. La ejecución de esta acción debe tomar normalmente menos de un minuto.

3) Una vez emitida la información a la SGR, su personal a cargo realiza un segundo ejercicio de comunicación, en el cuál dispone la ejecución del plan de

emergencia respectivo. Este paso generalmente debe realizarse también en menos de un minuto por parte de la SGR.

4) Personal de la SGR acude a las zonas de amenaza para ejecutar el plan de emergencia (evacuar las zonas de peligro y/o ayudar con los potenciales problemas de tránsito). El tiempo de ejecución del plan de emergencia por parte de la SGR es relativamente variable en función de varios factores, pero tarda en promedio 15 minutos.

EMISIÓN DE ALERTAS TEMPRANAS EN CASO DE OCURRENCIA DE LAHARES EN EL VOLCÁN TUNGURAHUA



Figura 3.10: Esquema básico del funcionamiento del Sistema de Alerta Temprana ejecutado en el volcán Tungurahua para ocurrencia de lahares (Modificado de Andrade et al., 2006).

El funcionamiento de este sistema de alerta temprana por lahares ha sido de gran importancia principalmente debido a que la carretera Baños – Penipe atraviesa por varios de los drenajes en el noroccidente-occidente del volcán, y

adicionalmente por las actividades que se realizan en las cercanías de los mismos.

Los tiempos promedio de tránsito de los lahares en La Pampa entre los AFM y la intersección de la carretera principal con el drenaje se estiman en 14 ± 2 minutos, mientras que en el Vascún este valor se estima en 19 ± 2 minutos (*Andrade et al, 2004; Jones et al., 2015*), lo que representa los tiempos en que debería ejecutarse los respectivos planes de emergencia ante la ocurrencia de estos fenómenos.

Debido a que los caudales máximos y volúmenes de los lahares que se producen en el volcán Tungurahua no son de gran magnitud las zonas que pueden ser afectadas tienen superficies menores a 1km^2 y la población a ser evacuada suele ser del orden de decenas.

CAPÍTULO 4

4. METODOLOGÍA DE OBTENCIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS

4.1. CREACIÓN DE BASE DE DATOS

Se recopiló toda la información disponible sobre los lahares ocurridos en la quebrada Palmaurcu (La Pampa) del volcán Tungurahua, contenida en los informes semanales del OVT comprendidos en el periodo de marzo de 2012 a marzo de 2015 y adicionalmente de los archivos diarios que incluyen los datos en bruto registrados por las tres estaciones AFM ubicadas en la zona de Juive en la quebrada Palmaurcu.

4.1.1. INFORMES SEMANALES DEL OBSERVATORIO DEL VOLCÁN TUNGURAHUA

Una de las fuentes de información que contienen datos y descripciones detalladas diarias de todos los eventos ocurridos en relación a la actividad del volcán Tungurahua son los boletines semanales emitidos el día martes de cada semana por parte del personal del OVT, los mismos que incluyen la ocurrencia de lahares.

Fue necesario compilar la información comprendida en 162 informes que cubren el periodo de tiempo de este estudio, de los cuales fue posible extraer información general como su fecha y hora de ocurrencia, algunas características de los flujos (en base a observaciones visuales por parte del personal del OVT y reportes por parte de los vigías del volcán), fecha y hora en que se produjo la emisión de alarmas automáticas por parte del sistema de adquisición de datos. Además estos informes permitieron descartar anomalías generadas en los detectores de lahares por otras causas como deslizamientos u operación de maquinaria en zonas cercanas, etc.

4.1.2. DATOS GENERADOS POR LOS AFM (JUIVE) DE LA QUEBRADA PALMAURCU

Tres estaciones han estado operando habitualmente en la quebrada Palmaurcu durante el desarrollo de este trabajo, salvo algunas ocasiones en que se han presentado fallas técnicas por falta de mantenimiento oportuno o han estado temporalmente fuera de servicio al verse afectadas por erupciones importantes. Estas estaciones se encuentran ubicadas en la margen izquierda de la quebrada (Fig. 4.1) entre los 2369 – 2264 m de altura. La estación “JUI-01” es la situada a mayor altura [0782382 / 9842623; UTM (WGS84)], aguas abajo siguiendo el curso de la quebrada a una distancia de 205m se encuentra “JUI-03” [0782453 / 9842816; UTM (WGS84)] y finalmente a 320m de la primera y 119m de distancia de la segunda estación se encuentra “JUI-02” [0782452 / 9842935; UTM (WGS84)].

La antigua estación “JUI-04” [0782341 / 9842637; UTM (WGS84)] que operó hasta febrero de 2014 (Fig. 4.1) presentó algunos problemas durante su periodo de funcionamiento y debido a esto no se pudieron adquirir datos de la ocurrencia de algunos lahares hasta dicha fecha.

Cuando un lahar desciende por el cauce de esta quebrada, las estaciones ubicadas en ella envían vía radio los datos de estas señales en tiempo real (Fig. 4.2), donde son almacenados y pueden ser fácil y rápidamente reconocidos e interpretados. Mediante un software especializado (ver Capítulo 3) los datos generados se despliegan para las diferentes bandas de frecuencia separadamente por cada estación. Esto permite una detección confiable y rápida de estos fenómenos.

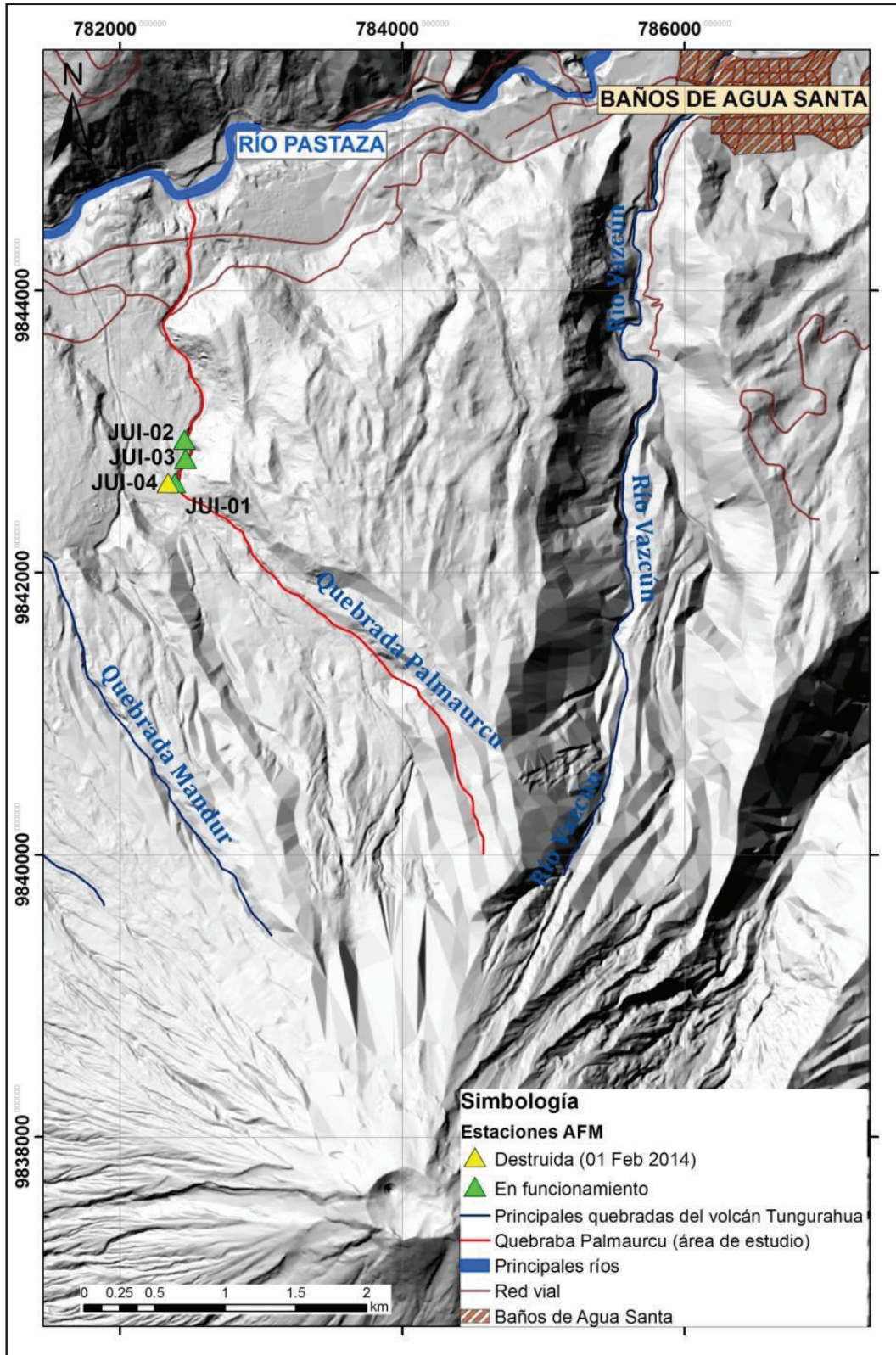


Figura 4.1: Ubicación de las estaciones AFM de la quebrada Palmaurcu en el volcán Tungurahua.

Por la configuración propia de los instrumentos AFM, los valores teóricos que tienen los registros de cada banda se encuentran en un rango de entre 0 y 4096 cuentas. En el caso de los AFM “JUI-01” y “JUI-02” cada cinco minutos (300 segundos) se origina un nuevo registro (valor promedio obtenido durante ese rango de tiempo), y en el caso del AFM “JUI-03” cada cinco minutos y treinta y ocho segundos (338 segundos) ya que inicialmente han sido programados de esta manera.

Las estaciones funcionan en “estado normal” siempre que la amplitud medida no supere el umbral de 500 cuentas por más de 45 segundos (duración crítica) en la Banda baja (Low Band) de cualquiera de las estaciones. En caso de que dicho umbral y duración críticos sean superados, la estación AFM funciona en “estado de alerta” mientras la amplitud medida no baje del umbral indicado. Esto se refleja en el dato de estado de funcionamiento de la estación (0= “estado normal”; 1= “estado de alerta”). Sin embargo los datos siguen enviándose desde las estaciones a intervalos de 5 minutos debido a problemas técnicos en su configuración.

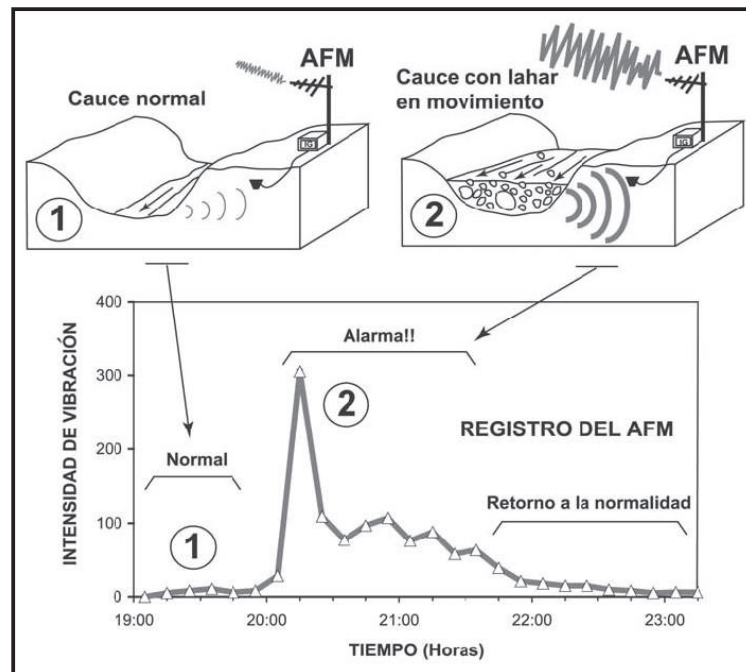


Figura 4.2: Esquema del funcionamiento de un detector de lahares AFM cuando desciende un lahar por el cauce (Tomado de Andrade et al, 2005).

Los datos en bruto generados por los AFM se guardan en un archivo creado por el software *Descartes Omniserver Developer* (en formato .csv), al inicio de cada día y se actualizan a lo largo de este (ver Capítulo 3). Los archivos diarios mencionados fueron revisados y se extrajeron los correspondientes a todos los días que presentaron anomalías en sus valores registrados, para ser tabulados, graficados y examinados.

De estos archivos puede definirse de forma directa datos como el tiempo de ocurrencia de los lahares y su duración, más adelante mediante su análisis se determinará otros parámetros.

4.1.3. SELECCIÓN DE EVENTOS

Los datos reunidos a partir de los informes semanales del OVT y de los registros de las estaciones AFM fueron analizados, comparados e integrados para obtener una base de datos confiable de todos los lahares ocurridos. Los principales criterios que han sido empleados para determinar los eventos a ser analizados en este estudio son:

- Se han tomado en cuenta los eventos que han sido detectados por los AFM (siempre y cuando se hayan registrado lluvias en ese día o en días previos) y que han sido reportados en los informes del OVT.
- Se considera eventos que hayan disparado automáticamente una alerta en el sistema de adquisición de datos (potencialmente los más grandes y peligrosos).
- De los eventos que no hayan disparado alertas en el sistema se considera únicamente los que alcancen una amplitud pico que sobrepase 100 unidades en la banda de baja frecuencia (Low Band), para evitar la consideración de flujos muy acuosos, que no se consideran verdaderamente como lahares (por ejemplo flujos de agua lodosa).

4.2. ADQUISICIÓN DE PARÁMETROS FÍSICOS EN EL CAMPO

Mediante la medición de ciertos parámetros en el campo es posible calcular el valor de las magnitudes físicas que permiten estimar el caudal máximo (pico) de

un lahar. Las medidas se realizaron con ayuda de un telémetro láser marca Laser Technology de tipo TruPulse 360B (Fig. 4.3).



Figura 4.3: Imagen del telémetro láser TruPulse 360B utilizado para realizar las mediciones de campo.

Este instrumento posee un sensor de alcance láser, un sensor de inclinación integrado, una brújula y un procesador digital, que permiten medir las distancias directa, horizontal y vertical, la inclinación (o pendiente porcentual) y el azimut entre el instrumento y un punto determinado. También permite calcular automáticamente la altura de cualquier objeto o la distancia entre dos puntos desde su posición.

El TruPulse 360B (Laser Technology, Inc., 2009) posee tres botones que proporcionan acceso al firmware interno de la unidad, el cual controla los sensores integrados. La pantalla de cristal líquido (LCD) está montada dentro del sistema óptico y al activarse muestra: una retícula para enfocar, yardas/metros, y los indicadores de la propia pantalla.

El sensor de alcance láser emite pulsos de energía infrarroja invisibles, determinando la distancia mediante la medición del tiempo de recorrido de cada pulso desde el telémetro hasta el objeto y viceversa. El indicador LASER se muestra siempre que se emite el láser. Tiene una sensibilidad de amplio espectro y puede funcionar tanto con objetos reflectantes como no reflectantes,

proporcionando automáticamente la mejor precisión y distancia de alcance con respecto a un objeto dado.

El sensor de inclinación integrado mide los ángulos verticales que el telémetro emplea para calcular la altura y la elevación y para determinar las distancias horizontales con pendiente reducida. Cuando el instrumento está a nivel marca 0°, y puede rotarse hacia arriba hasta +90° y hacia abajo hasta -90°.

Este telémetro emplea tecnología avanzada de brújulas electrónicas. Los circuitos internos proporcionan una monitorización de 3 ejes del campo magnético de la Tierra y utilizan algoritmos de calibración exclusivos para generar un azimut con la mayor precisión posible, mientras se realiza un procedimiento de calibración de campo sencillo.

El instrumento realiza lecturas precisas del azimut y la inclinación, independientemente de su orientación en el espacio físico; puede inclinarse, girarse o incluso colocarse al revés y aun así medirá el azimut y la inclinación correcta en la dirección en la que se mire. Esto se logra al combinar un sensor magnético de 3 ejes con un sensor de inclinación de 3 ejes, de modo que conoce siempre su posición en un espacio tridimensional y la dirección del campo magnético de la Tierra, independientemente de cómo esté orientado, lo que hace posible disparar desde cualquier ángulo (Laser Technology, Inc., 2009).

Adicionalmente incluye un chip ASIC (siglas en inglés correspondientes a Circuito Integrado de Aplicación Específica). El chip ASIC, junto con una unidad central de procesamiento de alta velocidad, hacen que el telémetro TruPulse proporcione mediciones rápidas y precisas.

La medición producida se expresa de acuerdo a la calidad del blanco: para un blanco de alta calidad la medición es expresada con un decimal, de lo contrario el valor de la medida se mostrará solo con números enteros.

Su precisión y exactitud dependen entonces de las características y la distancia a la cual se encuentre el objetivo. Medidas de distancia (directa, vertical y horizontal) para objetivos claros y cercanos tienen un error menor, considerando que las medidas de inclinación (precisión ± 0.25 grados) y azimut (precisión ± 1

grado) influyen en los valores calculados por el telémetro. Los parámetros obtenidos son (Fig. 4.4):

- SD (Distancia directa) distancia entre el objetivo y el instrumento en línea recta.
- VD (Distancia vertical) la distancia entre el objeto y la perpendicular con respecto a la trayectoria de la distancia horizontal.
- HD (Distancia horizontal) la distancia a nivel entre el telémetro y el objeto.
- INC (Inclinación) el ángulo de inclinación entre el TruPulse a nivel y el objeto.
- AZ (Azimut) rumbo magnético del objeto con relación al norte magnético.

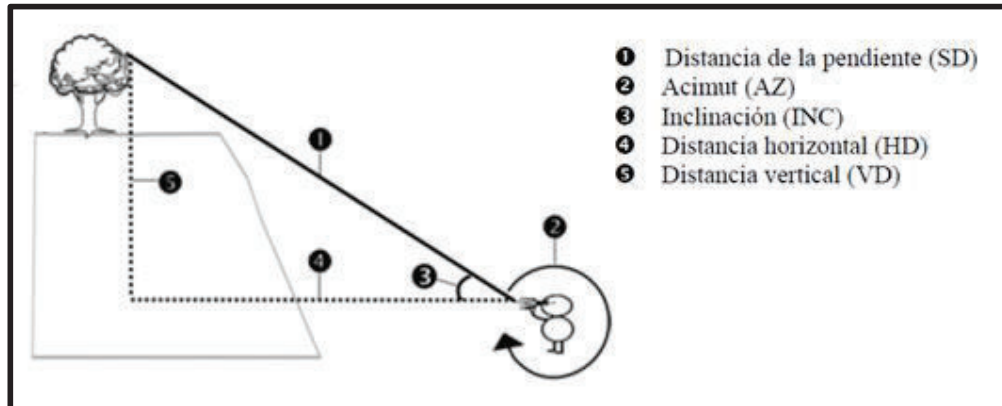


Figura 4.4: Esquema que muestra las medidas de los diferentes parámetros obtenidos con el telémetro láser. Los parámetros marcados con línea continua representan los valores medidos directamente y los marcados con línea de puntos representan los valores calculados. (Laser Technology, Inc., 2009)

4.3. ESTIMACIÓN DE CAUDALES DE LOS LAHARES OCURRIDOS EN LA QUEBRADA PALMAURCU

Para correlacionar los registros de los AFM es necesario calcular el caudal máximo (pico) del lahar. El caudal es la medida fundamental que describe el movimiento de un fluido y se relaciona fácilmente con la velocidad a la cual se desplaza el fluido por un canal.

El caudal Q para cualquier flujo en una sección determinada es igual al producto entre la velocidad v a la que se mueve el fluido y el área A de la sección del canal que atraviesa:

$$Q = A * v \quad [1]$$

Donde

A = área de la sección mojada

v = velocidad del flujo

En los canales naturales la sección transversal es generalmente de forma muy irregular y varía de un lugar a otro ya que los canales son no prismáticos y no conservan una sola dirección. Entonces el área de la sección transversal a lo largo de un canal no está predeterminada, sino que es en realidad una variable que depende de la profundidad y otros parámetros hidráulicos.

El área entonces se define enteramente de acuerdo a la geometría de la sección transversal que ocupó el lahar, tomada en forma perpendicular a la dirección del flujo en un sitio determinado del canal. Esta área está delimitada por la huella del perímetro mojado por el lahar a su paso y la línea imaginaria entre los extremos del perímetro, que constituiría la superficie libre (Fig. 4.5b).

Por otra parte la estimación de la velocidad del flujo posteriormente al tránsito de un lahar implica algunas dificultades asociadas a los métodos y sus restricciones.

La ecuación de vórtice forzado que considera el principio de sobre elevación que se produce en una curva es, según varios autores, el método más común y preciso para estimar la velocidad media de los flujos de escombros en el canal (Costa, 1984; Pierson, 1985; Iverson et al., 1994; Prochaska et al, 2000; Scheidl, 2014).

La **sobre elevación** es la diferencia en el nivel del flujo entre la parte interna y externa de la curva, la superficie libre se eleva en la parte exterior y es más baja hacia el interior (Johnson y Rodine, 1984; Pierson, 1985; Znamensky, 2002; Váscenez, 2006). Este método se basa en la aceleración radial del flujo en una

curva (independientemente de la densidad) e iguala la presión del fluido a la fuerza centrífuga.

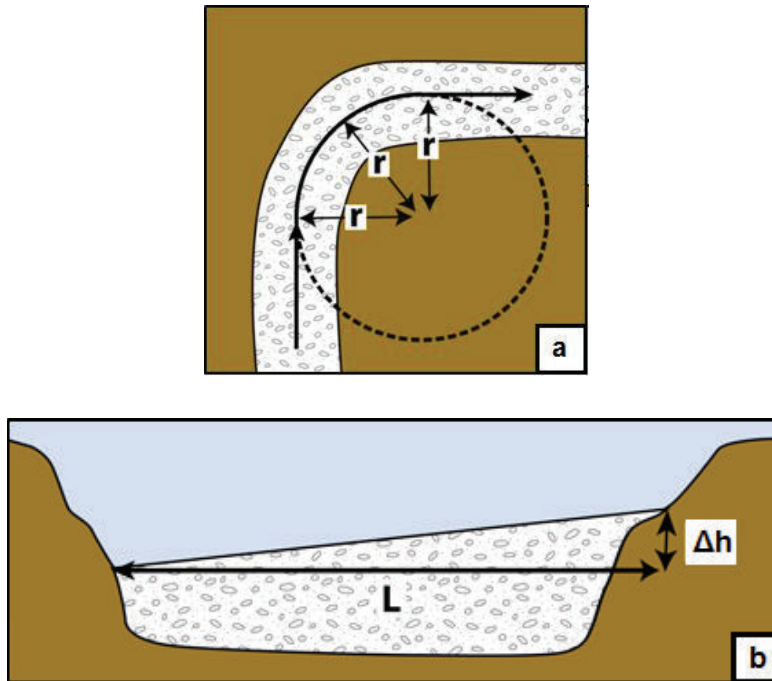


Figura 4.5: Esquema mostrando los parámetros que intervienen en la relación de velocidad basada en el principio de sobre – elevación a) radio de curvatura, b) diferencia de altura entre los bordes de la sección mojada y longitud de la sección mojada.

La ecuación fue derivada del principio de aceleración radial de una unidad de masa, asumiendo que la superficie libre es perpendicular al vector diferencia entre la fuerza de cuerpo y la aceleración radial (Costa, 1984; Pierson, 1985). De acuerdo a este fundamento la velocidad promedio del flujo de lodo en ese instante se puede obtener mediante la fórmula:

$$v = \sqrt{\frac{g \cdot \Delta h \cdot r_c}{L}} \quad [2]$$

Donde los parámetros que intervienen son (Fig. 4.5a, b):

v = velocidad promedio del flujo de lodo

g = aceleración de la gravedad (9.8 m/s²)

Δh = diferencia de altura entre los bordes de la sección mojada

r_c = radio de curvatura

L = longitud de la sección mojada

Esta ecuación (Ec. 2) no toma en cuenta la densidad y viscosidad del flujo, la fricción basal, ni la resistencia interna al flujo; por lo tanto provee valores de velocidad mínima del flujo (Johnson y Rodine, 1984; Costa, 1984; Pierson, 1985).

Su aplicación supone que:

- El flujo es subcrítico (las fuerzas inerciales son superadas en importancia por las gravitacionales, prevalece la energía potencial)
- Es radio de curvatura es igual para todas las líneas de corriente.
- La velocidad de cada línea de corriente es igual a la velocidad media del flujo.

El desnivel producido entre la parte interna y externa de la curva se evidencia y es observable posteriormente, en las huellas dejadas por el lahar en las paredes del cauce durante su tránsito.

Para realizar las medidas necesarias en el campo se procedió a seleccionar los sitios de la quebrada en donde se cumplieran los siguientes requisitos: donde la huella dejada por el lahar fuera aceptablemente clara, donde el drenaje presente una curvatura marcada, y donde fuera posible utilizar el telémetro láser. Para cada lahar se escogieron varios sitios a lo largo del drenaje que cumplieran con estas características y se realizaron tantas medidas como fuera posible.

4.3.1. ESTIMACIÓN DEL ÁREA DE LA SECCIÓN MOJADA

Para el cálculo del área, se realizaron perfiles perpendiculares al cauce, en lugares donde fue posible observar claramente los límites laterales de la huella dejada por el lahar (Fig. 4.6). Se procedió entonces a seleccionar un punto fijo (de referencia), desde el cual se toman medidas de varios puntos que permiten delinear el perfil adecuadamente, con ayuda del telémetro láser. Para cada punto del perfil se realizaron tres mediciones, con el fin de que se confirme el mismo valor obtenido.

Dependiendo del perfil, se tomaron diferente número de puntos, según como ayuden a delimitar de manera más precisa la geometría del lecho de la quebrada hasta la huella del calado máximo del flujo. Este procedimiento permite definir el perfil mojado para un evento dado en un sitio específico.

De acuerdo a la magnitud del lahar, su calado y la forma del cauce de la quebrada en un lugar determinado, estos perfiles presentan diferentes tamaños y formas irregulares.

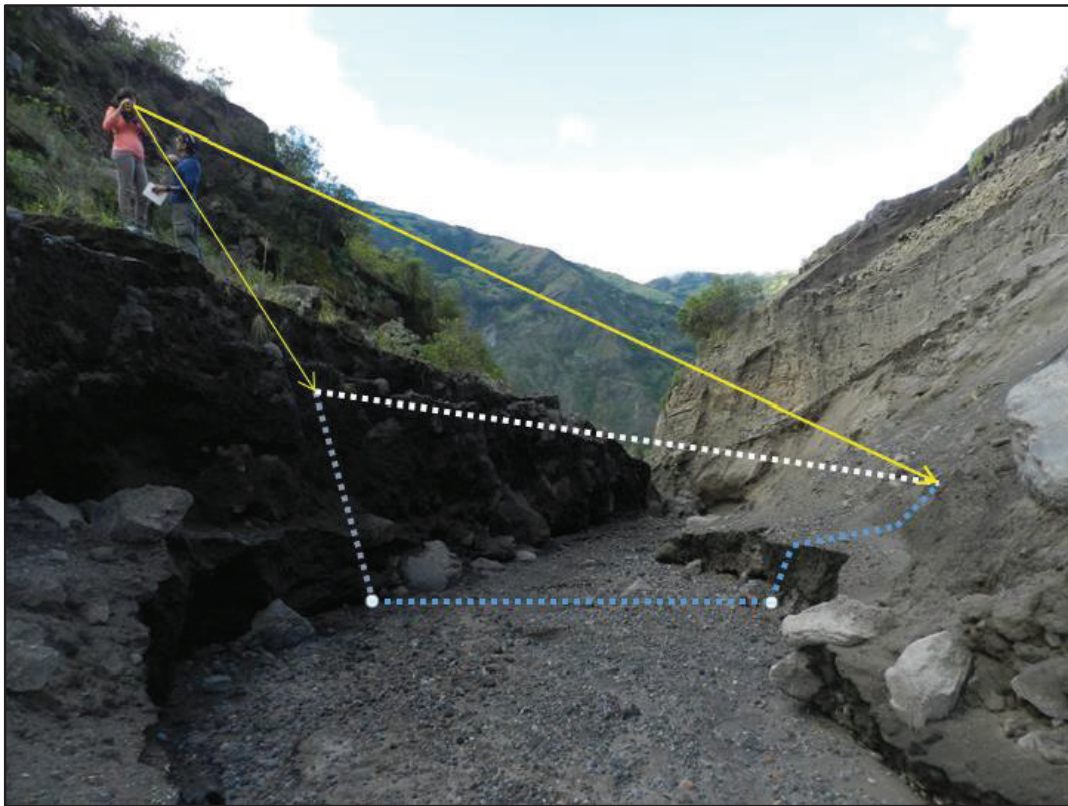


Figura 4.6: Esquema de la realización de un perfil en el campo de acuerdo a la huella mojada dejada por el lahar durante su transporte. Las líneas de puntos azules corresponden al perímetro mojado y la de puntos blancos a la superficie libre del flujo; en su conjunto determinan la sección transversal del flujo. Las flechas indican los puntos inicial y final del perfil entre los cuales se tomaron los puntos que determinan la sección.

El lugar de inicio de las medidas, denominado P1 para cada perfil, corresponde al primer punto del perfil y está siempre localizado en uno de los extremos de la quebrada (parte interna o externa de la curva) donde el flujo alcanzó su calado máximo. Los puntos siguientes se ubican a lo largo del perfil en la misma

dirección hasta alcanzar el otro extremo que corresponde al punto de calado máximo en el borde del cauce opuesto al primero (Fig. 4.6).

El diagrama del perfil (Fig. 4.7) se obtiene al graficar los valores obtenidos mediante el uso del telémetro para los parámetros HD (distancia horizontal: eje x) y VD (distancia vertical: eje y) medidos para cada uno de los puntos que determinan la sección (P1-P5 en el ejemplo).

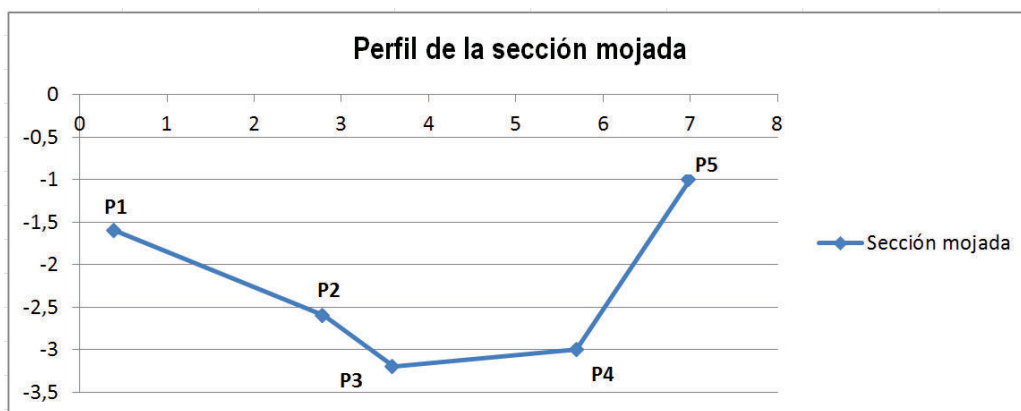


Figura 4.7: Diagrama mostrando el perfil de la sección mojada con los puntos tomados mediante el uso del telémetro.

Una vez determinada la forma del perfil de la sección mojada en una hoja de cálculo (Fig. 4.7), debido a su forma irregular, el cálculo del área se realiza por medio del método de triangulación. Consiste en descomponer el polígono irregular en triángulos pequeños conocidos sin perder su forma original (Fig. 4.8).

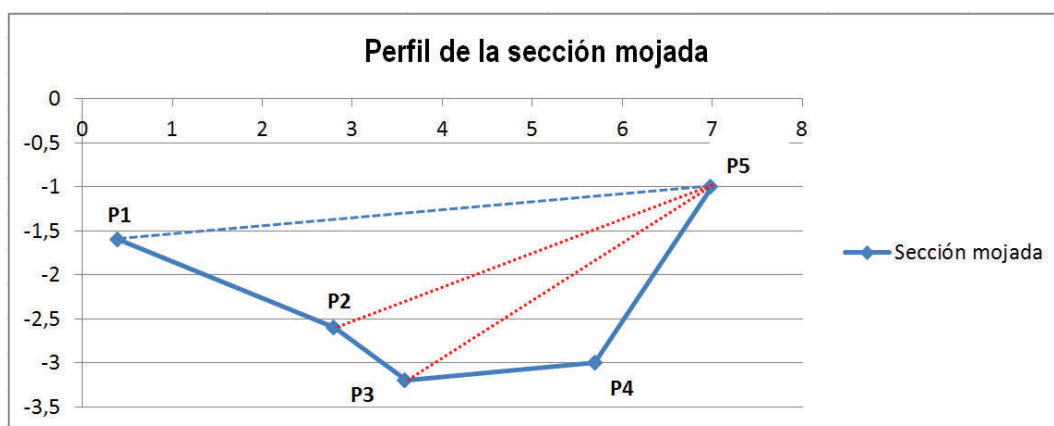


Figura 4.8: Diagrama mostrando la triangulación del polígono que determina la sección transversal para el cálculo de su área.

Como se conoce las coordenadas (x,y) de los puntos que determinan la sección mojada (que corresponden a la vez a los vértices del polígono irregular resultante y por tanto de cada uno de los triángulos disyuntos), el área de cada triángulo (T_n) se puede calcular entonces mediante el método de determinantes de una matriz.

$$T_n = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} x_1 & y_1 \\ x_2 & y_2 \\ x_3 & y_3 \\ x_1 & y_1 \end{vmatrix} \quad [3]$$

Entonces el área total de la sección mojada para un evento determinado estará dado por la suma del área de todos los triángulos:

$$A = \sum_{i=1}^n T_n \quad [4]$$

T_n = El área del triángulo n disyunto del polígono original.

n = La cantidad de triángulos que pueden resultar de ese polígono irregular.

4.3.2. ESTIMACIÓN DE LA VELOCIDAD DEL FLUJO

Para que sea posible estimar la velocidad de un lahar después de su paso, es necesario conocer las variables que intervienen en la ecuación que considera el principio de sobre-elevación (ver ecuación [2] más arriba), para lo cual es necesario realizar varias medidas adicionales en el campo.

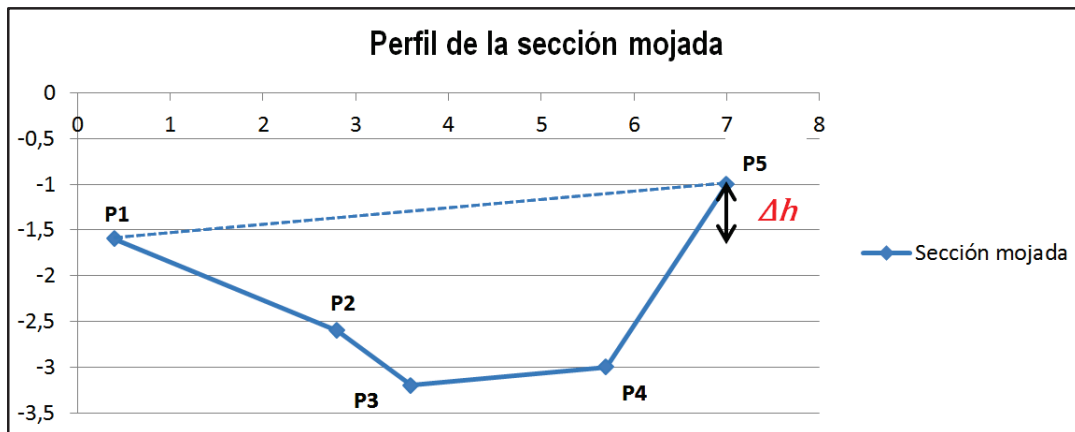


Figura 4.9: Diagrama mostrando el cálculo de la diferencia de altura en base al perfil transversal realizado con mediciones de campo.

El valor de Δh , es decir la diferencia de altura provocada por el efecto de sobre-elevación en la curva por donde transitó en lahar puede calcularse directamente tomando los puntos extremos del perfil de la sección mojada, realizando la resta de los valores de VD (eje y) entre dichos puntos (Fig. 4.9).

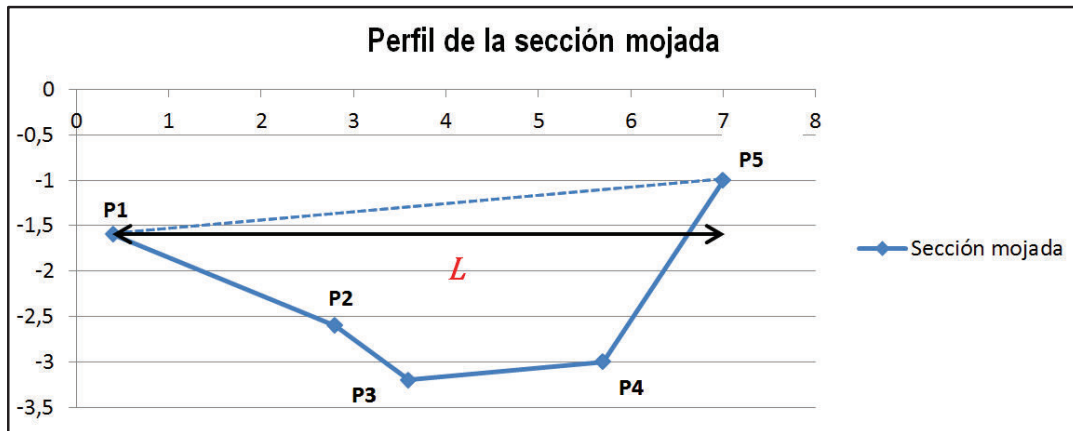


Figura 4.10: Diagrama mostrando el cálculo de la longitud de la sección mojada en base al perfil transversal realizado con mediciones de campo.

De la misma forma el valor de la longitud de la sección mojada L se obtiene de la resta de los datos de HD (eje x), obtenidos con el telémetro, de los puntos extremos del perfil de la sección mojada (Fig. 4.10).

Para el cálculo del radio de curvatura r_c se debe definir la curva transitada por el flujo con ayuda del telémetro (Fig. 4.11), tomando la ubicación de varios puntos a lo largo de la misma. Una vez que la curva esté definida y sus puntos ubicados espacialmente en un plano (en coordenadas rectangulares), se procede a determinar el radio de curvatura. Para esto se utilizó el método de construir todos los triángulos posibles con los puntos que definen la curva (Fig. 4.12), y posteriormente recurriendo a la geometría analítica determinar el radio de curvatura.



Figura 4.11: Medición en el campo de la ubicación de varios puntos a lo largo de una curva transitada por el lahar. La línea de puntos roja representa el eje de la trayectoria seguida por el lahar que se toma como referencia.

La mediatriz de una cuerda dada en cualquier circunferencia pasa necesariamente por el centro de la misma. La mediatriz de una cuerda es la línea recta perpendicular a dicho segmento trazada por su punto medio.

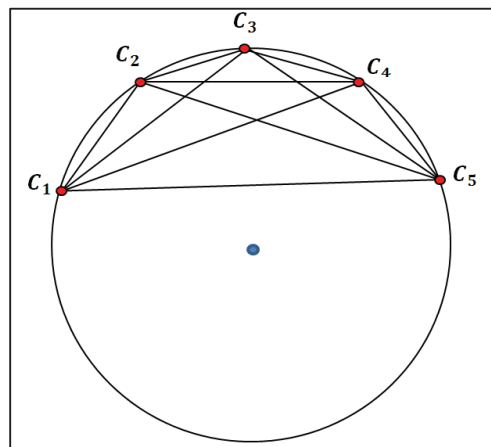


Figura 4.12: Diagrama mostrando la construcción de todos los triángulos posibles con los puntos que definen la curva.

Todo triángulo puede ser inscrito dentro de una circunferencia, por lo que al construir las mediatrices a los lados de un triángulo, obtenemos que las intersecciones de las mismas determinan el centro de dicha circunferencia.

Geoméricamente la circunferencia circunscrita es aquella que pasa por todos los vértices de un polígono plano (en este caso un triángulo) y contiene completamente a dicha figura en su interior. Todos los triángulos tienen una circunferencia circunscrita, el centro de la circunferencia circunscrita se llama circuncentro y su radio Circunradio. Por las características geométricas antes mencionadas, en todo triángulo las mediatrices de sus tres lados concurren en un mismo punto: el circuncentro, el cual es equidistante de los vértices del triángulo (Fig. 4.13).

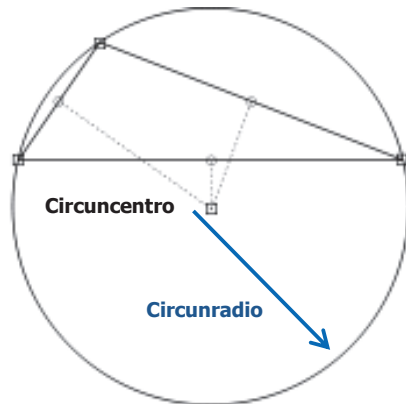


Figura 4.13: Diagrama mostrando el circuncentro y circunradio de un triángulo.

El problema del cálculo del radio de curvatura se resuelve entonces construyendo para cada triángulo dos mediatrices cualesquiera de sus tres lados, las cuales pueden ser perfectamente determinadas si se conocen las coordenadas de uno de sus puntos y su inclinación, para esto se determinará en cada caso el punto medio de cada lado y su pendiente.

Conociendo los dos puntos extremos de un segmento dirigido (en este caso los vértices de los lados del triángulo) $C_1(x_1, y_1)$ y $C_2(x_2, y_2)$ las coordenadas (x_m, y_m) del punto medio M que divide a dicho segmento es:

$$x_m = \frac{x_1+x_2}{2} ; y_m = \frac{y_1+y_2}{2} \quad [5]$$

Al ser la mediatriz el segmento perpendicular al lado del triángulo, su pendiente es recíproca y de signo contrario a la pendiente del lado del triángulo ya que su vector director es normal al lado. La pendiente de un determinado lado se calcula entonces mediante la expresión $m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$ [6], y por tanto la pendiente de la mediatriz será igual a $m_m = -\frac{1}{m}$ [7].

Así la ecuación de la mediatriz teniendo un punto dado $M(x_m, y_m)$ y su pendiente tiene por ecuación: $y - y_m = m_m(x - x_m)$ [8].

Hallando del mismo modo la ecuación de otra de las mediatrices para un mismo triángulo y resolviendo el sistema de ecuaciones obtenido, el resultado del despeje de x e y corresponden a las coordenadas del circuncentro.

Realizando el mismo procedimiento para cada uno de los triángulos se obtiene un sistema de ecuaciones (correspondientes a dos de las mediatrices de sus lados) que al resolverlo determinará las coordenadas del circuncentro del triángulo al que pertenecen. Calculando la distancia entre un vértice y el circuncentro para todos los triángulos podemos determinar la longitud del radio de cada circunferencia circunscrita mediante la aplicación de la fórmula de distancia entre dos puntos:

$$d = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad [9]$$

Basándose en estas propiedades, y debido a que todos los triángulos formados se encuentran contenidos en el mismo arco de curva ya que los puntos que la definen constituyen a la vez los vértices de dichos triángulos, entonces los circuncentros de todos los triángulos idealmente se encuentran en el mismo punto (Fig. 4.14).

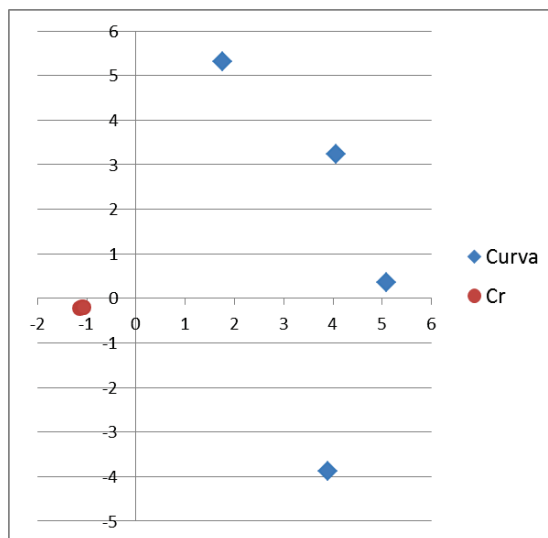


Figura 4.14: Gráfico mostrando la ubicación espacial de los puntos tomados en el campo que definen la curva transitada por un lahar y la ubicación del centro de su radio de curvatura (Cr).

En la práctica debido a que la forma de la curva no se ajusta con total precisión a un arco de circunferencia, esto genera una nube de puntos dispersos (varios circuncentros cercanos entre sí), y en consecuencia se tendrá un número de radios igual al número de triángulos formados de acuerdo a la cantidad de puntos de la curva (Fig. 4.15).

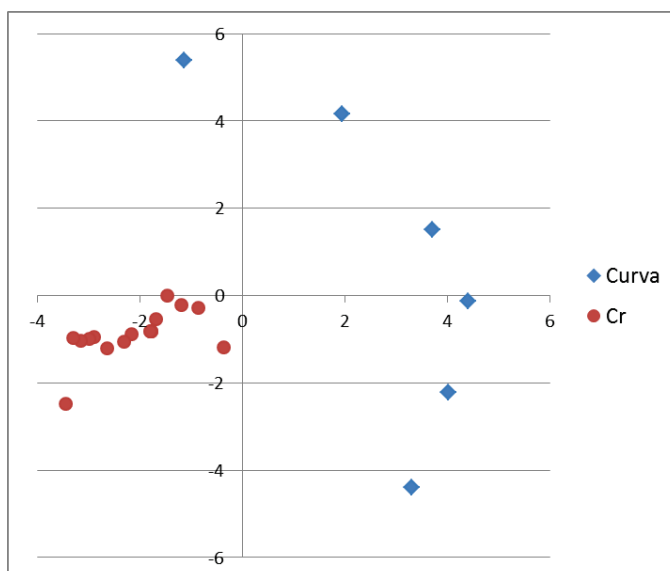


Figura 4.15: Gráfico mostrando la ubicación espacial de todos los circuncentros asociados a todos los triángulos formados de acuerdo al número de puntos que definen la curva transitada por un lahar el 5 de mayo del 2013. Nótese la dispersión de los circuncentros obtenidos, debido a que la curva medida en el campo no corresponde exactamente a un arco de círculo.

Con un conjunto de datos calculados, el promedio o media aritmética se define como una medida de tendencia central y es el que más se usa, ya que es el valor característico de la serie de datos y es el número que puede representar de mejor manera a los valores del conjunto. Su valor se calcula como la suma de todos los componentes dividida entre el número de componentes:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i = \frac{a_1 + a_2 + \dots + a_n}{n} \quad [10]$$

Una de las limitaciones de la media aritmética es que se trata de una medida muy sensible a los valores extremos; los valores muy elevados tienden a aumentar el promedio, mientras que los valores muy bajos lo reducen, y de este modo puede dejar de ser representativo del conjunto de datos.

La desviación estándar es una medida del grado de dispersión de los datos con respecto al valor promedio, es decir la variación esperada respecto a éste que nos da la precisión de un grupo repetido de medidas y permite determinar si un valor es significativamente inusual.

Así del conjunto de datos calculados para r_c se determina el promedio con los valores que se encuentren dentro del rango de variación de la desviación estándar, y este único valor se utilizará para la estimación de la velocidad del flujo.

De esta manera se obtienen todas las variables necesarias que intervienen en la ecuación de la sobre elevación que permite realizar el cálculo aproximado de la velocidad.

4.3.3. ESTIMACION DEL CAUDAL

Para cada evento se realizaron uno o más perfiles perpendiculares al cauce en distintos sitios a lo largo de la quebrada, de acuerdo a la accesibilidad y las características del sitio, y donde a la vez fuera posible determinar la sobre-elevación en una curva del canal (Fig. 4.16); de forma que se pudieran obtener mediciones confiables.



Figura 4.16: *Determinación del perfil transversal y la curva transitada (necesarios para la estimación del caudal) en diferentes puntos de la quebrada para un mismo evento.*

Suponiendo un caudal máximo (pico) constante durante el tránsito del lahar a lo largo de la quebrada, el cálculo del caudal para un evento dado en más de un sitio teóricamente debería ser el mismo. Sin embargo en la práctica no se cumple con exactitud, debido a que los flujos pueden erosionar y depositar localmente. A pesar de esto, debido a que en el Tungurahua la distancia recorrida por estos flujos no es muy larga y que en su mayoría los flujos no sufren cambios muy significativos en su comportamiento durante el transporte, los valores de caudal que se pueden calcular en varios sitios generalmente no fueron muy variables.

Para un único evento se obtiene entonces uno o más valores de caudal relacionando la velocidad con la cual transitó el lahar por el canal a través de una sección determinada del mismo, mediante los procedimientos descritos anteriormente para cada uno de estos parámetros.

En este caso si se tiene más de un valor de caudal se procede a utilizar la media aritmética del conjunto de valores para la determinación del caudal de un evento dado.

CAPÍTULO 5

5. RESULTADOS

5.1. MONITOREO DE OCURRENCIA DE LAHARES EN LA QUEBRADA PALMAURCU

Los sensores de las tres estaciones AFM han detectado en conjunto el paso de 72 lahares en este drenaje del flanco norte del volcán Tungurahua, a lo largo del periodo comprendido desde marzo de 2012 hasta marzo de 2015. Mientras los sensores se hayan operado correctamente ningún lahar ocurrió sin ser detectado.

No obstante, el número total de lahares ocurridos en la quebrada Palmaurcu durante este lapso asciende a 82 (Fig. 5.1), debido a que se han presentado ocasionales inconvenientes con los instrumentos y estos no han estado funcionando normalmente durante ciertos días o periodos (Tabla 2). Esto se ha podido determinar en base a los informes semanales realizados en el Observatorio del Volcán Tungurahua (OVT).

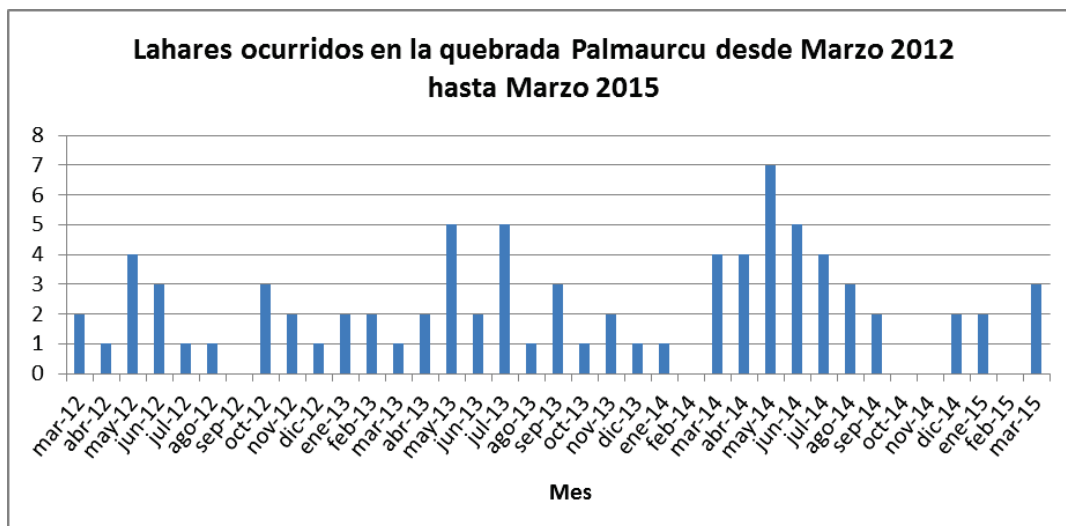


Figura 5.1: Número de lahares ocurridos por mes en la quebrada Palmaurcu, durante el periodo de estudio.

El AFM JUI-01 proporcionó datos registrados y almacenados de 68 lahares, JUI-02 de 57 lahares y JUI-03 de 31 lahares. Esta última estación en realidad registró un número similar de lahares que JUI-02, pero debido a problemas del sistema de almacenamiento sus datos no se encuentran disponibles (Tabla 2).

Los primeros 12 lahares ocurridos solo fueron registrados por el AFM JUI-01 debido a que los otros dos AFM se instalaron el 30 de agosto de 2012 (Tabla 2). Por otra parte, 5 lahares de los cuales no se tienen datos almacenados corresponden a eventos ocurridos en las semanas después de la erupción del 14 de julio de 2013 que provocó daños temporales en las estaciones y no operaron correctamente. De la misma manera, su funcionamiento se vio interrumpido a partir de la erupción del 1 de febrero de 2014, por lo que no se registraron al menos dos lahares ocurridos las semanas siguientes, hasta su reparación y remplazo. Adicionalmente en ocasiones puntuales se han producido fallas en los instrumentos por factores externos o falta de correcto mantenimiento y problemas en la configuración del sistema de adquisición y almacenamiento de datos.

Gracias a este sistema de monitoreo es posible tener control de algunos parámetros de ocurrencia de los lahares en tiempo real, tales como: tiempo de ocurrencia del lahar (hora de inicio y fin del lahar), duración del lahar, hora de descarga pico del lahar (en un punto determinado), apreciación cualitativa de la magnitud del lahar (registro máximo de Low Band del AFM). En la tabla 2 se presenta un resumen de los principales parámetros de todos los lahares registrados en la quebrada Palmaurcu.

FECHA	HORA INICIO	HORA PICO	HORA FIN	DURACIÓN	REGISTRO AFM LB		
					JUI-01	JUI-02	JUI-03
2012							
25/03/12	3:20:00	3:30:00	4:55:00	95	3433	-	-
25/03/15	18:45:00	18:50:00	20:20:00	95	2526	-	-
02/04/12	-	-	-	-	FT	-	-
01/05/12	0:25:00	1:40:00	4:05:00	220	858	-	-
17/05/12	1:40:00	2:15:00	4:00:00	140	1526	-	-
21/05/12	9:00:00	9:15:00	10:25:00	95	1442	-	-
28/05/12	2:00:00	3:10:00	4:50:00	170	562	-	-
02/06/12	1:05:00	1:55:00	3:20:00	135	2402	-	-
02/06/12	14:10:00	14:40:00	17:00:00	170	1253	-	-

FECHA	HORA INICIO	HORA PICO	HORA FIN	DURACIÓN	REGISTRO AFM LB		
					JUI-01	JUI-02	JUI-03
07/06/12	9:20:00	10:00:00	11:55:00	155	537	-	-
29/07/12	9:20:00	11:05:00	13:10:00	230	627	-	-
13/08/12	17:25:00	19:00:00	20:15:00	170	1160	-	-
17/10/12	0:10:00	1:10:00	4:55:00	285	744	643	ND
18/10/12	17:05:00	17:15:00	19:00:00	115	3082	3649	ND
23/10/12	20:35:00	22:20:00	0:10:00	320	1336	3599	ND
05/11/12	20:50:00	21:10:00	22:15:00	85	318	559	ND
11/11/12	16:05:00	16:35:00	18:05:00	120	462	775	ND
01/12/12	16:15:00	16:30:00	19:05:00	170	3723	3783	ND
2013							
02/01/13	-	-	-	-	ND	ND	ND
04/01/13	8:55:00	10:05:00	12:15:00	200	2107	1652	ND
08/02/13	23:00:00	0:05:00	1:55:00	175	2636	FT	3789
28/02/13	6:50:00	7:55:00	8:30:00	100	259	143	201
21/03/13	0:30:00	1:00:00	4:35:00	245	248	267	239
15/04/13	-	-	-	-	ND	ND	ND
22/04/13	1:00:00	1:25:00	3:15:00	210	ND	ND	ND
03/05/13	17:55:00	18:00:00	18:55:00	60	322	578	1226
04/05/13	17:40:00	18:05:00	19:50:00	130	3818	3692	3828
20/05/13	0:00:00	2:10:00	3:05:00	185	201	285	613
30/05/13	20:05:00	21:35:00	22:35:00	180	243	597	967
31/05/13	3:50:00	4:15:00	7:00:00	190	3486	2719	3760
02/06/13	23:00:00	0:35:00	1:30:00	150	559	830	1120
07/06/13	9:10:00	11:00:00	14:50:00	340	1564	1194	3287
09/07/13	7:05:00	11:40:00	17:30:00	625	629	422	619
14/07/13	-	-	-	-	FT	FT	FT
21/07/13	-	-	-	-	FT	FT	FT
25/07/13	-	-	-	-	ND	ND	ND
31/07/13	-	-	-	-	ND	ND	ND
03/08/13	-	-	-	-	ND	ND	ND
19/09/13	0:35:00	1:25:00	4:25:00	230	1113	1616	3449
24/09/13	7:50:00	7:55:00	11:55:00	245	251	526	1248
29/09/13	9:15:00	10:35:00	12:50:00	215	1442	2301	3777
14/10/13	20:25:00	21:40:00	22:45:00	140	430	691	1642
17/11/13	18:30:00	18:55:00	20:05:00	95	3504	3264	FT
17/11/13	21:55:00	23:10:00	1:00:00	185	2427	2758	FT
20/12/13	4:40:00	5:05:00	6:25:00	105	1703	3551	3564
2014							
07/01/14	17:50:00	19:55:00	21:10:00	200	721	1425	2618
03/03/14	-	-	-	-	FT	ND	ND
08/03/14	17:55:00	18:30:00	19:35:00	130	FT	FT	619
09/03/14	1:45:00	1:55:00	3:50:00	125	FT	1345	FT
11/03/14	17:15:00	17:30:00	19:30:00	125	FT	595	FT

FECHA	HORA INICIO	HORA PICO	HORA FIN	DURACIÓN	REGISTRO AFM LB		
					JUI-01	JUI-02	JUI-03
08/04/14	8:25:00	11:45:00	14:05:00	340	179	640	395
14/04/14	22:00:00	23:10:00	1:25:00	205	198	516	253
24/04/14	8:30:00	11:40:00	14:25:00	355	1561	1319	1772
27/04/14	12:05:00	13:05:00	15:25:00	200	368	851	742
02/05/14	13:00:00	13:50:00	15:45:00	165	300	653	566
03/05/14	7:55:00	9:10:00	13:00:00	305	574	744	499
03/05/14	22:50:00	23:30:00	1:10:00	140	684	530	518
10/05/14	19:10:00	21:50:00	1:30:00	380	2308	3513	3489
11/05/14	22:10:00	22:40:00	1:20:00	190	1025	452	839
16/05/14	3:25:00	5:25:00	7:15:00	230	362	636	338
27/05/14	0:05:00	1:05:00	3:40:00	215	719	395	ND
01/06/14	5:05:00	5:30:00	9:25:00	260	3171	2548	ND
01/06/14	10:55:00	15:55:00	17:55:00	420	1567	1580	ND
02/06/14	3:55:00	4:45:00	8:25:00	270	962	935	ND
10/06/14	2:00:00	7:30:00	13:55:00	715	2788	3583	ND
14/06/14	13:30:00	15:20:00	17:45:00	265	688	283	ND
06/07/14	19:45:00	20:55:00	22:30:00	165	215	296	ND
07/07/14	13:55:00	14:25:00	16:55:00	180	1722	1456	ND
07/07/14	22:30:00	0:15:00	2:10:00	220	440	169	ND
14/07/14	10:50:00	11:40:00	12:45:00	115	FT	2470	ND
05/08/14	3:20:00	5:50:00	8:45:00	325	704	378	ND
05/08/14	12:25:00	15:30:00	17:35:00	310	320	171	ND
08/08/14	20:25:00	21:55:00	1:50:00	325	1454	1636	ND
12/09/14	3:30:00	6:40:00	8:55:00	325	1410	712	ND
15/09/14	9:00:00	10:20:00	12:55:00	235	3076	2325	ND
07/12/14	13:20:00	14:35:00	16:35:00	195	3708	2795	ND
24/12/14	22:00:00	23:10:00	1:30:00	210	299	275	ND
2015							
09/01/15	5:45:00	7:30:00	10:00:00	255	745	655	ND
09/01/15	20:50:00	22:25:00	23:55:00	185	665	524	ND
20/03/15	5:35:00	7:35:00	10:10:00	275	1167	1174	3072
23/03/15	17:40:00	17:55:00	19:35:00	115	852	1883	3366
29/03/15	7:05:00	8:45:00	12:10:00	305	716	719	1558

Tabla 2: Detalle de todos los lahares ocurridos en la quebrada Palmaurcu del volcán Tungurahua entre marzo de 2012 y marzo de 2015, y los datos disponibles proporcionados por los detectores de lahares AFM asociados a los mismos. En la sección de registros se ha usado la siguiente nomenclatura para indicar los casos en los que no se cuentan con datos de lahares en las fechas indicadas: FT= instrumentos han experimentado fallas técnicas, ND= debido a fallas del sistema de almacenamiento no se cuenta con estos datos.

Cabe recalcar también la importancia de los reportes de ocurrencia de lahares en el volcán Tungurahua, realizada por parte de los vigías que integran la red de comunicaciones alrededor del volcán, así como por parte del personal de turno en el OVT quienes realizan inspecciones de campo o llevan a cabo una correcta interpretación de los datos proporcionados por los AFM. Es así que, de los informes semanales del OVT se tiene reporte de 71 de los lahares ocurridos, es decir 86.5% del total. Únicamente los 11 eventos resaltados en rojo en la Tabla 2 no fueron reportados en las Síntesis Semanales de la Actividad del Volcán Tungurahua, sino que se determinaron a posteriori en base al análisis de los registros almacenados.

Es importante mencionar que ninguno de estos 11 eventos corresponde a lahares medianos o grandes, sino a flujos menores que no tuvieron ninguna consecuencia, lo que también explica que no hayan sido reportados.

El total de lahares ocurridos en la quebrada Palmaurcu del volcán Tungurahua en el periodo desde Marzo 2012 hasta Marzo 2015 da una tasa promedio anual de 26.9 eventos y una tasa mensual de 2.3 eventos. Durante este tiempo el mayor número de lahares registrados fue en el año 2014 en que ocurrieron 32 flujos de lodo, y específicamente el mes de mayo de este año es el de mayor ocurrencia con 7 lahares producidos (Fig. 5.1). A lo largo de los tres años, en general se registra mayor número de lahares en los meses comprendidos entre abril y julio, debido a que son generalmente los meses con mayor cantidad de lluvias en la zona.

En general, estos eventos son breves, de pocas horas de duración (214 minutos en promedio), y caracterizados por una oleada principal, aunque en algunos casos pueden presentarse varias dependiendo de la duración del lahar (el tiempo máximo corresponde a 715 minutos), que puede ser originado por lluvias más prolongadas. El pico de velocidad y descarga se produce durante la oleada principal, que coincide o sigue al frente del lahar generalmente por unos pocos minutos (Tabla 2).

5.2. CLASIFICACIÓN DE LOS LAHARES OCURRIDOS EN LA QUEBRADA PALMAURCU

En los pseudohidrogramas generados por los AFM es posible distinguir patrones diferentes de comportamiento debido a las distintas características que presentan estos flujos. Dichos patrones se ven influenciados en gran medida por el contenido y granulometría del sedimento (fracción sólida) suspendido, diferenciándose primordialmente entre flujos de escombros y flujos hiperconcentrados en los registros.

Previamente, ya se había mencionado que la intensidad de la señal en las bandas Low Band y Full Band puede dar una indicación relativa de la concentración de sedimento en el flujo (*Lavigne et al., 2000*). Para definir de mejor manera si el comportamiento de los lahares registrados por los AFM en la quebrada Palmaurcu se asemeja más a un flujo de escombros o a un flujo hiperconcentrado, o su variación en el tiempo de una fase a otra, se analizó las relaciones LB/FB (Low Band/Full Band) vs HB/FB (High Band/Full Band) para su clasificación, encontrándose un patrón para cada caso (Fig. 5.2).

Dado que los flujos hiperconcentrados son más concentrados en agua que los flujos de escombros, y que la banda High Band es más sensible a los flujos acuosos (*Marcial et al., 1996*), entonces se puede esperar una propensión de la razón HB/FB a ser mayor en los flujos hiperconcentrados respecto a los flujos de escombros.

En la Figura 5.2 se presentan dos lahares que ejemplifican las relaciones mencionadas arriba. Se trata de un flujo de escombros ocurrido el 1 diciembre del 2012 (puntos azules) y de un flujo hiperconcentrado ocurrido el 9 de julio del 2013 (puntos rojos). Para ambos casos, se obtuvieron las razones HB/FB y LB/FB, que luego fueron reportadas en el diagrama correspondiente.

Se puede observar que para ambos flujos existe poca diferencia en la razón LB/FB, mientras que en la razón HB/FB hay una tendencia marcada. En el caso del flujo de escombros, los valores de esta relación no superan un límite de 4, en

contraste los valores para el flujo hiperconcentrado se encuentran todos sobre este límite (Fig.5.2).

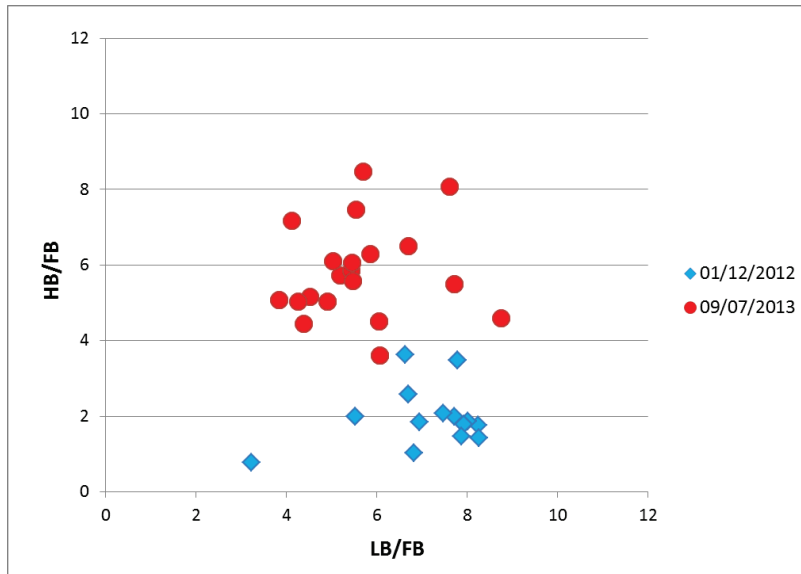


Figura 5.2: Relación HB/FB vs LB/FB para dos lahares ocurridos en la quebrada Palmaurcu. En el diagrama se puede observar que para el lahar ocurrido el 9 de julio de 2013 los valores tienden a ser mayores para la relación HB/FB respecto al lahar del 1 de diciembre de 2012, indicando un flujo con mayor concentración de agua a la cual la High Band es más sensible.

Adicionalmente el pseudohidrograma obtenido mediante los registros AFM para cada uno de los flujos mencionados evidencia claramente diferencias entre los mismos, que permiten distinguir también entre los dos tipos de flujo:

- **Flujos de escombros**, se reconocen porque en el registro del AFM el pico ocurre pocos minutos después del frente del lahar y los valores registrados cuando se produce uno de estos eventos incrementan de forma brusca, siempre se registran valores mayores en la banda Low Band respecto a las otras bandas y generalmente concuerdan con lahares de caudal importante pero relativamente corta duración (Fig. 5.3).

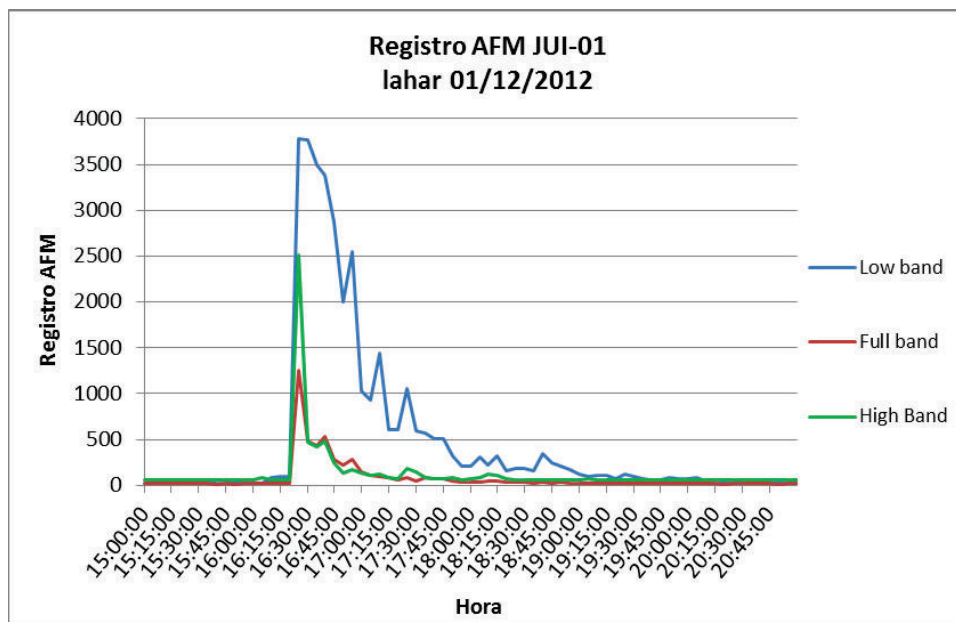


Figura 5.3: Registro AFM con cada una de sus bandas para un lahar ocurrido el 1 de diciembre de 2012 correspondiente a un debris flow, en el cual se puede apreciar el incremento brusco de los valores produciendo un pico bien marcado, y los máximos valores en Low Band. Su duración es relativamente corta.

- Flujos hiperconcentrados**, tienen una señal un poco más elevada en la alta frecuencia que los anteriores, y habitualmente no poseen picos tan elevados y marcados como los flujos de escombros. Los valores de la señal registrada incrementan de forma paulatina y de la misma forma se produce una disminución lenta y progresiva de los valores. El registro de la banda High Band tiende a ser más alto e incluso a veces supera los valores de Low Band, a diferencia de los flujos de escombros. Corresponden en su mayoría a lahares de caudal pequeño a moderado, pero de larga duración (Fig. 5.4).

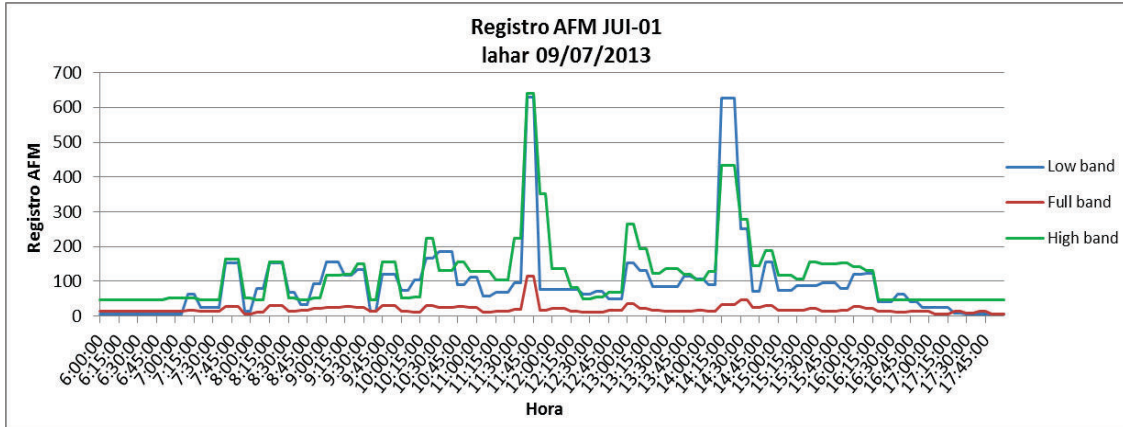


Figura 5.4: Registro AFM con cada una de sus bandas para un lahar ocurrido el 9 de julio de 2013 correspondiente a un flujo hiperconcentrado, en el cual se puede apreciar un incremento paulatino de los valores dando lugar a varios picos en el registro pero menos bruscos, y los máximos valores de Low Band siendo en muchos instantes superados por los de High Band. Son en general de larga duración.

Otro aspecto importante que se evidencia en los registros proporcionados por los AFM es que algunos cambios en la magnitud y características del flujo pueden ocurrir a lo largo del canal por donde transitan, como es común en los lahares, y en algunos casos puede evidenciarse por la variación de su patrón de comportamiento en el tiempo, y de una estación a otra.

5.3. CALIBRACIÓN DE LOS INSTRUMENTOS

El desarrollo del modelo de calibración de los detectores de lahares de tipo AFM en la quebrada Palmaurcu del volcán Tungurahua se fundamentó en la estimación *ex post* del caudal pico de varios lahares de los cuales fue posible obtener medidas de campo confiables y que a la vez fueron registrados por estas estaciones. El proceso de calibración es posible al hacer varias medidas de este tipo, lo que permite comparar y correlacionar los datos obtenidos en el campo con los datos instrumentales. En trabajos precedentes ya se ha comprobado que la amplitud medida por el AFM es directamente proporcional al caudal instantáneo del lahar (Tuñgol y Regalado, 1996; Andrade et al., 2005), por tanto las señales pico (valor máximo) registradas por los instrumentos corresponden a la descarga máxima de los flujos que transitan por el canal donde se encuentran ubicadas las estaciones.

Este tipo de calibración asume que la concentración de sedimento y la distribución del tamaño de grano de los lahares son constantes (o no son relevantes), obteniéndose una ecuación de correlación que permite transformar el registro del AFM en un hidrograma. Es decir que los valores de la señal medida por los AFM se traducen directamente en caudales instantáneos.

Previamente se ha podido comprobar que el ruido sísmico generado por un lahar se correlaciona mejor en las señales de la banda de frecuencia de 10-100 Hz (Low Band) o en la banda completa de 10-300 Hz (Full Band) (USGS, 2008), debido a su alta concentración de sedimentos suspendidos. Sin embargo, a pesar de que la energía de los lahares se evidencia mejor en la banda baja (Low Band), la calibración se dificulta debido a que esta banda es susceptible a saturarse con caudales relativamente pequeños.

El valor máximo teórico que puede registrar un AFM en cualquier banda es de 4096 cuentas, aunque un registro puede considerarse como saturado cuando llega a alrededor de 3800 cuentas (Fig. 5.5). Esto ocurre debido a varias razones, por ejemplo el tamaño del lahar, la cercanía a la cual se encuentran los sensores al cauce, o incluso por el proceso mismo de obtención de un dato, en el cuál se realiza el promedio de medidas tomadas durante varios minutos. Cuando el registro de la banda baja (Low band) se satura deja de ser útil para calcular parámetros como caudal y volumen del lahar.

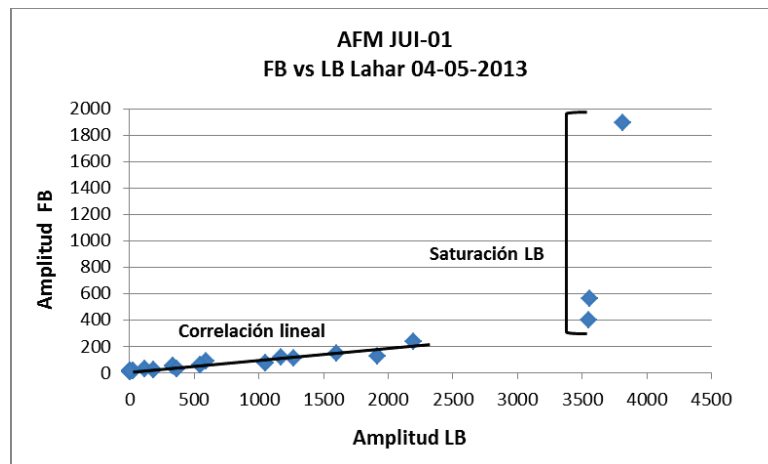


Figura 5.5: Comparación entre los registros de las amplitudes obtenidas en la Banda baja (Low Band) y la Banda completa (Full Band) para un lahar registrado el 04-05-2013. Se puede observar la zona de saturación de la banda baja donde se pierde la correlación lineal de los registros.

Un punto importante a considerar es que la banda baja tiene una amplificación de aproximadamente 10 veces con respecto a la banda completa (Full Band). Por ello, la banda completa proporciona un rango de detección 10 veces mayor, lo que hace posible el registro de flujos más caudalosos que saturan la banda baja. Por lo tanto para fines de calibración, la Full Band es la banda más conveniente, permitiendo obtener un hidrograma representativo de los lahares, ya que su registro casi nunca se satura ni va fuera de escala.

Por lo expuesto, la calibración de las estaciones de Juive se realizó utilizando las bandas Low Band y Full Band. Para cada estación AFM se obtuvo dos ecuaciones de correlación (una para la banda baja y otra para la completa) con los datos mencionados anteriormente. A continuación se presentan los resultados para cada estación.

5.3.1. ESTACIÓN JUI-01

➤ Full Band

Se pudo realizar el cálculo de caudal *ex post* para ocho lahares ocurridos en la quebrada Palmaurcu, de los cuales 6 fueron útiles para establecer la correlación (ya que solo de estos se cuenta con los registros AFM), los mismos que se pueden observar en el diagrama de dispersión (Fig. 5.6) y mediante los cuales se obtuvo la regresión lineal que permite estimar el caudal medio para un lahar en cada intervalo de tiempo (5 minutos) en función de los distintos valores de amplitud de señal registrados por esta estación.

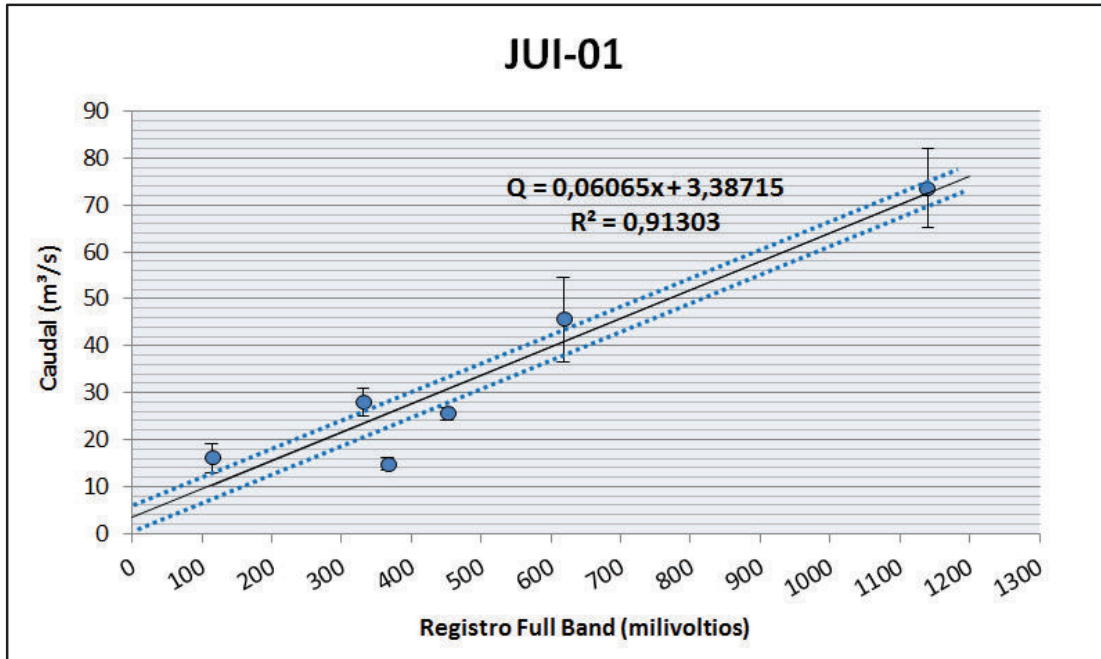


Figura 5.6: Diagrama de dispersión obtenido para la banda Full Band del AFM JUI-01, para cada ejemplo se puede observar la desviación estándar de los valores medios de caudal pico obtenidos para cada lahar de la distribución muestral. Se muestra la recta de regresión lineal que correlaciona las variables y su ecuación correspondiente.

A partir de este modelo matemático lineal la ecuación de la recta de mínimos cuadrados obtenida para la banda Full Band es la siguiente:

$$Q = 0,06065x + 3,38715 \quad [11]$$

Donde Q es el caudal y x representa el valor de amplitud registrado (en milivoltios) por esta estación AFM en esta banda. En este caso se obtuvo una fuerte correlación lineal, el coeficiente de determinación (que mide la bondad de ajuste de los datos) obtenido en este caso es de 0,91.

Para verificar la validez de las estimaciones obtenidas mediante esta ecuación, se realizó una prueba estadística de significancia utilizando el valor de probabilidad p (o p -valor), según el cual valores menores otorgan mayor confianza. El valor p obtenido es de 0,0029 que es altamente significativo ($p < 0,01$), por lo tanto es válida y altamente confiable la relación estadística entre las variables dependiente (Q) e independiente (registro AFM, x).

➤ Low Band

Para la calibración de esta banda fueron útiles 4 de los 6 lahares utilizados para la banda Full Band, debido a que los valores obtenidos en Low Band para los dos lahares que no se incluyen se encuentran saturados y no son representativos. Su diagrama de dispersión se muestra en la Figura 5.7.

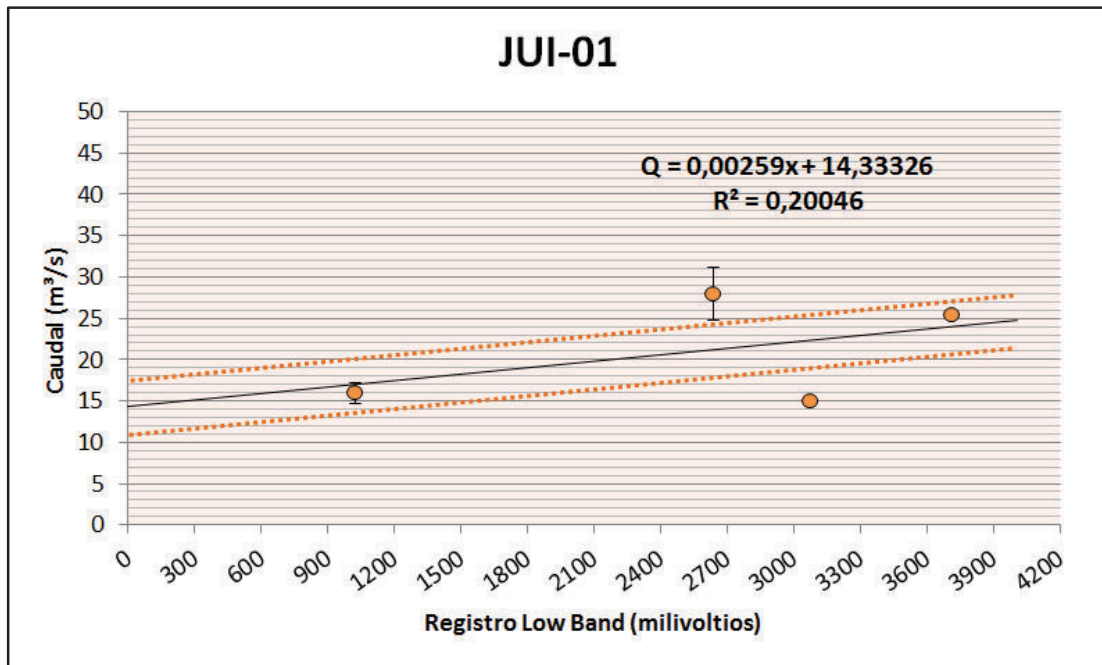


Figura 5.7: Diagrama de dispersión obtenido para la banda Low Band del AFM JUI-01, para cada ejemplo se puede observar la desviación estándar de los valores medios de caudal pico obtenidos para cada lahar de la distribución muestral. Se muestra la recta de regresión lineal que correlaciona las variables y su ecuación correspondiente.

La recta obtenida no muestra una buena relación lineal, que se refleja a través de su coeficiente de determinación de $R^2=0,20$.

La ecuación de regresión lineal que se obtuvo para la banda Low Band de esta estación AFM se muestra a continuación:

$$Q = 0,00259x + 14,33326 \quad [12]$$

La prueba estadística de significancia para los resultados obtenidos en la calibración de esta banda arrojan un valor de probabilidad p de 0,5523 señala que

las estimaciones de caudal obtenidas mediante su ecuación de correlación lineal no son válidas ($p > 0,1$).

5.3.2. ESTACIÓN JUI-02

➤ Full Band

Para establecer la correlación que permita calibrar la banda Full Band de la estación JUI-02, fueron útiles únicamente caudales estimados de 4 lahares, ya que desafortunadamente no se dispone de los datos AFM para otros eventos que también ha sido posible realizar esta estimación. El diagrama de dispersión de estos datos se visualiza a continuación (Fig. 5.8).

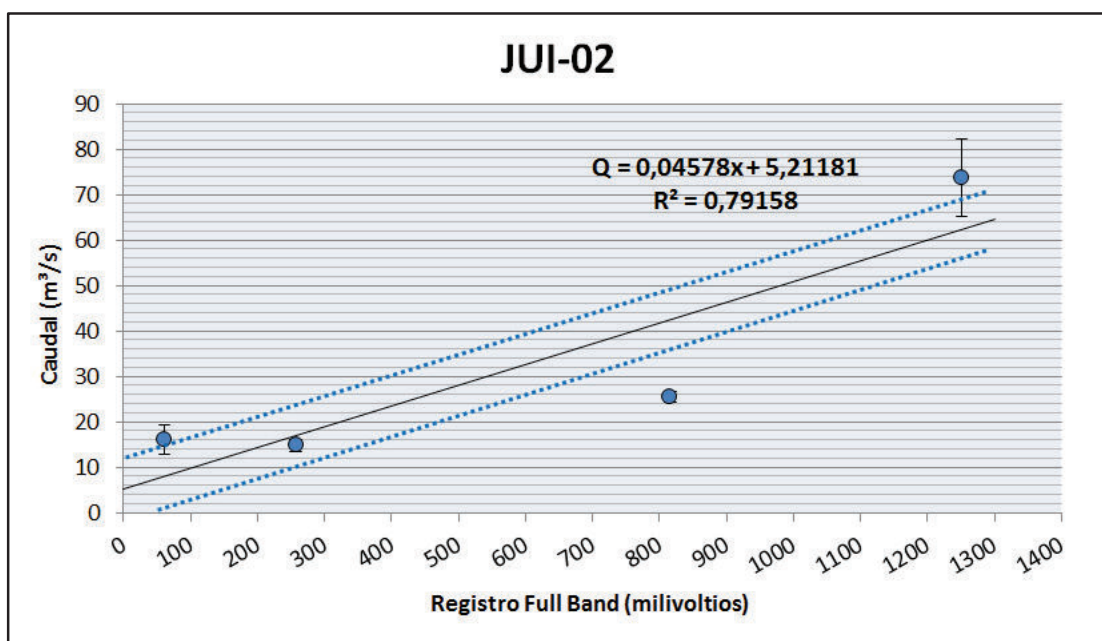


Figura 5.8: Diagrama de dispersión obtenido para la banda Full Band del AFM JUI-02, se puede observar la desviación estándar de los valores medios de caudal pico obtenidos para cada lahar de la distribución muestral. Se muestra la recta de regresión lineal que correlaciona las variables y su ecuación correspondiente.

La recta de regresión observada muestra una buena correlación entre la señal registrada en el AFM y el caudal estimado, hay una buena asociación de los datos (coeficientes de correlación $r=0,89$ y de determinación $R^2=0,79$ respectivamente).

La ecuación que permite obtener el caudal instantáneo medio para un intervalo de 5 minutos mediante el uso del registro de la banda Full Band de la estación JUI-02 es:

$$Q = 0,04578x + 5,21181 \quad [13]$$

El valor de probabilidad p calculado para verificar las estimaciones realizadas mediante la Ec. 10 es $p=0,1$ que se define como significativo ($p \leq 0,1$), por lo cual esta calibración es considerada como válida y confiable para la obtención de caudales.

➤ **Low Band**

Para la calibración de esta banda se utilizaron los mismos 4 lahares que para la Full Band, a pesar de que dos de ellos se encuentran en el punto de saturación típico de la Low Band (3800 cuentas), por lo que su ajuste es de menor calidad (Fig. 5.9).

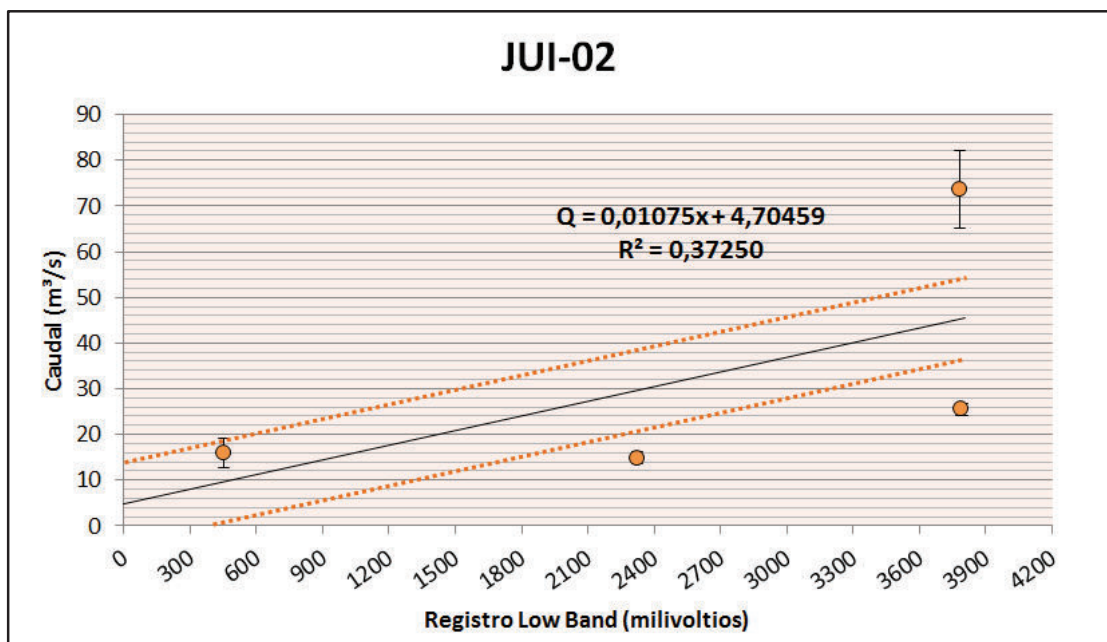


Figura 5.9: Diagrama de dispersión obtenido para la banda Full Band del AFM JUI-02, se puede observar la desviación estándar de los valores medios de caudal pico obtenidos para cada lahar de la distribución muestral. Se muestra la recta de regresión lineal que correlaciona las variables y su ecuación correspondiente.

Con los datos mencionados se determinó la siguiente ecuación:

$$Q = 0,01075 x + 4,70459 \quad [14]$$

Su coeficiente de correlación $r=0,61$ y su coeficiente de determinación $R^2=0,37$ indican una menor intensidad de la asociación de los datos respecto de su banda Full Band y también respecto a las bandas de la estación JUI-01. Adicionalmente de la prueba estadística de significancia arroja una probabilidad de rechazo es $p=0,38$ que muestra que no hay significancia ($p>0,1$), y la ecuación no tiene buena confiabilidad para el uso de las estimaciones de caudales instantáneos medios.

5.3.3. ESTACIÓN JUI-03

➤ Full Band

Anteriormente se había mencionado que la estación JUI-03 es la que menos registros AFM de ocurrencia de lahares ha proporcionado, lo cual no ha sido favorable para una calibración confiable de las bandas de esta estación. En particular para ella se cuenta con sólo 3 lahares de los cuales fue posible estimar su caudal y de los que se tiene también sus registros (Fig.5.10).

Para el caso específico de Full Band se obtuvo la ecuación:

$$Q = 0,00478 x + 15,34434 \quad [15]$$

Se calcularon sus coeficientes de correlación $r=0,80$ y de determinación $R^2=0,64$ describiendo una asociación lineal de menor intensidad comparada con las bandas completas de las estaciones JUI-01 y JUI-02. A esto se suma que el valor p obtenido $p=0,41$ define que actualmente la ecuación 12 no es confiable para realizar estimaciones de caudal instantáneo ($p>0,1$), lo que la convierte en la única estación cuyos registros AFM no pueden cumplir este fin al momento.

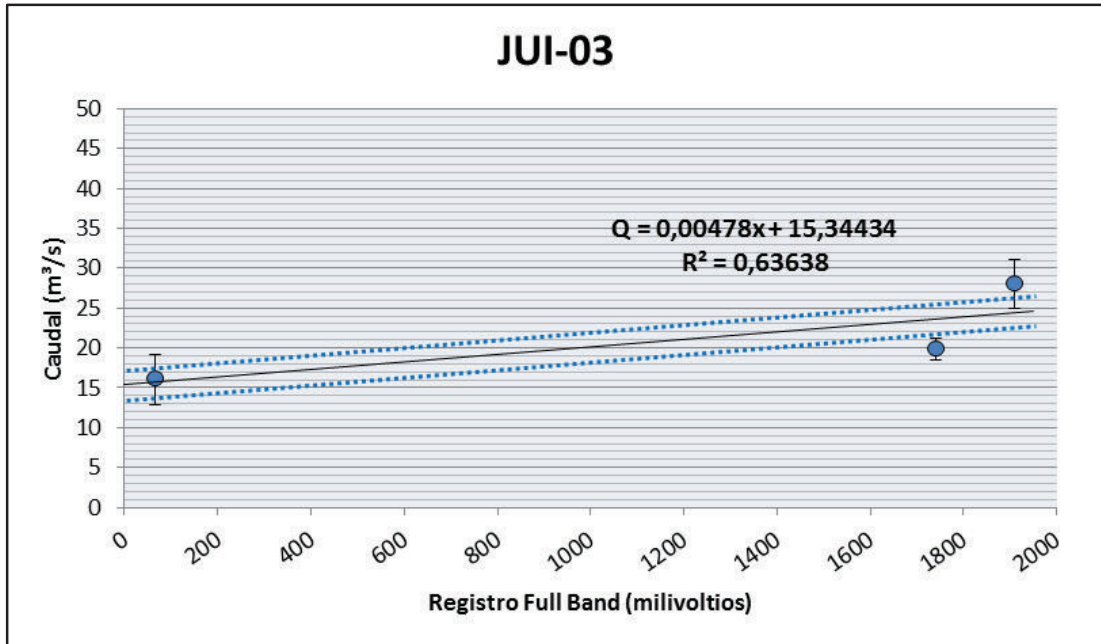


Figura 5.10: Diagrama de dispersión obtenido para la banda Full Band del AFM JUI-03, se puede observar la desviación estándar de los valores medios de caudal pico obtenidos para cada lahar de la distribución muestral. Se muestra la recta de regresión lineal que correlaciona las variables y su ecuación correspondiente.

➤ **Low Band**

De igual forma que para su banda Full Band se dispone únicamente de los datos de 3 lahares para su calibración, y dos de ellos tienen valores de Low Band alrededor de su límite de saturación (Fig. 5.11), lo cual puede afectar a la obtención de una regresión confiable.

Con los datos disponibles se determinó la siguiente ecuación para el cálculo de caudales con los datos de Low Band de la estación JUI-02:

$$Q = 0,00275x + 13,61874 \quad [16]$$

Cuyo coeficiente de correlación es $r=0,75$ y el coeficiente de determinación $R^2=0,57$, que describen una buena intensidad de asociación de datos. Sin embargo, el valor p calculado para este caso $p=0,41$ también sobrepasa el límite de significancia para que se puedan realizar estimaciones que puedan considerarse válidas, ya que este valor define que la ecuación no da buena confianza en los resultados ($p>0,1$).

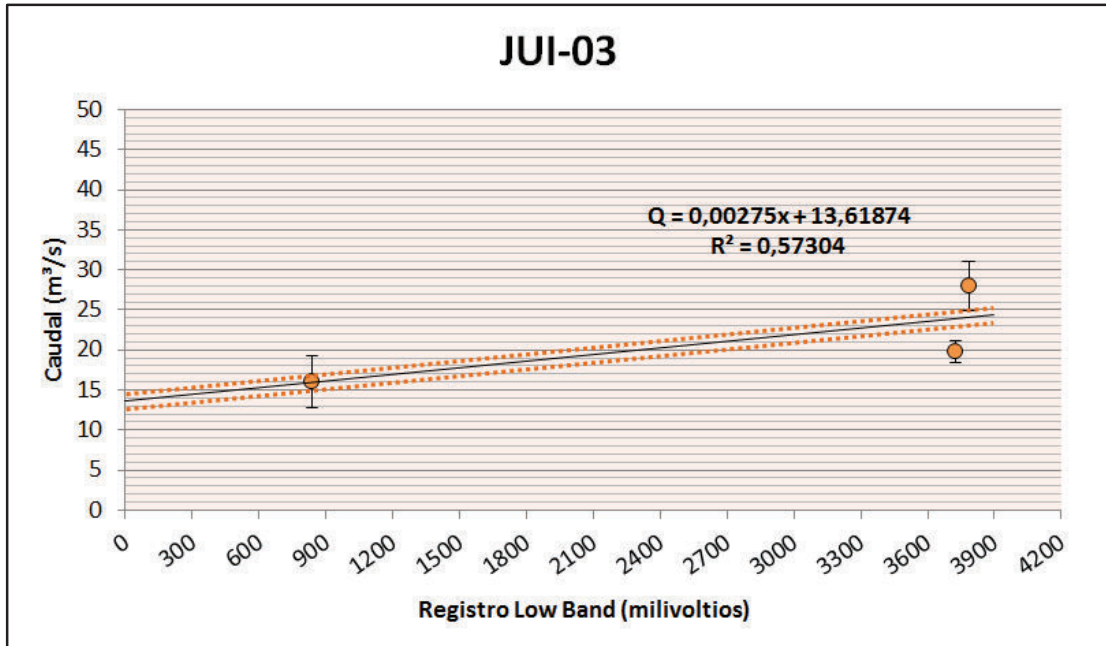


Figura 5.11: Diagrama de dispersión obtenido para la banda Low Band del AFM JUI-03, se puede observar la desviación estándar de los valores medios de caudal pico obtenidos para cada lahar de la distribución muestral. Se muestra la recta de regresión lineal que correlaciona las variables y su ecuación correspondiente.

De las correlaciones presentadas las correspondientes a JUI-01 han sido mejor desarrolladas. Por algunos factores esta estación ha operado con mayor eficiencia y ha sido posible obtener mayor cantidad de datos para su análisis, en cambio para las estaciones JUI-02 y JUI-03 los datos son más restringidos. Se puede constatar además que en un mismo drenaje la pendiente de la recta de las correlaciones para diferentes AFM varía, dependiendo principalmente de su ubicación (distancia a la fuente) y además de las características del sitio donde se encuentra el sensor (material en el que se encuentra enterrado y en la trayectoria que siguen las ondas superficiales).

Evidentemente la señal sísmica se transmite de mejor manera cuando el medio son lavas como en el caso de JUI-01 que sobre paquetes de sedimentos como es el caso de JUI-02 y JUI-03, ya que con datos similares para la primera se obtiene un mejor ajuste de la curva para cada una de sus bandas, lo que se traduce en una correlación más confiable (Figs. 5.6, 5.7, 5.8, 5.9, 5.10 y 5.11).

Las ecuaciones de calibración de la estación JUI-01 permiten estimaciones válidas mediante el uso de la ecuación de regresión para FB, que aporta los resultados más confiables, junto con la regresión obtenida para la misma banda de JUI-02.

Particularmente, en el caso de la estación JUI-03 los resultados alcanzados hacen que en la actualidad lastimosamente no sea posible estimar valores de caudal instantáneo que sean confiables, mediante el uso de los registros AFM de sus bandas Full Band y Low Band.

5.4. ESTIMACIÓN DE CAUDALES Y VOLÚMENES DE LOS LAHARES OCURRIDOS EN LA QUEBRADA PALMAURCU DEL VOLCÁN TUNGURAHUA

Tal como se presentan las correlaciones para las bandas Full Band y Low Band de la estación JUI-01 y Full Band de la estación JUI-02, permiten transformar los datos obtenidos de los AFM en valores de caudal instantáneo que en conjunto constituyen un hidrograma para cualquier lahar que ocurra en la quebrada Palmaurcu y que sea registrado durante su paso por los puntos donde dichas estaciones se encuentran ubicadas, sin necesidad de hacer medidas de campo. Aun así, cuando sea posible se debería procurar obtener nuevos datos para integrarlos a estas correlaciones y actualizarlas o mejorarlas.

Es así que con las ecuaciones de correlación y mediante los datos registrados por los AFM es posible calcular de forma sencilla varios parámetros cuantitativos de cada lahar, como su caudal pico, su caudal medio, y adicionalmente su volumen. El hidrograma de cada lahar se obtiene aplicando la ecuación de calibración a los registros del AFM correspondientes al periodo de tiempo del tránsito del lahar, con lo que se obtiene los caudales instantáneos a lo largo de su duración.

Luego, el volumen se estima mediante el cálculo del área comprendida bajo la curva definida por el respectivo hidrograma (Fig.5.12). Esto se puede realizar a partir de los datos numéricos de caudales; si se multiplica el valor del caudal medio de cada intervalo Δt por dicho intervalo (en este caso 5 minutos) y se suma los resultados individuales se obtiene el volumen total de un lahar determinado.

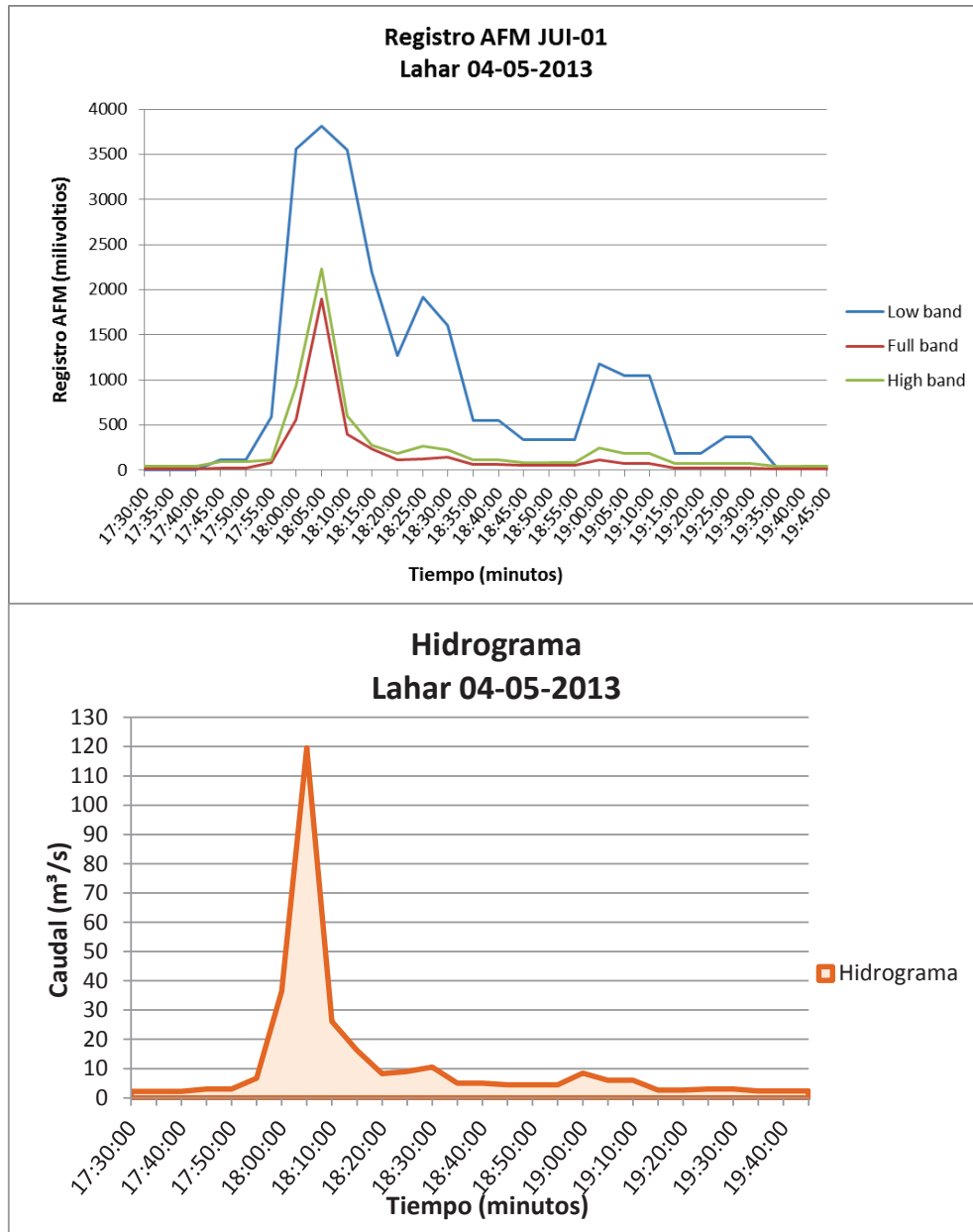


Figura 5.12: Diagrama mostrando la transformación de los registros Full Band del AFM JUI-01 (arriba) a su respectivo hidrograma (abajo) para obtener de él su volumen. El lahar ocurrió el 4 de mayo de 2013.

Se cuenta con registros útiles para 72 de un total de 82 lahares generados, que corresponde al 88%, con los cuales se determinó los parámetros físicos que se encuentran a continuación en la tabla 3, utilizando los datos correspondientes a la banda Full Band del AFM JUI-01.

FECHA	HORA	DURACIÓN	TIPO FLUJO	Q medio	ee (Qm)	Q máx	ee (Qmáx)	VOLUMEN	ee (V)
2012									
25/03/2012	3:20:00	95	DF	15,62	0,75	63,13	3,64	93739,73	4478,85
25/03/2015	18:45:00	95	DF	7,59	0,26	23,28	1,21	45522,98	1537,35
02/04/2012	-	-	-	-	-	-	-	-	-
01/05/2012	0:25:00	220	HP	4,19	0,05	7,75	0,27	56570,75	661,56
17/05/2012	1:40:00	140	DF	5,77	0,15	15,34	0,73	50210,51	1265,4
21/05/2012	9:00:00	95	DF	5,30	0,12	14,12	0,65	31803,95	700,41
28/05/2012	2:00:00	170	HP	3,89	0,03	6,78	0,21	40878,02	324,12
02/06/2012	1:05:00	135	DF	5,16	0,11	21,76	1,12	43317,38	906,87
02/06/2012	14:10:00	170	DF	5,16	0,11	14,49	0,68	54142,17	1133,31
07/06/2012	9:20:00	155	DF	4,12	0,04	7,39	0,24	39594,50	431,79
29/07/2012	9:20:00	230	HP	4,27	0,05	8,00	0,28	60276,98	763,68
13/08/2012	17:25:00	170	DF	4,56	0,07	12,48	0,56	47901,29	752,58
17/10/2012	0:10:00	285	HP	4,11	0,04	8,12	0,29	71454,57	763,68
18/10/2012	17:05:00	115	DF	8,80	0,33	32,62	1,78	63361,17	2377,62
23/10/2012	20:35:00	320	HP	7,02	0,22	26,37	1,40	90546,36	2858,25
05/11/2012	20:50:00	85	DF	3,66	0,02	4,96	0,10	19764,41	89,91
11/11/2012	16:05:00	120	HP	4,36	0,06	6,78	0,21	32663,43	442,89
01/12/2012	16:15:00	170	DF	9,44	0,37	71,74	4,17	99102,02	3876,12
2013									
02/01/2013	-	-	-	-	-	-	-	-	-
04/01/2013	8:55:00	200	HP	5,68	0,14	19,94	1,01	69827,81	1718,28
08/02/2013	23:00:00	175	HP	8,28	0,30	22,67	1,18	89474,09	3226,77
28/02/2013	6:50:00	100	HP	3,68	0,02	4,90	0,09	23158,55	111
21/03/2013	0:30:00	245	HP	3,55	0,01	4,24	0,05	53263,58	149,85
15/04/2013	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22/04/2013	1:00:00	135	-	-	-	-	-	-	-
03/05/2013	17:55:00	60	DF	3,80	0,03	5,27	0,11	14811,05	97,68
04/05/2013	17:40:00	130	DF	12,28	0,54	117,53	6,96	99506,31	4396,71
20/05/2013	0:00:00	185	HP	3,55	0,01	4,30	0,06	40433,01	111
30/05/2013	20:05:00	180	HP	3,58	0,01	4,48	0,07	33301,80	109,89
31/05/2013	3:50:00	190	DF	7,51	0,25	17,46	0,86	87864,60	2942,61
02/06/2013	23:00:00	150	HP	4,43	0,06	8,24	0,30	41216,63	592,74
07/06/2013	9:10:00	340	HP	5,22	0,11	16,73	0,81	106506,78	2282,16
09/07/2013	7:05:00	625	HP	3,88	0,03	9,57	0,38	146738,73	1141,08
14/07/2013	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21/07/2013	-	-	-	-	-	-	-	-	-
25/07/2013	-	-	-	-	-	-	-	-	-
31/07/2013	-	-	-	-	-	-	-	-	-
03/08/2013	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19/09/2013	0:35:00	230	HP	5,07	0,10	12,18	0,54	71448,71	1445,22
24/09/2013	7:50:00	245	DF	3,77	0,02	4,90	0,09	56484,09	346,32
29/09/2013	9:15:00	215	DF	5,73	0,14	14,85	0,70	75660,08	1888,11
14/10/2013	20:25:00	140	HP	4,12	0,04	7,03	0,22	35854,65	389,61
17/11/2013	18:30:00	95	DF	8,48	0,31	30,07	1,63	50890,50	1864,8
17/11/2013	21:55:00	185	HP	6,72	0,20	20,55	1,05	76604,67	2317,68
20/12/2013	4:40:00	105	DF	5,52	0,13	14,43	0,67	36401,73	856,92

FECHA	HORA	DURACIÓN	TIPO FLUJO	Q medio	ee (Qm)	Q máx	ee (Qmáx)	VOLUMEN	ee (V)
2014									
07/01/2014	17:50:00	200	DF	3,93	0,03	7,39	0,24	48339,51	407,37
03/03/2014	-	-	-	-	-	-	-	-	-
08/03/2014	17:55:00	100	DF	5,66	0,12	7,73	0,65	35649,87	731,85
09/03/2014	1:45:00	125	DF	5,97	0,20	9,61	1,14	46544,00	1531,53
11/03/2014	17:05:00	145	DF	5,57	0,09	7,32	0,55	50161,25	846,09
08/04/2014	8:25:00	340	HP	3,74	0,02	4,66	0,08	77355,62	441,78
14/04/2014	22:00:00	205	HP	3,89	0,03	5,57	0,13	49028,15	387,39
24/04/2014	8:30:00	355	HP	5,22	0,11	11,57	0,50	112718,37	2413,14
27/04/2014	12:05:00	200	HP	4,01	0,04	5,45	0,13	49322,04	467,31
02/05/2014	13:00:00	165	HP	3,74	0,02	4,90	0,09	38169,74	220,89
03/05/2014	7:55:00	305	HP	4,16	0,05	7,63	0,26	77429,63	880,23
03/05/2014	22:50:00	140	DF	4,33	0,06	6,90	0,21	37710,54	502,83
10/05/2014	19:10:00	380	HP	6,45	0,19	21,95	1,13	148912,55	4311,24
11/05/2014	22:10:00	190	DF	4,51	0,07	9,33	0,36	52748,25	800,31
16/05/2014	3:25:00	230	HP	3,99	0,04	5,69	0,14	56328,66	522,81
27/05/2014	0:05:00	215	HP	4,25	0,05	8,42	0,31	56100,45	694,86
01/06/2014	5:05:00	260	DF	5,84	0,15	39,90	2,23	94591,52	2423,13
01/06/2014	10:55:00	420	DF	4,88	0,09	12,85	0,58	124563,63	2329,89
02/06/2014	3:55:00	270	DF	4,25	0,05	9,27	0,36	70189,25	872,46
10/06/2014	2:00:00	715	HP	6,79	0,21	19,64	0,99	293122,14	8955,48
14/06/2014	13:30:00	265	HP	4,12	0,04	8,54	0,31	64229,61	694,86
06/07/2014	19:45:00	165	HP	3,67	0,02	4,60	0,07	37460,13	177,6
07/07/2014	13:55:00	180	HP	6,98	0,22	15,46	0,74	77499,00	2434,23
07/07/2014	22:30:00	220	HP	3,97	0,04	5,87	0,15	53641,35	482,85
14/07/2014	10:50:00	115	HP	9,82	1,20	18,40	3,43	70678,91	8617,98
05/08/2014	3:20:00	325	HP	4,14	0,05	8,79	0,33	81876,30	903,54
05/08/2014	12:25:00	310	HP	3,73	0,02	5,02	0,10	70439,97	391,83
08/08/2014	20:25:00	325	HP	4,70	0,08	13,09	0,59	93011,64	1582,86
12/09/2014	3:30:00	325	HP	4,54	0,07	13,27	0,60	89863,91	1390,83
15/09/2014	9:00:00	235	HP	6,72	0,20	24,61	1,30	96755,18	2927,07
07/12/2014	13:20:00	195	DF	8,96	0,34	29,77	1,61	107476,04	4077,03
24/12/2014	22:00:00	210	HP	3,68	0,02	5,15	0,11	47496,99	231,99
2015									
09/01/2015	5:45:00	255	HP	4,39	0,06	8,97	0,34	68487,24	954,6
09/01/2015	20:50:00	185	HP	4,53	0,07	7,51	0,25	51604,74	792,54
20/03/2015	5:35:00	275	HP	4,64	0,08	10,73	0,45	77937,54	1283,16
23/03/2015	17:40:00	115	DF	4,37	0,06	9,09	0,35	31428,95	429,57
29/03/2015	7:05:00	305	HP	4,32	0,06	8,54	0,31	80413,61	1062,27

Tabla 3: En base a los registros de los AFM de Juive es posible precisar su hora de ocurrencia, duración, hora de descarga pico, y en base a las correlaciones obtener parámetros como caudal medio, caudal pico y volumen para cada evento (y sus respectivos errores estándar ee).

Las estimaciones de caudales y volúmenes para los eventos detallados en la Tabla 3 se realizaron mediante la correlación obtenida para el Full Band del AFM JUI-01 debido a su mayor confiabilidad y por ser el que mayor cantidad de datos aportó, a excepción de los lahares que se encuentran resaltados en color celeste, cuyos parámetros se estimaron con la correlación de Full Band JUI-02 debido a que la primera estación no pudo registrar dichos eventos.

Como resultado se obtiene que el volumen promedio de los 72 lahares es de $5,17 \cdot 10^4 \text{ m}^3$, los volúmenes más comunes se encuentran en el rango de $3\text{-}6 \cdot 10^4 \text{ m}^3$. En general los lahares producidos en este drenaje no sobrepasan un volumen total de $1 \cdot 10^5 \text{ m}^3$.

El lahar más voluminoso ocurrió el 10 de junio de 2014 con $2,44 \cdot 10^5 \text{ m}^3$, el cual tuvo un caudal pico de $\sim 19 \text{ m}^3/\text{s}$ y acarrió bloques de 20cm de diámetro en promedio alcanzando un tamaño máximo de 1m (OVT-IGEPN, 2014), su importante volumen se debe principalmente a su duración (715 min). Por otra parte, el lahar con mayor caudal se registró el 4 de mayo de 2013 con $\sim 120 \text{ m}^3/\text{s}$.

La estimación de estos parámetros físicos permitió también calcular el volumen total mínimo de material desalojado por la ocurrencia de lahares en la quebrada Palmaurcu del volcán Tungurahua durante el periodo de estudio, dando un total de $4,86 \cdot 10^6 \pm 1,07 \cdot 10^5 \text{ m}^3$.

CAPÍTULO 6

6. DISCUSIÓN

6.1.LOS AFM COMO INSTRUMENTOS DE DETECCIÓN Y DE CUANTIFICACIÓN DE LAHARES

Existen varios métodos e instrumentos que han sido empleados para la detección de lahares en los volcanes alrededor del mundo. Se ha implementado anclas y cables en los drenajes, se han desarrollado sensores de ultrasonido, radares, sensores ultrasónicos, y distintos sensores sísmicos (*Itakura et al., 2005; Prochaska et al, 2008*).

Un sistema de detección de lahares AFM es muy ventajoso sobre otros sistemas de detección ya que comparados con otros sensores sísmicos, la señal que éstos proveen se encuentra filtrada en los rangos específicos producidos por estos flujos, lo que permite descartar otras causas o fuentes cuando se tiene una anomalía. Sin embargo con un tratamiento adicional de los datos sísmicos obtenidos por ejemplo mediante estaciones sísmicas de banda ancha filtrando únicamente las altas frecuencias y trabajando con su RSAM (Real seismic amplitude measurement), han dado en algunos casos resultados similares (*Itakura et al., 2005; Vásquez et al., 2016*).

Además, los AFM no necesitan reparación constantemente después del paso de cada lahar como en el caso de anclas y cables que deben ser reinstalados (incluso después de lahares menores), lo que puede resultar muy complicado, costoso y sobre todo peligroso en situaciones de emergencia.

Los sensores ultrasónicos y radares pueden proporcionar también excelentes resultados, sin embargo pueden resultar muy costosos. Adicionalmente se debe tomar muchas precauciones acerca de la estructura en la que se monta el sensor sobre el cauce, y que se éste se encuentre a un altura segura donde no sea

alcanzado por el lahar. Por otra parte se deben ubicar hasta una altura específica o pierden precisión en la medida, por lo que debido a las características de algunos ambientes pueden no resultar muy propicios.

Es por esto que, instalados en sitios adecuados y con un apropiado mantenimiento, los AFM pueden dar excelentes resultados sin ser afectados por el paso de los flujos. Por este motivo desde hace años atrás después de que fueran probados por primera vez en 1989-1990 en el Monte Redoubt-Alaska (*Brantley, 1990*) donde tuvieron un buen rendimiento, han sido utilizados en volcanes como el Pinatubo – Filipinas (*Marcial et al, 1996*), Merapi – Indonesia (*Lavigne et al, 2000*), Monte Rainier y el St. Helens - Estados Unidos (*Lockhart y Murray, 2003; USGS, 2014*), el Monte Ruapehu – Nueva Zelanda (*Pierson, 2002; Keys and Green, 2008; Cole et al, 2009*), el Nevado del Ruiz y el Huila – Colombia (*Scott et al, 2001*), el Popocatépetl – México (*Guevara et al, 2003*), Reventador Tungurahua y Cotopaxi – Ecuador (*Andrade et al, 2004; Andrade et al, 2006a; Andrade et al, 2006b*).

Mediante la realización de medidas de campo que permiten la calibración de los AFM es factible cuantificar parámetros físicos de lahares. De sus registros se puede extraer información como caudal instantáneo, caudal medio, caudal pico y volumen. En algunas ocasiones, estaciones AFM secuenciales a lo largo del mismo canal (como en el caso único de la quebrada Palmaurcu en el volcán Tungurahua) pueden también indicar en algunas ocasiones la velocidad frontal de propagación de los flujos (*Lavigne et al., 2000; Marchi et al., 2002; Cole et al., 2009*).

Lamentablemente en este caso no fue posible debido a las cortas distancias a las que se encuentra una estación de otra y a la tasa de envío de datos de las estaciones AFM (5 minutos). Esto ha impedido comparar las diferencias en los tiempos de arribo del frente del lahar o sus caudales pico a cada estación, ya que coinciden generalmente en el mismo intervalo de tiempo. La mejor solución para esto sería programar las estaciones para que envíen datos a intervalos de tiempo más cortos, p.e. cada minuto, o si es posible guardar una distancia suficiente entre estaciones.

Intervalos de tiempo más cortos también pueden contribuir a una mejor calibración de los instrumentos, ya que el valor de amplitud obtenido para cada intervalo de tiempo (5 minutos) puede resultar más preciso y representativo si se configura en menor tiempo. En el caso de la amplitud máxima de la señal que se utilizó para obtener las correlaciones el resultado del caudal máximo puede mejorar, y a la vez los caudales instantáneos que permiten estimar el volumen total.

Entre los otros métodos de detección existentes, los únicos que posiblemente sean más efectivos en la cuantificación de parámetros de lahares son los sensores ultrasónicos y radares que miden constantemente la altura del flujo mientras atraviesa por el cauce y la velocidad de los bloques que van suspendidos en el lahar. El volumen se puede estimar por la altura alcanzada durante toda la duración de lahar que puede medirse con gran precisión (hasta 1cm), conociendo la sección del punto específico donde se ubiquen los instrumentos. No obstante, aunque su empleo requeriría menos esfuerzo para la obtención de resultados, no se tienen muchas referencias del uso de estos instrumentos para este fin en casos reales, sino más bien en experimentos realizados en laboratorio. Adicionalmente, como se había dicho, la infraestructura para su instalación, así como su mantenimiento, podrían ser muy costosos.

En lo referente a otro tipo de sensores sísmicos si se filtra la señal en los rangos de frecuencia específicos producidos por los lahares y se trabaja de forma similar que con los AFMs posiblemente se obtendrán resultados semejantes, con las mismas restricciones.

6.2. LOS AFM Y LOS SISTEMAS DE ALERTAS TEMPRANAS EN CASO DE LAHAR

Para emitir alertas, los AFM son eficientes siempre y cuando sean instalados de modo que den un tiempo prudente de reacción, dependiendo de la distancia entre la fuente, los instrumentos y los sitios de interés como poblados, vías, etc.

La implementación de un Sistema de Alerta Temprana (SAT) es una buena opción para reducir el riesgo por amenaza de lahares. En el caso de los lahares

secundarios (generados por lluvias) son generalmente de tamaños pequeños (volúmenes de $10^4 - 10^6 \text{ m}^3$, caudales pico de hasta $1 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$) pero pueden ocurrir más frecuentemente y de manera menos predecible que los primarios, incluso años después de una erupción. Por esto los AFM constituyen una herramienta importante en el caso del Tungurahua para minimizar el riesgo de forma práctica, donde su uso se ha traducido en una medida eficaz de mitigación debido a los tamaños relativamente pequeños de los flujos y su alta recurrencia. Esto ha permitido probar y mejorar algunos aspectos de los AFM y del SAT, además conocer cómo responde la gente a las alertas en las zonas de amenaza.

Incluso aunque proporcionan alertas automáticas para los eventos más grandes, es fundamental una rápida interpretación de las señales de los AFM y una comunicación eficiente para dar advertencias rápidas y confiables en tiempo real. La coordinación entre múltiples organismos y el personal involucrado es esencial para el éxito de un sistema de alerta temprana, ya que se necesita operación, mantenimiento, interpretación, gestión, agentes de orden, etc.

No obstante, si se quiere explotar el uso de AFMs en otros ambientes para integrarlos a un SAT, hay que prestar mayor atención en varios aspectos que pueden suponer importantes inconvenientes, como en el caso del volcán Cotopaxi.

Cuando se trata de lahares primarios es muy importante una detección oportuna, debido principalmente a la magnitud que pueden alcanzar estos lahares, las extensas zonas que pueden inundar y consecuentemente la gran afectación que son capaces de producir si en su trayecto se encuentran ubicadas zonas densamente pobladas o con importante infraestructura.

En este caso no sólo la detección de estas amenazas es relevante, sino también una determinación de su magnitud, una cuantificación aproximada en tiempo real, ya que de esto dependerá el nivel de afectación que pueden ocasionar. Esto implica un estudio más profundo del establecimiento de la red de monitoreo de lahares, una red más amplia y compleja, e incluso un análisis más exhaustivo del sitio donde se ubique cada estación, asimismo es necesario una mayor experiencia en la interpretación de sus señales.

Por ejemplo, en este proyecto no se analizó la variación en la sensibilidad de detección de acuerdo a la distancia entre el sensor y la fuente. Este es un punto clave a tratar si se requiere su uso en un ambiente distinto al del Tungurahua donde los lahares son generalmente de pequeña magnitud y no sobrepasan la capacidad de los drenajes, por lo que se pueden instalar muy próximos a la quebradas sin riesgo de perder los instrumentos o que se vean parcialmente afectados y logrando una detección eficiente durante el paso de estos flujos, sin tener mayor incertidumbre.

En este sentido la distancia de los sensores a la fuente juega un papel muy importante. La señal sísmica registrada por los AFM se ve influenciada por varios parámetros como la composición de los flujos, el material en el que se encuentra enterrado el sensor y aquellos por los que deban atravesar las ondas superficiales, pero especialmente de la distancia a la que se sitúen dependerá su capacidad de detección, y las condiciones en que sus bandas se saturen, lo cual derivará en la cantidad y calidad de información que pueda adquirirse de sus registros.

El establecer alarmas automáticas confiables en este caso también resultará más complicado, puesto que implica la determinación de la magnitud de los lahares que se pretende alertar, además de una idea de las características de la señal que dichos lahares puedan llegar a producir, para así establecer los umbrales de tiempo y amplitud de la señal que sean indicativos reales de su ocurrencia.

Los AFMs pueden ser útiles en cualquier ambiente y posibilitar una detección oportuna (en tiempo real), permitiendo integrarlos a un SAT, siempre y cuando se tome en cuenta todos los aspectos primordiales a ser considerados para explotar su uso y adaptarlos al ambiente y necesidades específicas de cada sitio. No se puede usar la misma estructura en el diseño de las redes ni los mismos parámetros en la configuración de sus estaciones, ya que son específicas para cada caso, no deben estandarizarse. Pero sobre todo planificar y ejecutar los planes también en base a un análisis detallado de las condiciones propias de cada sitio.

Por otra parte, en caso de lahares primarios como en el del Cotopaxi, uno de los mayores retos será que la respuesta de los instrumentos y en general la aplicación de un SAT no podrán ser probados y mejorados frecuentemente con eventos reales (como en el Tungurahua), ya que aquí se producirán de forma esporádica. Sin embargo, estudios como el presente pueden contribuir al desarrollo de modelos teóricos que si bien no respondan totalmente a todas las incógnitas previo a la generación de estos fenómenos, pueden aportar al desarrollo de modelos empíricos y teóricos que sirvan de base para su aplicación, pudiendo ser comprobados y mejorados en el futuro cuando se tenga la posibilidad de obtener datos reales.

6.3. CLASIFICACIÓN DE LAHARES A PARTIR DE LOS REGISTROS DE LOS AFM

La clasificación realizada para los lahares en la sección 5.2 en realidad no se debe tomar de forma tan rígida, ya que a pesar de que algunos de ellos tienen un comportamiento predominante de una fase de flujo (de escombros o hiperconcentrado) sabemos que un solo evento no puede ser catalogado completamente en una sola categoría, y su dinámica no responde a un modelo específico de flujo.

Es por esto que realizar una clasificación de lahares (en base a su comportamiento) únicamente utilizando los registros AFM no resulta muy sencillo, y aunque en los ejemplos presentados las diferencias son claras (Fig. 5.2), de hecho muchos lahares se encuentran en la media.

Si se realiza un análisis más exhaustivo es claro que su comportamiento y clasificación puede variar a lo largo de su duración. Esto se evidencia en que en el diagrama de relaciones HB/FB vs. LB/FB se puede observar en la mayoría de los casos que no responden a un solo modelo, que lo que se considera como el frente y la cola del lahar son diferentes (Figs. 6.1 y 6.2).

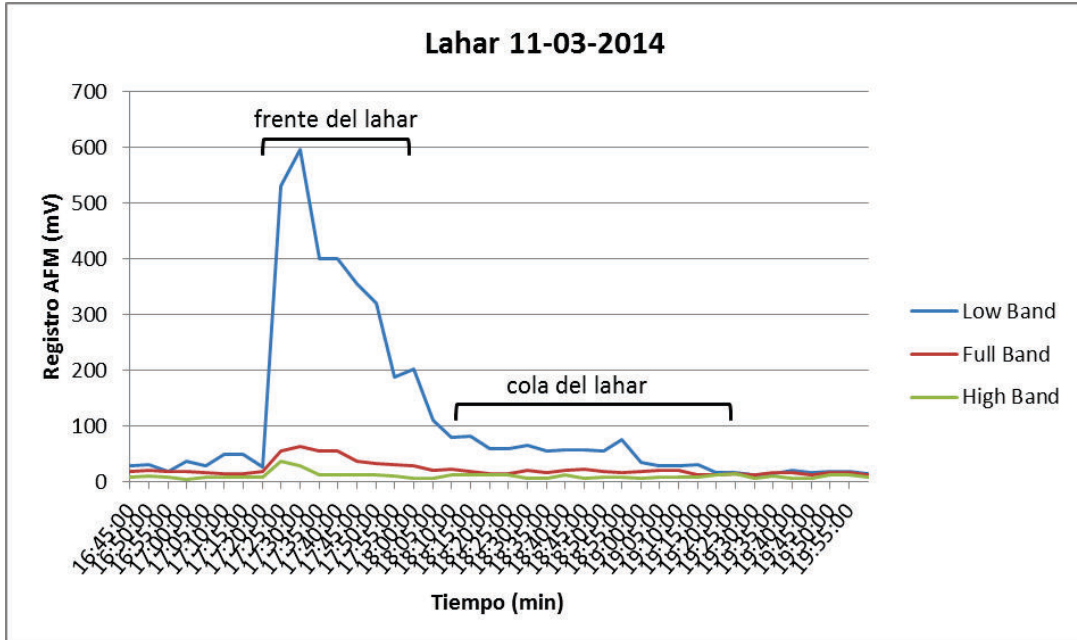


Figura 6.1: Diagrama de los registros AFM correspondientes a las tres bandas de frecuencia para un lahar ocurrido el 11 de marzo de 2014, en el cual se puede apreciar el desarrollo de dicho lahar en el tiempo.

Tomando el ejemplo del lahar ocurrido el 11 de marzo de 2014 (Fig. 6.1) los valores para un solo evento caen en los dos campos que se habían definido. Los puntos correspondientes al frente del lahar (más rico en bloques) se encuentran en color verde donde predominan los valores altos en la relación LB/FB (fase de flujo de escombros), por otra parte los valores correspondientes a la cola del lahar representados en color naranja se concentran en dominios de valores altos para la relación HB/FB lo que da la idea de un flujo más acuoso (flujo hiperconcentrado) ya que la High band es más sensible a estos flujos (Fig. 6.2).

Esto apoya la diferencia de fases y diferente dinámica que presenta cada lahar a lo largo de su duración, y el hecho de que cuando se modela estos flujos las leyes que gobiernan el comportamiento para cada modelo no responden completamente a su realidad.

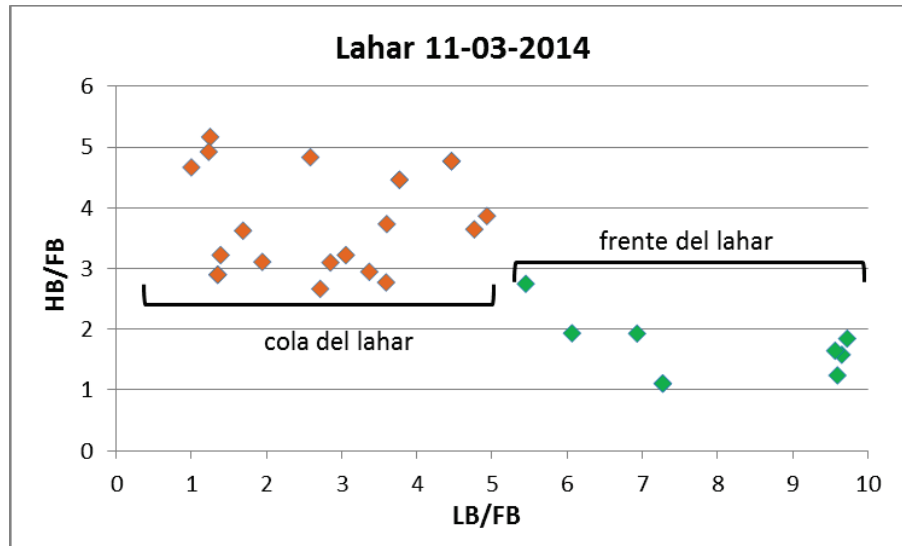


Figura 6.2: Diagrama representando las relaciones HB/FB vs LB/FB para un lahar ocurrido el 11 de marzo de 2014. En él se puede apreciar dos zonas de concentración diferentes de la dispersión de puntos.

6.4. INCERTIDUMBRES EN LA APLICACIÓN DEL MÉTODO DE SOBRE ELEVACIÓN PARA EL CÁLCULO DE VELOCIDADES DE LAHARES

Muchas relaciones teóricas y otras empíricas obtenidas en laboratorio (en que los ejemplos son muy simplificados) se han propuesto para el cálculo de velocidad de los lahares. La experiencia se basa principalmente en observaciones de velocidad realizadas para la parte frontal y superficial de estos flujos.

En general cada modelo de ecuación analiza los lahares como un solo flujo y con un régimen particular, logrando algunos simular su comportamiento un poco mejor que otros. Sin embargo, la mayoría de ellos implican varias dificultades. Algunos no funcionan bien por ausencia de información reológica, la cual es muy difícil de obtener en el campo para estos flujos. Otros se ven muy influenciados por la composición y las propiedades mecánicas de la mezcla (*Rickenmann, 1999*).

Sin embargo una de las razones más importantes para optar por el modelo de sobre elevación para estimar la velocidad posteriormente al paso de un lahar, es el hecho de la dificultad que conlleva la obtención de ciertos parámetros como viscosidad, densidad, límites elásticos, esfuerzos cortantes, coeficientes de

empuje, coeficientes de fricción basal efectiva, etc., introducidas en otras fórmulas (*Prochaska et al., 2008*). Por otra parte incluso si algunas de estas propiedades pueden ser obtenidas en laboratorio, generalmente se derivan solo del estudio de la fracción más fina que puede estar presente en los lahares, y pueden diferir de forma significativa con las propiedades a escala de campo.

Adicionalmente, a pesar de ser un método sencillo algunos autores lo consideran el método más preciso para la estimación de velocidades de lahares, lo que lo convierte a la vez en el método más común reportado para este fin (*Costa, 1984; Pierson, 1985; Reneaud y Dietrich, 1987; Iverson et. Al, 1994; Rickenmann, 1999; Iverson, 2003; Prochaska et al, 2008; Scheild et al, 2014*). Y debido a la complejidad inherente de estos flujos es muy difícil determinar entre los otros métodos un único régimen de comportamiento de flujo que se pueda aplicar de forma general a todos ellos.

No obstante aunque se trata de un método sencillo hay ciertas dificultades y errores asociados a su aplicación. Los principales inconvenientes están ligados a la determinación del radio de curvatura y a la precisión del cálculo del área de la sección mojada.

El radio de curvatura es un concepto subjetivo de un canal natural. En este sentido, la curva no es precisamente la de una circunferencia, sino que tiene una curvatura que varía. Puede aproximarse y estimarse razonablemente como si de una curva perfecta se tratara, pero depende de dónde y cómo se examine la curva y lastimosamente poco se ha orientado como debe estimarse.

Una opción es tomando varios puntos y construyendo la ecuación de una circunferencia, para luego diferenciar dos veces la función (*Thomas y Finley, 1984; Prochaska et al, 2008*):

$$rc = \frac{[1+(dy/dx)^2]^{3/2}}{d^2y/d^2x} \quad [17]$$

Se puede también realizar estimaciones del radio de curvatura con mapas topográficos o fotografías aéreas de donde se tomaron las secciones transversales. Esta estimación es dependiente de la ubicación a lo largo del arco

en donde se mide y de la escala a la que se trabaje, dependiendo de ella se puede tener como resultado varias curvas, sin embargo se escoge una que mejor se ajuste a todos los puntos centrales de la curva; y de acuerdo a la longitud de arco examinada el radio de curvatura puede ser mayor. Una escala más grande y mayor resolución ofrecerán mejores resultados.

Otro método posible es el de medir el azimut normal a la orientación del canal en dos puntos extremos de un arco de curva, y relacionando la longitud de dicho arco al ángulo incluido (*Prochaska et al, 2008*):

$$r_c = \frac{360L}{2\pi\theta} \quad [18]$$

Esta estimación (Ec. 18) depende de la ubicación de los puntos a lo largo del arco en el cual se miden, son sensibles al ángulo incluido, y en el campo este método se centra mucho en las irregularidades locales de la curva y en algunas ocasiones no permite una visión global de la misma, el azimut puede ser incorrectamente referenciado ya que las mediciones se hacen en sitios locales.

Anteriormente, el método de estimación del radio de curvatura utilizado en este proyecto no había sido aplicado, pero los valores obtenidos de los posibles radios no varían significativamente. Además comprende un amplio arco de curva, el cual es el que se ajusta de mejor manera a varios de los puntos que la conforman, o a unos muy cercanos a ellos.

Incertidumbres adicionales en los cálculos de las variables introducidas en la fórmula de la ecuación de vórtice incluyen diferencias que pueden darse en la alineación del canal o en la geometría de la sección en el momento del evento y después de su paso. Una opción para reducir esto es llevar un control de la evolución de los canales, mediante fotografías o alguna otra técnica, que permita tener evidencia de sus condiciones antes y después del tránsito de cada lahar (esto fue útil en las mediciones de campo realizadas en el volcán Tungurahua). Mientras mayor precisión se obtenga en la determinación del perfil mojado, mayor precisión se logrará también en el cálculo del área de la sección y por lo tanto de la velocidad.

Los valores de sobre elevación también pueden ser erróneos y sobre estimarse por salpicaduras del flujo, aun así se ha dicho que la sobre elevación efectiva puede ser la diferencia entre la máxima onda transversal del lado interno y externo de la curva, que es la misma diferencia causada por la sobre elevación sola; y solo afectaría pero de menor forma en el cálculo del área de la sección.

Otra discusión que se ha dado sobre la aplicación de la fórmula de vórtice basada en el principio de sobre elevación es la aplicación de un factor k para tener en cuenta la variación principalmente de la viscosidad en los lahares (*McClung, 2001; Prochaska et al, 2008*) y se ha sugerido diferentes valores para este factor en el rango de 1-5 con el fin de que sobre elevaciones experimentales coincidan con valores teóricos. Sin embargo son muy pocos los estudios que mencionan esta propuesta, y frecuentemente la fórmula se utiliza como fue inicialmente expuesta.

En consecuencia, a pesar de sus limitaciones, el principio de sobre elevación para la estimación de velocidades de lahares parece ofrecer resultados coherentes. No obstante, mediciones directas de velocidad en el momento de su ocurrencia pueden ser muy útiles y proveer cálculos de caudales más exactos, y si de obtener parámetros físicos de lahares se trata, por lo tanto también la obtención de una calibración más precisa de los instrumentos, como se puede apreciar en el trabajo de *Andrade et al. (2004)*.

6.5. INCERTIDUMBRES ASOCIADAS A LA ESTIMACIÓN DE VOLÚMENES DE LAHARES

Adicionalmente de las incertidumbres que implica el cálculo de la velocidad de los lahares, existen otras incertidumbres relacionadas a la estimación de su volumen total.

Esto se atribuye al hecho de que el caudal pico obtenido corresponde en la mayoría de los casos al frente del lahar o a la oleada que lo sigue pocos minutos después que generalmente acarrea clastos de mayor tamaño, lo que posiblemente hace que esta fase del lahar sea mucho más ruidosa. Y se ha

asumido (debido a variaciones difíciles de introducir como en otros métodos) una única dinámica para todo el flujo. Sin embargo, en este mismo capítulo ya se demostró con los registros de los AFM que eso no es correcto.

El cuerpo y la cola del lahar están compuestos de clastos de menor tamaño y en menor porcentaje que el frente, y posiblemente la correlación realizada con el pico del lahar (que es más rico en bloques) no se ajuste de la misma forma al resto del flujo. Para determinar la influencia de este aspecto tal vez una opción razonable sea la de calcular el caudal de un lahar en varios instantes a lo largo de su duración, lo cual en el campo se dificulta ya que es posible únicamente con mediciones directas de la velocidad y de la altura que alcance el flujo. Y por otra parte relacionar los tiempos de las mediciones con los registros correspondientes de los AFM en esos instantes puede ser también un inconveniente.

Otro punto muy complejo a analizar es las variaciones en la sensibilidad del instrumento en las detecciones, relacionadas a la distancia entre el sensor y la fuente. Si unos lahares varían de forma significativa su caudal y por lo tanto su calado respecto de otros, esta distancia entre el sensor y la fuente podría dejar de ser considerada como constante. Por otra parte si las dimensiones de la quebrada se ven afectadas de forma pronunciada (por ejemplo en profundidad) también se puede tener ciertas variaciones en la sensibilidad de las detecciones. En el Tungurahua los drenajes se pueden erosionar de una forma rápida y profundizarse en corto tiempo debido a la acción de los lahares, esto puede traer inconvenientes en el futuro, por lo que sería importante siempre la adquisición de nuevos datos para realizar nuevos ajustes en la curva de correlación y probar periódicamente su validez.

CAPÍTULO 7

7. CONCLUSIONES

- Se generó una base de datos de los lahares ocurridos en la quebrada Palmaurcu entre marzo de 2012 y marzo de 2015, la cual comprende 82 eventos, de los cuales debido a algunos inconvenientes esporádicos que han dejado temporalmente fuera de funcionamiento los AFM, se han detectado 72 de ellos equivalentes al 88% del total.

Durante este tiempo el mayor número de lahares registrados fue en el año 2014 en que ocurrieron 32 flujos de lodo, y específicamente el mes de mayo de este año fue el de mayor ocurrencia con 7 lahares producidos. A lo largo de los tres años, en general se registra mayor número de lahares en los meses comprendidos entre abril y julio, debido a que son generalmente los meses con mayor cantidad de lluvias en la zona.

- En trabajos precedentes ya se había comprobado que la amplitud medida por el AFM es directamente proporcional al caudal instantáneo del lahar (*Tuñgol y Regalado, 1996; Andrade et al., 2006*), por tanto las señales pico (valor máximo) registradas por los instrumentos corresponden a la descarga máxima de los flujos. La calibración de las estaciones de la quebrada Palmaurcu se realizó utilizando las bandas Low Band y Full Band, por lo que se obtuvo dos ecuaciones de correlación para cada estación, que se presentan en la tabla que se muestra a continuación.

Estación	Ecuaciones de Correlación	
	Low Band	Full Band
JUI-01	$0,0067x + 1,4404$	$0,0624x + 2,1514$
JUI-02	$0,0115x + 2,1962$	$0,0479x + 3,1498$
JUI-03	$0,0052x + 5,0453$	$0,0092x + 7,4099$

Mediante un análisis de significancia se determinó que la ecuación de calibración de la estación JUI-01 permite estimaciones válidas para cualquiera de sus dos bandas, principalmente su banda Full Band aporta los resultados más confiables, junto con la regresión obtenida para la misma banda de JUI-02. En el caso de la estación JUI-03 los resultados alcanzados hacen que en la actualidad lastimosamente no sea posible estimar valores de caudal instantáneo que sean confiables, mediante el uso de los registros AFM de sus bandas Full Band y Low Band.

- Es evidente que en base a los registros proporcionados por los AFM también se pueden determinar características y diferencias entre las fases de flujo hiperconcentrado y flujo de escombros debido a sus particularidades que se traducen en patrones de flujo diferentes que son observables en la señal sísmica que producen mostrando hidrogramas particulares para cada caso, y sobre todo variaciones de comportamiento a lo largo del mismo evento.
- El volumen total mínimo de los lahares ocurridos en la quebrada Palmaurcu del volcán Tungurahua durante el periodo de estudio, se estimó en $4,86 \cdot 10^6 \pm 1,07 \cdot 10^5$ m³. En general los lahares producidos en este drenaje, individualmente no sobrepasan un volumen total mínimo de $1 \cdot 10^5$ m³, a excepción de tres ocasiones. El lahar más voluminoso ocurrido tuvo un volumen de $\sim 2,93 \cdot 10^5$ m³ y se originó el 10 de junio de 2014.

REFERENCIAS CITADAS

Ancey, C. (2001). Debris flows and related phenomena. En: *Geomorphological Fluid Mechanics*, 582: 528-5547.

Andrade, D., Hall, M., Ramón, P., Mothes, P., Ruíz, A., Hidalgo, S. (2004). Observación instrumental de lahares en el volcán Tungurahua entre abril-2000 y agosto-2001. *Investigaciones en Geociencias*, Vol 4. p 9-12.

Andrade, D., Hall, M., Mothes, P., Troncoso, L., Eissen, J. P., Samaniego, P., Egred, J., Ramón, P., Rivero, D., Yepes, H. (2005). Los peligros volcánicos asociados con el Cotopaxi. Quito: Corporación Editora Nacional.

Andrade, D., Ramón, P., Mothes, P., Hall, M.L., Samaniego, P., Enriquez, W., Vaca, M., Ramos, C., Yepes, H., Lockhart, A., Marso, J., Ewert, J. (2006). Lahar Early Warning Systems based on Acoustic Flow Monitors in Ecuador. *Cities on Volcanoes 4*. Quito-Ecuador.

Andrade, D., Yepes, H., Samaniego, P., Barba, D., Rivero, D., Ramón, P., Bermeo, J. (2006). Quantification of some lahar flow – parameters based on Acoustic Flow Monitor records in the Volcanoes of Ecuador. *Cities on Volcanoes 4*. Quito-Ecuador.

Brantley, S. (1990). The eruption of Redoubt volcano, Alaska, December 14, 1989-August 31, 1990. U.S. Geological Survey Circular 1061, 33pp.

Cole, S. E., Cronin, S. J., Sherburn, S. & Manville, V. (2009). Seismic signals of snow-slurry lahars in motion: 25 September 2007, Mt Ruapehu, New Zealand. *Geophysical Research Letters*, 36.

Costa, J. E. (1984). Physical geomorphology of debris flows. En: Costa, J. E., Fleisher, P. J. (eds). *Developments and applications of geomorphology*. Springer, Berlin, pp 268–317.

Doyle, E., Cronin, S., Cole, S. & Thouret, J. (2010). The coalescence and organization of lahars at Semeru volcano, Indonesia. *Bulletin of Volcanology*, 72, 961-970.

Eychenne, J., Le Pennec, J., Troncoso, L., Gouhier, M. & Nedelec, J. (2012). Causes and consequences of bimodal grain-size distribution of tephra fall deposited during the August 2006 Tungurahua eruption (Ecuador). *Bulletin of Volcanology*, 74, 187-205.

Fagents, S. A., Baloga, S. M. (2006). Toward a model for the bulking and debulking of lahars. *J Geophys Res Solid Earth* 111.

Guevara, E., Quaas, R., Castelán, G., Ortiz, J., Vásquez, J., Morquecho, C., Alarcón, A. M., Martínez, A., Gómez, A., Espitia, G., Rivera, P., Cárdenas, L. (2003). Instrumentación y monitoreo del volcán Popocatepetl. Informe técnico, Centro Nacional de Prevención de Desastres, 101 pp.

Hadley, K.C., & LaHusen, R.G., 1995. Technical manual for an experimental acoustic flow monitor: U.S. Geological Survey Open-File Report 95-114, 24p.

Hall, M. L., Robin, C., Beate, B., Mothes, P., & Monzier, M. (1999). Tungurahua Volcano, Ecuador: structure, eruptive history and hazards. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 91, 1-21.

Hall, M. L., Steele, A., Mothes, P. & Ruíz, M. (2013). Pyroclastic Density Currents (PDC) of the 16-17 August 2006 Eruptions of Tungurahua Volcano, Ecuador: Geography Registry and Characteristics. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 265, 78-93.

Itakura, Y., Inaba, H., Sawada, T. (2005). A debris-flow monitoring devices and methods bibliography. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5, 971–977.

Iverson, R. M. (1997). The physics of debris flows. *Review in Geophysics* 35: 245–296.

Iverson, R.M. (2003). The debris-flow rheology myth. En: 3rd International Conference on Debris-Flow Hazard Mitigation: Prediction and Assessment, Rickenmann D, Chen CL (eds). Millpress: Rotterdam; 303–314.

Johnson, A.M., Rodine, J.R. (1984). Debris flow. En: Slope Instability, Brundsen D, Prior DB (eds). Wiley: Chichester; 257–361.

Jones, R., Manville, V., Andrade, D. (2015). Probabilistic analysis of rain – triggered lahar initiation at Tungurahua volcano. *Bulletin of Volcanology*, 19 pp.

Keys, H. J., Green, P. M. (2008). Ruapehu lahar New Zealand 18 March 2007: Lessons for hazard assessment and risk mitigation 1995–2007. *Journal of Disaster Research*, 3(4), p. 284-296.

Kumagai, H., Palacios, P., Maeda, T., Castillo, D. B., Nakano, M. (2009). Seismic tracking of lahars using tremor signals. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 183:112–121.

LaHusen, R.G. (1996). Detecting Debris Flows using ground vibrations. U.S. Geological Survey Fact Sheet FS-236-96, pp.1-2.

LaHusen, R., (2005). Debris-flow instrumentation (Chapter 12). En: Jakob, M, Hungr O (eds) Debris-flow hazards and related phenomena. Praxis-Springer, Berlin, p 291–304.

Lavigne, F., Thouret, J.C., Voight, B., Young, K., LaHusen, R., Marso, J., Suwa, H., Sumaryono, A., Sayudi, D.S., Dejean, M. (2000). Instrumental lahar monitoring at Merapi Volcano, Central Java, Indonesia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 100. p 457-478.

Leonard, G., Johnston, D., Paton, D., Christianson, A., Becker, J., Keys, H. (2008). Developing effective warning systems: Ongoing research at Ruapehu volcano, New Zealand. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 172: 199–215.

Le-Pennec, J., Samaniego, P., Eissen, J., Hall, M., Molina, I., Robin, C., Mothes, P., Yepes, H., Ramón, P., Monzier, M., Egred, J. (2005). Los peligros volcánicos asociados con el Tungurahua (Segunda edición modificada y aumentada ed.). Quito: Corporación Editora Nacional.

Le Pennec, J., Jaya, D., Samaniego, P., Ramón, P., Moreno, S., Egred, J., & van der Plicht, J. (2008). The AD 1300–1700 eruptive periods at Tungurahua volcano,

Ecuador, revealed by historical narratives, stratigraphy and radiocarbon dating. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 176, 70-81.

Le Pennec, J., Ruiz, G., Ramón, P., Palacios, E., Mothes, P., & Yepes, H. (2012). Impact of tephra falls on Andean communities: The influences of eruption size and weather conditions during the 1999–2001 activity of Tungurahua volcano, Ecuador. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*.

Marchi, L., Arattano, M. & Deganutti, A. M. (2002). Ten years of debris-flow monitoring in the Moscardo Torrent (Italian Alps). *Geomorphology*, 46, 1-17.

Marcial, S., Melosantos, A., Hadley, K., LaHusen, R., Marso, J. (1996). Instrumental Lahar Monitoring at Mount Pinatubo. En *Fire and Mud: Eruptions and lahars of Mount Pinatubo, Philippines*. Newhall C. y Punongbayan R., eds., p. 1015-1022.

McClung, D. M. (2001). Super-elevation of flowing avalanches around curved channel bends. *Journal of Geophysical Research*, 106:16,489–498.

McFarlin, J., Bustillos, J., Valverde, V., Merino, L., Andrade, G. (2011). Tungurahua volcano: An overview on lahar activity and risk assessment. *Séptimas Jornadas en Ciencias de la Tierra*, 23-25 de noviembre de 2011, Quito, p. 159-162.

Mothes, P., Yepes, H., Hall, M., Ramón, P., Steele, A. & Ruíz, M. (2015). The scientific–community interface over the fifteen-year eruptive episode of Tungurahua Volcano, Ecuador. *Journal of Applied Volcanology*. 15 pp.

Mothes, P., Vallance, J. (2015). Lahars at Cotopaxi and Tungurahua Volcanoes, Ecuador: Highlights from Stratigraphy and Observational Records and Related Downstream Hazards. En: *Volcanic Hazards, Risks, and Disasters*. Elsevier, pp. 141-168.

OVT-IGEPN, (2000-2015). Síntesis semanales de la actividad del volcán Tungurahua. Informes 1-789.

Pierson, T. C., and Scott, K. M. (1985). Downstream dilution of a lahar – transition from debris flow to hyperconcentrated streamflow. *Water Resources Research*, 21, 1511–1524.

Pierson, T., (1985). Initiation and flow behavior of the 1980 Pine Creek and Muddy River lahars, Mount St. Helens, Washington. *Geological Society of America Bulletin*, vol 96, p. 1056-1069.

Pierson, T., Daag, A., Delos Reyes, P., Regalado, T. M., Solidum, R. & Tubianosa, B. (1996). Flow and Deposition of Posteruption Hot Lahars on the East Side of Mount Pinatubo, July-October 1991. En: *Fire and Mud, Eruptions and Lahars of Mt Pinatubo, Philippines*. Newhall C. y Punongbayan R., eds., p 921-951.

Pierson, T., Wood, N., Driedger, C., (2014). Reducing risk from lahar hazards: concepts, case studies, and roles for scientists. *Journal of Applied Volcanology*, 3:16, 25pp.

Prochaska, A., Santi, P., Higgins, J., Cannon, S. (2008). A study of methods to estimate debris flow velocity. En: *Landslides*, 5:431–444.

Reneau, S. L., Dietrich, W. E. (1987). The importance of hollows in debris flow studies; examples from Marin County, California. En: Costa, J. E., Wieczorek, G. F. (eds) *Reviews in engineering geology*, vol VII. Debris flows/avalanches: process, recognition, and mitigation. The Geological Society of America, Boulder, CO, pp 165–180.

Rickenmann, D. (1999). Empirical relationships for debris flows. *Natural Hazards*, 19:47–77.

Scheidl, C., McArdell, B., Rickenmann, D., (2015). Debris flow velocities and super-elevation in a curved laboratory channel. *Can Geotech J* 52: 305–317.

Scott, K.M., Janda, R.J., De la Cruz, E., Gabinete, E., Eto, I., Isada, M., Sexon, M., Hadley, K.C. (1996). Channel and Sedimentation responses to large volumes of 1991 volcanic deposits on the east flank of Mount Pinatubo. En: *Fire and Mud: Eruptions and lahars of Mount Pinatubo, Philippines*, Newhall C. y Punongbayan R., eds., p. 971-988.

Shimokawa, E., (2007). Observation and measurement of debris flow. En: Field survey for debris flow in volcanic area, Shimokawa, E., Jitousono, T., p. 1-6.

Smith, J.G., Dehn, Jonathan, Hoblitt, R.P., LaHusen, R.G., Lowenstern, J.B., Moran, S.C., McClelland, Lindsay, McGee, K.A., Nathenson, Manuel, Okubo, P.G., Pallister, J.S., Poland, M.P., Power, J.A., Schneider, D.J., and Sisson, T.W., (2009). Volcano monitoring, en Young, Rob, and Norby, Lisa, eds., Geological monitoring: Boulder, Colo., Geological Society of America, p. 273–305.

Sorenson, O., Rose, W. & Jaya, D. (2003). Lahar Hazard Modelling at Tungurahua, Ecuador. Geophysical Research Abstracts, 5.

Stone, J., Barclay, J., Simmons, P., Cole, P. D., Loughlin, S. C., Ramón, P. & Mothes, P. (2014). Risk reduction through community-based monitoring: the vigías of Tungurahua, Ecuador. Journal of Applied Volcanology, 3, 11.

Suwa, H. and Okuda, S. (1985). Measurement of debris flows in Japan. Proc. IV Int. Conf. and Field Workshop on Landslides, August 1985, Tokyo, p. 391–400.

Tuñgol, N.M., Regalado, M. T. (1996). Rainfall, Acoustic Flow Monitor Records, and Observed Lahars of the Sacobia River in 1992. En Fire and Mud: Eruptions and lahars of Mount Pinatubo, Philippines, Newhall C. y Punongbayan R., eds., p. 1023-1032.

USGS United States Geological Survey (19 de Septiembre de 2008). How does the lahar-detection system work?. Obtenido de <http://volcanoes.usgs.gov/activity/methods/hydrologic/lahardetection.php>

USGS United States Geological Survey (19 de Septiembre de 2008). Ground-vibration response of an acoustic-flow monitor. Obtenido de <http://volcanoes.usgs.gov/activity/methods/hydrologic/lahardetection.php>

USGS (2014) Monitoring Lahars at Mount Rainier., USGS Volcano Hazards Program website http://volcanoes.usgs.gov/volcanoes/mount_rainier/mount_rainier_monitoring_99.html

- Vallance, J.W., Scott, K.M. (1997). The osceola mudflow from Mount Rainier: sedimentology and hazard implications of a large clay-rich debris flow. *Geol. Soc. Am. Bull.* 109 (2), 143-163.
- Vallance, J.W. (2001). Lahars. En: Sigurdsson, H., Houghton, B.F., McNutt, S.R., Rymer, H., Stix, J. (Eds.), *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press, London, pp. 601-616.
- Vallance, J.W. (2005). Volcanic debris flows. En: Jakob, M., Hungr, O. (Eds.), *Debris Flow Hazards and Related Phenomena*. Praxis-Springer, Berlin and Heidelberg, pp. 247-274.
- Vásconez, R. (2006). Estudio geológico de los flujos de lodo asociados al terremoto del 20 de junio de 1698, que destruyeron la primera ciudad de Ambato. Proyecto de Titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Geólogo, Escuela Politécnica Nacional, Quito – Ecuador. 309 p.
- Vázquez, R., Suriñach, E., Capra, L., Arámbula-Mendoza, R., Reyes-Dávila, G. (2016). Seismic characterisation of lahars at Volcán de Colima, Mexico. *Bulletin of Volcanology*, 78:8.
- Waitt, R. (2013). Lahar. En: Bobrowsky, P. (Ed.), *Encyclopedia of Natural Hazards*. Springer, pp. 579-580.
- Williams, R., Stinton, A.J., Sheridan, M.F. (2008). Evaluation of the Titan2D two-phase flow model using an actual event: case study of the 2005 Vazcu'n valley Lahar. *J.Volcanol. Geotherm. Res.* 177, 760-766.
- Znamensky, D. (2000). Expedite Mud and Debris Flows Rheologic Properties Determination. Jornadas de Investigación JIFI 2000. Segundo Encuentro Académico EAIL-UCV 2000.

ANEXOS

Drenaje: Quebrada Palmaurcu				Ubicación:			
Fecha ocurrencia lahar: 2012-12-01				x	0782507		
Fecha medición: 2012-12-13				y	9844184		
Datos de la curva transitada por el flujo							
Punto	SD	Inc	Az	HD	VD	x	y
C1	14,90	-29,20	23,30	13,00	-7,30	5,14	11,94
C2	14,90	-27,60	40,30	13,20	-6,90	8,54	10,07
C3	14,50	-26,20	59,90	13,00	-6,40	11,25	6,52
C4	11,00	-25,00	91,20	10,00	-5,00	11,30	-0,21
C5	12,40	-22,70	117,40	11,50	-4,80	10,21	-5,29
C6	12,70	-23,10	129,50	11,70	-5,00	9,03	-7,44
Determinación del radio de curvatura							
Triángulos	Xc	Yc	Rc	Triángulos	Xc	Yc	Rc
T-123	2,04	2,29	10,13	T-234	3,08	3,09	8,86
T-124	2,37	2,90	9,46	T-235	0,96	1,47	11,46
T-125	1,62	1,54	10,98	T-236	0,45	1,08	12,09
T-126	1,38	1,11	11,47	T-245	-5,60	0,76	16,93
T-134	2,74	3,09	9,17	T-246	-4,97	0,93	16,31
T-135	1,28	1,44	11,18	T-256	-3,71	0,96	15,26
T-136	0,89	1,01	11,73	T-356	-5,70	2,06	17,53
T-145	-2,97	0,19	14,28	T-456	-1,89	-0,04	13,19
T-146	-2,84	0,26	14,15	T-345	-15,79	2,94	27,27
T-156	-2,54	0,32	13,93	T-346	-11,49	2,98	23,01
PROM						13,92	
D. ST						9,40	

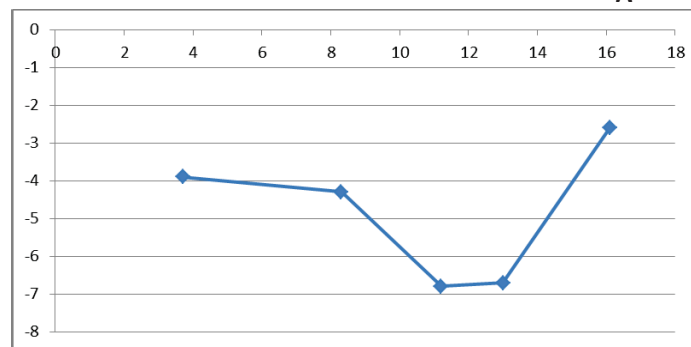
Datos de la sección mojada

Punto	SD	Inc	Az	HD	VD
P1	5,40	-46,60	61,00	3,70	-3,90
P2	9,30	-27,60	63,00	8,30	-4,30
P3	13,10	-31,30	62,00	11,20	-6,80
P4	14,60	-27,20	60,00	13,00	-6,70
P5	16,30	-9,20	63,00	16,10	-2,60

Δh 1,30

L 12,40

A 21,22



Estimación del caudal

Rc	v	Q
10,13	3,23	68,47
9,46	3,12	66,14
10,98	3,36	71,26
11,47	3,43	72,84
11,18	3,39	71,93
11,73	3,47	73,66
14,28	3,83	81,27
14,15	3,81	80,90
13,93	3,78	80,28
11,46	3,43	72,81
12,09	3,52	74,80
16,93	4,17	88,50
16,31	4,09	86,86
15,26	3,96	84,03
17,53	4,24	90,05
13,19	3,68	78,13
Promedio	3,66	77,62

ANEXO 1: Estimación de caudal del lahar ocurrido el 01-12-2012 en la Quebrada Palmarucu (Sección 1).

Drenaje: Quebrada Palmaurcu	Ubicación:	
Fecha ocurrencia lahar: 2012-12-01	x	0782452
Fecha medición: 2012-12-13	y	9843966

Datos de la curva transitada por el flujo

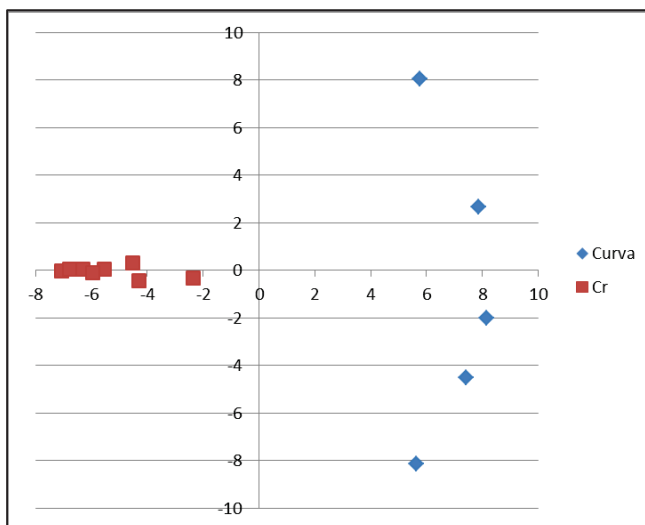
Punto	SD	Inc	Az	HD	VD	x	y
C1	11,90	-33,40	35,60	9,90	-6,50	5,76	8,05
C2	10,20	-35,70	71,20	8,30	-6,00	7,86	2,67
C3	10,10	-33,90	103,80	8,40	-5,60	8,16	-2,00
C4	10,30	-32,10	121,40	8,70	-5,50	7,43	-4,53
C5	11,10	-27,30	145,40	9,90	-5,10	5,62	-8,15

Determinación del radio de curvatura

Triángulos	Xc	Yc	Rc
T-123	-8,87	-0,75	17,08
T-124	-7,08	-0,05	15,18
T-125	-6,80	0,06	14,89
T-134	-4,51	0,29	12,87
T-135	-5,53	0,05	13,84
T-145	-6,30	0,05	14,47
T-234	-2,36	-0,33	10,65
T-235	-4,31	-0,46	12,56
T-245	-5,95	-0,12	14,09
T-345	-9,88	1,84	18,45

PROM 14,41

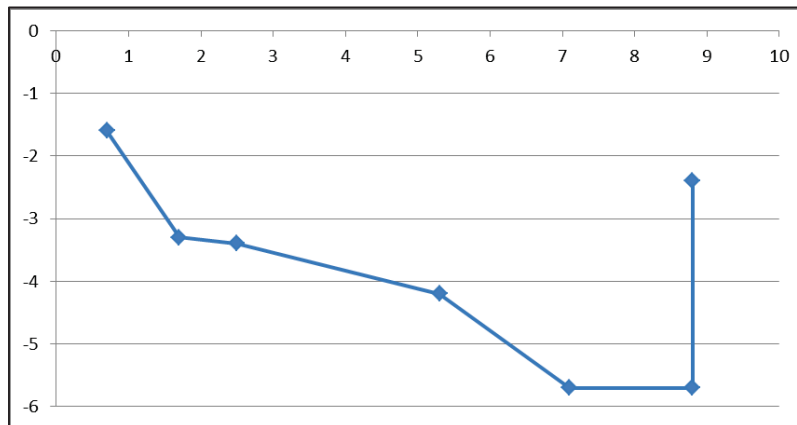
D. ST 2,22



Datos de la sección mojada

Punto	SD	Inc	Az	HD	VD
P1	1,80	-66,00	108,00	0,70	-1,60
P2	3,70	-63,20	109,00	1,70	-3,30
P3	4,20	-53,80	108,00	2,50	-3,40
P4	6,70	-38,70	109,00	5,30	-4,20
P5	9,10	-38,50	107,00	7,10	-5,70
P6	10,40	-33,00	108,00	8,80	-5,70
P7	9,20	-15,30	107,00	8,80	-2,40

Δh 0,80
 L 8,10
 A 18,17



Estimación del caudal

Rc	v	Q
15,18	3,83	69,65
14,89	3,80	68,98
12,87	3,53	64,14
13,84	3,66	66,50
14,47	3,74	67,99
10,65	3,21	58,35
12,56	3,49	63,36
14,09	3,69	67,10
	3,62	65,76

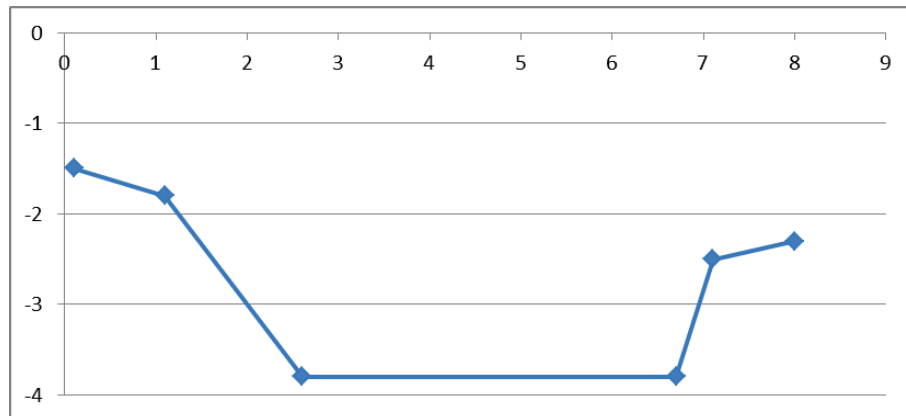
ANEXO 2: Estimación de caudal del lahar ocurrido el 01-12-2012 en la Quebrada Palmaurcu (Sección 2).

Drenaje: Quebrada Palmaurcu				Ubicación:			
Fecha ocurrencia lahar: 2013-02-08				x	0782503		
Fecha medición: 2013-02-09				y	9844128		
Datos de la curva transitada por el flujo							
Punto	SD	Inc	Az	HD	VD	x	y
C1	10,00	-12,40	238,50	9,80	-2,20	-8,36	-5,12
C2	7,00	-20,70	239,00	6,60	-2,50	-5,66	-3,40
C3	4,90	-37,70	254,30	3,90	-3,00	-3,75	-1,06
C4	5,20	-46,00	298,00	3,60	-3,80	-3,18	1,69
C5	6,60	-36,60	317,60	5,30	-3,90	-3,57	3,91
C6	8,90	-27,90	327,60	7,90	-4,20	-4,23	6,67
Determinación del radio de curvatura							
Triángulos	Xc	Yc	Rc	Triángulos	Xc	Yc	Rc
T-123	-12,17	3,83	9,73	T-234	-9,36	1,55	6,19
T-124	-11,32	2,51	8,19	T-235	-9,47	1,64	6,32
T-125	-11,06	2,09	7,70	T-236	-10,42	2,41	7,51
T-126	-11,34	2,54	8,22	T-245	-9,64	1,69	6,46
T-134	-10,34	1,76	7,16	T-246	-11,41	2,55	8,27
T-135	-10,26	1,67	7,05	T-256	-13,90	2,90	10,37
T-136	-10,89	2,38	7,92	T-345	-9,84	1,65	6,66
T-145	-10,13	1,60	6,95	T-346	-12,75	2,26	9,59
T-146	-11,38	2,55	8,25	T-356	-17,89	1,95	14,45
T-156	-12,99	3,12	9,45	T-456	-45,95	-4,76	43,26
PROM							9,99
D. ST							8,05

Datos de la sección mojada

Punto	SD	Inc	Az	HD	VD
P1	8,30	-16,30	262,00	8,00	-2,30
P2	7,50	-19,40	262,30	7,10	-2,50
P3	7,70	-29,60	265,40	6,70	-3,80
P4	4,60	-55,60	263,30	2,60	-3,80
P5	2,10	-57,40	260,60	1,10	-1,80
P6	1,50	-85,30	228,30	0,10	-1,50

Δh 0,80
 L 7,90
 A 9,84



Estimación del caudal

Rc	v	Q	Rc	v	Q
9,73	3,11	30,57	6,19	2,48	24,38
8,19	2,85	28,05	6,32	2,50	24,64
7,70	2,76	27,21	7,51	2,73	26,86
8,22	2,86	28,11	6,46	2,53	24,92
7,16	2,67	26,23	8,27	2,87	28,20
7,05	2,65	26,03	10,37	3,21	31,57
7,92	2,80	27,58	6,66	2,57	25,30
6,95	2,63	25,85	9,59	3,08	30,36
8,25	2,86	28,16	14,45	3,79	37,27
9,45	3,06	30,14			
				2,84	27,97

ANEXO 3: Estimación de caudal del lahar ocurrido el 08-02-2013 en la Quebrada Palmaurcu (Sección 1).

Drenaje: Quebrada Palmaurcu				Ubicación:			
Fecha ocurrencia lahar: 2013-05-04				x	0782507		
Fecha medición: 2013-05-05				y	9844184		
Datos de la curva transitada por el flujo							
Punto	SD	Inc	Az	HD	VD	x	y
C1	6,60	-34,40	348,00	5,50	-3,70	-1,14	5,38
C2	6,00	-40,00	25,10	4,60	-3,80	1,95	4,17
C3	5,40	-41,90	67,70	4,00	-3,60	3,70	1,52
C4	5,40	-35,60	91,70	4,40	-3,20	4,40	-0,13
C5	5,50	-31,90	118,90	4,60	-2,90	4,03	-2,22
C6	6,10	-25,10	143,20	5,50	-2,60	3,29	-4,40
Determinación del radio de curvatura							
Triángulos	Xc	Yc	Rc	Triángulos	Xc	Yc	Rc
T-123	-1,47	0,01	5,38	T-234	-8,38	-4,57	13,53
T-124	-1,79	-0,81	6,22	T-235	-2,90	-0,94	7,05
T-125	-1,68	-0,55	5,95	T-236	-2,99	-1,00	7,14
T-126	-1,79	-0,81	6,22	T-245	-0,86	-0,28	5,26
T-134	-3,44	-2,48	8,19	T-246	-1,79	-0,81	6,23
T-135	-2,17	-0,88	6,34	T-256	-3,15	-1,02	7,28
T-136	-2,30	-1,05	6,53	T-345	0,98	-0,60	3,45
T-145	-1,20	-0,22	5,60	T-346	-0,37	-1,18	4,89
T-146	-1,79	-0,81	6,23	T-356	-3,30	-0,98	7,43
T-156	-2,64	-1,20	6,75	T-456	-10,43	1,42	14,91
						PROM	6,69
						D. ST	2,25

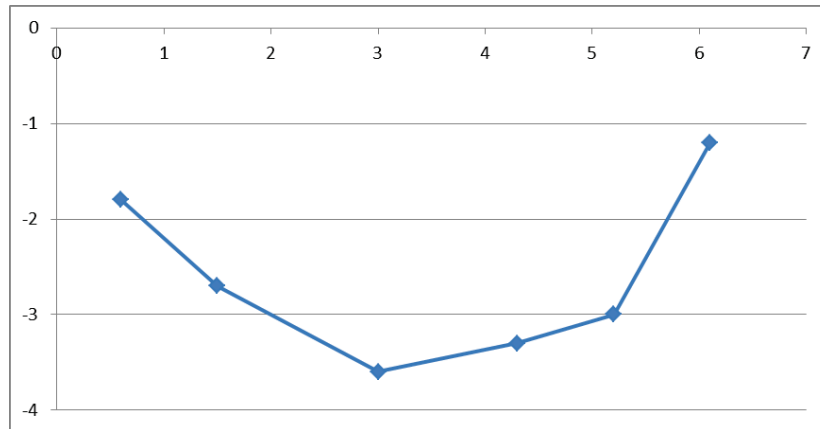
Datos de la sección mojada

Punto	SD	Inc	Az	HD	VD
P1	1,90	-72,90	100,10	0,60	-1,80
P2	3,10	-61,10	85,00	1,50	-2,70
P3	4,70	-50,10	83,00	3,00	-3,60
P4	5,50	-37,50	77,00	4,30	-3,30
P5	6,00	-29,60	80,20	5,20	-3,00
P6	6,30	-11,40	82,00	6,10	-1,20

Δh 0,60

L 5,50

A 7,71



Estimación del caudal

Rc	v	Q	Rc	v	Q
5,38	2,40	18,50	6,75	2,69	20,70
6,22	2,58	19,88	7,05	2,74	21,16
5,95	2,52	19,45	7,14	2,76	21,31
6,22	2,58	19,89	5,26	2,37	18,28
8,19	2,96	22,81	6,23	2,58	19,89
6,34	2,60	20,08	7,28	2,79	21,51
6,53	2,64	20,37	4,89	2,29	17,62
5,60	2,45	18,86	7,43	2,82	21,73
6,23	2,58	19,89			
				2,61	20,11

ANEXO 4: Estimación de caudal del lahar ocurrido el 04-05-2013 en la Quebrada Palmaurcu (Sección 1).

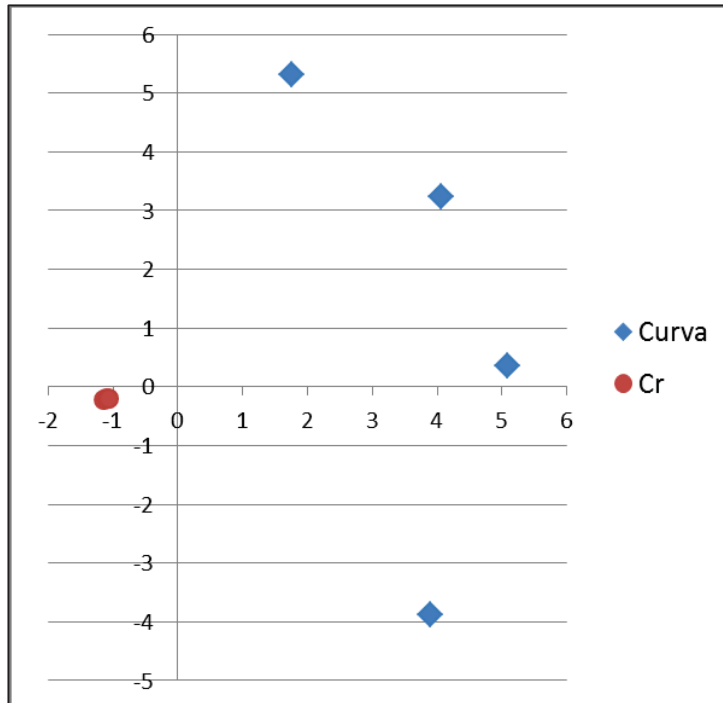
Drenaje: Quebrada Palmaurcu	Ubicación:	
Fecha ocurrencia lahar: 2013-05-04	x	0782550
Fecha medición: 2013-05-05	y	9844122

Datos de la curva transitada por el flujo

Punto	SD	Inc	Az	HD	VD	x	y
C1	6,60	-31,70	18,20	5,60	-3,50	1,75	5,32
C2	6,10	-32,60	51,40	5,20	-3,30	4,06	3,24
C3	5,90	-31,00	85,90	5,10	-3,10	5,09	0,36
C4	6,20	-27,40	135,00	5,50	-2,80	3,89	-3,89

Determinación del radio de curvatura

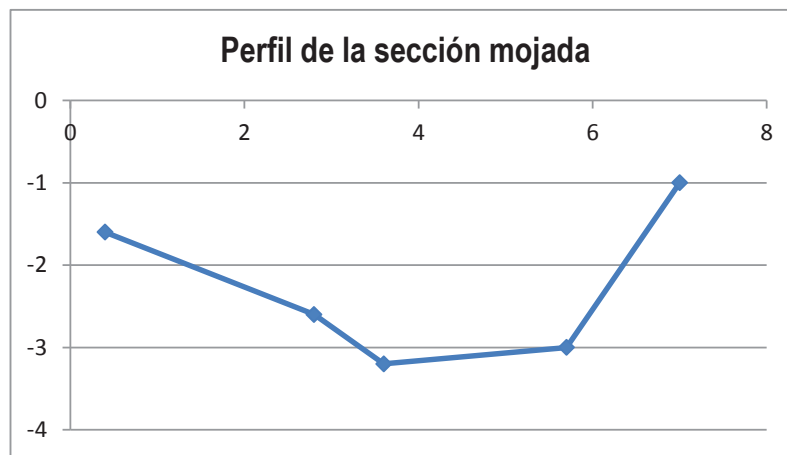
Triángulos	Xc	Yc	Rc
T-123	-1,13	-0,22	6,25
T-124	-1,11	-0,20	6,21
T-134	-1,09	-0,19	6,20
T-234	-1,06	-0,20	6,18
PROM			6,21
D. ST			0,03



Datos de la sección mojada

Punto	SD	Inc	Az	HD	VD
P1	1,70	-76,30	77,00	0,40	-1,60
P2	3,80	-43,00	75,00	2,80	-2,60
P3	4,80	-42,00	75,00	3,60	-3,20
P4	6,50	-27,70	74,00	5,70	-3,00
P5	7,10	-7,80	76,00	7,00	-1,00

Δh 0,60
L 6,60
A 7,89

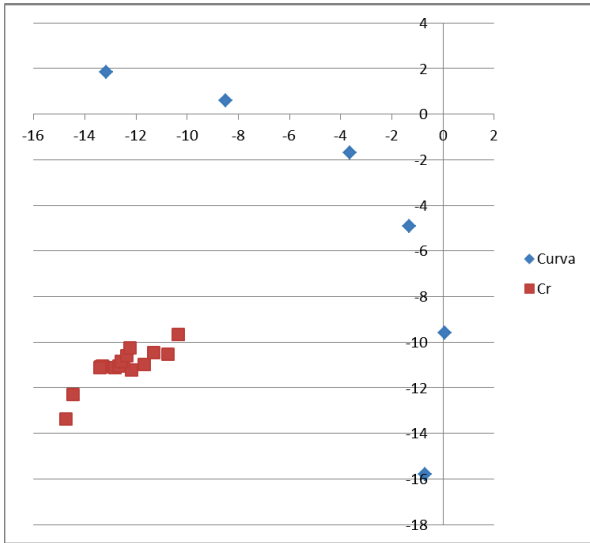


Estimación del caudal

Rc	v	Q
6,25	2,36	18,62
6,21	2,35	18,57
6,20	2,35	18,54
6,18	2,35	18,51
	2,35	18,56

ANEXO 5: Estimación de caudal del lahar ocurrido el 04-05-2013 en la Quebrada Palmaurcu (Sección 2).

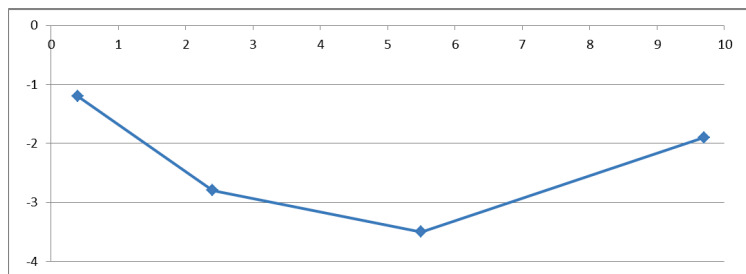
Drenaje: Quebrada Palmaurcu				Ubicación:			
Fecha ocurrencia lahar: 2013-07-09				x	0782494		
Fecha medición: 2013-07-19				y	9843436		
Datos de la curva transitada por el flujo							
Punto	SD	Inc	Az	HD	VD	x	y
C1	15,80	-1,30	182,50	15,80	-0,40	-0,69	-15,78
C2	9,70	-8,20	179,50	9,60	-1,40	0,08	-9,60
C3	5,60	-24,40	195,00	5,10	-2,30	-1,32	-4,93
C4	4,90	-36,40	245,00	4,00	-2,90	-3,63	-1,69
C5	9,50	-26,30	274,00	8,50	-4,20	-8,48	0,59
C6	14,00	-18,80	278,00	13,30	-4,50	-13,17	1,85
Determinación del radio de curvatura							
Triángulos	Xc	Yc	Rc	Triángulos	Xc	Yc	Rc
T-123	-13,29	-11,07	13,45	T-234	-13,42	-11,11	13,59
T-124	-13,33	-11,06	13,49	T-235	-11,30	-10,47	11,42
T-125	-12,18	-11,21	12,37	T-236	-12,57	-10,85	12,72
T-126	-12,81	-11,13	12,99	T-245	-10,34	-9,66	10,42
T-134	-13,37	-11,07	13,53	T-246	-12,37	-10,61	12,49
T-135	-11,69	-10,98	12,01	T-256	-14,73	-13,36	15,29
T-136	-12,68	-11,03	12,89	T-345	-9,81	-8,54	9,22
T-145	-10,75	-10,53	11,35	T-346	-12,24	-10,26	12,15
T-146	-12,47	-10,89	12,76	T-356	-15,38	-15,76	17,75
T-156	-14,45	-12,29	14,20	T-456	-18,26	-26,50	28,80
PROM							13,64
D. ST							3,98



Datos de la sección mojada

Punto	SD	Inc	Az	HD	VD
P1	1,20	-72,40	217,00	0,40	-1,20
P2	3,70	-49,00	226,00	2,40	-2,80
P3	6,50	-32,20	230,00	5,50	-3,50
P4	9,90	-10,80	232,00	9,70	-1,90

Δh 0,70
 L 9,30
 A 8,74



Estimación del caudal

Rc	v	Q	Rc	v	Q
13,45	3,15	33,68	14,20	3,24	34,59
13,49	3,15	33,72	13,59	3,17	33,85
12,37	3,02	32,29	11,42	2,90	31,03
12,99	3,09	33,08	12,72	3,06	32,74
13,53	3,16	33,77	10,42	2,77	29,64
12,01	2,98	31,81	12,49	3,04	32,45
12,89	3,08	32,97	15,29	3,36	35,90
11,35	2,89	30,93	12,15	2,99	32,00
12,76	3,07	32,79			
Promedio				3,07	32,78

ANEXO 6: Estimación de caudal del lahar ocurrido el 09-07-2013 en la Quebrada Palmaurcu (Sección 1).

Drenaje: Quebrada Palmaurcu				Ubicación:			
Fecha ocurrencia lahar: 2014-05-11				x	0782458		
Fecha medición: 2014-05-13				y	9843980		
Datos de la curva transitada por el flujo							
Punto	SD	Inc	Az	HD	VD	x	y
C1	11,40	-27,80	54,30	10,10	-5,30	8,20	5,89
C2	8,40	-35,70	64,00	6,80	-4,90	6,11	2,98
C3	7,20	-41,70	79,50	5,40	-4,80	5,31	0,98
C4	6,90	-38,30	97,30	5,40	-4,30	5,36	-0,69
C5	7,90	-31,50	106,00	6,80	-4,10	6,54	-1,87
C6	9,20	-25,70	111,00	8,30	-4,00	7,75	-2,97
Determinación del radio de curvatura							
Triángulos	Xc	Yc	Rc	Triángulos	Xc	Yc	Rc
T-123	16,77	-2,46	11,97	T-123	16,77	-2,46	11,97
T-124	14,16	-0,59	8,81	T-124	14,16	-0,59	8,81
T-125	11,89	1,04	6,10	T-125	11,89	1,04	6,10
T-126	11,56	1,28	5,71	T-126	11,56	1,28	5,71
T-134	12,02	0,34	6,74	T-134	12,02	0,34	6,74
T-135	10,22	1,40	4,93	T-135	10,22	1,40	4,93
T-136	10,32	1,34	5,02	T-136	10,32	1,34	5,02
T-145	8,92	1,68	4,28	T-145	8,92	1,68	4,28
T-146	9,62	1,38	4,74	T-146	9,62	1,38	4,74
T-156	10,55	1,33	5,13	T-156	10,55	1,33	5,13
PROM							6,49
D. ST							6,39

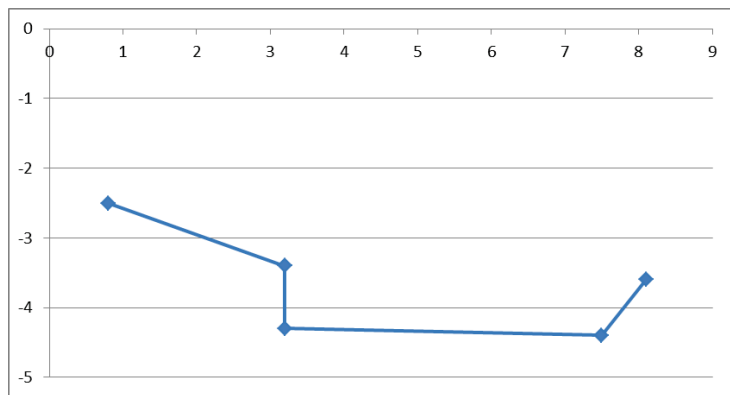
Datos de la sección mojada

Punto	SD	Inc	Az	HD	VD
P1	2,60	-71,30	84,40	0,80	-2,50
P2	4,70	-46,50	84,10	3,20	-3,40
P3	5,40	-53,30	84,10	3,20	-4,30
P4	8,70	-30,20	77,10	7,50	-4,40
P5	8,90	-24,00	77,00	8,10	-3,60

Δh 1,10

L 7,30

A 5,92



Estimación del caudal

Rc	v	Q	Rc	v	Q
11,97	4,20	24,88	4,70	2,63	15,59
8,81	3,61	21,35	3,44	2,25	13,34
6,10	3,00	17,76	3,84	2,38	14,10
5,71	2,90	17,19	2,92	2,08	12,30
6,74	3,16	18,68	3,64	2,32	13,73
4,93	2,70	15,97	4,55	2,59	15,34
5,02	2,72	16,12	2,27	1,83	10,84
4,28	2,51	14,88	3,31	2,21	13,08
4,74	2,64	15,65	5,60	2,87	17,02
5,13	2,75	16,30			
Promedio				2,70	16,01

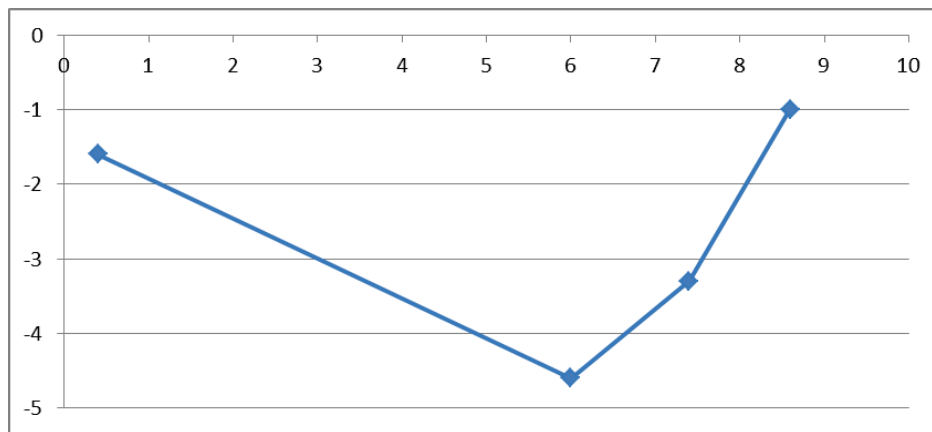
ANEXO 7: Estimación de caudal del lahar ocurrido el 11-05-2014 en la Quebrada Palmaurcu (Sección 1).

Drenaje: Quebrada Palmaurcu				Ubicación:			
Fecha ocurrencia lahar: 2014-06-01				x	0782701		
Fecha medición: 2014-06-03				y	9844290		
Datos de la curva transitada por el flujo							
Punto	SD	Inc	Az	HD	VD	x	y
C1	10,50	-33,80	17,60	8,80	-5,90	2,66	8,39
C2	8,70	-38,00	355,10	6,90	-5,40	-0,59	6,87
C3	7,50	-40,70	320,50	5,70	-4,90	-3,63	4,40
C4	7,20	-34,00	284,20	5,90	-4,00	-5,72	1,45
C5	7,50	-24,60	262,60	6,80	-3,10	-6,74	-0,88
C6	8,60	-15,00	242,20	8,30	-2,20	-7,34	-3,87
Determinación del radio de curvatura							
Triángulos	Xc	Yc	Rc	Triángulos	Xc	Yc	Rc
T-123	7,38	-6,00	15,14	T-234	6,67	-5,13	14,03
T-124	7,22	-5,64	14,75	T-235	6,86	-5,36	14,32
T-125	7,22	-5,64	14,75	T-236	6,76	-5,24	14,17
T-126	7,14	-5,48	14,57	T-245	7,21	-5,64	14,75
T-134	6,96	-5,33	14,38	T-246	6,85	-5,29	14,26
T-135	7,05	-5,47	14,53	T-256	6,51	-5,08	13,91
T-136	6,96	-5,33	14,37	T-345	7,68	-5,85	15,26
T-145	7,21	-5,64	14,75	T-346	6,95	-5,32	14,36
T-146	6,95	-5,33	14,37	T-356	6,33	-5,05	13,72
T-156	6,70	-5,12	14,10	T-456	5,49	-4,88	12,87
						PROM	14,37
						D. ST	0,52

Datos de la sección mojada

Punto	SD	Inc	Az	HD	VD
P1	1,70	-74,90	267,30	0,40	-1,60
P2	7,50	-37,80	298,30	6,00	-4,60
P3	8,20	-24,10	302,20	7,40	-3,30
P4	8,70	-6,60	304,10	8,60	-1,00

Δh 0,60
 L 8,20
 A 14,81



Estimación del caudal

Rc	v	Q	Rc	v	Q
14,75	3,25	48,17	14,03	3,17	46,97
14,75	3,25	48,16	14,32	3,20	47,47
14,57	3,23	47,87	14,17	3,19	47,21
14,38	3,21	47,55	14,75	3,25	48,16
14,53	3,23	47,81	14,26	3,20	47,36
14,37	3,21	47,54	13,91	3,16	46,77
14,75	3,25	48,16	15,26	3,31	48,99
14,37	3,21	47,54	14,36	3,21	47,53
14,10	3,18	47,09			
Promedio				3,22	47,67

ANEXO 8: Estimación de caudal del lahar ocurrido el 01-06-2014 en la Quebrada Palmaurcu (Sección 1).

Drenaje: Quebrada Palmaurcu	Ubicación:	
Fecha ocurrencia lahar: 2014-06-01	x	0782668
Fecha medición: 2014-06-03	y	9844253

Datos de la curva transitada por el flujo

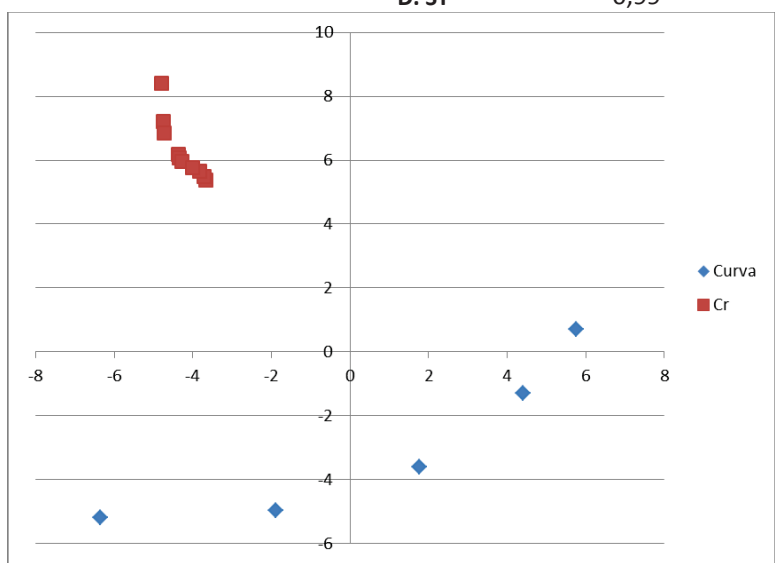
Punto	SD	Inc	Az	HD	VD	x	y
C1	8,70	-19,70	230,80	8,20	-2,90	-6,35	-5,18
C2	6,10	-30,40	200,80	5,30	-3,10	-1,88	-4,95
C3	5,50	-42,50	153,90	4,00	-3,70	1,76	-3,59
C4	6,20	-42,30	106,40	4,60	-4,20	4,41	-1,30
C5	7,30	-38,00	82,90	5,80	-4,50	5,76	0,72

Determinación del radio de curvatura

Triángulos	Xc	Yc	Rc
T-123	-4,81	8,41	13,68
T-124	-4,75	7,22	12,51
T-125	-4,73	6,85	12,15
T-134	-4,37	6,18	11,53
T-135	-4,35	6,08	11,44
T-145	-4,29	5,95	11,32
T-234	-3,67	5,37	10,48
T-235	-3,71	5,49	10,61
T-245	-3,83	5,65	10,78
T-345	-4,02	5,77	11,00

PROM 11,55

D. ST 0,99



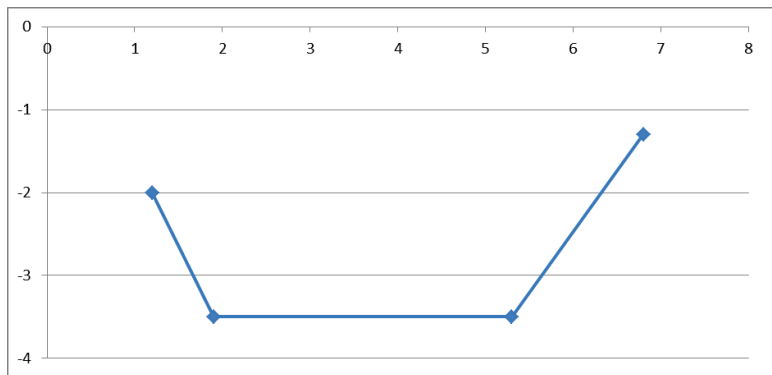
Datos de la sección mojada

Punto	SD	Inc	Az	HD	VD
P1	2,30	-59,90	161,50	1,20	-2,00
P2	4,00	-61,30	155,90	1,90	-3,50
P3	6,30	-33,40	158,20	5,30	-3,50
P4	6,90	-10,60	158,10	6,80	-1,30

Δh 0,70

L 5,60

A 8,19



Estimación del caudal

Rc	v	Q
12,51	3,91	32,04
12,15	3,86	31,57
11,53	3,76	30,77
11,44	3,74	30,64
11,32	3,72	30,49
10,61	3,60	29,50
10,78	3,63	29,74
11,00	3,67	30,05
Promedio	3,74	30,60

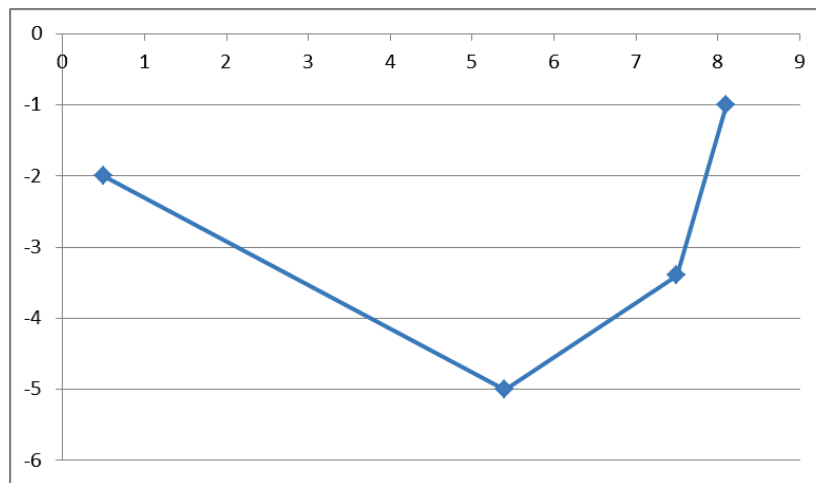
ANEXO 9: Estimación de caudal del lahar ocurrido el 01-06-2014 en la Quebrada Palmaurcu (Sección 2).

Drenaje: Quebrada Palmaurcu				Ubicación:			
Fecha ocurrencia lahar: 2014-06-01				x	782550		
Fecha medición: 2014-06-03				y	9844122		
Datos de la curva transitada por el flujo							
Punto	SD	Inc	Az	HD	VD	x	y
C1	8,90	-24,20	236,90	8,10	-3,60	-6,79	-4,42
C2	8,10	-29,90	257,90	7,00	-4,10	-6,84	-1,47
C3	7,40	-35,40	289,20	6,10	-4,30	-5,76	2,01
C4	7,60	-41,50	324,50	5,70	-5,00	-3,31	4,64
C5	8,30	-45,30	356,80	5,90	-5,90	-0,33	5,89
C6	9,20	-41,90	27,70	6,90	-6,20	3,21	6,11
Determinación del radio de curvatura							
Triángulos	Xc	Yc	Rc	Triángulos	Xc	Yc	Rc
T-123	3,35	-2,74	10,27	T-234	1,30	-2,10	8,17
T-124	2,44	-2,76	9,37	T-235	1,28	-2,10	8,15
T-125	2,04	-2,77	8,98	T-236	1,58	-2,19	8,46
T-126	2,02	-2,77	8,96	T-245	1,26	-2,08	8,13
T-134	1,70	-2,48	8,71	T-246	1,68	-2,33	8,57
T-135	1,53	-2,45	8,55	T-256	1,98	-2,71	8,91
T-136	1,72	-2,48	8,72	T-345	1,25	-2,06	8,11
T-145	1,38	-2,36	8,42	T-346	1,72	-2,50	8,74
T-146	1,72	-2,49	8,72	T-356	2,00	-3,11	9,29
T-156	1,98	-2,73	8,93	T-456	2,05	-3,97	10,15
						PROM	8,81
						D. ST	0,60

Datos de la sección mojada

Punto	SD	Inc	Az	HD	VD
P1	2,00	-76,00	312,10	0,50	-2,00
P2	7,40	-42,70	297,40	5,40	-5,00
P3	8,30	-24,20	300,50	7,50	-3,40
P4	8,10	-6,80	304,20	8,10	-1,00

Δh 1,00
L 7,60
A 15,89



Estimación del caudal

Rc	v	Q	Rc	v	Q
9,37	3,48	55,23	8,72	3,35	53,29
8,98	3,40	54,06	8,93	3,39	53,91
8,96	3,40	54,00	8,46	3,30	52,48
8,71	3,35	53,25	8,57	3,32	52,83
8,55	3,32	52,76	8,91	3,39	53,86
8,72	3,35	53,28	8,74	3,36	53,33
8,42	3,30	52,36	9,29	3,46	55,01

Promedio 3,37 53,55

ANEXO 10: Estimación de caudal del lahar ocurrido el 01-06-2014 en la Quebrada Palmaurcu (Sección 3).

Drenaje: Quebrada Palmaurcu	Ubicación:	
Fecha ocurrencia lahar: 2014-06-01	x	0782751
Fecha medición: 2014-06-03	y	9844411

Datos de la curva transitada por el flujo

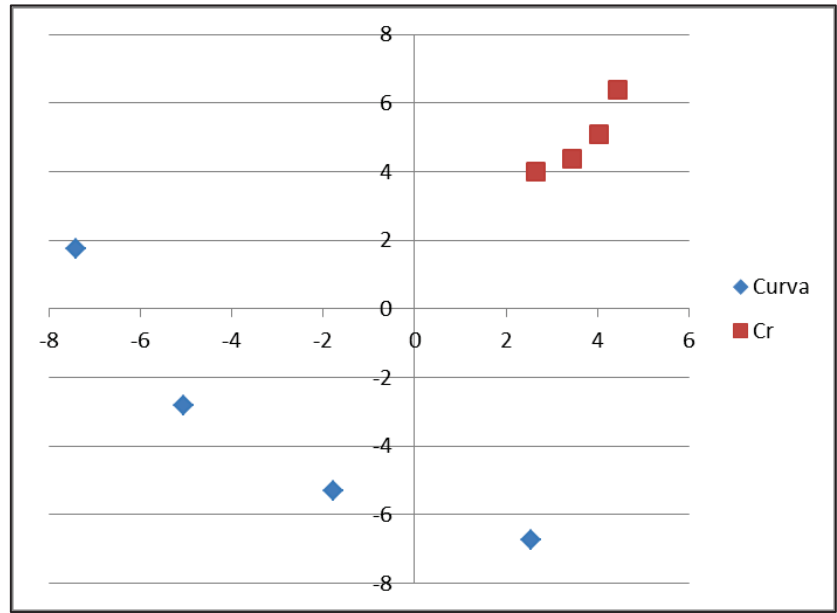
Punto	SD	Inc	Az	HD	VD	x	y
C1	8,80	-35,20	159,20	7,20	-5,10	2,56	-6,73
C2	8,00	-45,50	198,40	5,60	-5,70	-1,77	-5,31
C3	8,40	-46,50	240,80	5,80	-6,10	-5,06	-2,83
C4	11,00	-46,70	283,30	7,60	-8,00	-7,40	1,75

Determinación del radio de curvatura

Triángulos	Xc	Yc	Rc
T-123	4,45	6,37	13,24
T-124	4,03	5,08	11,91
T-134	3,44	4,39	11,15
T-234	2,66	3,99	10,31

PROM 11,65

D. ST 1,24



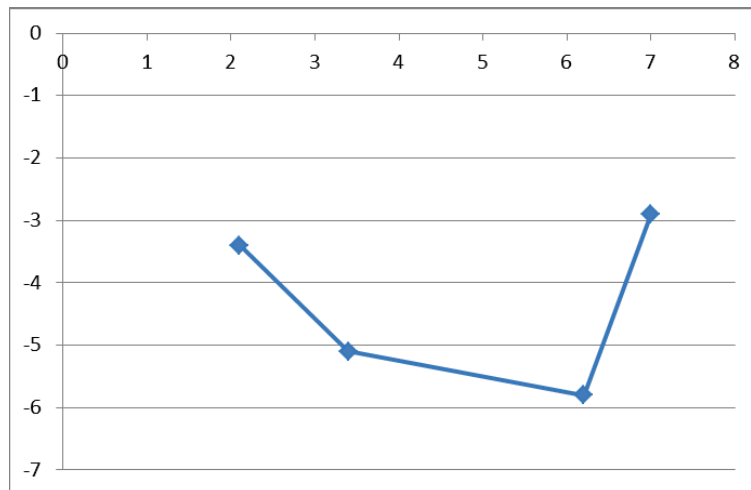
Datos de la sección mojada

Punto	SD	Inc	Az	HD	VD
P1	4,00	-58,80	201,30	2,10	-3,40
P2	6,10	-56,10	204,00	3,40	-5,10
P3	8,50	-42,70	205,20	6,20	-5,80
P4	7,50	-22,90	202,00	7,00	-2,90

Δh 0,50

L 4,90

A 8,83



Estimación del caudal

Rc	v	Q
13,24	3,64	32,12
11,91	3,45	30,47
11,15	3,34	29,49
10,31	3,21	28,35
Promedio	3,40	29,98

ANEXO 11: Estimación de caudal del lahar ocurrido el 01-06-2014 en la Quebrada Palmaurcu (Sección 4).

Drenaje: Quebrada Palmaurcu	Ubicación:	
Fecha ocurrencia lahar: 2014-09-15	x	782515
Fecha medición: 2014-09-15	y	9844100

Datos de la curva transitada por el flujo

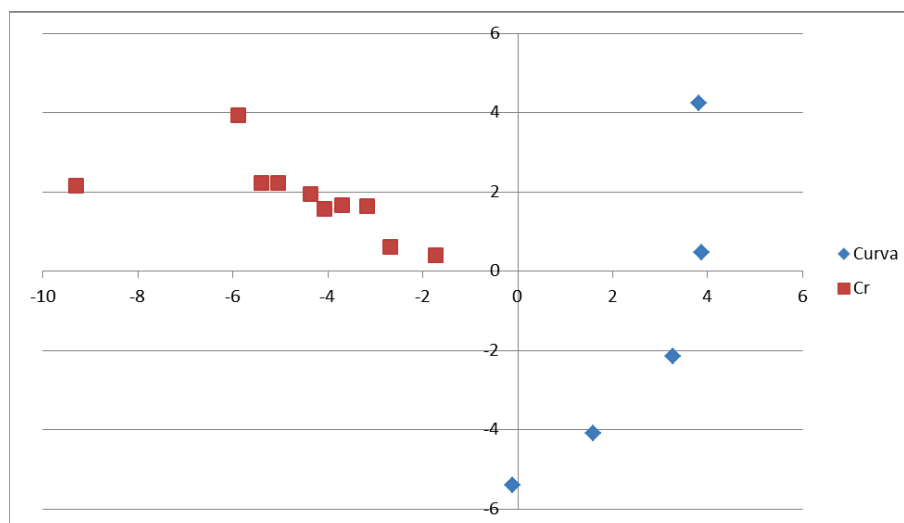
Punto	SD	Inc	Az	HD	VD	x	y
C1	6,10	-27,60	181,10	5,40	-2,80	-0,10	-5,40
C2	5,20	-33,60	158,70	4,40	-2,90	1,60	-4,10
C3	5,00	-39,50	123,30	3,90	-3,20	3,26	-2,14
C4	5,20	-41,80	82,90	3,90	-3,50	3,87	0,48
C5	6,90	-34,00	42,00	5,70	-3,80	3,81	4,24

Determinación del radio de curvatura

Triángulos	Xc	Yc	Rc
T-123	-5,88	3,93	10,97
T-124	-4,08	1,57	8,02
T-125	-4,37	1,95	8,49
T-134	-2,68	0,62	6,55
T-135	-3,70	1,68	7,94
T-145	-5,05	2,23	9,09
T-234	-1,72	0,40	5,59
T-235	-3,17	1,63	7,46
T-245	-5,39	2,22	9,42
T-345	-9,29	2,16	13,27

PROM 8,68

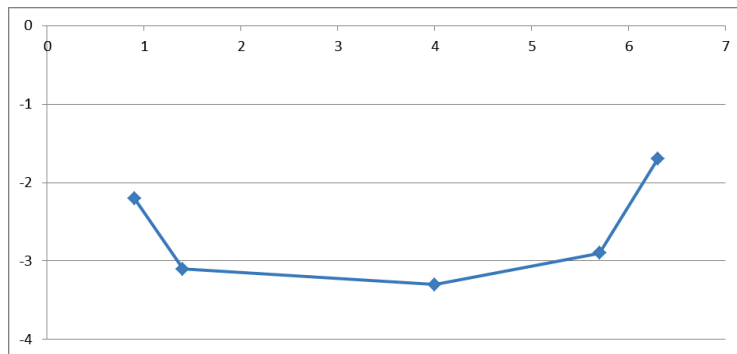
D. ST 2,20



Datos de la sección mojada

Punto	SD	Inc	Az	HD	VD
P1	2,40	-67,60	112,90	0,90	-2,20
P2	3,40	-65,00	109,50	1,40	-3,10
P3	5,20	-38,90	103,40	4,00	-3,30
P4	6,40	-26,90	106,20	5,70	-2,90
P5	6,50	-14,90	105,50	6,30	-1,70

Δh 0,50
L 5,40
A 5,77



Estimación del caudal

Rc	v	Q
8,02	2,70	15,55
8,49	2,78	16,01
6,55	2,44	14,05
7,94	2,68	15,47
9,09	2,87	16,56
7,46	2,60	14,99
9,42	2,92	16,86
Promedio	2,71	15,64

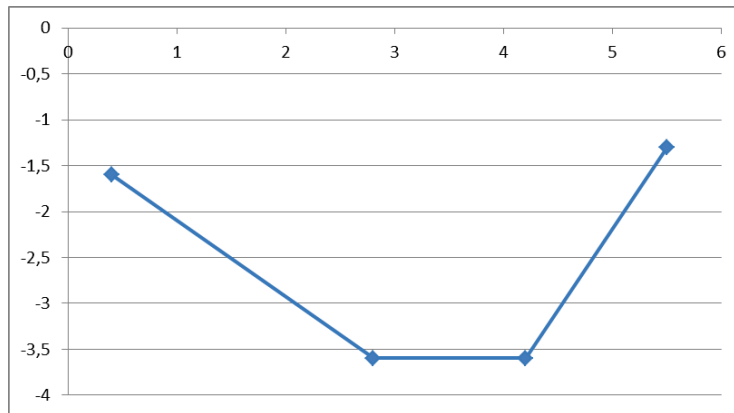
ANEXO 12: Estimación de caudal del lahar ocurrido el 15-09-2014 en la Quebrada Palmarcu (Sección 1).

Drenaje: Quebrada Palmaurcu				Ubicación:			
Fecha ocurrencia lahar: 2014-09-15				x	782501		
Fecha medición: 2014-09-15				y	9844042		
Datos de la curva transitada por el flujo							
Punto	SD	Inc	Az	HD	VD	x	y
C1	6,10	-27,60	181,10	5,40	-2,80	-0,10	-5,40
C2	5,20	-33,60	158,70	4,40	-2,90	1,60	-4,10
C3	5,00	-39,50	123,30	3,90	-3,20	3,26	-2,14
C4	5,20	-41,80	82,90	3,90	-3,50	3,87	0,48
C5	6,90	-34,00	42,00	5,70	-3,80	3,81	4,24
Determinación del radio de curvatura							
Triángulos	Xc	Yc	Rc				
T-123	-1,93	-0,04	5,09				
T-124	-2,10	0,36	5,52				
T-125	-2,20	0,59	5,77				
T-134	-2,44	0,69	5,94				
T-135	-2,52	0,81	6,07				
T-145	-2,65	0,90	6,20				
T-234	-2,83	0,89	6,36				
T-235	-2,85	0,92	6,40				
T-245	-2,89	0,93	6,43				
T-345	-2,92	0,94	6,47				
PROM			6,03				
D. ST			0,45				

Datos de la sección mojada

Punto	SD	Inc	Az	HD	VD
P1	1,70	-74,50	128,50	0,40	-1,60
P2	4,60	-51,90	124,10	2,80	-3,60
P3	5,50	-40,70	122,30	4,20	-3,60
P4	5,70	-14,80	121,30	5,50	-1,30

Δh 0,30
L 5,10
A 7,07



Estimación del caudal

Rc	v	Q
5,77	1,82	12,89
5,94	1,85	13,08
6,07	1,87	13,23
6,20	1,89	13,37
6,36	1,92	13,54
6,40	1,92	13,58
6,43	1,93	13,62
6,47	1,93	13,65
Promedio	1,89	13,37

ANEXO 13: Estimación de caudal del lahar ocurrido el 15-09-2014 en la Quebrada Palmaurcu (Sección 2).

Drenaje: Quebrada Palmaurcu	Ubicación:	
Fecha ocurrencia lahar: 2014-09-15	x	0782462
Fecha medición: 2014-09-15	y	9843977

Datos de la curva transitada por el flujo

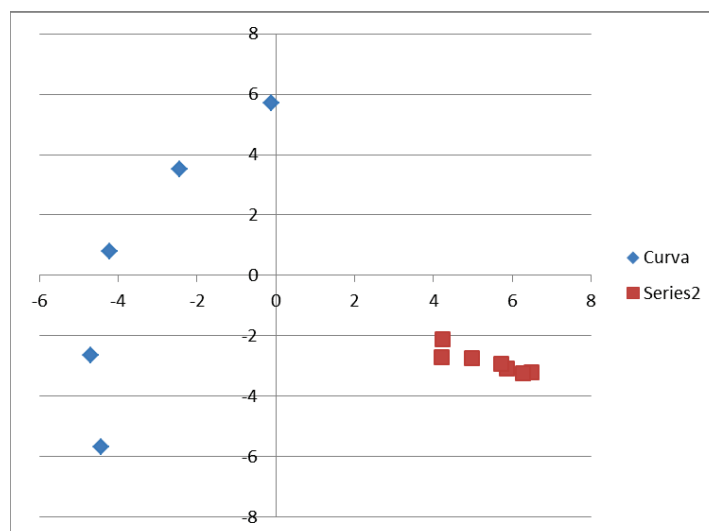
Punto	SD	Inc	Az	HD	VD	x	y
C1	7,60	-19,10	218,10	7,20	-2,50	-4,44	-5,67
C2	6,10	-28,00	240,50	5,40	-2,90	-4,70	-2,66
C3	5,50	-37,50	280,70	4,30	-3,30	-4,23	0,80
C4	5,40	-36,70	325,20	4,30	-3,50	-2,45	3,53
C5	6,90	-34,10	358,80	5,70	-3,90	-0,12	5,70

Determinación del radio de curvatura

Triángulos	Xc	Yc	Rc
T-123	10,00	-2,92	14,70
T-124	6,49	-3,22	11,20
T-125	6,27	-3,24	10,98
T-134	4,20	-2,72	9,13
T-135	4,98	-2,75	9,87
T-145	5,86	-3,08	10,62
T-234	3,02	-1,96	7,75
T-235	4,24	-2,13	8,96
T-245	5,73	-2,94	10,43
T-345	7,53	-4,88	13,06

PROM 10,67

D. ST 2,02



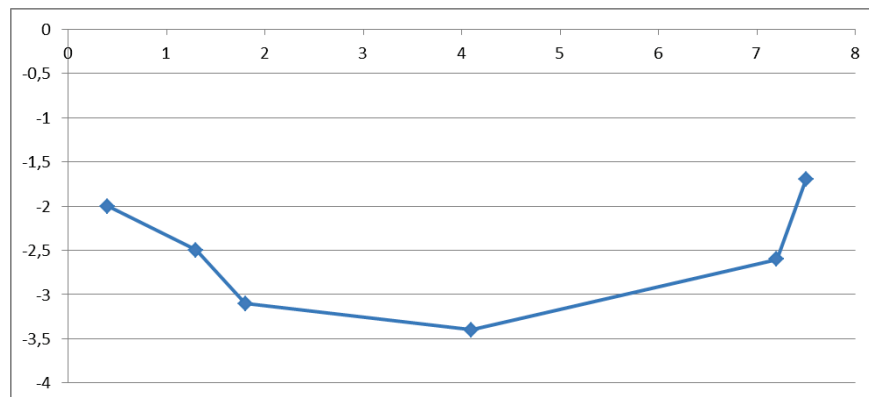
Datos de la sección mojada

Punto	SD	Inc	Az	HD	VD
P1	2,10	-79,20	289,10	0,40	-2,00
P2	2,90	-62,50	286,00	1,30	-2,50
P3	3,60	-60,70	285,30	1,80	-3,10
P4	5,40	-39,30	289,90	4,10	-3,40
P5	7,60	-19,70	292,40	7,20	-2,60
P6	7,70	-13,00	293,30	7,50	-1,70

Δh 0,30

L 7,10

A 7,71



Estimación del caudal

Rc	v	Q
11,20	2,15	16,61
10,98	2,13	16,44
9,13	1,94	14,99
9,87	2,02	15,59
10,62	2,10	16,17
8,96	1,93	14,85
10,43	2,08	16,02
Promedio	2,05	15,81

ANEXO 14: Estimación de caudal del lahar ocurrido el 15-09-2014 en la Quebrada Palmaurcu (Sección 3).

Drenaje: Quebrada Palmaurcu	Ubicación:	
Fecha ocurrencia lahar: 2014-12-07	x	0782561
Fecha medición: 2014-12-12	y	9844128

Datos de la curva transitada por el flujo

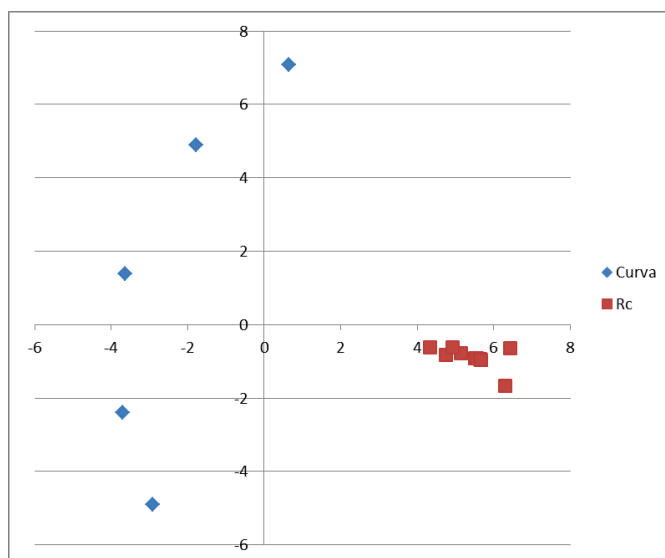
Punto	SD	Inc	Az	HD	VD	x	y
C1	6,50	-28,20	210,90	5,70	-3,10	-2,93	-4,89
C2	5,50	-36,00	237,20	4,40	-3,20	-3,70	-2,38
C3	5,30	-44,20	290,80	3,90	-3,60	-3,65	1,38
C4	6,60	-37,40	339,90	5,20	-4,00	-1,79	4,88
C5	8,30	-32,00	5,20	7,10	-4,40	0,64	7,07

Determinación del radio de curvatura

Triángulos	Xc	Yc	Rc
T-123	6,43	-0,64	10,28
T-124	5,51	-0,92	9,33
T-125	5,56	-0,91	9,37
T-134	4,75	-0,83	8,68
T-135	5,15	-0,79	9,06
T-145	5,65	-0,94	9,45
T-234	4,33	-0,61	8,22
T-235	4,92	-0,62	8,80
T-245	5,68	-0,96	9,48
T-345	6,30	-1,66	10,40

PROM 9,31

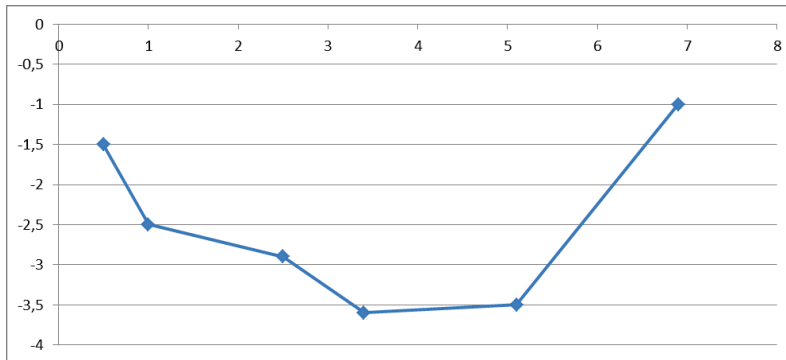
D. ST 0,67



Datos de la sección mojada

Punto	SD	Inc	Az	HD	VD
P1	1,60	-69,80	282,60	0,50	-1,50
P2	2,70	-68,10	281,60	1,00	-2,50
P3	3,80	-49,10	285,50	2,50	-2,90
P4	4,90	-46,90	284,10	3,40	-3,60
P5	6,20	-34,70	282,60	5,10	-3,50
P6	6,80	-8,30	284,30	6,90	-1,00

Δh 0,50
L 6,40
A 10,06



Estimación del caudal

Rc	v	Q
9,33	2,67	26,88
9,37	2,68	26,95
8,68	2,58	25,94
9,06	2,63	26,49
9,45	2,69	27,05
8,80	2,60	26,11
9,48	2,69	27,10
Promedio	2,65	26,65

ANEXO 15: Estimación de caudal del lahar ocurrido el 07-12-2014 en la Quebrada Palmaurcu (Sección 1).

Drenaje: Quebrada Palmaurcu	Ubicación:	
Fecha ocurrencia lahar: 2014-12-07	x	782571
Fecha medición: 2014-12-12	y	9844158

Datos de la curva transitada por el flujo

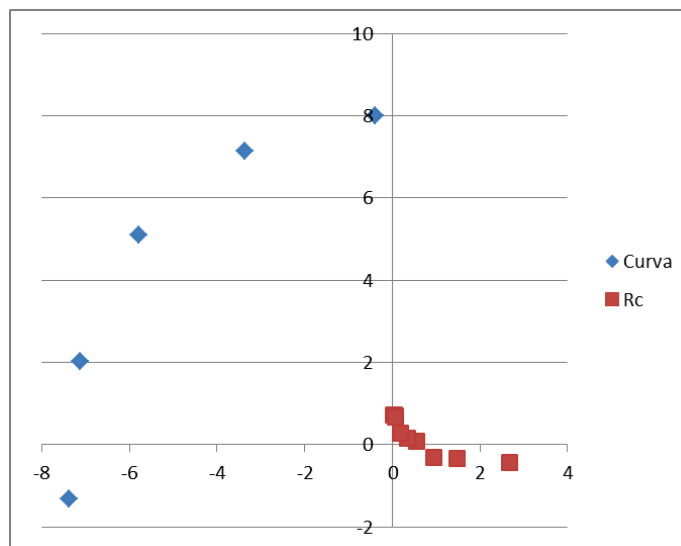
Punto	SD	Inc	Az	HD	VD	x	y
C1	7,80	-16,00	259,90	7,50	-2,10	-7,38	-1,32
C2	7,80	-18,00	285,80	7,40	-2,40	-7,12	2,01
C3	8,10	-19,70	311,40	7,70	-2,70	-5,78	5,09
C4	8,50	-22,20	334,80	7,90	-3,20	-3,36	7,15
C5	8,90	-26,40	357,20	8,00	-4,00	-0,39	7,99

Determinación del radio de curvatura

Triángulos	Xc	Yc	Rc
T-123	2,68	-0,44	10,10
T-124	1,48	-0,34	8,92
T-125	0,95	-0,30	8,40
T-134	0,57	0,10	8,07
T-135	0,36	0,15	7,88
T-145	0,19	0,27	7,74
T-234	0,03	0,72	7,27
T-235	0,05	0,71	7,29
T-245	0,07	0,69	7,31
T-345	0,08	0,67	7,34

PROM 8,03

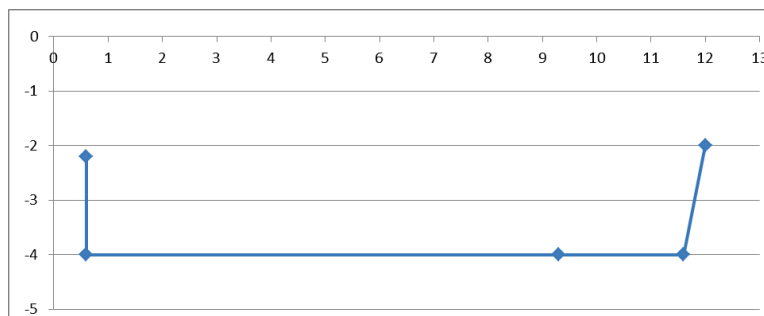
D. ST 0,91



Datos de la sección mojada

Punto	SD	Inc	Az	HD	VD
P1	2,20	-75,10	322,40	0,60	-2,20
P2	8,30	-20,50	321,60	0,60	-4,00
P3	3,80	-49,10	320,50	9,30	-4,00
P4	12,30	-19,20	320,50	11,60	-4,00
P5	12,10	-9,40	319,50	12,00	-2,00

Δh 0,20
L 11,40
A 21,26



Estimación del caudal

Rc	v	Q
8,92	1,24	26,33
8,40	1,20	25,55
8,07	1,18	25,05
7,88	1,16	24,74
7,74	1,15	24,52
7,27	1,12	23,76
7,29	1,12	23,80
7,31	1,12	23,84
7,34	1,12	23,88
Promedio	1,16	24,61

ANEXO 16: Estimación de caudal del lahar ocurrido el 07-12-2014 en la Quebrada Palmaurcu (Sección 2).