

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

ESCUELA DE POSGRADO EN INGENIERÍA Y CIENCIAS

SIMULACIÓN DEL FLUJO LAHARICO NO PERMANENTE EN EL FLANCO SUR DEL VOLCÁN COTOPAXI

**TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE MASTER (M.Sc) EN
INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS MENCIÓN DISEÑO
HIDRÁULICO**

PAULINA ROSANA LIMA GUAMAN

DIRECTOR: DR. ING. MARCO CASTRO D.

Quito, abril 2007

DECLARACIÓN

Yo, Paulina Lima Guamán, declaro que el trabajo aquí descrito 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.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Ing. Paulina Lima Guamán

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Paulina Rosana Lima Guamán, bajo mi supervisión.

DR. ING. MARCO CASTRO
DIRECTOR DE PROYECTO

CONTENIDO

CAPITULO I

GENERALIDADES SOBRE LA AMENAZA VOLCÁNICA

1.1	DEFINICIONES SOBRE FLUJO DE LODOS Y ESCOMBROS DE ORIGEN VOLCÁNICO.....	1
2.1.1	FLUJOS DE LODOS.	
2.1.2	FLUJOS HIPERCONCENTRADOS	
2.1.3	FLUJOS DE ESCOMBROS.....	2
1.2	ANÁLISIS DE LA ACTIVIDAD HISTÓRICA RECIENTE DEL VOLCÁN COTOPAXI.....	3
2.1.1	ACTIVIDAD LAHARÍTICA.....	3
1.3	DESCRIPCIÓN Y CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL EVENTO DE JUNIO DE 1877 A LO LARGO DEL FLANCO SUR.....	4
1.4	ANÁLISIS DE LA ACTIVIDAD ACTUAL DEL VOLCÁN COTOPAXI.....	7
1.5	HIDROGRAMAS PROBABLES DE GENERACIÓN DE LAHARES EN EL FLANCO SUR.....	10
2.1.1	ÁREA DEL GLACIAR.....	13
2.1.2	ANÁLISIS SOBRE EL MATERIAL DEPOSITADO.....	15
2.1.3	VOLUMEN DEL HIDROGRAMA.....	15
1.6	OBJETIVOS DE LA TESIS DE GRADO	17

CAPITULO II

ANÁLISIS BÁSICO SOBRE LA CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA DE LOS FLUJO LAHARICOS EN EL FLANCO SUR

2.1	INTRODUCCIÓN SOBRE EL FLUJO UNIFORME, GRADUALMENTE VARIADO Y NO PERMANENTE EN FLUIDOS NO NEWTONIANOS.....	18
2.1.1	FLUJOS VISCOPLASTICOS DE TIPO LAMINAR. CONDICIONES DE FLUJO UNIFORME.....	21

2.1.1	CONDICIONES DE FLUJO GRADUALMENTE VARIADO DE CARACTER ESTACIONARIO.....	23
2.1.2	FLUIDOS NO NEWTONIANOS.....	24
2.1.3	FLUJO UNIFORME.....	24
2.1.4	FLUJO GRADUALMENTE VARIADO.....	26
2.1.5	FLUJO NO PERMANENTE.....	27
2.2	ANÁLISIS DE LA SOLUCIÓN APROXIMADA AL FLUJO UNIFORME DE LAHARES: RESISTENCIA AL FLUJO Y RUGOSIDAD DEL CONTORNO.....	29
2.3	CONDICIONES DE FRONTERA PARA LA SIMULACIÓN DEL FLUJO DE LAHARES EN EL FLANCO SUR DEL VOLCÁN COTOPAXI.....	31
2.4	CRITERIOS DE SELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS REQUERIDOS PARA LA CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA EN EL MODELO DE SIMULACIÓN NUMÉRICA FLDWAV	33
2.5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	34

CAPITULO III

DISCRETIZACIÓN DE LA RED DE DRENAJE DEL FLANCO SUR

3.1	BASES DE LA DISCRETIZACIÓN EN EL FLANCO SUR.....	36
3.1.1	ANÁLISIS DE LOS TRAMOS DE ESTUDIO.....	36
3.1.1.1	Tramo 1.....	36
3.1.1.2	Tramo 2.....	37
3.1.1.3	Tramo 3.....	38
3.2	ESQUEMAS DE LA SOLUCIÓN GLOBAL Y DE LA PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	38
3.3	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	39

CAPITULO IV

CALIBRACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO

4.1	ESQUEMA DE LA CALIBRACIÓN POR TRAMOS.....	40
4.2	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	42
4.3	PLAN DE PRUEBAS PARA EL ESTUDIO DE SENSIBILIDAD	44
4.4	CONCLUSIONES.....	44

CAPITULO V

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS PRINCIPALES PARÁMETROS

5.1	ESTUDIO DE VARIACIÓN DE PARÁMETROS GEOMÉTRICOS.....	45
5.2	ESTUDIO DE VARIACIÓN DE PARÁMETROS HIDRODINÁMICOS Y REOLÓGICOS.....	46
5.2.1	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LA REOLOGÍA FRENTE A VARIACIONES DEL DIÁMETRO D50 EN LA SECCIÓN BURRUHUAICU.....	46
5.2.2	SENSIBILIDAD EB REGIMEN DE INERCIA GRANULAR, VARIACIÓN EN LA DENSIDAD DE SÓLIDOS.....	48
5.2.3	SENSIBILIDAD EN REGIMEN DE INERCIA GRANULAR DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN INTERNA.....	48
5.3	CONCLUSIONES.....	49

CAPITULO VI

SIMULACIÓN NUMÉRICA DEFINITIVA

6.1	BASES PARA LA SIMULACIÓN NUMÉRICA DEFINITIVA.....	50
6.2	ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS CON EVENTOS EN EL FLANCO SUR DEL VOLCÁN Y CON RESULTADOS DE OTROS VOLCANES	52
6.3	RECOMENDACIONES PARA INVESTIGACIONES FUTURAS.....	53

CAPITULO VII

CONCLUSIONES SOBRE EL USO DEL MODELO FLDWAV

7.1	SOBRE LA BASE TEÓRICA DE LA SOLUCIÓN MATEMÁTICA.....	55
7.2	SOBRE EL ESQUEMA DE LA SOLUCIÓN NUMÉRICA.....	57
7.3	SOBRE LA INFORMACIÓN BÁSICA REQUERIDA Y UTILIZADA.....	58
7.4	SOBRE EL PROCESO DE CALIBRACIÓN DEL MODELO.....	58
7.5	SOBRE EL TRATAMIENTO Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	59

CAPITULO VIII

RECOMENDACIONES PARA SIMULACIONES FUTURAS

8.1	SIMULACIÓN DEL EFECTO VISCOZO DE FLUJOS DE LODOS Y ESCOMBROS.....	60
8.2	SIMULACIÓN NUMÉRICA CON FLUJO NO PERMANENTE.....	61
8.3	SIMULACIÓN NUMÉRICA POR OBJETIVOS Y CON DIFERENTES TIPOS DE MODELOS.....	61

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Foto No. 1:	Vista General del flanco sur del volcán Cotopaxi.....	1
Foto No. 2:	Asentamientos poblacionales junto al Río Cutuchi, Ciudad de Latacunga.....	8
Foto No. 3:	: Puente principal de ingreso a Latacunga desde la vía Panamericana (Hpuente=17 m).....	8
Foto No. 4:	Cauce del Río Chinchina después de la erupción del Volcán Nevado Ruiz, Noviembre 1985.....	45
Foto No. 5:	Inicio de la quebrada Burruhuaycu en el Volcán Cotopaxi, 4500 m.s.n.m, Enero 2007.....	45
Foto No. 6:	Ensanchamiento del cauce al inicio de la Quebrada Burruhaycu (aguas arriba).....	51
Foto No. 7:	Ensanchamiento del cauce al Inicio de la Quebrada Simarrones....	51

Foto No. 8: Paredes verticales en el cauce al inicio de la Quebrada Burruhaycu (aguas abajo).....	51
Foto No. 9: Cauce de la quebrada Burruhaycu con paredes verticales descendiendo el Volcán Cotopaxi.....	51
Foto No. 10: Material granular y material viscoso depositado en el valle.....	60

LISTA DE GRAFICOS

Grafico No. 1.1: Poblaciones ubicadas junto al Río Cutuchi.....	9
Grafico No. 1.2: Hidrograma triangular.....	12
Grafico No.1.3: Modelo digital de terreno con los contornos para el Glaciar Cotopaxi. Jordan E. Et. Al 2004.....	14
Grafico No. 1.4: Columna estratigráfica de dos secciones vistas en una industria de textiles.....	15
Grafico No. 1.5: Hidrogramas de entrada asumidos para el estudio.....	16
Grafico No. 2.1: Clasificación de flujos hiperconcentrados.....	18
Grafico No. 2.2: Flujo Uniforme en lodos.....	22
Grafico No. 2.3: Tipos de flujo según la variación del esfuerzo de corte en función de la tasa de deformación.....	24
Grafico No. 2.4: Establecimiento del flujo uniforme en canal abierto.....	25
Grafico No. 2.5: Ubicación de las secciones de calibración del Flanco Sur.....	30
Grafico No. 2.6: Caracterización según el comportamiento del lahar a lo largo del cauce.....	31
Grafico No. 2.7: Perfil del drenaje sur-occidental del Volcán Cotopaxi.....	32
Grafico No. 2.8: Tramos de Quebradas seleccionados para el análisis del Flanco Sur del Cotopaxi.....	32
Grafico No. 2.9: Coeficiente de Manning para flujo uniforme en la sección de San Diego.....	34
Grafico No. 3.1: Perfil del tramo 1 del estudio del flanco sur del Volcán Cotopaxi.....	36

Grafico No. 3.2: Perfil del tramo 2.....	37
Grafico No. 3.3: Perfil del tramo 3.....	38
Grafico No 3.4: Diagrama de flujo de la solución global.....	38
Grafico No. 4.1: Esquema de calibración y análisis para eventos futuros.....	40
Grafico No. 4.2: Simulación mediante Hec Ras; Línea de energía, velocidad y calado de la sección Saquimala en fase de calibración mediante el lahar de 1877, tramo dos.....	41
Grafico No. 4.3: Análisis de la sección del Aeropuerto, variación de los niveles del lahar ante tres tipos de escenarios.....	43
Grafico No. 5.1: Sensibilidad del caudal frente a cambios del tamaño del material arrastrado en Régimen Granular.....	46
Grafico No. 5.2: Pseudocoefficiente de Manning Vs Calado con cambios en los valores de la densidad de los sólidos.....	48
Grafico No. 5.3: Pseudocoefficiente de Manning Vs Calado con cambios en los valores del los ángulos del fricción interna.....	48
Grafico No. 7.1: Diagrama de Flujo para análisis por tramos.....	57

LISTA DE TABLAS

Tabla No. 1.1: Síntesis de la actividad del volcán Cotopaxi en los últimos 5000 años.....	4
Tabla No. 1.2: Descripción de los escenarios eruptivos del Volcán Cotopaxi....	11
Tabla No. 1.3: Tiempo de recorrido del Flujo en el Flanco Sur, análisis gradualmente variado por tramos.....	13
Tabla No. 1.4: Glaciares que conforman el drenaje sur con las áreas respectivas en m ²	14
Tabla No. 1.5: Volúmenes de agua, lahares y probabilidad de ocurrencia según la variación del VEI.....	17
Tabla No. 1.6: Áreas de aportación de los glaciares a las cada una de las quebradas que drenan el Flanco Sur.....	17

Tabla No 2.1: Cuadro de resultados de coeficientes de Manning en el análisis de las secciones en el Flanco sur del Cotopaxi mediante Flujo Uniforme.....	29
Tabla No 2.2: Cuadro de características hidráulicas de las secciones de calibración análisis mediante flujo uniforme.....	30
Tabla No. 4.1: Análisis y Calibración del tramo uno mediante flujo gradualmente variado.....	40
Tabla No. 4.2: Análisis y calibración del tramo dos mediante flujo gradualmente variado.....	41
Tabla No. 4.3: Análisis y calibración del tramo tres mediante flujo gradualmente variado.....	41
Tabla No. 4.4: Rango de valores de los parámetros reológicos.....	44
Tabla No.5.1: Valores de velocidad, caudal unitario, caudal, esfuerzo de corte, Manning de la Sección Burruhuaycu mediante análisis de Régimen de Inercia Granular.....	47

PRESENTACIÓN

El volcán activo del Cotopaxi durante su periodo eruptivo desde hace millones de años ha venido modificando su entorno, los registros realizados desde la llegada de los españoles y el registro de la actividad sísmica de origen tectónico desde el 2001 hacen cada vez mas probable una erupción en los próximos años.

Numerosas poblaciones cuyas actividades principales son la agricultura y ganadería se han asentado a lo largo del cauce del Río Cutuchi que drena aproximadamente un 60% del glaciar correspondiente a la parte suroccidental del nevado Cotopaxi, en caso de una eventual erupción los efectos de los lahares generados pueden ocasionar catástrofes mayores a las causadas por el Volcán Tungurahua siendo necesario realizar un análisis del comportamiento de los lahares que podrían generarse basado en eventos históricos como la sucedida en el año 1877.

RESUMEN

En el presente estudio se realiza un análisis del comportamiento de los lahares mediante flujos inestacionarios para lo cual se ha recopilado la mayor cantidad de información existente en estudios anteriores del Flanco Sur del volcán Cotopaxi.

Tanto las secciones de control como los tramos discretizados se analizan desde el punto de vista Reológico y flujo de canales naturales abiertos; para flujo uniforme, flujo gradualmente variado e inestacionario usando programas de Modelación Hidráulica como el Hec-Ras, Modelación Hidráulica y de lodos como el FLDWAV y Flujo Uniforme como el FlowMaster caracterizando en tres tramos los tipos de flujo que se producirían en el cauce basado en comportamiento granular, viscoso, supercrítico, subcrítico, transporte, depositación de material, pendientes del cauce, etc.

Del análisis reológico mediante todos los tipos de flujo no Newtoniano y Newtoniano de las secciones de calibración se define el comportamiento del flujo, ya sea éste granular, viscoso o viscoplástico con su correspondiente pseudocoefficiente de Manning.

Las condiciones de frontera para la calibración de la modelación se obtienen a partir de los datos registrados en la erupción del volcán Cotopaxi en el año 1877 y se realiza un análisis de sensibilidad y de esta manera poder establecer la información básica necesaria para un estudio mas profundo y detallado.

ABSTRACT

For millions of years the Cotopaxi volcano has presented several eruptions producing lahars. From its top mud/debris may flow down drainages, impacting a population of around 3 million inhabitants. Cutuchi River is the main drainage towards the south of Cotopaxi and headwaters on the flanks of Cotopaxi Volcano. This river flows southwards through several communities such as Latacunga, Salcedo, Mulalo, San Luis and others.

This project is based on analyzing the mud/debris flow by using the steady and unsteady flow theory, compiling a lot of data about the southern drainage of the volcano to use hydraulic modelation programs such as Hec- Ras and Fldwav that simulate the characterizing flow on a specific river path.

Upon rheological analysis for all the types of flow Newtonian and not Newtonian of the sections of calibration the behavior of the flow, the pseudo Manning's coefficient is defined by considering the viscosity, granular and plastic characteristics.

The boundary conditions for the calibration process of the modeling are obtained from the information registered in the eruption of the Cotopaxi volcano in the year 1877.

Once defined the type of the flow that rules each section, tests regarding sensibility are carried out and in this way, it is possible to establish which is the basic information necessary for a detailed study of mud/debris flow emphasizing both the rheological and hydraulic theories that could be used in future studies.

AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento especial a la Escuela Politécnica Nacional, especialmente a mis Profesores por haberme permitido crecer profesionalmente.

A mi director de tesis Dr. Ing. Prof. Marco Castro por todo el apoyo brindado desde mi carrera preuniversitaria.

Del Instituto Geofísico de la EPN, muchas gracias a la Ing. Patricia Mottes por toda la información y conocimientos recibidos.

Msc. Ing. Rafael Poveda, Ing. Wilma Moposita que me ayudaron en el campo de la Hidráulica y digitalización de la información.

A toda mi familia especialmente a Rosita por su apoyo incondicional.

A todos los amigos que me han acompañado y compartido su tiempo conmigo, muchas gracias por todo!!!.....

CAPITULO I

GENERALIDADES SOBRE LA AMENAZA VOLCÁNICA

1.1 DEFINICIONES SOBRE FLUJO DE LODOS Y ESCOMBROS DE ORIGEN VOLCÁNICO

Los lahares son flujos de lodo o escombros de origen volcánico, están constituidos de arena, fragmento de roca, piedra pómez y ceniza mezcladas con agua, es decir son flujos con altas concentraciones de sedimentos que se generan en los volcanes.

Un lahar se forma por la fusión de hielo y nieve del volcán durante una erupción debido a la presencia de flujos piroclásticos y flujos de lava, siendo éstos los más potentes y voluminosos, éste mecanismo de formación fue el que generó los lahares en el Volcán Nevado Ruiz (1985), Volcán Mt. St. Helen (1980), Volcán Cotopaxi (1877); también se forman al mezclarse agua lluvia o de río con cenizas o flujos piroclásticos (Hall y Mothes, 1991).



Foto No. 1: Volcán Cotopaxi, Flanco sur.

1.1.1 FLUJOS DE LODOS (MUD FLOW).

Los flujos de lodos generalmente están conformados por agua y granos finos. Estos son un 20% de partículas menores que los limos y solo un pequeño porcentaje son más finos que la arcilla. Pueden transportar rocas enormes por varios kilómetros, a pesar de su bajo contenido de material fino. Otros componentes como aire, plantas o animales no son considerados porque su concentración es pequeña. Son flujos viscosos que se caracterizan por tener pulsos intermitentes mientras más avanza, se va disminuyendo la altura del flujo y se va haciendo cada vez más lento.

1.1.2 FLUJOS HIPERCONCENTRADOS.

Un flujo es hiperconcentrado cuando el volumen de sólidos en la mezcla no supera el 60% pero tampoco es menos al 20%. La viscosidad de estos flujos es mayor que la del agua. Sin embargo, un pequeño cambio en la cantidad de finos puede generar variación en las propiedades reológicas. La turbulencia de los flujos hiperconcentrados es bastante pequeña; por lo cual se dice que prácticamente es inexistente.

Los flujos hiperconcentrados pueden ser de tipo viscoso y no viscoso. Se dice que, cuando se presentan del primer tipo se comporta como flujo de Bingham, mientras que del segundo se comporta como Newtoniano.

Los sedimentos son transportados como carga de fondo o como carga suspendida. Al aumentar la concentración se va disminuyendo la velocidad del flujo (inclusive puede producir un frenado instantáneo) y por lo tanto, se llega a convertir en un flujo cuya distribución de velocidad vertical se vuelve casi uniforme.

1.1.3 FLUJOS DE ESCOMBROS (DEBRIS FLOW).

Son flujos no viscosos, turbulentos y actúan en dos fases, la fase líquida compuesta por partículas finas con agua (por lo general éste se presenta en una cantidad menor), y la fase sólida que está compuesta por el material grueso.

1.2 ANÁLISIS DE LA ACTIVIDAD HISTÓRICA RECIENTE DEL VOLCÁN COTOPAXI

El volcán ha tenido al menos siete períodos de actividad durante los últimos 40000 años, la forma actual del Cotopaxi es el resultado de una actividad volcánica que ha edificado un cono regular por la paulatina acumulación de materiales eruptivos (flujos dacíticos piroclásticos y coladas de lava), emitidas desde el cráter central durante los últimos 5000 años.

Desde la llegada de los españoles al Ecuador se han producido aproximadamente 30 erupciones. Las primeras erupciones registradas fueron en Noviembre de 1532 y 1533 (Barriga, 1988). A pesar de que han ocurrido más 30 erupciones no se puede establecer con exactitud el tiempo de retorno. El intervalo más largo de descanso del volcán ha sido 164 años, sin embargo también existen períodos cortos de aproximadamente 15 años.

Barberi et al., (1995) ha estimado que el Cotopaxi experimenta un evento eruptivo con una recurrencia promedio de 117 años sobre los dos últimos milenios. La actividad del volcán Cotopaxi esta resumida en la tabla No. 1.

1.1.2 ACTIVIDAD LAHARÍTICA

Comúnmente ha ocurrido dos tipos de lahares en el Volcán Cotopaxi (Andrade et al. 2005). Lahares primarios son generados por flujos piroclásticos y el descongelamiento de la capa de hielo del volcán. Lahares secundarios ocurren cuando la erupción produce una lluvia fuerte arrastrando los depósitos de ceniza. El Río Cutuchi ha experimentado lahares primarios en 4500 años BP y en los años 1742, 1743, 1744, 1766, 1768, 1855 y 1877 AD.

Tabla No. 1.1: Síntesis de la actividad del volcán Cotopaxi en los últimos 5000 años

Edad	Emisiones de ceniza	Flujos piroclásticos	Lahares	Flujos de lava	VEI*
1877-80 DC	X	X	2		2-4
1854 DC	X	X	1	1	3
1853 DC	X		1	1	3
1766-68 DC	X	X	2	1	3-4
1742-44 DC	X	X	5		4
1532-34 DC	X	X	2	1	3
~ 1440 DC	X	?	?	?	?
~ 1250 DC	X	?	?	?	?
~ 1130-50 DC	X	X	2		4
~1000 DC	X	X			3
950 DC	X	X	2		>4
850 DC	X	X	1		3-4
730-770 DC	X	X	2		4
? DC	X	?	?	?	?
? DC	X	?	?	?	?
~ 150-180 DC	X	X	3	>3	>4
? DC	X	?	?	?	?
? DC	X	?	?	?	?
~ 70-100 DC	X		varios		4
50 AC	X	X			4
~ 100-360 AC	X	?	?	?	?
~ 2220 AC	X	?	?	?	?
~ 2510 AC	X	?	?	?	>4
~ 3060 AC	X	?	?	?	?

1.3 DESCRIPCIÓN Y CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL EVENTO DE JUNIO DE 1877 A LO LARGO DEL FLANCO SUR

A las 10:00 de la mañana del 25 de junio de 1877 fue una de las más importantes erupciones históricas del volcán Cotopaxi, describiéndola de la manera siguiente por T. Wolf (1878) “*la lava ígnea del cráter del volcán entró en efervescencia y ebullición lanzándose con una rapidez extraordinaria sobre los flancos del cono*”.

Este tipo de actividad demostró ser particularmente eficaz para fundir una gran cantidad de hielo glacial, de modo que, en forma inmediata, se formaron enormes lahares que, al densificarse por la incorporación de sólidos a lo largo de los flancos del cono, incrementaron su capacidad destructiva y causaron graves tragedias cuando llegaron a los valles de Latacunga y Chillo.

Sodirot (1877) y Wolf (1878) presentan una prolija descripción del evento en sí y de los daños causados. Por la cuenca sur, el flujo llegó a Latacunga en menos de

una hora y, por la cuenca norte, en el mismo lapso, a Alangasí, Guangopolo y Conocoto, que quedaron cubiertos por arena y piedras.

".. Eran inmensos raudales de agua con enormes masas de hielo, lodo, piedras y peñascos que con ímpetu inconcebible se precipitaban del cerro. A poco rato brotaban ya de las grandes quebradas del austro-occidental arrancando árboles, destruyendo casas y arrebatando consigo ganados, personas y cuanto encontraban en su curso..." (Sodiro, 1877).

Al describir el movimiento de los flujos de lodo, Wolf percibe que: *"...las aguas duplicaron su volumen y fuerza por las sustancias sólidas que recibieron cuales son peñascos y trozos de hielo, pedazos de lava nueva, piedra pómez, escorias menores, etc. ..."*.

Refiriéndose, en particular, a la cuenca septentrional, la descripción continúa como sigue:

"... Verdad es que por las quebradas del lado norte y noreste bajaron cantidades de agua, lodo y piedras tan considerables y aún más grandes que por las del lado de Latacunga, pero la mayor parte de los materiales y los más gruesos se depositaron en la altura de los páramos, en las llanuras de Limpiopungo, de Saltopamba y del Mutadero...".

Las diferencias que existían, a la época, en cuanto al desarrollo relativo entre Latacunga y Chillo y el hecho cierto que *la avenida* por el lado norte recorrió, por algunos kilómetros, una región deshabitada, hicieron que, en las crónicas, se haya consignado un mayor número de datos y referencias sobre la cuenca sur.

El impacto que causó el flujo de lodo sobre el Valle de Los Chillos fue tan intenso que, aparte de los graves estragos económicos derivados de la destrucción de los molinos, sembríos, puentes, caminos, acequias, etc., apareció un problema inédito, atribuible a la intensa modificación de la red de drenaje; una epidemia de paludismo que afectó a los habitantes de Alangasí, a partir de septiembre de 1877. En abril de 1878 se continuaban presentando *"...estragos de una mortandad, más de 100 enfermos que sufren fiebre y fríos."* (Archivo Nacional, Gobernación de Pichincha 1877- 1878).

En la vertiente oriental, cuenca del Río Napo, también se produjeron estragos, que los refiere el Gobernador de la Provincia de Oriente, en un Informe fechado el 20 de julio de 1877:

"... El día martes 26 de Junio a la una de la tarde, poco mas o menos, se oyó un bramido de volcán; media hora después un ruido como de carruaje, y hora y media después se presentó la creciente, la que era puro lodo, y vino asolando cuanto encontró.

Como desde el momento en que se oyó el ruido con que bajaba, oscureció la atmósfera, no se pudo distinguir lo que llevaba sobre las palizadas.

Finalmente dejó de crecer a las cinco de la tarde, y se aclaró como media hora, y después volvió a oscurecer de manera aterrante, resultando una lluvia de tierra, que duró hasta el amanecer del día siguiente.

Así que calmó un poco la creciente, pude descubrir que los indios que poblaban las cabeceras del río, han sido arrebatados con sus casas y sembríos de los cuales han salvado dos hombres y una mujer entre las palizadas; el uno bajó como una milla, y el otro dos, y la mujer con su criatura. Hasta hoy solo se nota la falta de veinte y siete personas entre hombres, mujeres y niños. Del puerto del pueblo se ha llevado doce casas, con muy pocos trastos. Así que rebajó un poco más, se ha encontrado una mula, cuatro caballos y seis cabezas de ganado.

Este particular da a conocer que hay alguna hacienda inmediata al río Napo. Con este motivo he resuelto hacer una explicación, así que entre el verano, que será el mes de Septiembre; pues ofrece mucha facilidad, porque la creciente ha pasado desmontado las playas, y pocos serán los obstáculos que haya que vencer; de suerte que no es difícil encontrar el sitio de donde arrebató las bestias y el ganado.

De los pueblos de abajo no he podido saber nada por falta de canoas, de indios y principalmente porque se conserva crecido el río.

En este momento llegó un indio que estaba en las Zaparías del Sarayacu, y da razón que el río Pastaza creció más que el Napo, y que sus playas se encontraron

cuerpos despedazados de gente blanca, bestias y ganado en abundancia". (Quesada, 1877).

La erupción es considerada con una magnitud de VEI (intensidad eruptiva del volcán) de 4 (Mothes, 2006). Estos flujos viajaron sobre la capa de hielo, incluyendo la capa de hielo occidental sobre el drenaje el cual tuvo un área de 5.3 km² y un volumen de 0.260 Km³ (Mothes, 2006). Esto produjo grandes flujos a lo largo de los tres drenajes, los cuales más allá de la mezcla de glaciación con piroclastos y bloques de hielo causaron una intensa erosión y depositación, rápidamente envolviendo el internamente el flujo de lodos (Aguilera et al., 2004).

1.4 ANÁLISIS DE LA ACTIVIDAD ACTUAL DEL VOLCÁN COTOPAXI

En enero de 2001 el Volcán Cotopaxi se reactivó, incrementando los eventos sísmicos de largo periodo LP, seguidos de pequeños temblores en Noviembre. En junio de 2002 hubo un largo periodo de eventos LVP acompañados de señales de LP. Los cuales empezaron a ocurrir directamente en la base del volcán. Antes de septiembre 2003 han continuado eventos con cambios temporales entre LP y LVP, luego de esta fecha las señales de VLP han desaparecido, dominando las señales de LP. Rivero et al., (2006) propuso que las nuevas inyecciones del nuevo magma han ocurrido en Marzo 2003, Octubre 2004 y Abril-Mayo 2005 indicando que está incrementando la actividad fumarólica en la cumbre.

Esta reactivación del volcán ha conducido a científicos a considerar la posibilidad de una erupción que puede afectar a las poblaciones que actualmente están viviendo alrededor del Volcán Cotopaxi. Ya que una erupción similar a la del año 1877 ocasionará flujos importantes de lodos y escombros que descenderán por los flancos formados por tres sistemas de drenaje: Al norte los Ríos Pita y Esmeralda, al sur oeste el Río Cutuchi y Pastaza y el este el Río Tambo y Tamboyacu-Napo.

La Vía Panamericana una de las más importantes redes de infraestructura vial en el Ecuador fue construida junto al Río Cutuchi en la Provincia de Cotopaxi, su

capital la ciudad de Latacunga al igual que algunos asentamientos poblacionales se ha desarrollado en la cuenca baja de este Río de manera que si el Cotopaxi erupciona en el transcurso de estos años la Provincia del Cotopaxi y sus alrededores sería seriamente afectada.

Aunque la disminución de la capa de hielo debido al calentamiento global sobre los nevados a producido una gran pérdida de volúmenes de agua y del área de aportación del casquete glaciar, no disminuye el riesgo de que se generen lahares de la misma magnitud que la del evento de 1877 ya que el cono del nevado está cubierto con un área de casquete glaciar de aproximadamente 14 Km² (13'972,128 m²); si se produce un evento eruptivo que derrita 1m de espesor del glaciar, producirá 14'000.000 m³ de agua que formarán probablemente 42'000.000 m³ de lodo, es decir el 35% del volumen total de agua embalsada en Hidro Paute.

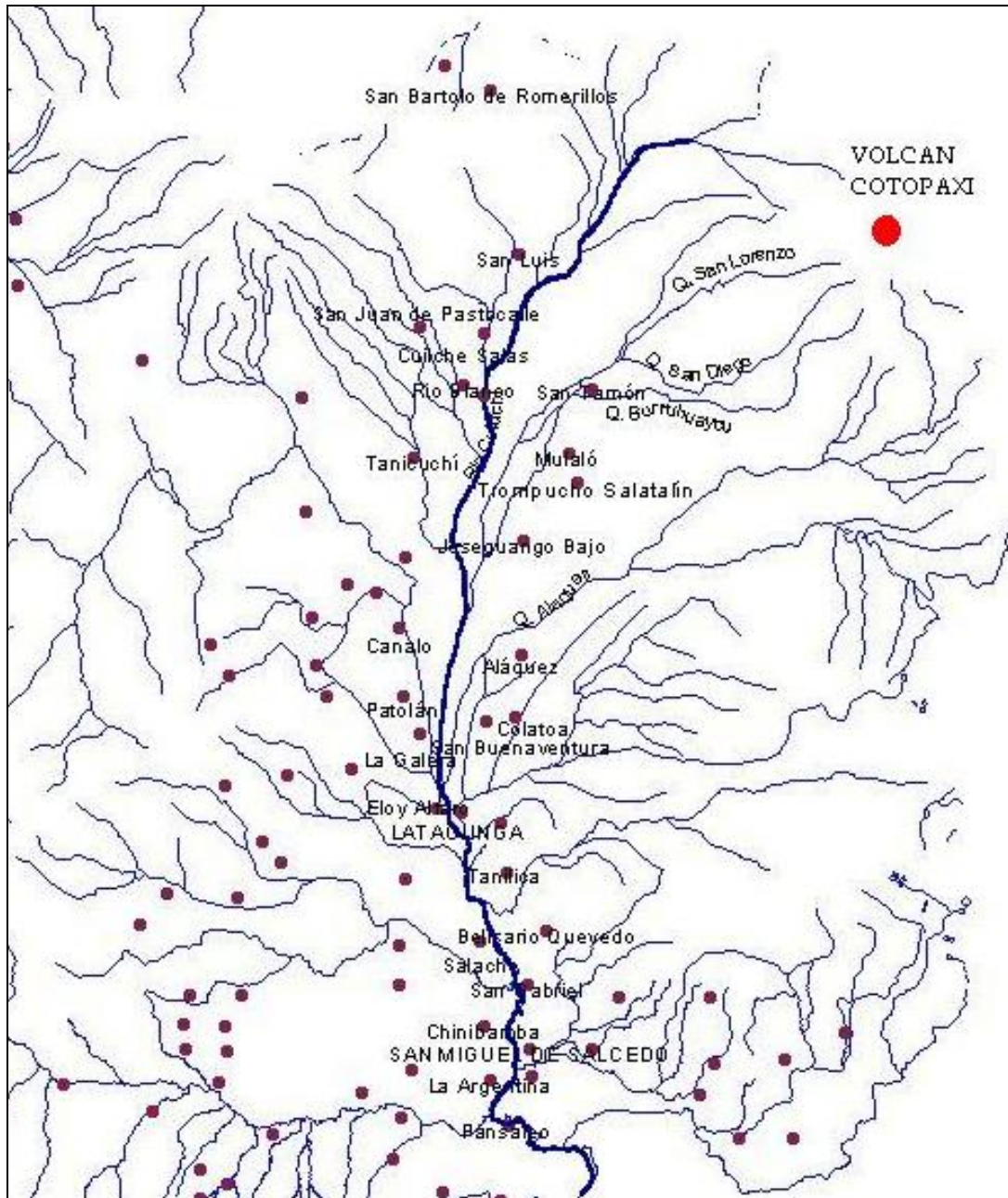
Estudios sobre la desglaciación de los nevados muestran una disminución de la capa de hielo sobre el nevado Cotopaxi, considerando el periodo mas largo de descanso del Volcán éste deberá erupcionar hasta el año 2041, disminuyendo el riesgo de producción de lahares en medida que disminuye la capa de hielo sobre el cono del volcán.



Foto No. 2: Asentamientos poblacionales junto al Río Cutuchi, Ciudad de Latacunga



Foto No. 3: Puente de ingreso a Latacunga desde la vía Panamericana ($H_{\text{puente}}=17$ m)







-  Ríos
-  Poblados
-  Volcán Cotopaxi
-  Río Cutuchi.

Grafico No. 1.1: Poblaciones ubicadas junto al Río Cutuchi.

1.5 HIDROGRAMAS PROBABLES DE GENERACIÓN DE LAHARES EN EL FLANCO SUR

Los hidrogramas son útiles, entre otras cosas, para comparar los tiempos de descarga y caudales pico de varias corrientes o cuencas hidrográficas, para así conocer las diferencias entre sus capacidades de respuesta ante el tránsito de crecientes o avenidas.

En la actualidad se han desarrollado algunos métodos para generar hidrogramas como: Modelo del Reservorio Lineal Simple, Modelo De Nash, Hidrograma Unitario Triangular SCS, Hidrograma Unitario Sintético de Snyder y otros, graficando la distribución del caudal de agua en el tiempo, mostrando el balance entre la precipitación, la evaporación y el caudal de una cuenca, sin embargo ante la explosión de un nevado la precipitación no predomina como evento de entrada para la generación de lahares, pues además de ésta intervienen la desglaciación y el aumento de volumen por el arrastre de material volcánico como ceniza, piroclastos, rocas, etc.

En el análisis de los hidrogramas de entrada para la modelación del tramo del cauce, el principal mecanismo de transporte de los lahares es por medio de escorrentía superficial, en el presente estudio no se considerará el incremento de volumen en la zona de transporte debido a la adición de sólidos y pérdida de volumen en la zona de depositación a lo largo del cauce.

Aún cuando las características físicas de la cuenca permanezcan relativamente constantes, existen otras como la duración del evento, intensidad-tiempo, distribución espacial de la escorrentía, cantidad de escorrentía para lo cual se necesitaría un número infinito de hidrogramas para cubrir cada una de estas características por lo que es erróneo inferir que un hidrograma típico bastaría para una sección de entrada.

En el análisis de los lahares el hidrograma de entrada depende de la intensidad eruptiva del volcán, para la calibración del modelo se utiliza el evento ocurrido en

1877 (VEI = 4) que corresponde a un escenario grande en donde la forma del hidrograma contiene un inicio abrupto y atenuación lenta.

Tabla No. 1.2: Descripción de los escenarios eruptivos del Volcán Cotopaxi

Escenario	VEI	Tipo de Actividad	Fenómenos Eruptivos	Forma del hidrograma
1 (pequeño)	1-2	-Fuente de lava -Estromboliana	-Caídas de ceniza. -Fragmentos balísticos -Flujos piroclásticos pequeños.	-múltiples pulsos. -atenuación rápida
2 (moderado)	3	-Fuente de lava -Vulcaniana	-Caídas de ceniza. -Flujos piroclásticos -Flujos de lava	-inicio moderado -atenuación lenta -múltiples pulsos
3 (grande)	4	-Vulcaniana a pliniana	-Caídas de ceniza. -Flujos piroclásticos	-inicio abrupto -atenuación lenta
4 (muy grande)	>4	- Pliniana	-Caídas de ceniza. -Flujos piroclásticos	-inicio abrupto -atenuación lenta

Siendo el caudal pico, el tiempo de duración y tiempo de llegada del caudal pico las partes principales de un hidrograma, en la calibración para facilitar la determinación de estos parámetros se asume la forma de un hidrograma triangular en donde el caudal pico de cada tramo se desarrolla en el primer tercio del hidrograma para representar un inicio abrupto y la duración del evento corresponde a tres veces la duración de llegada del caudal pico para tratar de representar una atenuación mas lenta, el volumen del hidrograma debe ser correspondiente con el volumen de lahar generado por el derretimiento del casquete glaciar que también depende del tipo de escenario.

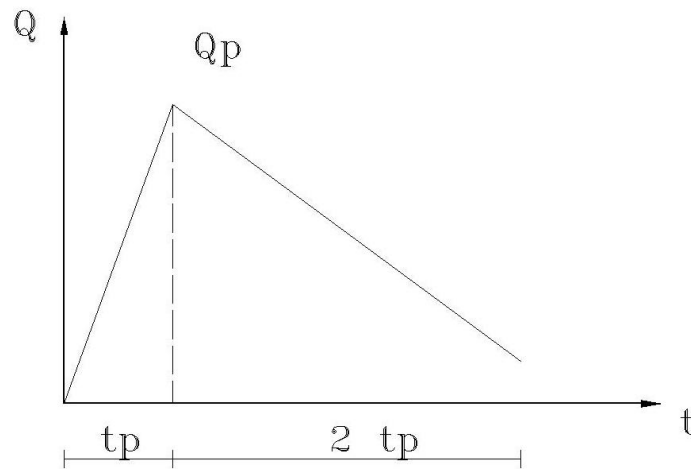


Grafico No. 1.2: Hidrograma triangular.

Analizando los niveles máximos del lahar en los drenajes, se determina el caudal pico que debe ser correspondiente a tipo de análisis que se va a realizar en el modelo.

El tiempo t_p del hidrograma de entrada depende del lugar en donde se va a iniciar la simulación, se tiene como dato de calibración por referencias históricas que el lodo llegó a Latacunga en menos de una hora por lo tanto el tiempo de llegada del caudal pico en otras secciones aguas arriba del Río Cutuchi debe ser menor a una hora mientras que en otros sectores aguas abajo según datos históricos se expresa que, a la vertiente oriental del Río Napo llegó la creciente después de una hora y media de la explosión, el arrastre de material se mantuvo por aproximadamente 4 horas, mientras que al Río Esmeraldas llegó la avenida a las 18 horas después del principio de la catástrofe.

Según resultados aproximados mediante análisis de flujo gradualmente variado se obtuvieron los siguientes datos de tiempo de recorrido del lahar en cada tramo.

Tabla No.1.3: Tiempo de recorrido del Flujo en el Flanco Sur, análisis gradualmente variado por tramos.

Tramo	T recorrido (min)
1	10.04
2	16.49
3	26.54
Σ	53.08

Analizando la tabla anterior el tiempo de llegada del caudal pico en el primer tramo deberá ser menor a 10min, en el segundo tramo deberá ser menor a 25 min y en el tercer tramo deberá ser menor 53 min aproximadamente.

El tiempo total T del hidrograma depende del tiempo de duración del evento eruptivo del volcán y del tramo a analizar.

El volumen del hidrograma debe aproximarse con el volumen generado por el derretimiento de la capa de hielo del cono del volcán y del material sólido del lahar, el mismo que tiene relación directa con el área de casquete del glaciar sobre el cual han transitado materiales incandescentes. La superficie afectada presentará un espesor de hielo derretido que junto con el arrastre de los materiales incandescentes será el factor que controle el volumen de lahar generado por estos procesos.

Otro tipo de hidrograma que puede generarse en el cauce es el producido por la rotura de un embalse formado naturalmente con el material volcánico, similar al que se formó en el río Tambo producto de la erupción del volcán Tungurahua.

1.5.1 ÁREA DEL GLACIAR

Utilizando la nomenclatura de los estudios del glaciar del Cotopaxi por Jordan (1983), los glaciares cuyos deshielos alimentan la red drenaje sur del volcán son desde el SE al NW, en sentido horario: Simarrones, El Picacho, Saquimala, San Lorenzo, Capuli Huaicu, Pucahuaicu Oeste, Chanchunga Sur, Chanchunga Norte, Yanasacha (números 11-19, Figura 1.3).

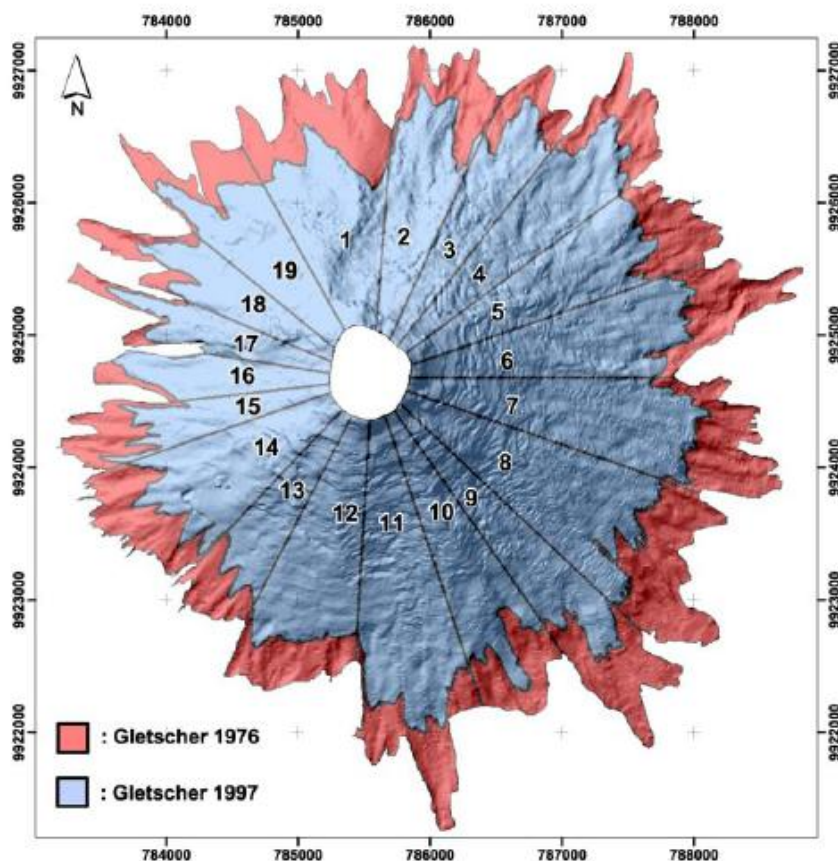


Grafico No.1.3: Modelo digital de terreno con los contornos para el Glaciar Cotopaxi.

Jordan E. Et. Al 2004

Tabla No. 1.4: Glaciares que conforman el drenaje sur con las áreas respectivas en m²

No.	Nombre del Glaciar	Area (1976)	Area medida (1997)	Reducción de área
		(m2)	(m2)	%
11	Simarrones	1585600	1268440.9	20.0%
12	El Picacho	1403500	1067240.8	24.0%
13	Saquimala	768800	353646.2	54.0%
14	San Lorenzo	1192300	740290.9	37.9%
15	Capuli Huaicu	776100	435090.2	43.9%
16	Pucahuaicu Oeste	298300	195418.4	34.5%
17	Chanchunga Sur	382600	320682.1	16.2%
18	Chanchunga Norte	712300	427634.5	40.0%
19	Yanasacha	957400	735124.3	23.2%
Area total del drenaje Sur		8076900	5543568.3	

1.5.2 ANÁLISIS SOBRE MATERIAL DEPOSITADO.

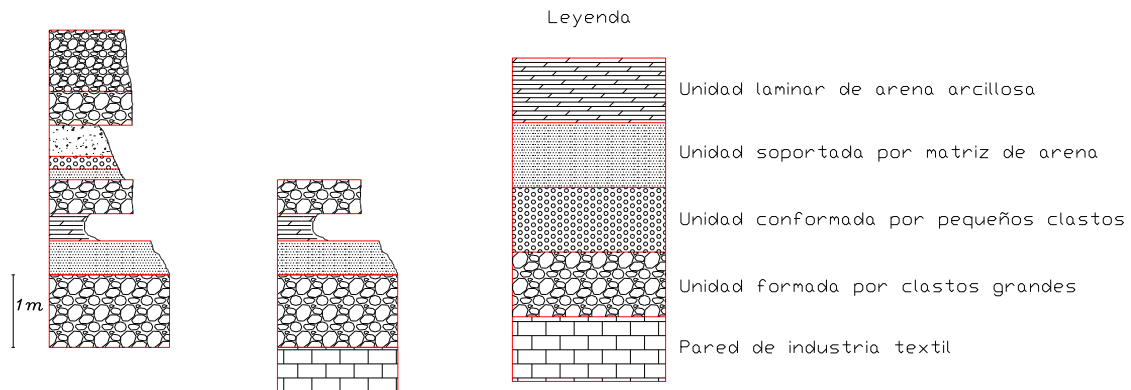


Grafico No. 1.4: Columna estratigráfica de dos secciones vistas en una industria de textiles.

Los depósitos encontrados muestran diferentes pulsos de flujo (avenidas) indicando que éste no fue estacionario. Habiéndose generado los lahares en el cono del volcán al mismo tiempo, cada cauce drena una cantidad de material de acuerdo al área de influencia en el derretimiento de los glaciares y sus condiciones topográficas, llegando las crecientes en diferentes tiempos y con diferentes características a la parte baja del Río Cutuchi en la ciudad de Latacunga.

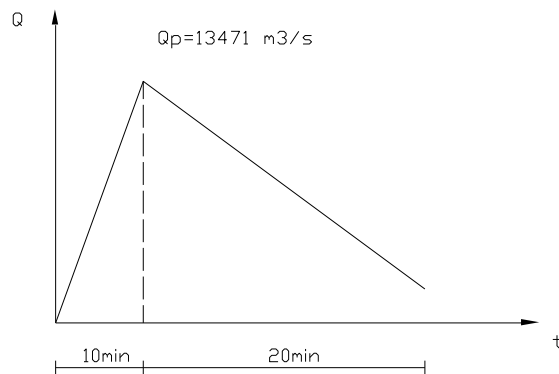
1.5.3 VOLUMEN DEL HIDROGRAMA

En el presente estudio se considera que para el primer tramo cuya cota inicial es de 4400 msnm el hidrograma de entrada debe tener un tiempo pico t_p aproximadamente 10 min, para el tramo dos cuya cota inicial se encuentra ubicada en este caso 3120 msnm el t_p aproximadamente deberá ser 20 min y en el tramo tres cuya cota inicial se encuentra ubicada en este caso 2771 msnm el t_p de aproximadamente de 30 min.

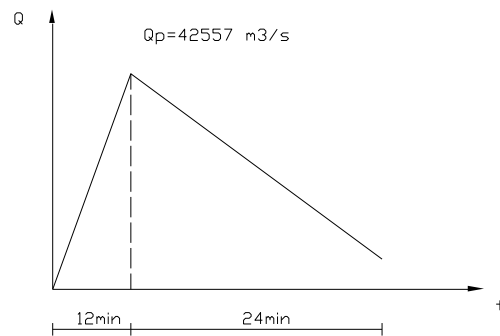
$V = \text{Área del los casquetes de aportación} \times \text{espesor derretido.}$

Según este análisis se proponen tres hidrogramas para cada tramo y asumiendo un hidrograma triangular basado en la hipótesis de un escenario del tipo VEI 4 con inicio abrupto y atenuación lenta.

Hidrograma de entrada tramo uno Calibración



Hidrograma de entrada tramo dos



Hidrograma de entrada tramo tres

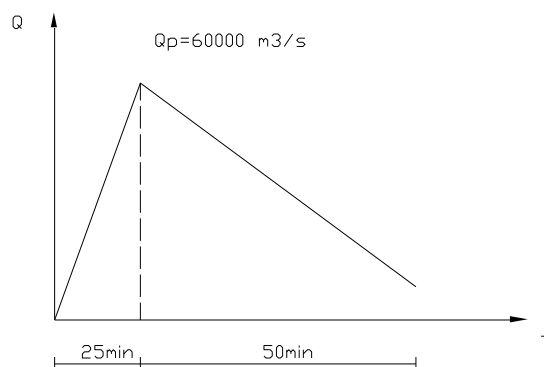


Grafico No. 1.5: Hidrogramas de entrada asumidos para el estudio.

Tabla No. 1.5: Volúmenes de agua, lahares y probabilidad de ocurrencia según la variación del VEI.

VEI	Espesor promedio afectado	Ocurrencias desde 1532	volumen agua flanco sur (m ²)	Volumen lahar flanco sur (m ²)	Probabilidad de Ocurrencia (%)
1	0.3	1	2.83E+06	8.48E+06	1.7
2	1	42	9.43E+06	2.83E+07	71.2
3	2	10	1.89E+07	5.66E+07	16.9
4	4	6	3.77E+07	1.13E+08	10.2
5	8	0	7.54E+07	2.26E+08	0.0

Tabla No. 1.6: Áreas de aportación de los glaciares a las cada una de las quebradas que drenan el Flanco Sur.

Quebradas	Glaciar	Area portante de glaciar m2 (1997)	% drenaje Flanco sur
Simarrones	11	1268441	22.88
Burruhaycu	12	1067241	19.25
Saquimala	13	353646	6.38
San Lorenzo	14, 15	1175381	21.20
Pucahuaycu	16,17,18,19	1678859	30.28
Cutuchi (Latacunga)	11,.....,19	5543568	100.00

1.6 OBJETIVOS DE LA TESIS DE GRADO

La presente tesis tiene por objeto una evaluación del modelo Fldwav como aplicación del desarrollo de los lahares en el flanco sur del Cotopaxi ante una eventual erupción. Los calados, velocidades y caudales, serán calibrados a partir del fenómeno eruptivo del 26 de junio de 1877, mediante la utilización del Modelo Hec-Ras y modelo Fldwav para **flujos inestacionarios**.

La investigación se enfoca hacia la recolección de la información necesaria para la determinación de la infraestructura que sería afectada por acción de los lahares y estimar su magnitud con la idea de reducir los efectos de futuros eventos laharíticos, sin embargo no es un documento de plan de riesgos profesional pero puede servir como ejemplo para otros estudios relacionados con el tema

CAPITULO II

ANÁLISIS BÁSICO

SOBRE LA CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA

DE LOS FLUJO LAHARICOS EN EL FLANCO SUR

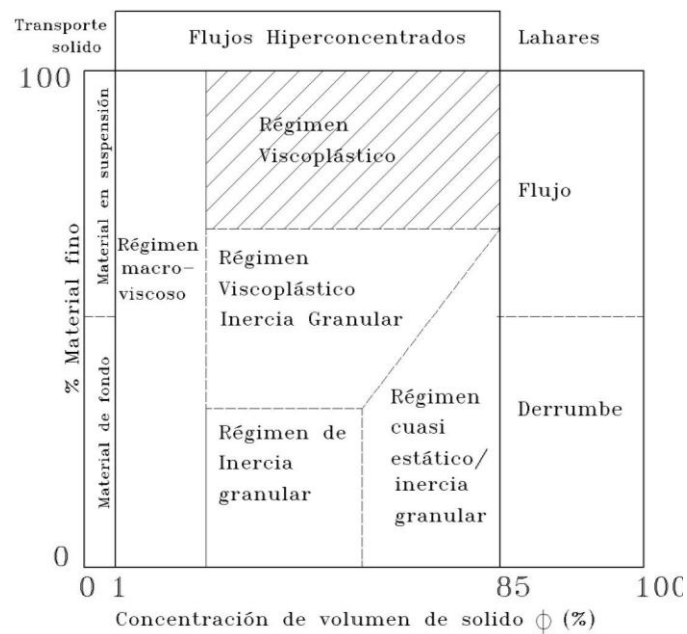


Grafico No. 2.1: Clasificación de los Flujos Hiperconcentrados

- Régimen MACRO-VISCOZO DILATANTE y VISCOZO NEWTONIANO
- Régimen de COLISION o de INERCIA GRANULAR
- Régimen intermedio QUASI- ESTATICO/INERCIA DE GRANO.
- Régimen VISCOPLASTICO
- Régimen VISCOPLASTICO /INERCIA GRANULAR
- Deslizamientos.

Notaciones:

τ = esfuerzo cortante [Pa]

u = velocidad del flujo a lo largo de la dirección del flujo [m/s]

y = coordenada perpendicular a la dirección del flujo [m]
 ρ = densidad en masa de la mezcla [kg/m³]

g = gravedad [m/s²]

h = profundidad del flujo [m]

θ = pendiente del lecho [°]

β = coeficiente de momento de Boussinesq [-]

Φ = concentración del volumen sólido [-]

ρ_s = densidad en masa solida [kg/m³]

Φ_∞ = concentración del volumen sólido máximo [-]

$$\lambda = \left[\frac{\Phi}{\Phi_\infty} - 1 \right]^{-1/3}$$

λ = concentración sólida lineal [-]:

d_{50} = tamaño de grano [m]

N = número de Bagnold [-]:

μ = viscosidad del fluido [Pa s]

$$N = \frac{\rho_s \sqrt{\lambda} d_{50}^2}{\mu} \cdot \left(\frac{du}{dy} \right)$$

Régimen MACRO-VISCOSO DILATANTE y VISCOSO NEWTONIANO

$$\tau = \mu_m \cdot \left(\frac{du}{dy} \right)$$

Fluido viscoso-newtoniano

μ_m = viscosidad efectiva [Pa s]

μ_m depende de las propiedades del fluido, de la concentración de volumen sólido y de la temperatura [refiérase a Bagnold, Einstein, Wan, Wang]

Fluido macro-viscoso dilatante

$$\mu_m = 2.25 \mu \lambda^{1.5}$$

λ = concentración lineal [-]

μ = viscosidad del liquido [Pa s]

Régimen de INERCIA GRANULAR

$$\tau = a \operatorname{sen} \alpha_1 \cdot \rho_s \lambda^2 d_{50}^2 \cdot \left(\frac{du}{dy} \right)^2$$

α_1 = ángulo de fricción dinámica interna [°]

a = coeficiente empírico = 0,042 [refiérase a Bagnold]

α_1 depende del número de Bagnold N y de la concentración del volumen sólido [refiérase Bagnold, Takhashi]

Regimen QUASI-ESTATICO/INERCIA GRANULAR

$$\tau = \tau_y + \alpha \cdot \left(\frac{du}{dy} \right)^2$$

τ_y = esfuerzo crítico de corte, “resistencia a punto de fluencia” [Pa]

α = viscosidad plástica (índice de consistencia) [Pa s²]

$$h - h_s \approx \tau_y / \rho g \operatorname{sen} \theta$$

$h - h_s$ es el espesor de la capa superficial caracterizada por no deformación

Régimen VISCOPLASTICO

$$\tau = \tau_y + k \cdot \left(\frac{du}{dy} \right)^n$$

τ_y = esfuerzo crítico de corte, “resistencia al punto de fluencia” [Pa]

k = viscosidad plástica (índice de consistencia) [Pa sⁿ]

n = exponente reológico [-]

Expresión de Coulomb para τ_y :

$$\tau_y = \tau_c + \sigma \tan \phi'$$

τ_c = esfuerzo cortante crítico cohesivo [Pa] σ = esfuerzo normal [Pa]

ϕ' = ángulo de fricción interna [°]

Régimen VISCOPLASTICO/INERCIA GRANULAR

$$\tau = \tau_c \cos\phi' + p \sin\phi' + \mu_m \cdot \left(\frac{du}{dy}\right)^n$$

τ_c = esfuerzo cortante crítico cohesivo [Pa]

ϕ' = ángulo de fricción interna [°] p = presión [Pa]

μ_m = viscosidad efectiva [Pa s]

n = exponente reológico [-]

Para el GVF (Generalized Viscoplastic Fluid) μ_m depende de p y n [reiferase a Chen]

DESLIZAMIENTOS

$$\tau = \tau_c + \sigma \tan \phi'$$

La teoría de Coulomb describe la “condición de fluencia” donde

τ_c = esfuerzo cortante crítico cohesivo [Pa]

σ = esfuerzo normal [Pa]

ϕ' = ángulo de fricción interna [°]

2.1 INTRODUCCIÓN SOBRE EL FLUJO UNIFORME, GRADUALMENTE VARIADO Y NO PERMANENTE EN FLUIDOS NO NEWTONIANOS

2.1.1 FLUJOS VISCOPLASTICOS DE TIPO LAMINAR. CONDICIONES DE FLUJO UNIFORME

Con particular atención al fluido de tipo Herschel – Bulkley

Hipótesis

Flujo monodimensional

Lecho de Ancho Infinito

Fase- simple mezcla agua-sedimento

Ausencia de sedimentación.

Ausencia de Fracturas

Ausencia de tixotropía y Anti-tixotropia.

Parámetros reológicos y densidad en masa constantes

$$\tau = \tau_y + k \left(\frac{du}{dy} \right)^n$$

Flujo Laminar + modelo reológico de Herschel- Bulkley

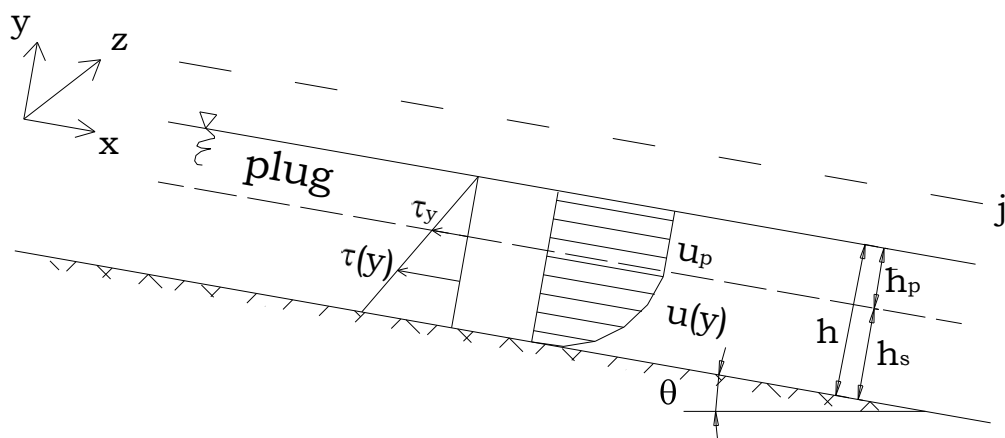


Grafico No. 2.2: Flujo Uniforme en lodos.

- Altura mínima de flujo: h_p ;
- Capa rígidamente transportada por la lámina de agua del fondo: “PLUG”.

En el flujo uniforme, el espesor del “**plug**” es COSTANTE:

$$\bar{h}_p = \frac{\tau_y}{\rho g \sin \theta}$$

De la solución de las ecuaciones de Naviér-Stokes para flujo LAMINAR obtenemos:

- ✓ El perfil vertical de velocidad (así como la velocidad en el “plug”);
- ✓ La expresión de la rugosidad viscosa causada por el movimiento del agua;
- ✓ La relación entre la altura del flujo y el caudal.

2.1.2 CONDICIONES DE FLUJO GRADUALMENTE VARIADO DE CARACTER ESTACIONARIO

Hipótesis

“AGUA SUPERFICIAL” APROVECHAMIENTO DE LA DISTRIBUCIÓN HIDROSTÁTICA DE LA PRESIÓN

De la solución de las ecuaciones de Navier-Stokes para el flujo GRADUALMENTE VARIADO obtenemos:

- ✓ El perfil vertical de velocidades (así como la velocidad en el “plug”);
- ✓ En el flujo Uniforme, el espesor del “plug” NO es COSTANTE:

$$h_p(x) = \frac{\tau_y}{\rho g \cos \theta \cdot \left(\tan \theta - \frac{dh}{dx} \right)}$$

- ✓ La ecuación para el perfil de flujo es:

$$\frac{dh}{dx} = \frac{\tan \theta - \frac{1}{\rho g h} \cdot \left\{ \tau_y + k \cdot \left[\frac{(k+1) \cdot (h+n h_p(x))^n}{n} \right] \cdot \frac{q^n}{(h-h_p(x))^n \cdot (k+1) \cdot (h+n h_p(x))^n} \right\}}{1 - Fr^2}$$

2.1.3 FLUIDOS NO NEWTONIANOS

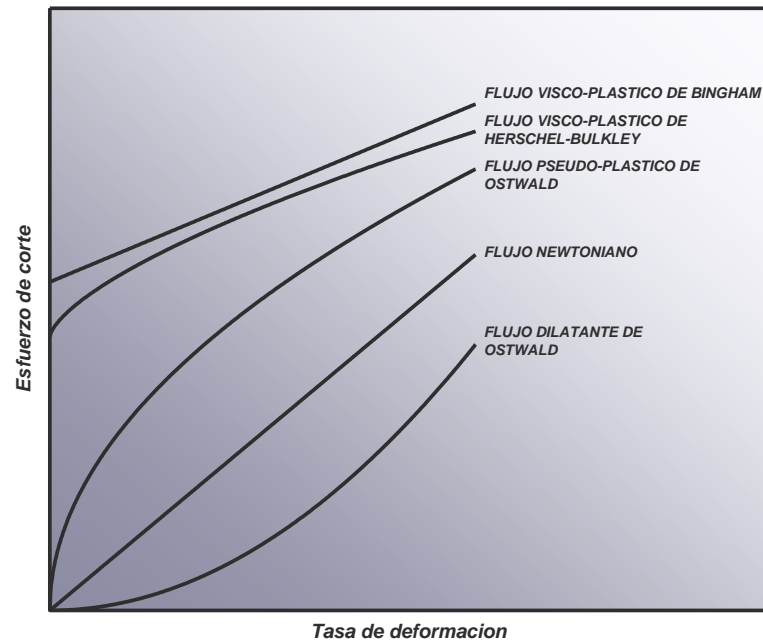


Grafico No. 2.3: Tipos de flujo según la variación del esfuerzo de corte en función de la tasa de deformación.

Estos tipos de flujo son los que consideran los efectos de la viscosidad en el fluido, es decir existe una variación en la relación entre la velocidad de aplicación del esfuerzo cortante (τ) y la cantidad de tensión.

2.1.4 FLUJO UNIFORME

En el caso de flujo uniforme en canales, las pendientes del fondo, de la superficie libre y de la línea de energía total son iguales. Esto hace que el cálculo hidráulico necesario para el diseño de una tubería parcialmente llena sea sencillo.

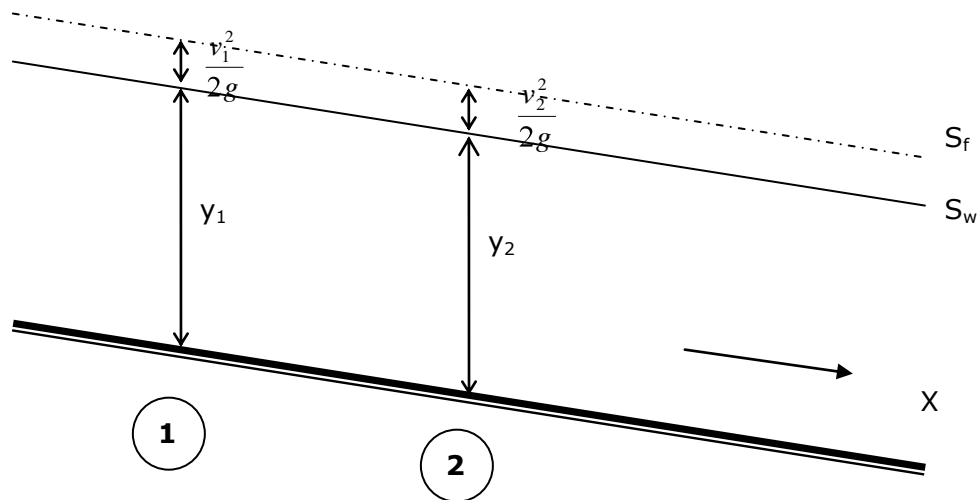


Grafico No. 2.4: Establecimiento del flujo uniforme en canal abierto

Debido a que el flujo uniforme solamente se presenta después de una longitud de desarrollo con rugosidad, forma, continuidad, alineación constante, se deduce que el flujo uniforme no se produce en la naturaleza, por lo que considera un coeficiente λ que depende de estas desviaciones de uniformidad.

Clasificación del flujo uniforme

Según el efecto de viscosidad:

- Crecimiento Flujo laminar ($Re < 2000$)
- Flujo turbulento ($Re > 10^5$)

$$Re = \frac{VR}{\nu}$$

$$V = \frac{Q}{A}$$

Re: Número de Reynolds

R: Radio hidráulico

V: velocidad media de corriente

Clasificación de los estados de flujo, tomando en consideración el efecto de gravedad:

- Flujo subcrítico (para $Fr < 1$, o $Y_n > Y_c$)
- Flujo supercrítico (para $Fr > 1$, o $Y_n < Y_c$)

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \frac{A}{B}}}$$

$$c = \sqrt{g \frac{A}{B}}$$

Fr: Número de Froude

A: Sección transversal del flujo

B: Ancho del canal en la superficie libre del agua

C: Velocidad de propagación de las ondas elementales.

En función de la estabilidad de corriente:

- Flujo estable, sin ondas de Froude
- Flujo inestable, con ondas de Froude.

Además se debe discutir sobre los diferentes tipos de flujo, acerca de la existencia de la captación espontánea de aire en la superficie del agua, que es turbulenta y muy rugosa cuando los números de Reynolds y de Froude son elevados.

2.1.5 FLUJO GRADUALMENTE VARIADO

El flujo gradualmente variado se caracteriza porque las variaciones en la superficie libre del agua, ocurren en tramos largos y son influenciados por la resistencia del fondo y de las paredes. En estos tipos de flujo se pueden despreciar los efectos de la aceleración, y para su cálculo es necesaria una correcta estimación del adecuado valor de la resistencia al flujo, y de las denominadas pérdidas por rozamiento. Para el cálculo de las pérdidas por rozamiento se expresa la pendiente de la línea de energía I.

2.1.6 FLUJO NO PERMANENTE

El problema del flujo no permanente y más comúnmente encontrado en canales abiertos, trata con olas traslatorias y oscilatorias. La ola traslatoria es una onda de gravedad que se propaga en un canal abierto y resulta en un desplazamiento apreciable de las partículas de agua en una dirección paralela al flujo, mientras que el de la oscilación es insignificante.

El flujo no permanente se clasifica en flujo variado gradualmente y flujo variado rápidamente.

En el flujo variado gradualmente la curvatura de perfil de la ola es moderada, y el cambio en profundidad es gradual. La componente vertical de la aceleración de las partículas de agua, es despreciable en comparación con la aceleración total, mientras que el efecto de la fricción del canal es apreciable.

La ley de continuidad para flujo no permanente, puede ser establecida considerando la conservación de masa en un espacio infinitesimal entre las dos secciones del canal.

Continuidad del flujo no permanente

En flujo no permanente el caudal cambia con la distancia a una relación $\partial Q / \partial x$, y la profundidad cambia con el tiempo en una relación $\partial y / \partial t$.

Cuando el canal consiste de una sección principal profunda y una sección lateral baja, extensa, se puede suponer que, mientras la descarga en la sección principal es relativamente muy alta la sección lateral contribuye solamente al volumen pero no a la descarga. Así:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial A'}{\partial t} = 0$$

Donde A' es la sección mojada de la sección lateral. Esta ecuación también se aplica al caso de un canal conteniendo obstáculos, el agua circula entre los obstáculos guiando el flujo del canal principal pero no para contribuir al caudal.

Ecuación dinámica para flujo no permanente.

Por simplicidad, el flujo no permanente será tratado como flujo no permanente en dos dimensiones, excepto que una variable adicional para el elemento tiempo, será usada. Este variable tiempo toma en cuenta la variación de la velocidad del flujo y en consecuencia trae a la anterior la aceleración, la que produce fuerza y causa pérdidas de energía adicional en el flujo.

Esta es la ecuación general dinámica para flujo gradualmente variado no permanente. La pendiente de fricción en la ecuación se puede evaluar por la formula de Manning la formula de Chézy o cualquier formula adecuada de flujo uniforme.

$$\frac{\partial y}{\partial x} + \frac{\alpha V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} = S_o - S_f$$

La solución de las ecuaciones se puede obtener por métodos aproximados por etapas o por métodos basados sobre hipótesis simplificadas.

2.2 ANÁLISIS DE LA SOLUCIÓN APROXIMADA AL FLUJO UNIFORME DE LAHARES: RESISTENCIA AL FLUJO Y RUGOSIDAD DEL CONTORNO

Para el análisis mediante flujo uniforme se utilizaron los datos de secciones cuya información fue editada por la Ing. Mothes en donde mediante Run up se determina la velocidad y se reconoce los niveles hasta donde llegó el lahar generado en el evento de 1877, la pendiente y la forma geométrica de la sección ha sido determinada mediante el uso de la carta topográfica y levantada en el campo respectivamente en el mismo estudio.

La incógnita en el análisis de flujo uniforme con los datos expuestos anteriormente es el valor del coeficiente de Manning en cada una de las secciones estudiadas obteniendo los siguientes resultados:

Tabla No 2.1: Cuadro de resultados de coeficientes de Manning en el análisis de las secciones en el Flanco sur del Cotopaxi mediante Flujo Uniforme.

	SECCION		Coeficiente Manning	Pendiente m/m	Nivel del agua m	Elevation Range
A	burruhuaicu	1877	0,050	0,025	3.151,00	3.133,78 to 3.160,00
B	Alaquez	1877	0,040	0,012	2.920,00	2.910,93 to 2.920,17
C	Barrancas. Hda	1877	0,035	0,025	3.199,00	3.186,24 to 3.200,00
D	Saquimala	1877	0,030	0,023	3.075,00	3.065,60 to 3.080,62
E	Cutuchi Run up	1877	0,040	0,010	3.202,00	3.180,10 to 3.215,00
F	Cutuchi Bocatoma	1877	0,055	0,020	3.205,00	3.175,75 to 3.205,64
G	San Diego	1877	0,050	0,090	3.434,00	3.426,00 to 3.451,32
G	San Diego	1768	0,080	0,090	3.445,00	3.426,00 to 3.451,32

Para el cálculo del comportamiento hidráulico basado en el flujo uniforme de las secciones se utilizó el Programa Flow Master de Cálculo para Canales Abiertos de la Haestad Methods (Ver Anexos a).

Tabla No 2.2: Cuadro de características hidráulicas de las secciones de calibración análisis mediante flujo uniforme.

	SECCION	Discharge m ³ /s	Flow Area m ²	Wetted Per m	Top Width m	Actual Dept m	Critical Elev m	Critical Slop m/m	Velocity m/s	Specific En m	Froude	Flow Type
A	burruhuaicu	16.810,55	1.108,10	105,45	94,55	17,22	3.154,17	0,012	15,17	3.162,73	1,42	Supercritical
B	Alaquez	5.272,56	1.029,50	402,52	398,43	9,07	2.920,07	0,012	5,12	2.921,34	1,02	Supercritical
C	Barrancas. Hda	12.561,83	804,8	125,33	109,73	12,76	3.202,79	0,007	15,61	3.211,42	1,84	Supercritical
D	Saquimala	25.746,74	1.477,60	230,91	227,78	9,40	3.079,57	0,004	17,42	3.090,48	2,18	Supercritical
E	Cutuchi Run up	65.292,28	4.470,60	316,61	300,62	21,90	3.204,05	0,007	14,6	3.212,88	1,21	Supercritical
F	Cutuchi Bocatoma	52.509,80	3.185,60	196,27	184,53	29,25	3.207,98	0,012	16,48	3.218,85	1,27	Supercritical
G	San Diego	13.470,71	653,7	102,71	94,62	8,00	3.439,91	0,013	20,61	3.455,65	2,5	Supercritical
G	San Diego	36.285,71	1.767,90	138,07	114,89	19,00	3.452,04	0,031	20,52	3.466,48	1,67	Supercritical

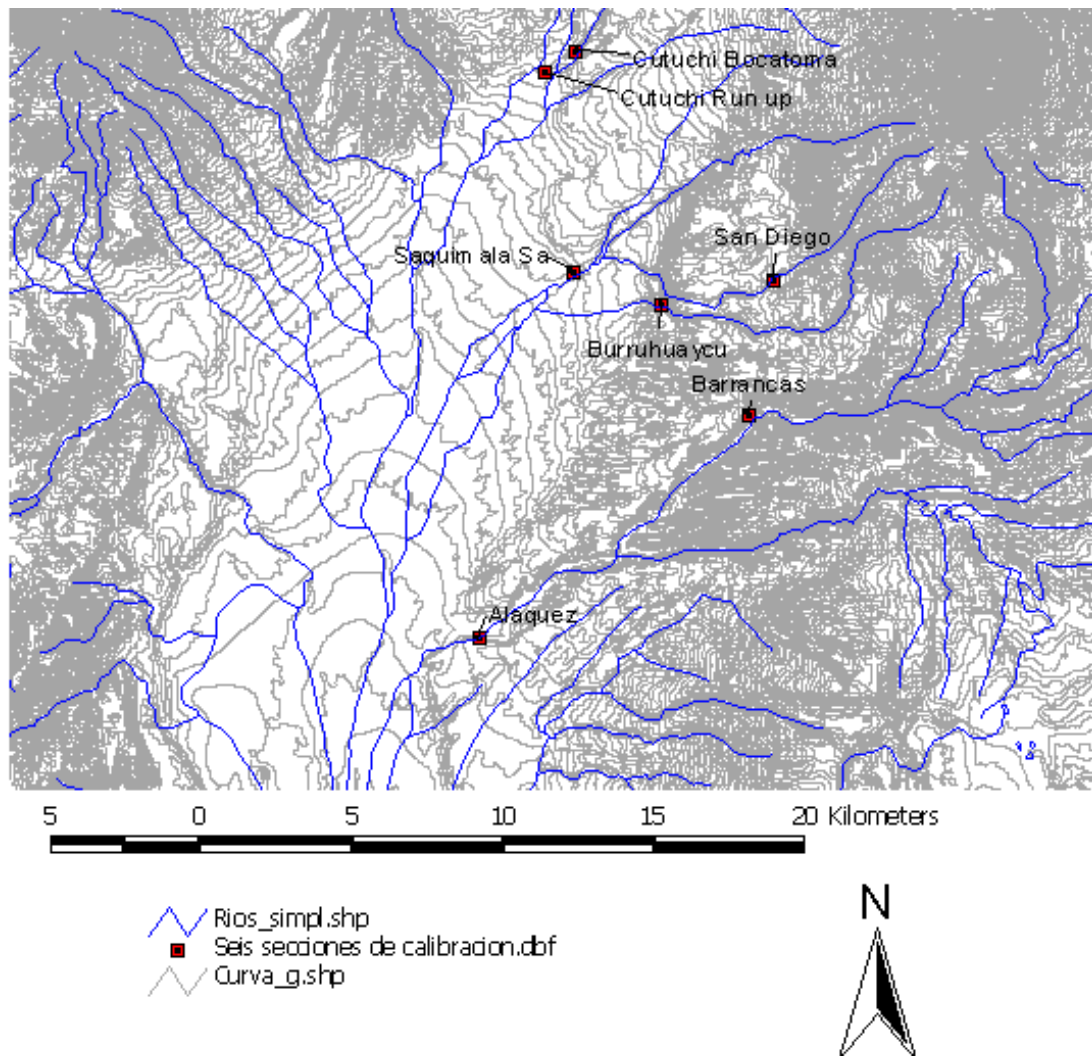
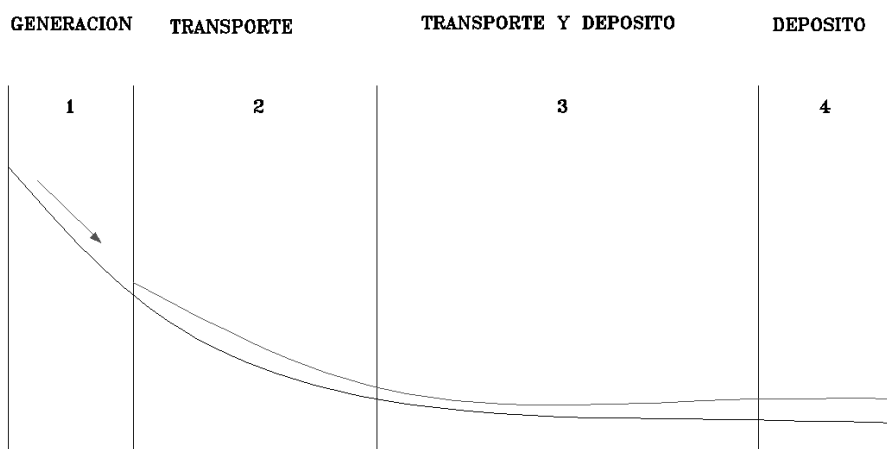


Grafico No.2.5: Ubicación de las secciones de calibración del Flanco Sur.

2.3 CONDICIONES DE FRONTERA PARA LA SIMULACIÓN DEL FLUJO DE LAHARES EN EL FLANCO SUR DEL VOLCÁN COTOPAXI



- 1.-Evento generador y tramo inicial de formación de lodos.
- 2.- Tramo de transporte de lodos y de incremento del volumen de sólidos.
- 3.- Tramo de transporte y depósito de material sólido.
- 4.- Tramo final, de depósito de los sólidos.

Grafico No.2.6: Caracterización según el comportamiento del lahar a lo largo del cauce.

El tramo cuyas secciones se encuentran ubicadas en la zona de transporte con altas pendientes, tienen eminentemente un comportamiento de flujo supercrítico y predominan las fuerzas gravitacionales sobre el comportamiento del flujo.

El tramo de transporte y depositación a más del comportamiento inercial del fluido, presenta la influencia de la viscosidad de los lodos ya que junto con la disminución de la pendiente, producen la depositación del material granular a lo

largo del cauce disminuyendo la velocidad y el tamaño del diámetro del material transportado. (Balanza de Lane).

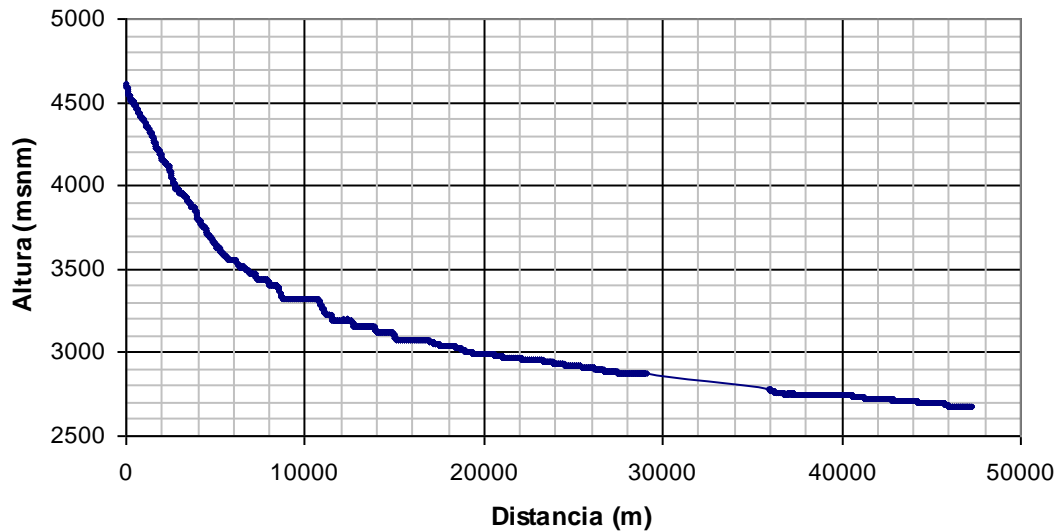


Grafico No. 2.7: Perfil del drenaje sur-occidental del Volcán Cotopaxi

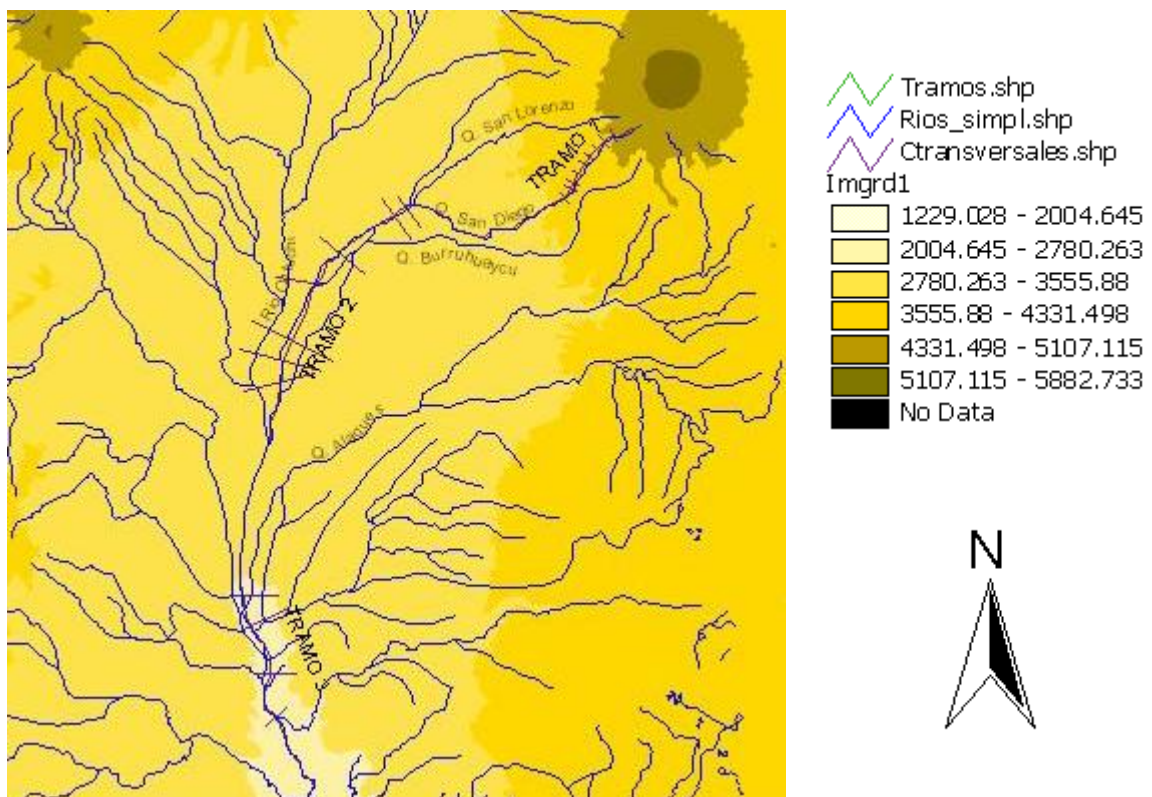


Grafico No. 2.8: Tramos de Quebradas seleccionados para el análisis del Flanco Sur del Cotopaxi

2.4 CRITERIOS DE SELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS REQUERIDOS PARA LA CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA EN EL MODELO DE SIMULACIÓN NUMÉRICA FLDWAV

Para el análisis reológico se utilizarán tres tramos que caractericen los tres tipos de comportamiento del flujo de lodos.

Cada una de las secciones de calibración partiendo del régimen de flujo uniforme se analizarán para régimen turbulento newtoniano, macroviscoso, inercia granular, quasi-estático/inercia granular, viscoplástico de Bingham y viscoplástico/inercia granular (Herschel-Bulkley).

2.4.1 PARÁMETROS REOLÓGICOS

i	0,025
θ (°)	1,4
ρ_w (kg/m ³)	1000
ρ_s (kg/m ³)	2650
ρ (kg/m ³)	1400
g (m/s ²)	9,81

Φ (m ³ /m ³)	0,242
--	-------

2.4.1.1 Régimen macroviscoso

μ_m (Pa s)	1400	ν (m ² /s)	1
----------------	------	---------------------------	---

2.4.1.2 Régimen de Inercia Granular

a	0,042	da 1 a 10	
λ	10		
d_{50} (m)	0,1		
α_1 (°)	18,7	α_1 (°)	0,32

2.4.1.3 Régimen quasi-estático/inercia granular

α (Pa s ²)	3,5
τ_y (Pa)	2000
h_p (m)	5,827

2.4.1.4 Régimen visco plástico (Bingham)

μ_b (Pa s)	3,5
τ_y (Pa)	2000
h_p (m)	5,827

2.4.1.5 Régimen visco plástico/inercia granular (Herschel-Bulkley)

k (Pa s ⁿ)	3,5
τ_y (Pa)	2000
n	0,667
h_p (m)	5,827

De los resultados y valores obtenidos en el análisis reológico se determina el tipo de régimen que gobierna el comportamiento de los lahares en cada sección de calibración, este régimen será asignado al tramo debido a las características similares de las secciones que lo conforman.

El tramo será modelado mediante el software Fldwav para flujos inestacionarios de lodo y escombros, los parámetros reológicos y el régimen serán los correspondientes al análisis reológico de las secciones.

2.5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el análisis de flujo uniforme de las seis secciones de estudio los valores del coeficiente de Manning oscilan entre 0.030 a 0.055 en el evento de 1877, sin embargo en la sección de San Diego se tiene el registro de un evento sucedido en el año de 1768 para el cual el coeficiente de Manning es de 0.08.

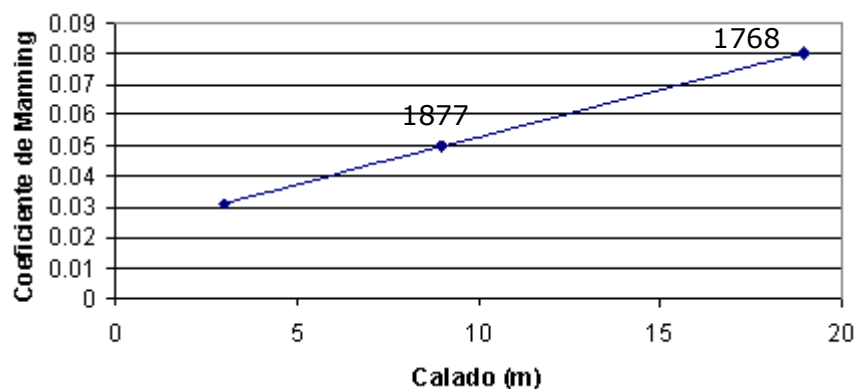


Gráfico No.2.9: Coeficiente de Manning para flujo uniforme en la sección de San Diego

Se recomienda realizar inspecciones de campo para analizar el tamaño y tipo de material depositado a lo largo del drenaje sur de los lahares producidos por el volcán, de esta manera se puede diferenciar las zonas de transporte y deposición de material eruptivo.

Los tramos deberán estar formados de por lo menos dos secciones de calibración, una sección al inicio del tramo y otra al final. Para el presente estudio se ha trabajado con una sección de calibración en el primer tramo, los parámetros usados en el análisis reológico son asumidos por similitud a otros estudios realizados sobre todo en el flanco norte.

Cada sección de calibración deberá contener la mayor cantidad de información in situ posible (estratigrafía, granulometría, nivel del lahar, estudio de suelos, referencia cartográfica, etc.).

Para determinar niveles de otros eventos eruptivos mediante flujo uniforme en las secciones, se deberán cambiar los coeficientes de Manning en relación directamente proporcional a la altura.

CAPITULO III

DISCRETIZACIÓN DE LA RED DE DRENAJE DEL FLANCO SUR

3.1 BASES DE LA DISCRETIZACIÓN EN EL FLANCO SUR

Para la discretización se debe hacer un análisis del material depositado mediante el uso de: mapa geológico, mapa estratigráfico del tipo de suelos a lo largo del cauce y mapa de pendientes.

Para el presente estudio se seleccionaron los tramos considerando la diferencia de pendientes en el cauce.

3.1.1 ANALISIS DE LOS TRAMOS DE ESTUDIO.

3.1.1.1 Tramo I

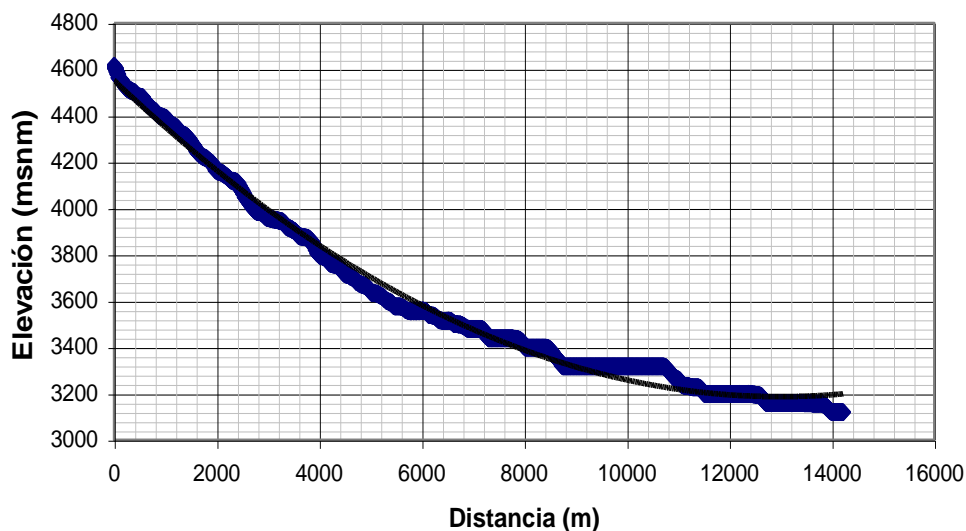


Gráfico No. 3.1: Perfil del tramo 1

$$y = 8E-06x^2 - 0,2103x + 4552,9$$

$$R^2 = 0,992$$

Pendiente tramo I

$$Y = 16E-6x - 0.2103$$

Dominio $0 < x < 12500$

Recorrido $1.12\% < y < 21.03\%$.

En este tramo predomina el tipo de flujo de lodos hiperconcentrados, inercia granular y los materiales arrastrados se asume del orden de 50 cm, por analogía según análisis estratigráfico de los materiales depositados en los valles del flanco norte. Para la calibración de este tramo se tiene los niveles del lahar de 1877 en la sección de San Diego.

3.1.1.2 TRAMO II

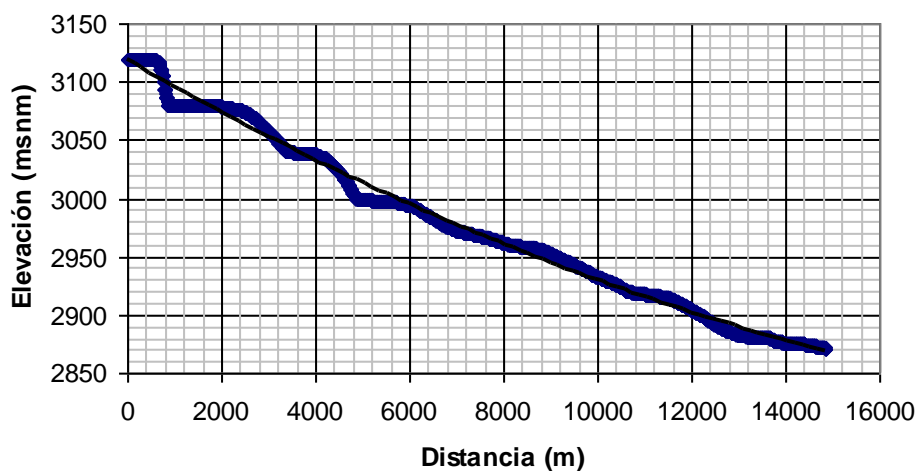


Grafico No. 3.2: Perfil del tramo 2

$$y = 4E-07x^2 - 0,0232x + 3118,8$$

$$R^2 = 0,9929$$

Pendiente tramo II

$$Y = 8E-07x - 0.0232$$

Dominio $0 < x < 15000\text{m}$

Recorrido $1.12\% < Y < 2.32\%$

Este tramo que pertenece a la zona de depositación y transporte, predominan flujos hiperconcentrados de tipo viscoso, se asume que el material tiene una dimensión de 15 cm aproximadamente. Para la calibración se usará la sección Saquimala.

3.1.1.3 TRAMO III

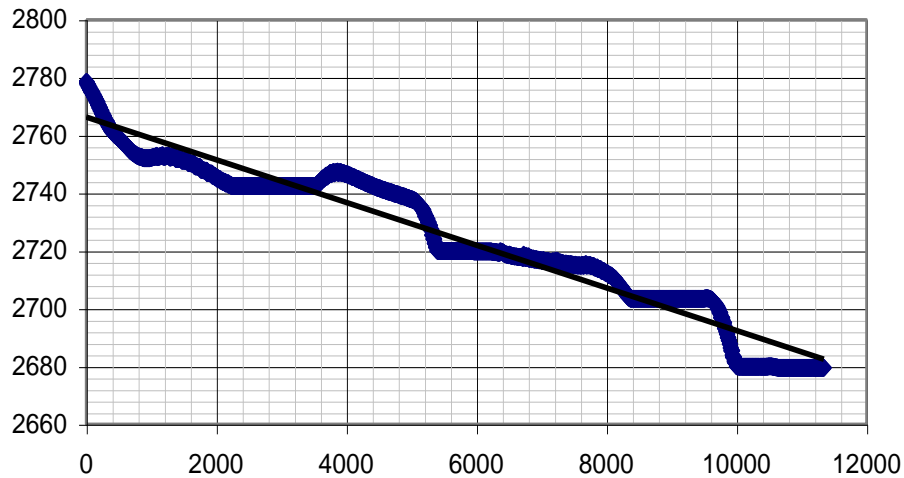


Gráfico No. 3.3: Perfil del tramo 3

$$y = -0,0074x + 2766,2$$

$$R^2 = 0,9457$$

Pendiente tramo III $0 < x < 15000$

$$Y = -0.0074$$

Debido a las pequeñas pendientes en este tramo predomina el régimen viscoplástico, no hay registro de los niveles alcanzados, sin embargo se analizará de manera general utilizando datos topográficos de las secciones levantadas cuyas alturas tienen una precisión $A = \pm 0,01$ m y de los caudales transportados aguas arriba.

3.2 ESQUEMAS DE LA SOLUCIÓN GLOBAL Y DE LA PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

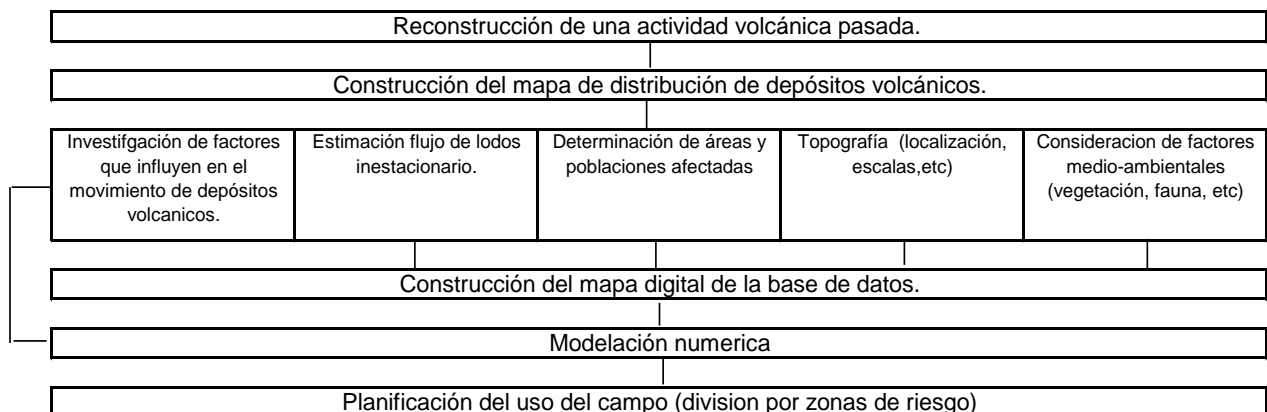


Gráfico No 3.4: Diagrama de flujo de la solución global.

Para realizar la modelación numérica de un flujo inestacionario en cada sección, se debe ser realizar un análisis previo secuencial mediante flujo uniforme y gradualmente variado para depurar y verificar los datos geométricos, hidrológicos y reológicos.

Los niveles del lahar determinados en la simulación numérica del cauce permiten realizar el mapa de riesgos a los cuales estará expuesta la zona de drenaje del Río Cutuchi ante una eventual erupción.

3.3 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las secciones de calibración analizadas en los gráficos anteriores se encuentran en la cuenca alta del drenaje sur y se ajustan al régimen granular.

Cuando la altura de calado del lahar es mayor a 10m, todas las curvas tienen un comportamiento asintótico hacia valores de pseudo-coeficiente de Manning bajos del orden de 0.05, este comportamiento es contrario al análisis de flujo uniforme.

Para poder realizar un análisis real del comportamiento viscoplástico del flujo, se recomienda realizar estudios de suelos y de lodos, de manera que se puedan determinar las características físicas y reológicas de las suspensiones de material sólido para el cálculo y simulación numérica.

CAPITULO IV

CALIBRACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO

4.1 ESQUEMA DE LA CALIBRACIÓN POR TRAMO

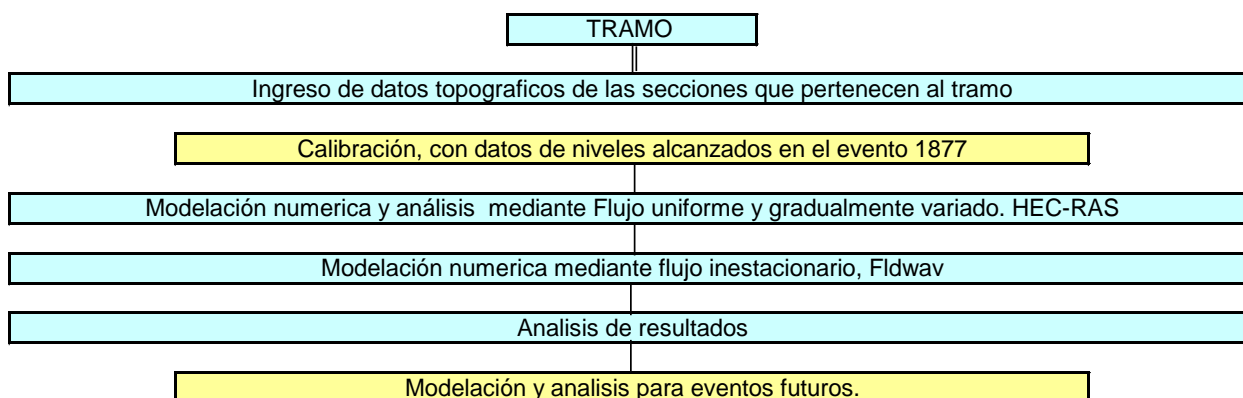


Grafico No. 4.1: Esquema de calibración y análisis para eventos futuros.

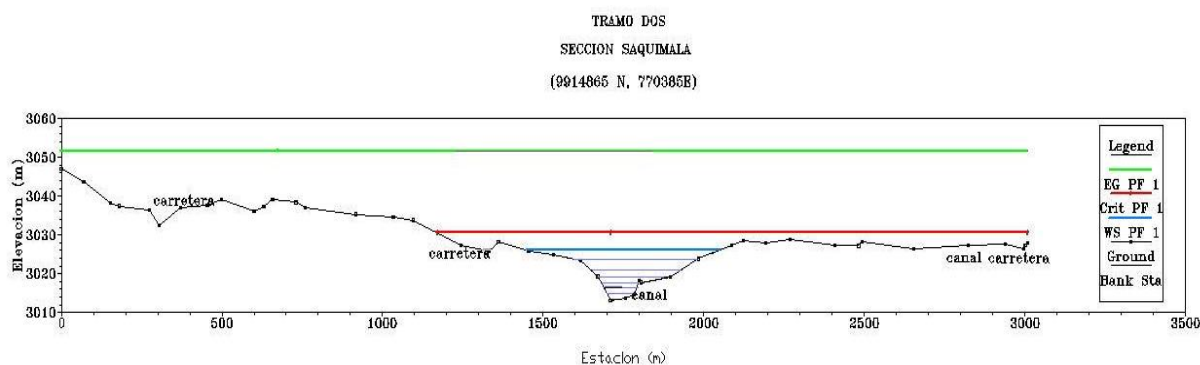
Como marco de referencia se analizan los tramos mediante flujo gradualmente variado mediante el uso del modelo HEC- RAS

Tabla No. 4.1: Análisis y calibración del tramo uno mediante flujo gradualmente variado.

tramo	seccion	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	V (m/s)	calado m	Froude # Chl
1	13	6500	4290	4304	4304	4308	0.01	8.97	14.4	1.01
1	12	6500	4163	4179	4179	4183	0.01	9.36	15.5	1.01
1	11	6500	4051	4065	4065	4070	0.01	9.33	14.3	1.01
1	10	6500	3957	3966	3966	3969	0.00	8.12	9.4	0.99
1	9	6500	3893	3899	3906	3956	0.22	33.58	5.6	5.72
1	8	6500	3792	3807	3807	3812	0.01	9.75	14.5	0.99
1	7	6500	3713	3718	3726	3796	0.27	39.16	4.8	6.50
1	6	6500	3666	3672	3678	3713	0.15	28.69	5.9	4.89
1	5	6500	3576	3585	3585	3588	0.01	7.93	8.5	1.00
1	4	6500	3540	3552	3557	3576	0.04	21.81	11.3	2.68
1	3	6500	3426	3435	3435	3439	0.00	8.93	9.0	0.98
1	2	6500	3387	3394	3401	3432	0.04	27.34	6.4	3.84
1	1	6500	3342	3345	3351	3384	0.07	27.83	3.4	4.94

Tabla No. 4.2: Análisis y calibración del tramo dos mediante flujo gradualmente variado.

tramo	seccion	Q Total	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Calado	Froude # Chl
		(m ³ /s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	m	
2	221	70000	3119.6	3136.4	3136.4	3142.3	0.001	11.76	16.72	0.95
2	220	70000	3079.7	3089.4	3099.3	3135.6	0.024	30.12	9.69	3.47
2	219	70000	3013.2	3026.1	3030.5	3051.5	0.023	22.32	12.91	3.17
2	218	70000	2947.8	2963.8	2969.7	2988.2	0.021	21.9	15.95	3.05
2	217	70000	2925.6	2934.6	2936.2	2939.9	0.012	9.42	9.02	2
2	216	70000	2912.7	2918.8	2920.7	2924.9	0.012	8.3	6.1	1.94
2	215	70000	2883.3	2899.8	2902.9	2910.2	0.007	15.27	16.59	1.87

**Grafico No. 4.2:** Simulación mediante Hec Ras; Línea de energía, velocidad y calado de la sección Saquimala en fase de calibración mediante el lahar de 1877,**Tabla No. 4.3:** Análisis y calibración del tramo tres mediante flujo gradualmente variado.

Tramo	seccion	Q Total	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	calado	Froude # Chl
		(m ³ /s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)		
3	34	60000	2770.29	2787.55	2787.55	2789.72	0.00212	7.39	17.26	0.97
3	33	60000	2758.23	2782.93	2782.93	2785.79	0.00159	8.35	24.70	0.90
3	32	60000	2724.95	2750.44	2750.44	2754.89	0.00159	10.76	25.49	0.95
3	31	60000	2715.32	2744.50	2744.50	2749.07	0.00132	10.47	29.18	0.88

4.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Los valores obtenidos de los resultados en la modelación deberán ser acordes con los valores reales en los diferentes campos de estudio por ejemplo:

- ✓ Velocidades de alrededor de los 20 m/s
- ✓ Los niveles del calado 10-30 m o más.
- ✓ Tipo de régimen subcrítico o supercrítico.
- ✓ Análisis de régimen reológico usado en el tramo.
- ✓ Coeficientes de Manning mayores a 0.02.
- ✓ Si son pendientes >20% los resultados pueden estar conformados por régimen supercrítico en donde predominan las fuerzas de gravedad. Si son pendientes menores, en los resultados puede intervenir un análisis viscoso.
- ✓ La pendiente disminuye aguas abajo del Río Cutuchi de 21% a 0.7%, por lo tanto la velocidad deberá disminuir recíprocamente.

4.3 PLAN DE PRUEBAS PARA EL ESTUDIO DE SENSIBILIDAD

La sensibilidad del plan de pruebas está basada en la variación de cada uno de los parámetros que intervienen en el cálculo y análisis reológico del flanco sur, para lo cual se presenta el siguiente cuadro de valores con los rangos que pueden alcanzar las propiedades de los materiales en el caso de transitar por el cauce.

	Rango	Unidad
Angulo de fricción interna	20 - 56	grados
Densidad de solidos	2.2-2.8	T/m ³
d ₅₀ (ASUMIDO)	10-50	cm
Esfuerzo de corte inicial τ_v	0.3 - 20	Pa
Viscosidad dinámica η	0.2-100	poisses

Tabla No. 4.4: Rango de valores de los parámetros reológicos.

El esfuerzo de corte y la viscosidad dinámica dependen de la concentración del volumen de sólidos del fluido y del tipo de suelo del que está conformada la matriz.

Debido a que la topografía no cambia considerablemente, no se analiza la sensibilidad al cambio de pendiente ni al cambio geométrico de la sección.

4.4 CONCLUSIONES

Aunque se usan los mismos parámetros para el análisis reológico de cada sección, los resultados obtenidos en el cálculo son diferentes.

En el análisis reológico los pseudocoefficientes de manning aumentan considerablemente cuando los calados de los flujos son menores a 10m es decir tienen una relación inversa, mientras que en análisis de flujo uniforme los valores del coeficiente de manning aumentan cuando aumentan los calados del flujo.

En el análisis de resultados del flujo gradualmente variado del tramo tres, para un evento VEI4 con un caudal aproximado de $Q=60000$ m³/s se produciría la inundación del Aeropuerto de Latacunga, la Panamericana, el poliducto y el canal de agua de riego.

CAPITULO V

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS PRINCIPALES PARÁMETROS

5.1 ESTUDIO DE VARIACIÓN DE PARÁMETROS GEOMÉTRICOS

El tránsito de un lahar por el cauce natural del Río Cutuchi producirá cambios en la geometría de cada sección, creando a su paso canales con paredes laterales verticales, como lo indican las crónicas de Sodiro e información recopilada en eventos similares producidos recientemente.



Foto No. 4: Cauce del Río Chinchiná, Volcán Nevado Ruiz, Noviembre 1985.



Foto No. 5: Quebrada Burruhuaycu, Volcán Cotopaxi, 4500 m.s.n.m.

Este cambio geométrico en el cauce dependerá de la magnitud del evento y aún no se ha desarrollado una base matemática para su análisis, por lo tanto en este estudio se trabajará con la hipótesis de que los canales ya formados son los que transportarán el lahar y no se producirán cambios en la pendiente ya que la topografía no cambia considerablemente.

5.2 ESTUDIO DE VARIACIÓN DE PARÁMETROS HIDRODINÁMICOS Y REOLÓGICOS

5.2.1 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LA REOLOGÍA FRENTE A VARIACIONES DEL DIÁMETRO D₅₀ EN LA SECCIÓN BURRUHUAICU.

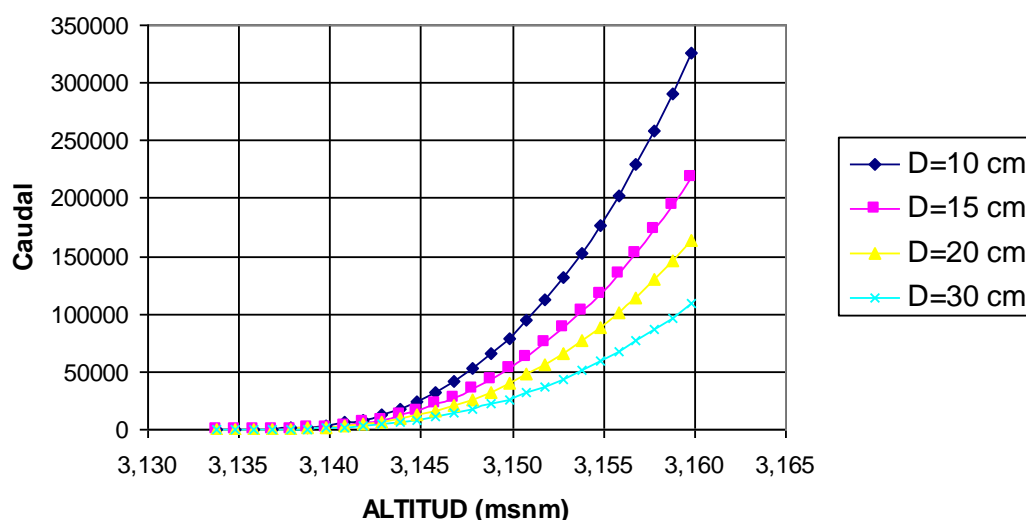


Gráfico No. 5.1: Sensibilidad del caudal frente a cambios del tamaño del material arrastrado en Régimen Granular.

En el análisis bajo el régimen de inercia granular de la sección Burruhuaicu que se muestra en la figura el lahar de 1877 alcanza hasta la cota 3150, si el material arrastrado tiene un $d_{50} = 10\text{cm}$ el caudal que pasa por esa sección $70000\text{m}^3/\text{s}$ o si el material $d_{50} = 30\text{cm}$ el caudal de transporte es de $30000\text{m}^3/\text{s}$, es muy importante tener un conocimiento de la granulometría del material que se deposita y transporta en cada tramo.

Para el nivel que alcanza el lahar según los resultados de la tabla, la velocidad que alcanza el lahar es de 16 m/s , el caudal es de $15821\text{ m}^3/\text{s}$ y el pseudocoefficiente de Manning es de 0.063 para transportar un material $d_{50} = 30\text{cm}$.

Los pseudo coeficientes de Manning para calados menores a 1.0m calculados mediante régimen de inercia granular y macroviscoso son del orden de 0.38 - 1.93 , que incorpora la interacción flujo-pared del canal.

Tabla No.5.1: Valores de velocidad, caudal unitario, caudal, esfuerzo de corte, Manning de la Sección Burruhuaicu mediante análisis de Régimen de Inercia Granular.

Elevación (m)	h	Régimen de inercia granular						
msnm	(m)	U (m/s)	$u (y=h)$ (m/s)	Q (m ³ /s)	q (m ² /s)	J (m/m)	$\tau (y=0)$ (Pa)	n (sm ^{-1/3})
3,134	0	0.0	0.0	0	0.00	0.00	0.00	0.000
3,135	1	0.2	0.4	2	0.25	0.02	343.24	0.637
3,136	2	0.7	1.2	17	1.40	0.02	686.49	0.357
3,137	3	1.3	2.2	69	3.87	0.02	1029.73	0.255
3,138	4	2.0	3.3	186	7.95	0.02	1372.97	0.201
3,139	5	2.8	4.6	387	13.88	0.02	1716.21	0.166
3,140	6	3.7	6.1	695	21.90	0.02	2059.46	0.143
3,141	7	4.6	7.7	1136	32.20	0.02	2402.70	0.126
3,142	8	5.6	9.4	1762	44.96	0.02	2745.94	0.113
3,143	9	6.7	11.2	2598	60.35	0.02	3089.18	0.102
3,144	10	7.9	13.1	3652	78.54	0.02	3432.43	0.093
3,145	11	9.1	15.1	4951	99.67	0.02	3775.67	0.086
3,146	12	10.3	17.2	6518	123.89	0.02	4118.91	0.080
3,147	13	11.6	19.4	8383	151.33	0.02	4462.16	0.075
3,148	14	13.0	21.7	10548	182.13	0.02	4805.40	0.071
3,149	15	14.4	24.0	13023	216.42	0.02	5148.64	0.067
3,150	16	15.9	26.5	15821	254.31	0.02	5491.88	0.063
3,151	17	17.4	29.0	18960	295.93	0.02	5835.13	0.060
3,152	18	19.0	31.6	22456	341.39	0.02	6178.37	0.057
3,153	19	20.6	34.3	26325	390.80	0.02	6521.61	0.055
3,154	20	22.2	37.0	30585	444.27	0.02	6864.86	0.052
3,155	21	23.9	39.8	35248	501.90	0.02	7208.10	0.050
3,156	22	25.6	42.7	40332	563.80	0.02	7551.34	0.048
3,157	23	27.4	45.7	45853	630.07	0.02	7894.58	0.047
3,158	24	29.2	48.7	51827	700.80	0.02	8237.83	0.045
3,159	25	31.0	51.7	58270	776.10	0.02	8581.07	0.044
3,160	26	32.9	54.9	65291	856.05	0.02	8924.31	0.042

5.2.2 SENSIBILIDAD EN REGIMEN DE INERCIA GRANULAR, VARIACION EN LA DENSIDAD DE LOS SÓLIDOS.

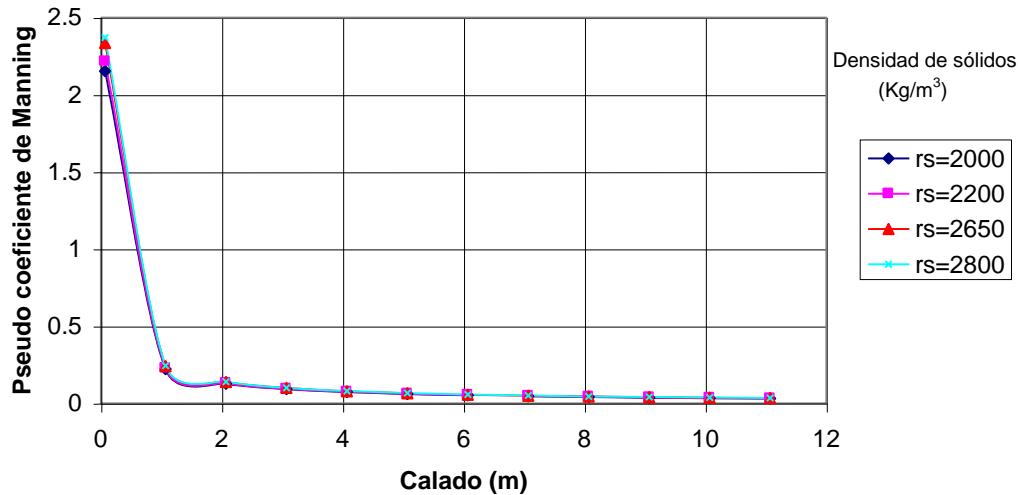


Gráfico No. 5.2: Pseudocoefficiente de Manning Vs Calado con cambios en los valores de la densidad de los sólidos.

En la sección Alaquez (Cota 2910 msnm) frente a los cambios de la densidad de los sólidos solo se producen cambios para calados menores a 1m, es decir no es sensible a la densidad de los sólidos.

5.2.3 SENSIBILIDAD EN REGIMEN DE INERCIA GRANULAR DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN INTERNA.

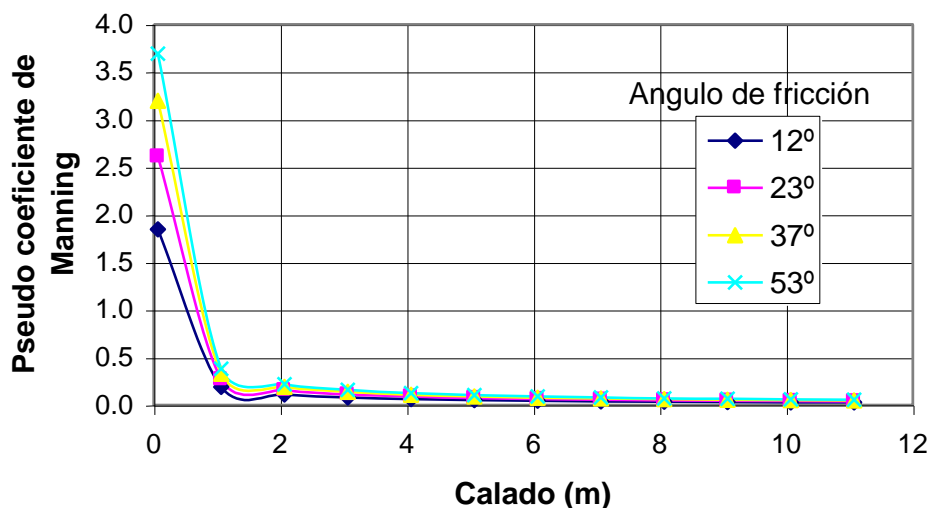


Gráfico No. 5.3: Pseudocoefficiente de Manning Vs Calado con cambios en los valores del los ángulos del fricción interna.

La sensibilidad del coeficiente de Manning frente al coeficiente de fricción interna es despreciable.

5.3 CONCLUSIONES

El análisis reológico obedece a las condiciones de la sección que transporta un determinado caudal, sin embargo al cambiar la magnitud del evento cambia la capacidad de arrastre del caudal que circula a través del cauce y cambian nuevamente todos los parámetros físicos de los materiales.

Las secciones de calibración tienen resultados que se ajustan al régimen inercia granular, estas secciones tienen características similares al encontrarse en zonas de alta pendiente.

En el régimen de Inercia granular, debido a la gran sensibilidad de los pseudocoefficientes de Manning y caudales frente a los cambios del tamaño del grano transportado, es necesario determinar por tramos los valores reales del tamaño de grano transportado.

CAPITULO VI

SIMULACIÓN NUMÉRICA DEFINITIVA

6.1 BASES PARA LA SIMULACIÓN NUMÉRICA DEFINITIVA

El éxito de la simulación numérica más que de la cantidad depende de la calidad de datos obtenidos acerca del flanco del volcán y de los criterios de manejo de dicha información, de manera que se pueda realizar una buena representación de la realidad basado en eventos anteriores.

El programa de modelación es una aplicación de los criterios con los que se realiza el estudio en donde se consideren los parámetros más importantes que influyen en el comportamiento reológico de los lahares.

La base de datos deberá ser adquirida dependiendo del tipo de análisis que se realizará sobre la cuenca del Río y sobre las metas del estudio, una buena base de datos estará conformada por:

- Un registro topográfico de escala 1:5000 de la cuenca del Río Cutuchi en zonas con pendientes mayores de 20% y para las cuencas planas es necesario tener un levantamiento detallado de las secciones a lo largo del cauce, así como también es necesario determinar en campo los niveles del alcanzados por el lahar de 1877 al ingreso y salida de cada tramo para poder realizar una buena calibración.
- Estudios estratigráficos, granulométricos y de las propiedades físicas del material depositado en cada sección que conforma el tramo, esta base de datos se requiere para el análisis reológico.
- Una buena recopilación de información histórica con datos más precisos acerca del evento producido en el año 1877.

- Debería realizarse la simulación de todo el drenaje del flanco sur del Cotopaxi, en donde se sectoricen las propiedades de los lodos por tramos. Ya que el evento y sus efectos de desglaciación se inician al mismo tiempo en todas las quebradas que están en la parte más alta de la cuenca en estudio, obteniendo hidrogramas más cercanos a la realidad generados aguas abajo.
- Al inicio del tramo en cada una de las quebradas los lahares han producido un ensanchamiento de la sección con pendientes bajas (Fotos 6-7-8), produciendo una forma de embalse de almacenamiento (cuenco amortiguador) en la cota 4200 aproximadamente, luego se han formado las quebradas de transporte con paredes verticales (Foto 9).



Foto No. 6: Ensanchamiento del cauce al inicio de la Quebrada Burruhaycu (aguas arriba).

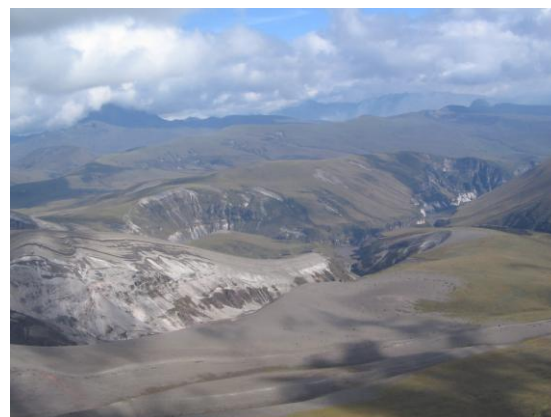


Foto No. 7: Ensanchamiento del cauce al Inicio de la Quebrada Simarrones.



Foto No. 8: Paredes verticales en el cauce al inicio de la Quebrada Burruhaycu (aguas abajo).



Foto No. 9: Cauce de la quebrada Burruhaycu con paredes verticales descendiendo el Volcán Cotopaxi.

6.2 ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS CON EVENTOS EN EL FLANCO SUR DEL VOLCÁN Y CON RESULTADOS DE OTROS VOLCANES

Se han realizado algunos trabajos de modelación numérica del evento de 1877 en los flancos Norte y Sur del Cotopaxi (Barberi et al., 1992, Aguilera et al., 2004). Aguilera et al (2004) modeló lahares con volúmenes iniciales de $35-80 \times 10^6 \text{m}^3$ para el flanco norte, reproduciendo los máximos calados alcanzados por el lahar en el valle. Barberi et al. (1992) simuló flujos con volúmenes de 45, 90 y $150 \times 10^6 \text{m}^3$ que reproducen actualmente las alturas alcanzadas por el lahar de 1877.

El presente estudio está basado en información recopilada en proyectos de investigación anteriores y una aplicación al análisis reológico del lahar.

En la EPN se han realizado algunos trabajos de tesis de grado, Ing. Luis Espin e Ing. Santiago Maldonado, 1993 para el análisis del flujo de lodo utilizaron el Modelo Hec-1 y desarrollaron un modelo denominado Lahar-1, el cual se fundamenta en el algoritmo de Muskingum-Cunge, en donde es muy importante para toda la simulación numérica el coeficiente de Manning.

Rebecca Williams, 2006 ha realizado el más reciente estudio del flanco sur del Cotopaxi en donde modela los lahares usando TITAN2D en la zona de Latacunga, usando varios volúmenes que corresponden a los actuales depósitos a lo largo del Río Cutuchi cerca de la Ciudad de Latacunga. Presentando sus resultados mediante la realización de las zonas de inundación de Latacunga.

6.3 RECOMENDACIONES PARA INVESTIGACIONES FUTURAS

Las cartas topográficas con las que se cuentan en el presente proyecto son de escala 1:25000 las mismas que fueron generadas a partir de las cartas topográficas 1:50000, es necesario trabajar con una carta topográfica actualizada y con una escala mínima de 1:5000.

Se recomienda realizar un estudio más detallado tomando en consideración los efectos económicos, medioambientales y riesgo de pérdidas humanas que causaría la erupción del volcán Cotopaxi de manera que se puedan realizar planes de contingencia.

Para el estudio se recomienda usar un mapa geológico mas detallado de la zona afectada por el transito de lahares.

Para el estudio reológico en las zonas de alta pendiente, se requiere información acerca de la granulometría del material transportado y depositado aguas abajo, mientras que en las zonas de baja pendiente se recomienda recopilar información acerca de la matriz que conforma el lodo.

La dinámica del comportamiento y las propiedades de los materiales a lo largo del cauce es similar en todas las áreas de drenaje, la granulometría y el comportamiento reológico del lahar cambia de acuerdo a la pendiente y la distancia de recorrido.

La zona de Mulaló, se encuentra depositado mucho material rocoso (andesita) de aproximadamente 1m de diámetro.

6.4 CONCLUSIONES

Solo realizando un análisis del sistema total del drenaje sur (desde el cono hacia aguas abajo), se podrá determinar y prever planes de contingencia con tiempos aproximados de llegada del lahar a las diferentes zonas de peligro para los habitantes.

En las zonas de los valles (Latacunga), es muy importante la determinación de la topografía en elevación ya que el volumen de almacenamiento puede ser muy sensible con el cambio de la altura.

En la actualidad se están realizando medidas del volumen real del casquete del glaciar del Cotopaxi, con estos nuevos datos se podrá determinar de realmente cual podría ser el volumen de aportación del glaciar para la generación de lahares.

CAPITULO VII

CONCLUSIONES SOBRE EL USO DEL MODELO FLDWAV

7.1 SOBRE LA BASE TEÓRICA DE LA SOLUCIÓN MATEMÁTICA

El modelo FLDWAV se basa en la solución de la ecuación unidimensional de Saint Venant de flujos inestacionarios mediante diferencias finitas con una variedad de condiciones de borde internas para controlar la simulación de flujos inestacionarios que circulan a través de estructuras hidráulicas. El flujo puede ocurrir en un cauce simple o en un sistema interconectado de cauces en la cual los efectos por sinuosidad son considerados. El flujo, el cual puede ser estudiado mediante análisis newtoniano o no newtoniano puede cambiar libremente con el tiempo y ubicación desde subcrítico a supercrítico o viceversa.

El modelo FLDWAV es una combinación de los modelos NWS DAMBRK y DWOPER, el primero desarrollado en 1970 para el análisis del transito de la onda creciente y generalizado para la aplicación sobre ríos en donde varían la geometría, parámetros de rugosidad, flujos laterales, perdidas locales, contracciones y expansiones producidas por puentes, operaciones de apertura y cierre de compuertas y efectos del viento; el segundo desarrollado en 1970 para ser usado en tiempo real para el análisis de rotura de presas.

El modelo Fldwav puede ser usado por ingenieros/hidrólogos a lo largo de las aplicaciones del flujo inestacionario incluido flujo en tiempo real para poder pronosticar el comportamiento de un sistema de drenaje de ríos, análisis de rotura de presas para un caudal máximo probable, diseño de vías fluviales, realización de mapas de inundación, diseño de sistemas de riego, mapas de inundación de lodos y diseño/análisis de drenaje para tormentas.

El fin de este programa es realizar predicciones que se puedan aplicar en la navegación, riego, operaciones de control de un embalse, centrales

hidroeléctricas, recreación y cualquier interés sobre el comportamiento hidráulico sobre ríos y estructuras hidráulicas.

FLDWAV es un modelo generalizado de inundación de una descarga. La ecuación que gobierna el modelo es la ecuación unidimensional de Saint Venant de flujos inestacionarios mediante diferencias finitas a la par representada mediante ecuaciones para las condiciones internas de borde para los flujos que atraviesan estructuras tales como puentes, azudes, con los cuales se puede desarrollar específicamente las condiciones de rotura de presa en tiempo dependiente. También se utilizan las ecuaciones para las condiciones de borde externas a la entrada y salida del cauce del río a ser estudiado. El sistema de ecuaciones se resuelve mediante un interactivo, no-lineal, método implícito de diferencias finitas. El flujo puede ser también subcrítico o supercrítico o una combinación de ambos variando en el espacio y tiempo; las propiedades del fluido pueden obedecer los principio de flujo Newtoniano (agua) o no Newtoniano (flujo de lodos/escombros). El hidrograma de entrada puede ser ingresado al programa en los datos o puede ser desarrollado por el modelo especificando parámetros de una rotura de presa (altura, forma, tiempo de desarrollo). La posible presencia de embalses aguas abajo los cuales controlen el flujo y pueda ser el flujo se encuentre con puentes, tributarios, sinuosidad del sistema, niveles a lo largo de y/o aguas abajo del río y otros efectos cada uno puede ser representado durante la propagación del flujo aguas abajo.

FLDWAV también puede ser usado para el análisis de flujo de lodos y escombros usando un hidrograma de entrada en la parte superior del cauce. El modelo puede realizar el análisis mediante sistema de métrico o ingles.

El hidrograma se modifica (atenuándose, retardándose y distorsionándose) como se produce a través de un canal o área de inundación considerando los efectos de la clasificación de inundación, resistencia a la fricción del flujo, componentes de la aceleración de la onda, pérdidas de energía del flujo debido a las estructuras y componentes a lo largo del cauce. Las modificaciones en la onda del flujo se manifiestan en la atenuación de la magnitud del caudal pico, la dispersión del volumen del flujo de la onda creciente y los cambios de velocidad (velocidad de propagación) o tiempo de viaje de la onda creciente. Si el río o valle contiene un

área de inundación extensa la onda de crecida puede ser extensivamente atenuada y su tiempo de viaje se incrementará grandemente. De la misma manera si el canal es uniforme la atenuación de la onda será despreciable.

La ecuación de Saint Venant, expresada en forma de conservación, con términos adicionales para representar los efectos de expansión /contracción, sinuosidad y flujo No-Newtoniano se basa en la ecuación de conservación de masa y momentum.

Las condiciones iniciales para resolver las ecuaciones para flujo inestacionario de Saint Venant debe ser el conocimiento de las secciones del canal en donde se iniciará la simulación ($t=0$). También puede ser otra condición inicial del flujo el definirlo como estacionario o inestacionario. En el FLDWAV, el régimen del flujo deber especificado antes de la simulación como subcrítico, supercrítico o flujo mixto, dependiendo del valor del número de Froude del tramo que se va analizar.

El coeficiente de Manning describe la resistencia del flujo debido a la rugosidad del canal causado por las paredes conformadas de arena/grava, vegetación y obstrucciones, efectos de curvatura del canal, y pérdidas en la circulación del agua. El coeficiente de Manning n se define para cada sección del canal o río.

La simulación resulta frecuentemente muy sensitiva al coeficiente de Manning n . Aunque ante la ausencia de datos, n puede ser estimado; sin embargo, los mejores resultados son obtenidos cuando n se ajusta a curvas de descarga de observaciones históricas.

Debido a que la ecuación de Saint Venant tiene aplicación solamente para flujos unidimensionales, en algunos casos en donde el flujo es más cercano a flujo bidimensional, es decir la velocidad del flujo y la elevación de la superficie del agua no varía solamente en la dirección x a lo largo del río o valle sino también en la dirección perpendicular a la dirección x . El comportamiento bidimensional de un flujo puede ser importante en cauces extremadamente anchos, en donde se presenten cambios bruscos de sección y las velocidades y las variaciones se confinan a la transición en el cual flujo cambia de unidimensional a bidimensional a lo largo del a dirección x .

7.2 SOBRE EL ESQUEMA DE LA SOLUCIÓN NUMÉRICA

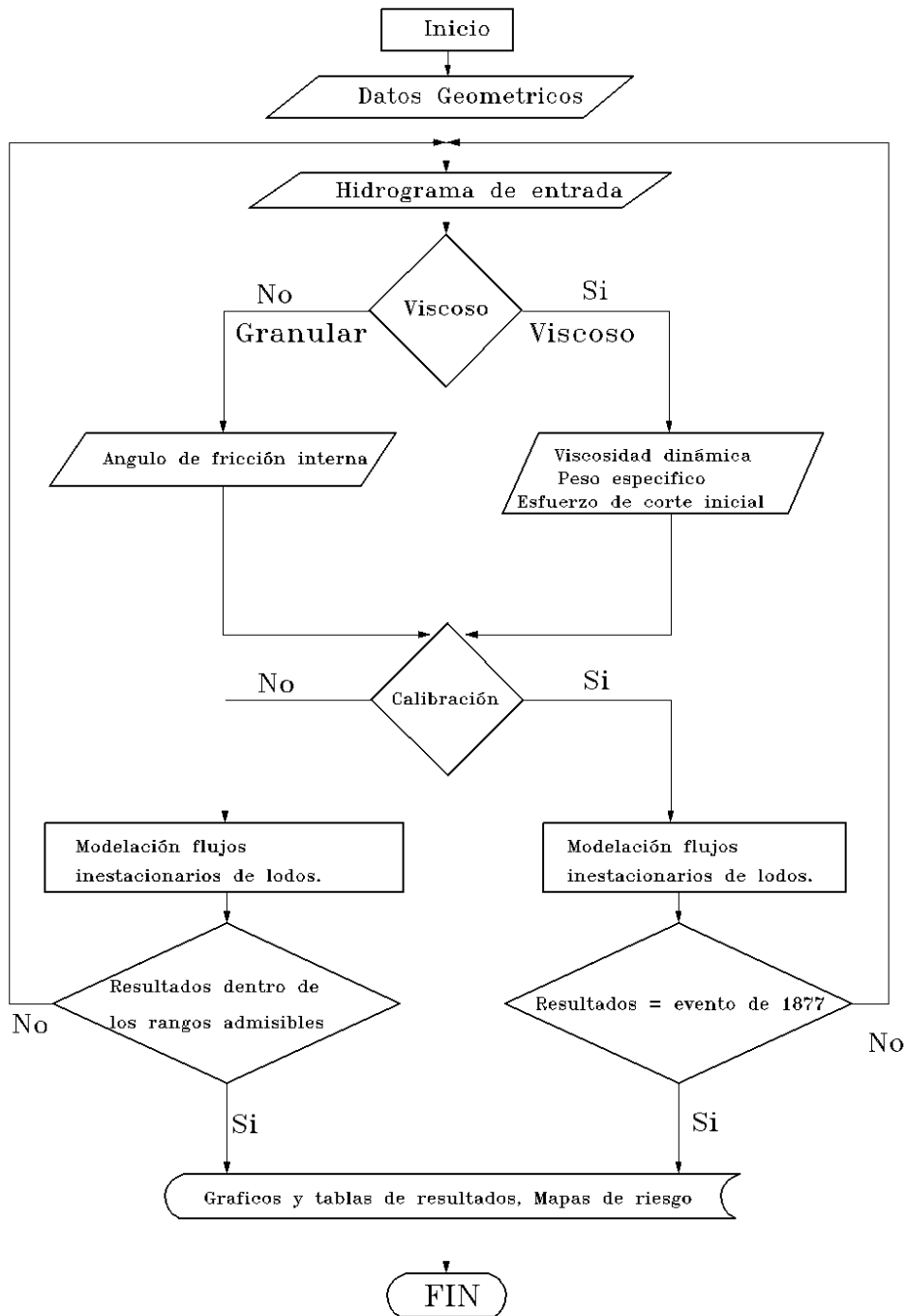


Grafico No. 7.1: Diagrama de Flujo para análisis por tramos

7.3 SOBRE LA INFORMACIÓN BÁSICA REQUERIDA Y UTILIZADA

La información que se usa en el presente estudio es:

- ✓ DEM de escala 1:50000.
- ✓ 39 secciones levantadas topográficamente en el río Cutuchi.
- ✓ Seis secciones con estudios de Run up.
- ✓ Estudio de la simulación numérica del Flanco Norte realizado por la EPN para la EMAAP.
- ✓ Referencias históricas del paso del lahar en el evento de 1877.
- ✓ Parámetros reológicos usados en otros modelos.
- ✓ Hidrogramas de entrada

7.4 SOBRE EL PROCESO DE CALIBRACIÓN DEL MODELO

El proceso de calibración fue realizado mediante el ajuste de parámetros variables en el tránsito del lodo/escombros a lo largo del cauce, con el fin de obtener los niveles alcanzados por el lahar en las secciones de calibración en tiempos acordes con la duración que se manifiesta en referencias históricas en la ciudad de Latacunga.

Para la calibración del modelo es necesario reconocer los parámetros que pueden variar y el rango real que puede alcanzar cada parámetro.

En el análisis de flujo uniforme y flujo gradualmente variado el proceso de calibración se limita a la variación del coeficiente de Manning en el modelo.

Para el análisis en flujo inestacionario es muy importante generar un hidrograma de entrada el mismo que puede tener un número indeterminado de hidrogramas probables ampliando los parámetros que varían en la calibración siendo estos el coeficiente de Manning, tiempo de duración del hidrograma, Q_p , tipo de hidrograma dado en el evento de calibración. Del mismo modo se pueden generar un sinnúmero de resultados para eventos futuros.

7.5 SOBRE EL TRATAMIENTO Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Los datos ingresados al modelo fueron en el sistema de unidades métricas por lo tanto los resultados son mostrados mediante tablas y gráficos en las mismas unidades. De acuerdo a la interés del modelador este programa puede mostrar curvas de descarga, los hidrogramas, velocidades, profundidad del flujo en cada sección, el tiempo de transito de la onda en el tramo.

Estos resultados deben ser congruentes con los determinados mediante otros métodos y con los datos determinados en campo del evento de 1877.

El tramo uno ubicado en la vertiente de la Quebrada San Diego tiene una longitud de 7 km, las pendientes son de alrededor de 20%, presenta velocidades que exceden los 20 m/s. El transito de la onda fue analizada en el modelo FLDWAV mediante el método granular para lodos/escombros para régimen supercrítico, cuya duración no excede los 10 min. Las áreas de inundación se muestran en el siguiente grafico.

El tramo tres ubicado en la ciudad de Latacunga se encuentra en la cuenca Baja del Río Cutuchi de cuarto orden, tiene una longitud de 7 Km, las pendientes son menores a 0.7%, presenta velocidades de alrededor de 10 m/s. El transito de la onda en este tramo fue analizado con el método de Régimen visco plástico de Bingham para flujo de lodos en régimen subcrítico. Las áreas de inundación se muestran en el siguiente grafico.

Realizando un análisis en los extremos del tramo para flujo inestacionario los caudales pico generados presentan una disminución del orden de 2000 m³/s

CAPITULO VIII

RECOMENDACIONES PARA SIMULACIONES FUTURAS

8.1 SIMULACIÓN DEL EFECTO VISCOSO DE FLUJOS DE LODOS Y ESCOMBROS

El efecto viscoso en el comportamiento de lodos empieza a influir en las cuencas bajas del Río Cutuchi, debido a la gran cantidad de material fino que contiene el lahar y las bajas pendientes que se presentan en la topografía, su análisis se deberá enmarcar a la recreación de los lodos formados en base a la información granulométrica y de los suelos conformados por lahares.

Debido a la poca información de lodos, los parámetros usados en el análisis viscoso han sido considerados en función de datos reales usados en otros estudios.

El efecto viscoso a lo largo del cauce es dinámico, ya que las propiedades del flujo cambia a lo largo del cauce que lo transportará por lo que se hace necesario realizar discretizaciones por tramos que tengan características similares.



Foto No. 10: Material granular y material viscoso depositado en el valle.

8.2 SIMULACIÓN NUMÉRICA CON FLUJO NO PERMANENTE

La simulación con flujo no permanente requiere de un tratamiento de datos mas exhaustivo basado en el criterio físico, geográfico, hidrológico, geológico, histórico, modelación hidráulica, topográfico de la cuenca. Además de un dominio en el manejo de los parámetros que se deben ingresar en el modelo a utilizar y su calibración requiere de más tratamiento de datos y de tiempo.

Debería realizarse un estudio mas profundo basado en datos reales levantados en campo desarrollando la reología como parte influyente en el comportamiento de los lahares, de manera que se puedan prever eventos futuros considerando los cambios en las propiedades de viscosidad, tamaño, concentración y otros de los materiales.

8.3 SIMULACIÓN NUMÉRICA POR OBJETIVOS Y CON DIFERENTES TIPOS DE MODELOS

La simulación numérica mediante régimen uniforme en cada sección es la mas sencilla de realizar y sirve para dar un criterio general del comportamiento del flujo en la sección estudiada. Se puede determinar el tipo de régimen reológico que gobierna además el tipo de flujo supercrítico o subcrítico. Este análisis es muy importante y es obligatorio realizarlo como análisis previo a la modelación de Flujo Inestacionario de lodos. A más del FLOWMASTER, existen varios modelos desarrollados para realizar este tipo de análisis. Los datos que se requieren son los conseguidos mediante el estudio de Run up y los niveles alcanzados por el lahar.

La simulación numérica mediante régimen gradualmente variado requiere de un tratamiento más profundo de la topografía del cauce y de cada una de las secciones pertenecientes al río o al sistema de ríos que van a intervenir en el estudio. Para la calibración es necesario asumir un caudal que se ajuste a un coeficiente de Manning que represente las propiedades reológicas del flujo. En este caso el caudal usado será constante en todas las secciones del tramo y variarán los calados. Para la realización de simulaciones de eventos diferentes al de calibración se deben escoger con criterio los coeficientes de Manning y el caudal de ingreso, en este caso se puede determinar las causas de un evento

futuro en relación al evento de calibración. (Por ejemplo un evento 4 veces menor que el evento de 1877).

La simulación mediante flujo Inestacionario de un caudal de agua con un pseudo coeficiente de Manning, el tratamiento de resultados tratados de manera similar a los obtenidos en flujo gradualmente variado.

La modelación de un flujo Inestacionario de lodos, requiere de un completo estudio de las propiedades físicas y mecánicas de lo materiales, además de una selección correcta del tipo de régimen que se aplicará en cada uno de los tramos que conforman el cauce.

REFERENCIA BIBLIOGRAFICA

- [1] Naudascher, E., Castro, M.: HIDRÁULICA DE CANALES, Limusa-Noriega Editores, México, 2000.
- [2] Chow, V.T.: HIDRÁULICA DE LOS CANALES ABIERTOS, McGraw Hill Ed. Co., New York – Bogotá, 1959.
- [3] Ranga Raju, K.G.: FLOW THROUGH OPEN CHANNELS, Tata McGraw Hill Ed. New Delhi, 1990.
- [4] Henderson, F.M.: OPEN CHANNEL FLOW, MacMillan Co. Ed., New York 1970.
- [5] Subramanya, S.: FLOW IN OPEN CHANNELS, Tata McGraw Hill Ed., New Delhi, 1985.
- [6] ASCE, Journal of the Hydraulics División, Proceedings and Monographs. Información obtenible desde el Internet.
- [7] Saldarriaga, J.: HIDRÁULICA DE ACUEDUCTOS Ed. McGraw Hill, New York – Bogotá, 2003.
- [8] Fread, D.L., Lewis, J.M.: NWS FLDWAV MODEL, THEORETICAL DESCRIPTION AND USER DOCUMENTATION, November 1998.
- [9] Escuela Politécnica Nacional, 2000. Continuación de los estudios de los flujos de lodo y escombros en las laderas orientales del volcán Guagua Pichincha. Convenio firmado entre la EPN y el PNUD-MDMQ.
- [10] Escuela Politécnica Nacional, 2000. Zonificación de los peligros por flujos de lodo y escombros, sismo en la ciudad de Bahía de Caráquez, Provincia de Manabí. Convenio Dirección Nacional de Defensa Civil-EPN.
- [11] Escuela Politécnica Nacional, 2000. Simulación de los flujos secundarios de lodo en las laderas orientales del volcán Pichincha. Convenio Municipio del Distrito Metropolitano de Quito con la Dirección General de Planificación-EPN.
- [12] Lorenzini, G. y N. Mazza. 2004. Debris Flow. Phenomenology and Pheological Modelling. WITPress.
- [13] Miyamoto, Kuniaki, 1990. Debris-Mud Flow Hazard Map. Sabo Technical Center. Poligrafiados del curso sobre Ingeniería Volcánica. Japan Internacional Cooperation Agency - JICA.

- [14] Sylvestre, Janice y Paul Sylvestre. 1999. FLDWAV application: transitioning from calibration to operational mode. National Weather Service, NOAA.
- [15] Suzuki, Hiroshi, 1990. Hazard Map. Sabo Technical Center. Poligrafiados del curso sobre Ingeniería Volcánica. Japan Internacional Cooperation Agency - JICA.
- [16] Suárez Díaz Jaime, 2001. Control de erosión en zonas tropicales, Ediciones Universidad Industrial de Santander
- [17] USGS, 1987. Hydrological hazards along Squaw Creek from a hypothetical failure of the glacial Moraine impounding Carver Lake near Sisters, Oregon. Open File Report 87-41.
- [18] USGS, 1988. Simulation of three lahars in the Mount Saint Hellens area, Washington, using a one-dimensional, unsteady state stream flow model. Water-Resources Investigations Report 88-4004.
- [19] Robalino, E. Caracterización Reológica de los flujos laharicos en el flanco sur del volcán Cotopaxi, Abril 2006.
- [20] Pacheco, R. Caracterización Reológica de los flujos de lodos y escombros de origen volcánico, Curso Internacional, EPN, Marzo 2006.
- [21] Aguirre, S. Simulación numérica de los flujos laharicos en el flanco sur del volcán Cotopaxi mediante el programa NWS FLDWAV, en ejecución, 2006.