

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**



**“FACTORES CONDICIONANTES Y DESENCADENANTES EN LA  
DETERMINACIÓN DEL PELIGRO DE FLUJO DE DETRITOS  
APLICANDO EL MODELO FLO-2D, QUEBRADA LLOCLLAMAYO  
KM-295+350, IIRSA SUR TRAMO -IV”**

**TESIS**

**PRESENTADA POR:  
JOSÉ ELOY CCAMA LIPA**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:  
INGENIERO CIVIL**

**PUNO - PERÚ**

**2018**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO - PUNO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**

“FACTORES CONDICIONANTES Y DESENCADENANTES EN LA DETERMINACIÓN DEL PELIGRO DE FLUJO DE DETRITOS APLICANDO EL MODELO FLO-2D, QUEBRADA LLOCLLAMAYO KM-295+350, IIRSA SUR TRAMO -IV”

**TESIS PRESENTADA POR:**  
**JOSÉ ELOY CCAMA LIPA**

**PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:**  
**INGENIERO CIVIL**



**APROBADA POR EL JURADO REVISOR CONFORMADO POR:**

**PRESIDENTE:**

  
\_\_\_\_\_  
ING. GUILLERMO NÉSTOR FERNÁNDEZ SILA

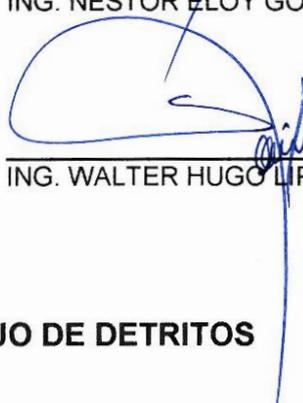
**PRIMER MIEMBRO:**

  
\_\_\_\_\_  
ING. SAMUEL LAURA HUANCA

**SEGUNDO MIEMBRO:**

  
\_\_\_\_\_  
ING. NÉSTOR ELOY GONZALES SUCASAIRE

**DIRECTOR / ASESOR:**

  
\_\_\_\_\_  
ING. WALTER HUGO LIPA CONDORI

**TEMA : MODELAMIENTO, FLUJO DE DETRITOS**

**ÁREA : HIDRÁULICA**

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: HIDRÁULICA Y MEDIO AMBIENTE**

**Fecha de sustentación, 28 de Diciembre del 2018**

## DEDICATORIA

### **A DIOS.**

Por haberme dado la vida y acompañarme en este mundo, por haber puesto en mi camino a aquellas personas que has sido mi soporte e inspiración, por enseñarme que lo difícil de conseguir es lo más apreciado y recordado, por darme la dicha de lograr mi objetivo de ser Ingeniero Civil.

### **MIS PADRES**

Juan José Ccama Flores (†) y Sebastiana Lipa Condori. Por ser los principales promotores de mis sueños, por sus consejos, sus valores, por confiar y creer en mí, pero más que nada, por su amor, siendo ustedes quienes merecen todos los logros. A ti mamá, siempre serás esa fuerza y mi motivo de seguir adelante sin mirar atrás, haciéndote sentir orgullosa. A ti papá (QEPD), por ser el pilar fundamental de mi formación, tu partida causó un profundo vacío en mi corazón, pero a la par recuerdo tus palabras de exigencia, que me impulsa a llegar alto.

## AGRADECIMIENTO

En el desarrollo de esta tesis primeramente me gustaría agradecerle a ti Dios. Por bendecirme para llegar hasta este momento tan importante de mi formación profesional, porque hiciste realidad este sueño anhelado.

A mi madre Sebastiana Lipa Condori y padre Juan José Ccama Flores (†), por ser mi fuente de inspiración para lograr lo que me proponga.

A los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional del Altiplano – Puno, por impartirme sus conocimientos, experiencias y darme la oportunidad de formarme como un profesional al servicio de vuestro País.

Un agradecimiento muy especial merece aquellas personas que directa o indirectamente contribuyeron con su apoyo, la comprensión, paciencia y el ánimo recibido en el desarrollo y culminación de esta tesis.

**ÍNDICE GENERAL**

1. INTRODUCCIÓN:.....	14
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	16
1.1.1. Problema General.....	16
1.1.2. Problemas Específicos.....	16
1.2. OBJETIVOS.....	16
1.2.1. Objetivo General.....	16
1.2.2. Objetivos Específicos.....	16
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	17
2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.....	17
2.2. MOVIMIENTOS EN MASA.....	19
2.2.1. Tipos de Movimientos en Masa.....	19
2.2.2. Factores Condicionantes y Desencadenantes.....	21
2.2.3. Movimiento en Masa, Tipo Flujo (Flow).....	22
2.2.4. El Fenómeno de Flujo de Detritos.....	25
2.2.5. Parámetro de Incertidumbre en el Modelo Reológico.....	33
2.2.6. Evaluación de Peligro de Movimientos en Masa Tipo Flujo.....	43
2.3. DESCRIPCIÓN DEL MODELO HIDRÁULICO FLO-2D.....	49
2.3.1. Ecuaciones Gobernantes.....	49
2.3.2. Algoritmo de Soluciones: Cómo Funciona el Modelo.....	51
2.3.3. Asignación de Números de Courant Separados para Terrenos Inundables.....	59
2.3.4. La Importancia de la Conservación del Volumen.....	60
2.4. MEDIDAS DE MITIGACIÓN.....	61
2.4.1. Sabo Dams.....	62
2.4.2. Contramedidas para Infraestructuras Viales.....	66
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	67

3.1. MATERIALES .....	67
3.1.1. Información Cartográfica y Fotogramétrica .....	67
3.1.2. Información Topográfica.....	67
3.1.3. Información Geológica.....	68
3.1.4. Información Pluviométrica .....	68
3.1.5. Volúmenes de Eliminación de Derrumbes.....	68
3.2. MÉTODOS.....	69
3.2.1. Zona de Estudio .....	69
3.2.2. Geología y Geotecnia de la Quebrada Llocllamayo .....	71
3.2.3. Hidrología e Hidráulica de la Quebrada Llocllamayo.....	76
3.2.4. Eventos de Flujo de Detritos, Antecedentes en la Quebrada Llocllamayo .....	87
3.2.5. Alternativas de Mitigación.....	88
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	90
4.1. RESULTADOS.....	90
4.1.1. Resultados de la Simulación $T_r = 50$ años. ....	90
4.1.2. Resultados de la Simulación $T_r = 100$ años. ....	91
4.1.3. Resultados de la Simulación $T_r = 500$ años. ....	92
4.1.4. Geomorfología.....	94
4.1.5. Hidrología e Hidráulica .....	95
4.2. DISCUSIÓN .....	97
5. CONCLUSIONES: .....	98
5.1. CONCLUSIONES .....	98
6. RECOMENDACIONES.....	100
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	101
ANEXOS .....	104

**ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura 1 Clasificación de movimientos en masa, en función de la fracción sólida y tipo de material.....	23
Figura 2 Tipos de flujo de detritos .....	25
Figura 3 Ruta de flujo de detritos .....	26
Figura 4 Esquema típico de una onda de flujo de detritos con frente rocoso..	29
Figura 5 Esquema en corte frente de avance de flujo de detritos. ....	32
Figura 6 Viscosidad de un fluido .....	33
Figura 7 Clasificación de los flujos de acuerdo con la velocidad y concentración de sedimentos.....	37
Figura 8 Esfuerzo cortante, en función de la velocidad de corte, para modelos de deformación fluida.....	40
Figura 9 Procedimiento general para la realización de un estudio de amenaza por movimientos en masa. ....	45
Figura 10 Dirección de flujo es el índice computacional. ....	53
Figura 11 Flujo de descarga a través de los límites de los elementos de la cuadrícula.....	55
Figura 12 Diagrama de flujo de los criterios de estabilidad de Flo-2D .....	57
Figura 13 Combinación de distintas soluciones de protección contra aluviones .....	61
Figura 14 Captación de Hayagawa, Japón. ....	62
Figura 15 Presas de aperturas verticales.....	63
Figura 16 Tuberías de acero abiertas, imagen de la izquierda, Presas permeables, Uesugi-tani river, Japón.....	64
Figura 17 Red Metálica. Mount Tateyama, Japan.....	64
Figura 18 Diques desviadores.....	65
Figura 19 Canales conductores de flujos detríticos.....	65
Figura 20 Barreras laterales.....	66
Figura 21 Ubicación Política de la quebrada Llocllamayo .....	69
Figura 22 Ubicación de la quebrada Llocllamayo, imagen modificada de google earth.....	70
Figura 23 Acceso hacia la quebrada Llocllamayo, imagen modificada de google earth.....	70

Figura 24	Mapa geológico, zona 27-V .....	71
Figura 25	Comparativa entre los años 1985 (izquierda) y 2014 (derecha) del sector Llocllamayo. ....	73
Figura 26	Mapa geomorfológico del sector crítico de la Quebrada Llocllamayo. ....	74
Figura 27	La zona quebrada Llocllamayo, le corresponde la región 1233.....	81
Figura 28	Valores, de los parámetros “a” y “n. ....	82
Figura 29	Valores del parámetro “k” .....	82
Figura 30	Quebrada Llocllamayo vista hacia aguas abajo .....	84
Figura 31	Flujograma con pasos realizados para simulación con modelo Flo-2D. ....	86
Figura 32	Magnitud de flujo de detritos para T=50 años .....	90
Figura 33	Intensidad de flujo de detritos para T=50 años .....	90
Figura 34	Peligro de flujo de detritos para T=50 años.....	91
Figura 35	Magnitud de flujo de detritos para T=100 años .....	91
Figura 36	Intensidad de flujo de detritos para T=100 años .....	92
Figura 37	Peligro de flujo de detritos para T=100 años.....	92
Figura 38	Magnitud de flujo de detritos para T=500 años .....	93
Figura 39	Intensidad de flujo de detritos para T=500 años .....	93
Figura 40	Peligro de flujo de detritos para T=500 años.....	94

**ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 1	Escala de velocidades.....	19
Tabla 2	Tipos de procesos de movimiento en masa .....	20
Tabla 3	Tipos de materiales que forman deslizamientos de tierra .....	21
Tabla 4	Influencia de los factores en las condiciones de los materiales .....	22
Tabla 5	Clasificación de los movimientos en masa del tipo de flujo.....	24
Tabla 6	Valores de Pendiente en la zona de ruptura y factor condicionante de los flujos de detritos. ....	27
Tabla 7	Ecuaciones empíricas encontradas en la bibliografía .....	30
Tabla 8	Valores de tasa de erosión encontrados en la bibliografía.....	31
Tabla 9	Valores de declividad encontrados en la bibliografía en el lugar de deposición.....	32
Tabla 10	Comportamiento de flujos de sedimentos en función de la concentración de sedimentos.....	36
Tabla 11	Tipos de flujo de acuerdo con las características de la mezcla y del canal .....	37
Tabla 12	Parámetros de resistencia para flujo laminar .....	41
Tabla 13	Esfuerzo de rendimiento y viscosidad en función de la concentración de sedimentos.....	42
Tabla 14	Magnitud relativa de los componentes de aceleración a la pendiente y la presión del lecho .....	50
Tabla 15	Información Cartográfica Utilizada .....	67
Tabla 16	Información Fotogramétrica Utilizada.....	67
Tabla 17	Información Topográfica.....	67
Tabla 18	Información Topográfica (BM y Puntos de Apoyo PA) del sector Llocllamayo .....	68
Tabla 19	Información Geológica Utilizada.....	68
Tabla 20	Información Pluviométrica Utilizada .....	68
Tabla 21	Información de Volúmenes Eliminados .....	68
Tabla 22	Características de la Cuenca .....	76
Tabla 23	Precipitaciones máximas en 24 horas (mm), Estación San Gabán..	77
Tabla 24	Precipitaciones (mm) para Diferentes Períodos de Retorno (T), Estación San Gabán .....	78

Tabla 25	Coeficiente de Escorrentía C – Método Racional (*).....	79
Tabla 26	Tiempo de Concentración .....	80
Tabla 27	Determinación de parámetros para la quebrada Llocllamayo .....	82
Tabla 28	Caudales para cada periodo de retorno .....	83
Tabla 29	Cálculo del caudal pico (Qp) para cuencas pequeñas (A< 2.5 Km2) mediante el método racional Tr = 100 años. ....	83
Tabla 30	Cálculo del caudal pico (Qp) para cuencas pequeñas (A< 2.5 Km2) mediante el método racional Tr = 500 años. ....	83
Tabla 31	Valores de los caudales totales para los Tr.....	87
Tabla 32	Resumen MEmer – quebrada Llocllamayo .....	87
Tabla 33	Volúmenes de remoción de flujo de detritos quebrada Llocllamayo	88
Tabla 34	Comparativo de descargas .....	97

**LISTA DE SÍMBOLOS**

Símbolo	Descripción
$\sigma$	Media de los valores observados de X
A	Área de la cuenca
Aa	Área Inundada
Asurf	Superficie de la superficie del terreno
C	Coeficiente de Escorrentía
Cv	Concentración volumétrica de sedimento
g	Aceleración de la gravedad
i	Intensidad de la lluvia
L	Distancia horizontal de la fuente hasta el depósito (Runout)
m	Masa del flujo de residuos
Ms	Volumen total de sedimentos
Mw	Volumen de Agua
n	Coeficiente de Manning
S	Declividad media de la cuenca
$\mu$	Desviación estándar de los valores observados de X
V	Velocidad media del flujo
T	Período de retorno
Vx	Componente de la velocidad del flujo en la profundidad promedio en x
Vy	Componente de la velocidad del flujo en profundidad promedio en y
$\alpha_i$	Coeficiente empírico utilizado para la determinación de la viscosidad y tensión cizallante crítica por el FLO-2D
$\beta$	Coeficiente empírico
$\beta_i$	Coeficiente empírico utilizado para la determinación de la viscosidad y tensión cizallante crítica por el FLO-2D
$\gamma_m$	Peso específico de la mezcla de sedimentos
$\eta$	Viscosidad aparente
$\sigma$	Fuerza normal
$\tau$	Cizallamiento medio
$\tau_y$	Tensión cizallante crítica

## RESUMEN

La quebrada Llocllamayo, es atravesada por el corredor vial interoceánico sur tramo 4, Azángaro – puente Inambari, en la zona de ceja de selva de la región Puno, específicamente entre las progresivas Km 295+200 y Km 295+600 a una altitud de 580msnm de orientación sur - norte y desembocadura en el río San Gabán. Como objeto de estudio se debe elaborar el mapa de peligro existente ante eventos extraordinarios e identificar los factores condicionantes y desencadenantes presentes en la quebrada, el mismo que se caracteriza por su elevada pendiente en la cuenca, con un régimen hidrológico que corresponde a un clima de selva alta acompañados de periodos de lluvia bien marcados en los meses de verano, geológicamente la quebrada se compone por rocas de baja calidad correspondiente a la formación San José y por numerosos depósitos cuaternarios. Los antecedentes de flujos de detritos que vienen ocurrido en la quebrada Llocllamayo hace necesario el uso de información a detalle de la cartográfica, hidrológica y geológica. Para ello, el presente proyecto de investigación abordara las condiciones físicas que condicionan el comportamiento de la quebrada Llocllamayo y se busca, definir las áreas potencialmente afectadas por flujos de detritos en ciertos eventos extraordinarios, en esta oportunidad se emplea el modelo matemático Flo-2D, el mismo que en base a distintas condiciones determinan las áreas afectadas por flujos de detritos, este modelo ayuda a estimar las áreas potenciales de peligro para diferentes periodos de retorno, por otro lado para el registro de las precipitaciones, la estación más próxima se encuentra en la localidad de San Gabán a 5km del área en estudio. Finalmente, se determinara el área que es físicamente afectable por efectos de propagación del flujo sobre su abanico de la quebrada, mediante la interpretación de los resultados obtenidos se elaborará un mapa de peligro siendo el potencial de peligro interpretado en el corredor vial desde la progresiva 295+200 al 295+600, siendo éste mayor hacia el cauce de la quebrada y menor alejándose de ésta.

## PALABRAS CLAVES:

Condicionantes, Desencadenantes, Peligro, Detritos, Flo-2d.

**ABSTRACT**

The Llocllamayo creek, is crossed by the interoceanic road corridor south section 4, Azángaro - Inambari bridge, in the jungle area of the Puno region, specifically between the progressive Km 295 + 200 and Km 295 + 600 at an altitude of 580msnm of south - north orientation and mouth in the river San Gabán. As an object of study, the existing hazard map should be prepared for extraordinary events and identify the conditioning and trigger factors present in the creek, which is characterized by its high slope in the basin, with a hydrological regime that corresponds to a climate of high jungle accompanied by periods of rain well marked in the summer months, geologically the ravine is composed of rocks of low quality corresponding to the San José formation and numerous Quaternary deposits. The history of debris flows that have occurred in the Llocllamayo creek makes it necessary to use detailed information on cartography, hydrology and geology. For this, the present research project will address the physical conditions that condition the behavior of the Llocllamayo creek and will seek to define the areas potentially affected by debris flows in certain extraordinary events, in this opportunity the mathematical model Flo-2D is used, the same that based on different conditions determine the areas affected by debris flows, this model helps to estimate the potential areas of danger for different periods of return, on the other hand to record the rainfall, the nearest station is in the town of San Gabán 5km from the area under study. Finally, the area that is physically affected by the effects of propagation of the flow on its range of the stream will be determined, by interpreting the results obtained, a hazard map will be drawn up, with the danger potential being interpreted in the road corridor from the progressive 295 +200 to 295 + 600, this being greater toward the channel of the stream and less away from it.

**KEYWORDS:**

Conditioning, Triggers, Danger, Debris, Flo-2d.

## CAPITULO I

### 1. INTRODUCCIÓN:

Las cuencas hidrográficas son unidades de territorio en donde actúa simultáneamente un subsistema hídrico asociado a un subsistema económico y social. La quebrada Llocllamayo, por intermedio del área de su cono de deyección, interactúa con la infraestructura vial tipo badén en la progresiva 295+350 y circundantes del corredor interoceánico IIRSA sur tramo 4 (Azángaro – puente Inambari). Referenciando al sector Llocllamayo, distrito de San Gabán, provincia de Carabaya de la región Puno.

La localización de la quebrada Llocllamayo, próximo al cauce principal del río San Gabán, y su corto recorrido lo define como a muchas de estas cuencas como torrentosas con presencia de cauces de altas pendientes y márgenes inestables, su ubicación en zona de ceja de selva, donde ocurren lluvias de gran intensidad, permiten que la superficie de la cuenca se altere con facilidad lo cual se acrecienta por la presencia de sectores con poca cobertura vegetal y sobre todo por lo frágil de las formación geológicas predominantes. Presentando constantes cambios geomorfológicos ocasionado por la ocurrencia de movimientos en masa, de los cuales se resalta el tipo flujo de detritos (denominado como “huayco” en Perú, “avenida torrencial” en Colombia y Venezuela, y su sinónimo en el inglés “debris flow”). Según la bibliografía, existen diversas definiciones para el término “flujo de detritos”, referenciando a [Varnes \(1958\)](#), [Coussot \(1996\)](#), [Iverson \(1997\)](#), [Hungr \(2001\)](#), [Takahashi \(2007\)](#), [Hungr \(2014\)](#), entre otros, ello suministro la base para la definición propuesta en esta tesis. Este tipo de catástrofe constituye uno de los desastres naturales que más vidas han cobrado; entre los países de la región Andina, más afectados, se encuentran; Perú, Venezuela, Colombia y Ecuador [Suárez Díaz \(2009\)](#).

Las fotografías satelitales, muestran la comparación de las condiciones en el año 1985 con las recientes 2014 de la quebrada Llocllamayo. Se nota como ya en el año 1985 existían derrumbes y erosiones activas (zonas con escasa cobertura vegetal), los cuales se han extendido progresivamente aguas arriba próximo a la cabecera de la quebrada. Se estima que el volumen de material movilizado entre dichos años sea alrededor de 1.5 millones de metros cúbicos,

por un valor promedio de 50,000.0 m<sup>3</sup>/año. Se tiene registros de que en los últimos años 2011-2014 el volumen de material movilizado se incrementó considerablemente hasta unos 150,000 m<sup>3</sup>/año, en promedio.

El continuo cierre de vía en el sector Llocllamayo km 295+350, por los flujos detríticos ocasiona malestar e inseguridad entre los usuarios de la vía, viéndose interrumpida la transitabilidad, y más aún está latente el riesgo de un evento detrítico extraordinario. Son estas fuertes e imprevisibles avenidas de flujo de detritos (agua y sólidos), y su violenta irrupción en la plataforma del corredor vial, lo que nos lleva a desarrollar esta tesis, estudiando la hoya y abanico (cono de deyección) de la quebrada Llocllamayo, a fin de determinar los mapas de peligro ante escenarios con características extraordinarias de la quebrada, consiguiente a alternativas de ingeniería conceptual que ayuden a su mitigación; de tal forma que se pueda garantizar la seguridad, transitabilidad y estándar técnico que mantiene la red vial nacional transversal (PE – 34B), corredor vial IIRSA sur tramo 4.

## **1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **1.1.1. Problema General**

La quebrada Llocllamayo presenta constantes cambios geomorfológicos, debido a la ocurrencia de movimientos en masa en especial de tipo flujo de detritos y consecuentemente su depósito sobre la infraestructura del corredor vial IIRSA sur tramo 4, km 295+350, irrumpiendo en la transitabilidad y seguridad de los usuarios de la vía.

### **1.1.2. Problemas Específicos**

- a. ¿Cuál es la relación de los factores; formación litológica, variación de la pendiente del cauce principal y escasa cobertura vegetal, presentes en la hoya y cono de deyección de la quebrada Llocllamayo, para la ocurrencia de los movimientos en masa de tipo flujo de detritos?
- b. ¿Cuál es la relación de los constantes cambios geomorfológicos, debido a factores como la precipitación, reología del material detrítico, presente en la quebrada Llocllamayo, que dan la iniciación del movimiento en masa de tipo flujo de detritos?

## **1.2. OBJETIVOS**

### **1.2.1. Objetivo General**

Establecer el mapa de peligro, de flujo de detritos, ante escenarios extraordinarios para la hoya y cono de deyección de la quebrada Llocllamayo, abarcando el áreas que transpone la infraestructura vial, km 295+350 y zonas circundantes, a efecto de garantizar la seguridad de los usuarios de la vía.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- a. Identificar los factores condicionantes (pasivos), presentes en la hoya y cono de deyección que explican la vulnerabilidad de la quebrada Llocllamayo, ante movimientos en masas de tipo flujo de detritos.
- b. Analizar el efecto de los factores desencadenantes (activos), en la iniciación de los movimientos en masas de tipo flujo de detritos de la quebrada Llocllamayo, ante eventos de carácter extraordinario.

## CAPITULO II

### 2. REVISIÓN DE LITERATURA

#### 2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

[Lucini \(2011\)](#), tuvo como objetivo definir el alcance de la masa deslizada y estimar los factores condicionantes para el movimiento en masa de tipo flujo de detritos. El ámbito de estudio corresponde a la cuenca del río Cunha del Estado de Santa Catarina – Brasil. Siendo su secuencia metodológica: (I) Análisis de lluvias que ocurrieron, con la finalidad de caracterizar el evento; (II) Se desarrollaron levantamientos en campo siguiendo la trayectoria de flujo, desde las zonas de ruptura hasta su deposición para su posterior análisis con datos bibliográficos y datos del modelo Flo-2D; (III) Se tantearon formulaciones empíricas, con la finalidad de comprobar sus aplicabilidades para la generación de datos de entrada para los modelos computacionales de la cuenca del río Cunha; y por último (IV) Fueron comprobadas, la aplicabilidad y consistencia de los datos generados por el modelo Flo-2D. Los resultados muestran la no posibilidad de aplicar ecuaciones empíricas para determinar el volumen total movilizado, el modelo Flo-2D fue calibrado a ello presento un error de alcance de 118m, lo que representa una diferencia del 8,22% entre el valor obtenido en campo y la simulación, a pesar de ser satisfactorio los resultados obtenidos con el modelo Flo-2D, algunas zonas de no reproducción física del fenómeno llegaron a ocurrir.

[García \(2016\)](#), tuvo como objetivo el estudio de alternativas para la estabilización de la quebrada Cantuta II con fines de mitigación de huaycos en las instalaciones de la Universidad Nacional de Educación Enrique Guzmán y Valle – La Cantuta. El ámbito de estudio corresponde a la quebrada Cantuta II de la ciudad de Lima – Perú. El inicio de la investigación se da con la obtención y extrapolación de data topográfica, geológica, geotécnica, hidrológico e hidráulico de flujo de detritos que se emplea para evaluar el tipo de flujo que transporta los huaycos, en seguida se estudiaron las diversas metodologías existentes, con la intención de lograr la estabilización de la quebrada, eligiendo la más apropiada de acuerdo a las características geomorfológicas de zona de estudio. La alternativa propuesta para estabilizar la quebrada Cantuta II, consiste

en un sistema mixto conformado por: zanjas de drenaje, camas de gravas y diques de piedra, ubicados estratégicamente en la zona alta, media y baja de la quebrada, siendo el sistema mixto elegido, quien dio resultados satisfactorios para estabilizar la quebrada y reducir el efectos de los huaycos.

[Karl-Heinz \(2011\)](#), el objetivo de dicho estudio es a solicitud de la empresa concesionaria Macusani S.A., por razones de seguridad energética, se da investigar los riesgos procedentes de los peligros naturales relacionados al periodo de operación de la Central Hidroeléctrica San Gabán I. El ámbito de estudio corresponde a las quebradas: “Chuani” y “Supay Huayco”, del distrito de San Gabán – Perú. La adaptación de una metodología desarrollada por científicos suizos y alemanes en los Alpes estudiando los fenómenos provocados por el cambio climático permite determinar la deposición de flujos potenciales de detritos, por lo tanto la investigación parte de la suposición que el proceso de inestabilidad están condicionados a cañones profundos, con una ocurrencia mayor en zonas desprotegidas, a ello sumado factores desencadenantes como los cambios de temperaturas y en especial las intensas lluvias, provocan la ocurrencia de eventos como los que se presentó en la Central Hidroeléctrica San Gabán II. Las conclusiones refieren que el área de la futura Central Hidroeléctrica San Gabán I, se ubica en una zona de alta geodinámica, amenazada por potenciales derrumbes y huaycos provenientes de la quebrada “Supay Huayco”, siendo necesario investigar más a profundidad los potenciales riesgos y reformular el diseño actual considerando medidas de mitigación respecto a la posición actual de proyecto de la Central Hidroeléctrica San Gabán I.

## 2.2. MOVIMIENTOS EN MASA

### 2.2.1. Tipos de Movimientos en Masa

El término “Movimiento en Masa” es considerado al movimiento descendente de un volumen de material constituido por roca, suelo (detritos o tierra) o ambos, bajo la influencia de la gravedad, [Cruden \(1991\)](#). Términos como: “Deslizamientos de Tierra”, “Procesos Gravitacionales”, “Procesos de Ladera”, “Movimientos de Ladera”, “Remoción en Masa”, [Alcantara \(2000\)](#) son ampliamente empleados como sinónimos de los procesos de “Movimientos en Masa”, esta expresión quizá sea la más precisa para designar genéricamente estos procesos, puesto que el calificativo “en Masa” establece la diferencia con otros procesos en los que el transporte no es masivo, [Gutiérrez Elora \(2008\)](#).

El sistema de clasificación de movimientos en masa más conocido y aceptado, es el propuesto por, [Varnes \(1978\)](#), recurre como criterio principal al tipo de movimiento y el tipo de material que lo compone. Así, divide los movimientos en: Caídas, Vuelcos, Deslizamientos, Propagaciones, Flujos y Complejos; y los materiales involucrados en dos tipos: Rocas y Suelos, este último subdividido entre tierra o barro (>80% partículas menores a 2mm), y detritos (20% - 80% partículas mayores a 2mm). [Cruden & Varnes \(1996\)](#) Recomendaron mejoras en la asignación de términos específicos a las fases de movimiento y una escala de velocidad, (ver tabla 1). [Hungro O. \(2013\)](#) Plantearon mejoras bajo el esquema de la triple división de materiales propuesta por [Varnes \(1978\)](#), de esta forma proporciona compatibilidad con la terminología geotécnica

Tabla 1 Escala de velocidades

CLASE DE VELOCIDAD	DESCRIPCIÓN	VELOCIDAD (mm/s)	VELOCIDAD TÍPICA
7	Extremadamente rápido		
6	Muy rápido	$5 \times 10^3$	5 m/s
5	Rápido	$5 \times 10^1$	3 m/min
4	Moderada	$5 \times 10^{-1}$	1.8 m/h
3	Lenta	$5 \times 10^{-3}$	13 m/mes
2	Muy lenta	$5 \times 10^{-5}$	1.6 m/año
1	Extremadamente lenta	$5 \times 10^{-7}$	16 mm/año

Fuente: [Cruden y Varnes \(1996\)](#)

y geológica, (ver tabla 2). [Bates y Jackson \(1984\)](#) en [Hungro O. \(2013\)](#) las palabras " Tierra o Barro " y " Detritos" no tienen equivalentes claros en la terminología geotécnica,

Tabla 2 Tipos de procesos de movimiento en masa

TIPO DE MOVIMIENTO	ROCA (Rock)	SUELO (Soil)
Caída (Fall)	1. Caída de Roca / Hielo <sup>a</sup>	2. Canto Rodado / Detritos / Caída de Limo <sup>a</sup>
Vuelco (Topple)	3. Vuelco de Bloque de Roca <sup>a</sup>	5. Grava / Arena / Vuelco de Limo <sup>a</sup>
	4. Vuelco por Flexión de Roca	
Deslizamiento (Slide)	6. Deslizamiento Rotacional de Roca	11. Deslizamiento Rotacional de Arcilla / Limo
	7. Deslizamiento Planar de Roca <sup>a</sup>	12. Deslizamiento Planar de Arcilla / Limo.
	8. Deslizamiento por Cuña de Roca <sup>a</sup>	13. Deslizamiento de Grava / Arena / Detrito <sup>a</sup>
	9. Deslizamiento Compuesto de Roca	14. Deslizamiento Compuesto Arcilla / Limo
10. Deslizamiento Irregular de Roca <sup>a</sup>		
Propagación (Spread)	15. Propagación de Pendiente Rocosa	16. Propagación de Licuefacción de Arena / Limo <sup>a</sup>
		17. Propagación de Arcilla Sensible <sup>a</sup>
Flujo (Flow)	18. Avalancha de Roca / Hielo	19. Flujo Seco de Arena / Limo / Detrito
		20. Deslizamiento por Flujo de Arena / Limo / Detrito <sup>a</sup>
		21. Deslizamiento por Flujo de Arcilla Sensible <sup>a</sup>
		22. Flujo de Detritos <sup>a</sup>
		23. Flujo de Lodo <sup>a</sup>
		24. Inundación de Detritos <sup>a</sup>
		25. Avalancha de Detritos <sup>a</sup>
26. Flujo de Tierra		
Deformación de Taludes (Slope Deformation)	28. Deformación de Taludes de Montaña	30. Deformación de Talud de Suelo
	29. Deformación de Talud de Roca	31. Reptación de Suelo
		32. Solifluxión

Fuente: Versión Mejorada de Varnes (1978), en [Hungro O. \(2013\)](#).

Obs.: <sup>(a)</sup> Tipos de movimiento que generalmente alcanzan velocidades extremadamente rápidas según lo definido por [Cruden y Varnes \(1996\)](#). Los otros tipos de deslizamientos de tierra son más a menudo (pero no siempre) extremadamente lentos o muy rápidos.

pero han adquirido estatus en la geología y la ciencia de los movimientos en masa. La primera columna de la tabla 3, enumera los nombres formadores de los movimiento en masa "roca", "arcilla", "barro", "limo", "arena", "grava", "cantos rodados", "detritos", "turba" y "hielo" reemplazan los nombres de los materiales triples utilizadas por [Varnes \(1978\)](#).

Tabla 3 Tipos de materiales que forman deslizamientos de tierra

Material / Nombre	Descriptor de Condición (Importante)	Descripción de campo simplificada para propósitos de clasificación.	Corresponde a la clasificación unificada de suelos	Índices de laboratorio (si están disponibles)
<b>Roca</b>	Fuerte	Fuerte - quebrado con un martillo		UCS>25 Mpa
	Débil	Débil - pelado con una cuchilla		2<UCS<25 Mpa
<b>Arcilla</b>	Duro	Plástico, se puede moldear en filamento estándar cuando está húmedo, tiene resistencia en seco	GC, SC, CL, MH, CH, OL, y OH	I <sub>p</sub> > 0.05
	Suave			
	Sensible			
<b>Lodo</b>	Líquido	Plástico, remodelado sin clasificar y cerca del límite líquido	CL, CH, y CM	I <sub>p</sub> > 0.05 y I <sub>l</sub> > 0.5
<b>Limo, arena, grava y cantos rodados.</b>	Seco	No plástico (o muy baja plasticidad), granular, clasificado. Las partículas de limo no pueden verse a simple vista.	ML	I <sub>p</sub> < 0.05
	Saturado		SW, SP, y SM	
	Parcialmente saturado		GW, GP, y GM	
<b>Detritos</b>	Seco	Baja plasticidad, sin clasificar y mixta.	SW-GW	I <sub>p</sub> < 0.05
	Saturado		SM-GM	
	Parcialmente saturado		CL, CH, y CM	
<b>Turba</b>		Orgánico		
<b>Hielo</b>		Glaciar		

Fuente: [Hungro O. \(2013\)](#)

### 2.2.2. Factores Condicionantes y Desencadenantes

Los factores que intervienen en los movimientos en masa son aquellas capaces de transformar las fuerzas internas y externas que actúan sobre el terreno. Estos factores indican sus efectos sobre el comportamiento y las propiedades de los materiales; los factores condicionantes (o “pasivos”) dependen de la propia naturaleza, estructura y forma del terreno, mientras que los desencadenantes (o “activos”) pueden ser considerados como factores externos que provocan o desencadenan las inestabilidades y son responsables por lo general, de la magnitud y velocidad de los movimientos, [González de Vallejo, et al. \(2002\)](#).

Tabla 4 Influencia de los factores en las condiciones de los materiales

FACTORES		INCIDENCIA Y EFECTOS
Condicionantes	Relieve (pendiente, geometría)	Distribución del peso del terreno
	Litología (composición, textura)	Densidad, resistencia. Comportamiento hidrogeológico
	Estructura geológica y estado tensional	Resistencia, deformabilidad. Comportamiento discontinuo y anisótropo. Zona de debilidad.
	Propiedades geomecánicas de los materiales	Comportamiento hidrogeológico Generación de presiones intersticiales.
	Deforestación	Modificaciones en el balance hídrico. Erosión.
	Meteorización	Cambio físico y químico, erosión externa e interna, generación de zonas de debilidad.
Desencadenantes	Precipitación y aporte de agua	Variación de las presiones intersticiales y del peso del terreno.
	Cambio en las condiciones hidrológicas	Saturación en suelos. Erosión.
	Aplicación de cargas estáticas y dinámicas	Cambio en la distribución del peso de los materiales y en el estado de la ladera. Incremento de presiones intersticiales.
	Cambio morfológico y de geometría en las laderas	Variación de las fuerzas debidas al peso. Cambio en el estado de tensional.
	Erosión y socavación del pie	Cambio geométrico en la ladera. Cambio en la distribución del peso de los materiales y en el estado tensional de la ladera.
	Acciones climáticas (procesos de deshielo, heladas, sequías)	Cambio en el contenido de agua del terreno. Generación de grietas y planos de debilidad. Disminución de las propiedades resistentes.

Fuente: Gonzáles de vallejo (2002)

### 2.2.3. Movimiento en Masa, Tipo Flujo (Flow)

Los flujos son un tipo de movimiento en masa fluidificada puede ser rápido o lento, saturado o seco, donde el material esta disgregado y se comporta como un “fluido”. Los movimientos tienen lugar sobre un gran número de pequeñas superficies de cizalla sin presentar una superficie de rotura definida. Lo que implica una mayor deformación interna y continua que un deslizamiento [Gutiérrez Elora \(2008\)](#), [Gonzáles de Vallejo, et al. \(2002\)](#).

Según ensayos en laboratorio, una muestra en un canal revestido de torrente con material de lecho granular puede transportar mediante *suspensión*, *rodadura* y *deslizamiento*, una vez que la pendiente del canal sobrepasa

aproximadamente los  $10^0$ . El lecho del canal puede volverse inestable bajo la combinación de la gravedad y las fuerzas de arrastre impuestas por el flujo de agua. Si el fluido de la superficie está formado por residuos saturados, se obtienen incluso mayores fuerzas de arrastre y el material del lecho puede movilizarse masivamente quedando atrapado en el flujo, [Hungro O., McDougall, & Bovis \(2005\)](#).

La literatura científica cita varios movimientos en masa de tipos flujo. La presencia de fuerzas sólidas y fluidas hacen una distinción amplia y mecanística al momento de caracterizar estos movimientos, [Iverson \(1997\)](#), por otro lado [Coussot & Meunier \(1996\)](#), presenta un criterio aproximativo, subjetivo y empírico, sobre la principal diferencia física que recae en función a la fracción sólida y el tipo de material, del cual a los flujos subdivide como: inundaciones, transporte de sólidos, flujos hiperconcentrados, flujo de lodos, flujo de detritos, lahars, flujos granulares, deslizamientos de tierra, avalancha de detritos, etc. Presentándose bajo una clasificación grafica elíptica (figura 1), pudiendo variar, dependiendo del límite específico las condiciones iniciales y las propiedades del material físico. Los flujos de detritos son catalogados como un intermedio entre los flujos hiperconcentrados y los deslizamientos de tierra, La física de las avalanchas, y la física de las inundaciones están sobre el dominio proporcional del material físico concentrado.

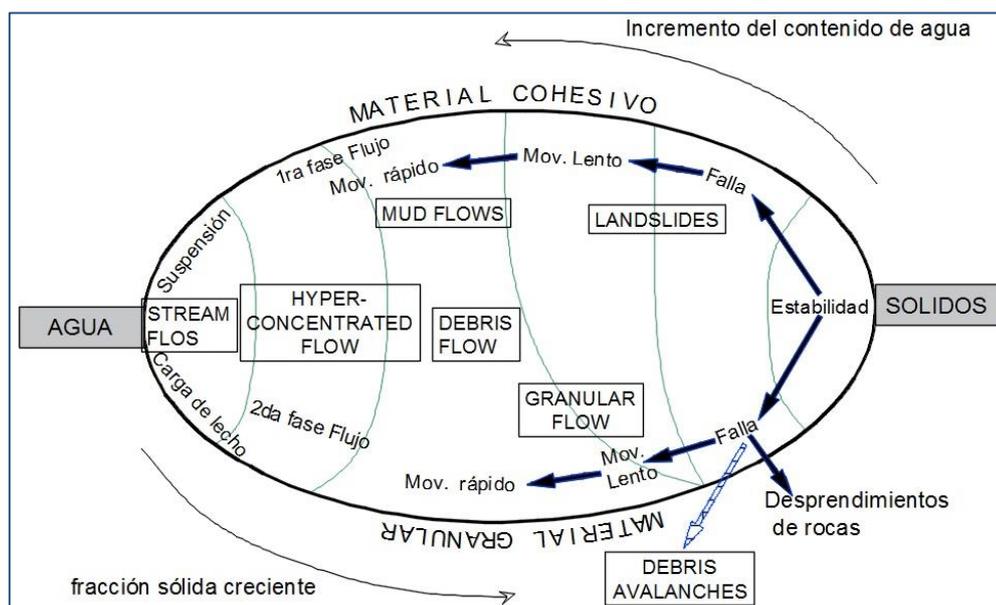


Figura 1 Clasificación de movimientos en masa, en función de la fracción sólida y tipo de material.

Fuente: Coussot (1996)

Hungr, Evans, Bovis, & Hutchinson (2001), sin embargo, propusieron lo que denominan "términos más precisos" para la clasificación de los movimientos en masa de tipo flujo, de acuerdo con el tipo y propiedades del material, la velocidad, humedad, confinamiento lateral y condiciones especiales (ver tabla 5). Según Jakob & Hungr (2005), los flujos de barro son flujos con mayor contenido de agua y plasticidad (> 5%), las inundaciones de detritos contienen

Tabla 5 Clasificación de los movimientos en masa del tipo de flujo

MATERIAL	CONTENIDO DE AGUA <sup>1</sup>	CONDICIONES ESPECIALES	VELOCIDAD	NOMBRE
Limo, Arena, Grava, Detritos.	Seco, Húmedo o Saturado.	- Sin Exceso de Presión de Poro - Volumen Limitado	Variada.	Flujo de arena no licuada (Limo, Grava, Detritos)
Limo, Arena, Detritos, Roca Débil <sup>2</sup>	Saturado en la Superficie de Ruptura	- Material Licuable <sup>3</sup> - Agua Constante	Extremadamente Rápido.	Deslizamiento de Flujo de Arena (Limo, Detritos, Roca)
Arcillas Sensibles	En o Sobre el Límite Líquido.	- Licuefacción In Situ <sup>3</sup> - Contenido de Agua Constante <sup>4</sup>	Extremadamente Rápido.	Deslizamiento de Flujo de Arcilla
Turba	Saturado	- Exceso de Presión de Poros	Lento a Muy Rápido.	Flujo de Turba
Arcilla o Tierra	Próximo al Límite Plástico.	- Movimientos Lentos	< Rápido	Flujo de Tierra
Detritos	Saturado	- Canal Establecido <sup>5</sup> - Contenido de Agua en Aumento <sup>4</sup>	Extremadamente Rápido.	Flujo de Detritos
Barro	En o Sobre el Límite Líquido.	- Flujos de Detritos de Grano Fino	> Muy Rápido	Flujo de Barro
Detritos	Presencia Libre de Agua	- Inundación <sup>6</sup>	Extremadamente Rápido.	Inundación de Detritos
Detritos	Parcial o Totalmente Saturado	- Canal No Establecido <sup>5</sup> - Relativamente Superficial, Naciente Empinado	Extremadamente Rápido.	Avalancha de Detritos
Roca Fragmentada	Variado, Mayormente Seco	- Roca Intacta en la Cabecera - Gran Volumen <sup>7</sup>	Extremadamente Rápido.	Avalancha de Rocas

Obs: (1). Contenido de agua del material en las proximidades de la superficie de ruptura en el momento de la falla. (2). Roca muy porosa y débil (ejemplos: tiza débil, toba meteorizada, piedra pómez). (3). Se puede observar o implicar la presencia de licuefacción in situ total o parcial del material fuente del deslizamiento de flujo. (4).

*Relativo al material fuente in situ. (5). Presencia o ausencia de un canal definido en una gran parte del trayecto y una forma de sedimentación establecida (abanico). El flujo de detritos es un fenómeno recurrente en su trayecto, mientras que la avalancha de detritos no lo es. (6). Descarga máxima del mismo orden que la de una gran inundación o inundación accidental. Fuerzas tractoras significativas del agua que fluye libremente. Presencia de detritos flotantes. (7). Volumen mayor a 10,000 m<sup>3</sup> aproximadamente. Flujo masivo, contrasta con la caída fragmentaria de rocas. Fuente: Hungr (2001)*

aún más agua con un movimiento de oleaje (pulso), a medida que fluye por el canal, y las avalanchas de detritos son flujos poco profundos de detritos parcial o totalmente saturados en pendientes pronunciadas que no están necesariamente confinados a un canal.

Es importante hacer la distinción entre los diferentes movimientos en masa de tipo flujo, al analizar el peligro al que está sometida un área, puesto que el potencial destructivo es característico de cada tipo de flujo. Los desastres naturales que más vidas han cobrado en el mundo, corresponden a avalanchas y el Perú no es ajeno de sufrir esta catástrofe, sin embargo la mayoría de las instigaciones corresponden en áreas no tropicales [Suárez Díaz \(2009\)](#).

#### 2.2.4. El Fenómeno de Flujo de Detritos.

[VanDine \(1996\)](#). El término genérico "flujo de detritos" se subdivide en: "flujo de detritos de pendiente abierta" y "flujo de detritos canalizado" (figura 2). Los flujos de detritos de pendientes abiertas o conocidos también como no canalizados crean su propio camino por las laderas, depositando el material detrítico en gradientes de menor pendiente. Los flujos de detritos canalizados siguen canales naturales existentes como ríos, barrancos, vaguadas, y otros tipos de depresiones topográficas [Cruden & Varnes \(1996\)](#). La presente tesis abarca el estudio de los flujos de detritos tipo canalizado.



Figura 2 Tipos de flujo de detritos  
Fuente: Cruden y Varnes (1996).

Hungr, Evans, Bovis, & Hutchinson (2001). El flujo de detritos, es un flujo muy rápido a extremadamente rápido de material detrítico saturados no plásticos (índice de plasticidad menor al 5%, en arena y fracciones más finas), que transitan en un canal confinado de pendiente pronunciada. Típicamente, estos flujos causan un daño considerable cuando descienden a la zona de deposición, abanico de detritos “debris fan”, y alcanzan áreas con infraestructura civil Coussot & Meunier (1996). Lo cual justifica su investigación representando un fenómeno completo de 3 fases (figura 3); la *iniciación* en una pendiente pronunciada, su propagación en las *zonas de transporte* y finalmente su *detención* depositados en abanicos de detritos Coussot & Meunier (1996), Cruden & Varnes (1996).

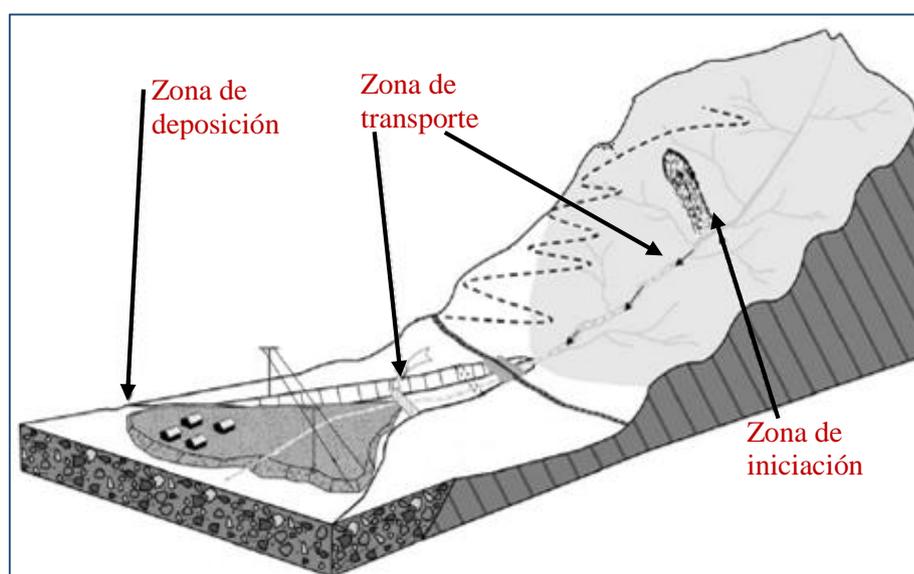


Figura 3 Ruta de flujo de detritos  
Fuente: Varnes (1978).

a. Zona de Iniciación

Los flujos de detritos pueden iniciarse como uno o varios deslizamientos superficiales, avalancha de detritos y caída de rocas, todo ello en la cabecera de cuenca, por ser una zona de elevada pendiente o por inestabilidad de taludes laterales del cauce en canales de pendientes fuertes, y eventualmente formarse en un flujo de detritos comenzando a moverse en el canal empinado, el lecho queda sujeto a una carga rápida no drenada Hungr O. (2013), Hungr, McDougall, & Bovis (2005), (ver tabla 6) se describe las pendientes encontradas por diferentes autores donde se inició las rupturas.

Tabla 6 Valores de Pendiente en la zona de ruptura y factor condicionante de los flujos de detritos.

REFERENCIA	MOTIVO	UBICACIÓN	PENDIENTE
Van Steijn (1996)	Lluvia Intensa	Alpes Franceses	26° – >45°
Kanji et al. (2008)	Lluvia Intensa	Serra do Cubatão, Brasil	12° – 37°
Tecca et al. (2006) D'Agostino e Tecca (2006)	Lluvia Intensa	Cortina d'Ampezzo, Itália	20° – 23°
Jitousono et al. (2008)	Lluvia Intensa	Minamata, Japão	20° – >35°
Gabet e Mudd (2006)	Lluvia Intensa	Santa Barbara, EUA	28° – 32°
Fannin e Wise (2001)	-	British Columbia, Canada	33° – 50° <sup>1</sup>
Roesli e Schindler (1990)	Lluvia Intensa	Alpes Suíços	29° – 37°
Zimmermann (1990)	Lluvia Intensa	Alpes Suíços	25° – 38° <sup>2</sup> 13° – 35° <sup>3</sup>
Boelhouwers et al. (2000)	Deshielo	Ilha Marion	23°
Archetti e Lamberti (2003)	Lluvia Intensa	Acquabona, Itália	45°
Crosta et al. (2003)	Lluvia Intensa	Valtellina, Itália	~44°
Gomes et al. (2008)	Lluvia Intensa	Rio de Janeiro, Brasil	> 20°
Lee et al. (2008)	Terremoto, Tifones	Taiwan	~35°
Campbell (1974)	Lluvia Intensa	Califórnia, EUA	17° – 56°
Morrissey et al. (2008)	Huracán	Virginia, EUA	18° – 44°
Toyos et al. (2007)	Lluvia Intensa	Sarno, Itália	> 33° – 35°
Blijenberg et al. (1996)	Lluvia Intensa	Alpes Franceses	27° – 54°
Zimmermann (1993)	Lluvia Intensa	Alpes Suíços	27° – 38° <sup>2</sup> 24° – 35° <sup>3</sup>
Cenderelli e Kite (1998)	Lluvia Intensa	West Virginia, EUA	28° – 31°
Temple e Rapp (1972)*	-	Tanzânia	28° – 44°
O'Loughlin (1972)*	-	British Columbia, Canadá	24° – 48°
Lumb (1975)*	-	Hong Kong	25° – 48°
Selby (1976)*	-	Califórnia, EUA	27° – 56°
Statham (1976)*	-	Wales	27° – 37°
Pomeroy (1980)*	-	Pensilvânia, EUA	20° – 40°
Heller (1981)*	-	Washington, EUA	20° – 40°
Ellen et al. (1988)*	-	Califórnia, EUA	20° – 50°
Pierson et al. (1992)*	-	Havaí, EUA	30° – 60°

Obs: (-) Dato no presentado, 1. Tomando como hipótesis de inicio en lugares donde sólo ocurrió la entrada de sedimentos tanto para una parte confinada como no confinada, 2. Para tipo de Pendiente, 3. Para tipo de Valle; Fuente: Iverson (1997).

El inicio representa un proceso por el cual un flujo de detritos se desarrolla a partir del estado estático, de una masa aparentemente rígida de suelo, sedimento o roca; las lluvias intensas es un factor desencadenante que contribuye a la desintegración del sedimento, para dar paso a la movilización de la masa saturada producto de la pérdida de cohesión del suelo, licuándose hasta transformarse en un fluido viscoso; y la conversión de la energía potencial a energía cinética capaz de cambiar el estilo del movimiento de desplazamiento hacia el flujo Iverson (1997), Lucini (2011).

Según Iverson (1997) el criterio de Mohr-Coulomb describe adecuadamente el estado de las fuerzas en la superficie de ruptura. Este criterio puede ser presentado de la siguiente manera:

$$\tau = (\sigma - \rho) \tan \varphi' + c' \quad (1)$$

Donde  $\tau$  es el cizallamiento medio ( $\text{kg} / \text{m} \cdot \text{s}^2$ );  $\sigma$  es la fuerza normal ( $\text{kg} / \text{m} \cdot \text{s}^2$ );  $\rho$  es la presión hídrica en el poro ( $\text{kg} / \text{m} \cdot \text{s}^2$ );  $\varphi'$  es el ángulo de fricción ( $^\circ$ ); y  $c'$  es el intercepto cohesivo del suelo ( $\text{kg} / \text{m} \cdot \text{s}^2$ ).

Después de la ruptura la masa desplazada adquirirá movimiento, pasando de la zona de ruptura, hacia la zona de transporte.

#### b. Zona de Transporte

Es una zona de transición, corresponde al canal, recorrido por el flujo de detritos donde el mismo permanece en movimiento Hungr, McDougall, & Bovis (2005). Las masas de detritos comúnmente crecen en tamaño al arrastrar suelos saturados, agua superficial y diversos desechos a medida que descienden por el canal en pendientes de más de  $10^\circ - 20^\circ$ ; El arrastre puede ocurrir por la erosión del material de fondo o el colapso de las orillas del canal, mientras que el volumen del deslizamiento iniciador es insignificante, esto causa que el volumen de un flujo de detritos se multiplique por diez o más, antes de que la deposición comience en un terreno plano aguas abajo. La magnitud de los flujos de detritos, por lo tanto depende principalmente de las características del canal, en regiones boscosas comúnmente se presentan con palizadas y material orgánico Hungr, McDougall, & Bovis (2005), Iverson (2014).

Los flujos de detritos desarrollan pulsos usualmente con acumulación de bloques en el frente, presentando una morfología característica como se muestra

en el diagrama de Pierson (1986), (Figura 4), distinguiendo tres regiones principales en un pulso de un flujo: el frente o cabeza, el cuerpo y la cola.

El frente o cabeza del flujo tiene un comportamiento turbulento, transporta material granular, incluyendo grandes bloques (dependiendo del material disponible), es la zona más alta del flujo, pudiendo superar los 10 metros. Esta característica es la que le otorga el gran nivel destructivo a estos eventos. El cuerpo corresponde a la zona que sigue a la cabeza, es la más extensa, tiene un comportamiento semi-turbulento y transporta gran porcentaje de partículas gruesas en suspensión. La cola sigue al cuerpo, es la zona de menor altura en un pulso, tiene un comportamiento laminar, transporta partículas finas y en función de la disponibilidad de estas, puede presentarse de líquida a hiperconcentrada Pierson (1986).

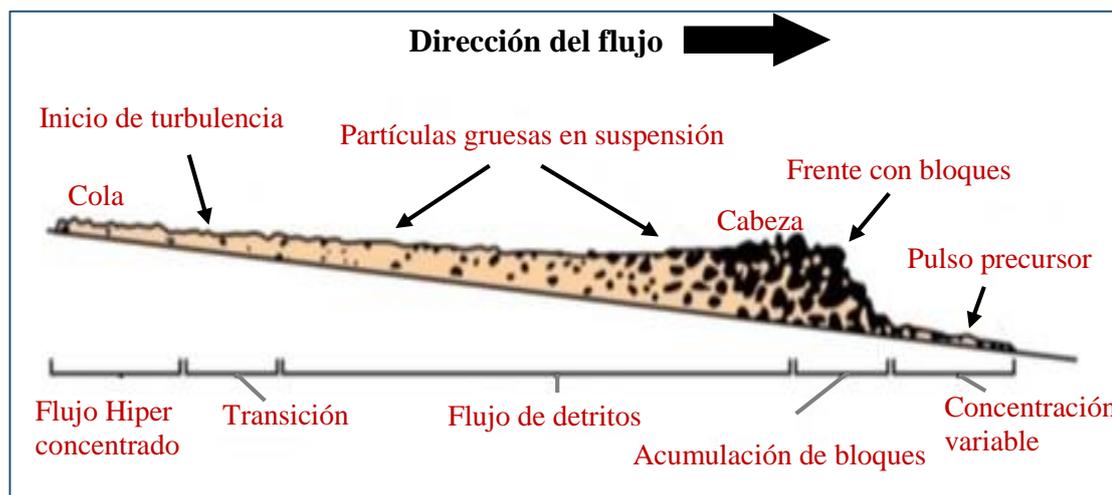


Figura 4 Esquema típico de una onda de flujo de detritos con frente rocoso  
Fuente: Pierson (1986), en *Movimientos en masa en la región andina* (2007)

Iverson (2014) El movimiento descendente de una masa de detritos convierte un porcentaje de su energía cinética de traslación en energía cinética aleatoria (es decir, agitación de detritos). La reorganización y empuje de granos puede implicar colisiones breves e inelásticas, así como contactos de fricción perdurables. A medida que los granos intercambian cantidad de movimiento entre sí, simultáneamente intercambian impulso con el fluido de poro adyacente. La evolución y persistencia de una alta presión de fluido y poro donde se contrae los detritos es provocado por la suspensión hidrodinámica sostenida de partículas del tamaño del lodo ( $<63 \mu\text{m}$ ), que aumentan la viscosidad efectiva de la fracción fluida de los detritos.

Según Rickenmann (2005), los modelos dinámicos se basan físicamente y consideran la conservación de la energía o la cantidad de movimiento. Además de formulaciones empíricas para estimar el alcance, existen formulaciones para estimar el pico de flujo del hidrograma, la velocidad media del flujo, entre otros. De esta forma, (ver tabla 7) se presentan ecuaciones empíricas encontradas en la bibliografía internacional, empleados para la generación de datos preliminares y de entrada para modelos; En la tabla 8, se presentan los valores obtenidos por algunos autores para la tasa de erosión en la zona de transporte, los cuales demuestran una gran variación Lucini (2011).

Tabla 7 Ecuaciones empíricas encontradas en la bibliografía

AUTOR	PARÁMETRO	Nº	ECUACIÓN
Archetti e Lamberti (2003)	Volumen total	(6)	$M = 39.1 * C_v^{1.97} * \eta^{-0.017} * \tau_y^{-0.19} * Q_p^{0.3} * M_w^{0.91}$
D'Agostino et al. (1996)	Volumen total	(7)	$M = 45,000 * A^{0.9} (\bar{S})^{1.5} * GI$
Marchi e D'Agostino (2004)	Volumen total	(8)	$M = 18,000 * A^{0.9} (\bar{S})^{1.3} * GI$
		(9)	$M = 65,000 * A^{1.35} (\bar{S})^{1.7}$
Forti (1920)*	Caudal Pico	(10)	$Q_p = A \left( 2.35 \frac{500}{A + 125} + 0.5 \right)$
Rickenmann (1999)	Caudal Pico	(11)	$Q_p = 0.1 * M^{5/6}$
Mizuyama et al. (1992)(1)	Caudal Pico	(12)	$Q_p = 0.135 * M^{0.78}$
Mizuyama et al. (1992)(1)	Caudal Pico	(13)	$Q_p = 0.0188 * M^{0.79}$
Jitousono et al. (1996)(1)	Caudal Pico	(14)	$Q_p = 0.00558 * M^{0.831}$
Jitousono et al. (1996)(1)	Caudal Pico	(15)	$Q_p = 0.00135 * M^{0.87}$
Costa (1988)(1)	Caudal Pico	(16)	$Q_p = 0.293 * M_w^{0.56}$
Costa (1988)(1)	Caudal Pico	(17)	$Q_p = 0.0163 * M_w^{0.64}$
Rickenmann (1999)	Vel. Media	(18)	$\bar{V} = 2.1 * Q^{0.33} * S_0^{0.33}$

Obs: M: Volumen total desplazado (m³); Cv: Concentración volumétrica de sedimento (m³/m³); η: Viscosidad aparente (Pa.s); τy: Tensión cizalliento crítica (Pa); Qp: Caudal pico (m³/s); Mw: Volumen de agua (m³); A: Área de la cuenca (km²); S: pendiente media de la cuenca (%); GI: Índice geológico; V: Velocidad media del flujo (m/s); S0: Pendiente del canal (m/m). Fuente: Rickenmann (1999).

Tabla 8 Valores de tasa de erosión encontrados en la bibliografía

AUTOR	LUGAR	TASA DE EROSIÓN EN EL RECORRIDO (m <sup>3</sup> /m)
Hungre et al. (1984)	M-Creek	
	Charles Creek	6.2
	Alberta	7.8
	Creek	5.5
	Wahleach	18.4
Rickenmann e Zimmermann (1993)	Alpes suizos	650 *
Conversini et al. (2005)	Italia	0 - 15
Fannin e Rollerson (1993)	British Columbia	12 - 25
Marchi e Cavalli (2007)	Alpes Italianos	120 *
Tecca e Genevois (2009)	Acquabona Creek, Italia	18 *
Cenderelli e Kite (1998)	West Virginia, EUA	
	Austin Run	0.5 - 41.7
	Kisamore Run	0.4 - 18
	Twin Run	0.5 - 22.5
Zimmermann (1990)	Alpes suizos	0.6 - 10
Thouret et al. (1995)(1)	Francia	5 - 10
		700 - 600

Obs: \* Valor máximo observado. Fuente: Marchi y D'Agostino (2004) en Lucini (2011).

De esta forma quedó demostrado que al propagar el flujo pierde energía, por fricción interna y externa, tendiendo a parar. Siendo así el flujo pasa de la zona de transporte, hacia la zona de deposición.

### c. Zona de Deposición

La deposición, son áreas donde los flujos de detritos escapan del confinamiento lateral, acumulándose en el formato de un abanicos de detritos o llanuras (figura 5), esto ocurre cuando toda la energía cinética es transformada a otra forma de energía Iverson (1997), Iverson (2014), Hungre, McDougall, & Bovis (2005).

La ruta de un grano representativo cerca de la superficie se muestra en rojo. El marco de referencia avanza a la velocidad del frente de flujo que avanza, de modo que un grano se mueve hacia adelante con menos rapidez que el frente que parece retroceder.

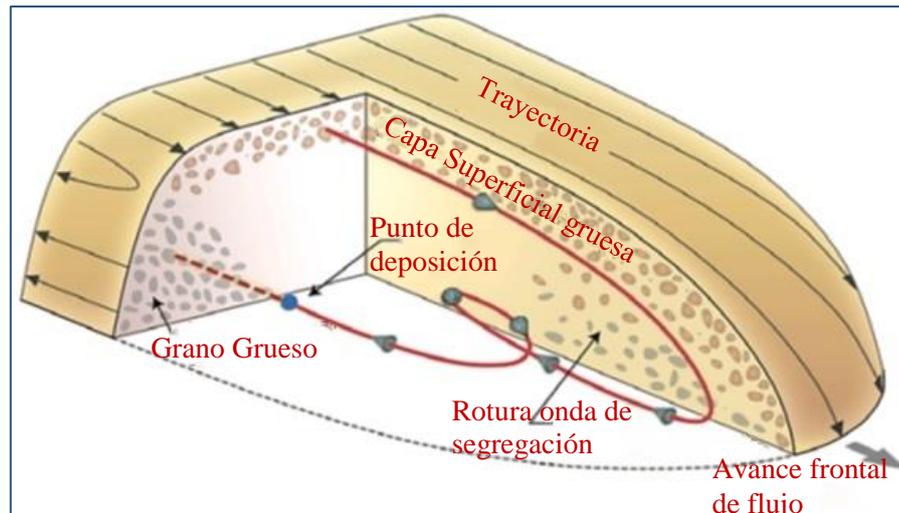


Figura 5 Esquema en corte frente de avance de flujo de detritos.  
Fuente Iverson (2014)

La bibliografía confirma la incertidumbre de que no existen pautas generales para la determinación del ángulo de deposición. La experiencia muestra que los flujos de detritos más pequeños y los eventos de avalanchas de detritos pueden depositarse en ángulos más abruptos que un evento mayor en el mismo canal. El contenido promedio de agua, la composición y el tamaño de partículas de un pulso juegan un papel importante [Hungr, McDougall, & Bovis \(2005\)](#). Diversos autores presentan los valores del ángulo de deposición. Estos valores se presentan en la tabla 9.

Tabla 9 Valores de declividad encontrados en la bibliografía en el lugar de deposición.

AUTOR	PENDIENTE DE DEPOSICIÓN
Slaymaker (1988)	5° – 12°
Hutter et al. (1996)	~3°
Benda e Cundy (1990)	1° – 10°
Bathurst et al. (1997)	10°
Hungr et al. (1984)	8° – 14°
Cenderelli e Kite (1998)	5° – 10°
Tecca et al. (2006)	12° – 14°
Boelhouwers et al. (2000)	<13°
	<17° <sup>1</sup>
Fannin e Rollerson (1993)	<6° <sup>2</sup>
	<15° <sup>3</sup>
Ishikawa et al. (2003)	~14,6° – 24,8°
Armento et al. (2008)	7°

Obs: (1) Flujo confinado, (2) Flujo no confinado, (3) Lugar de transición entre confinamiento y no confinamiento. Fuente: Lucini (2011).

Las posibles razones para la deposición de detritos en el abanico son obstrucciones dentro del canal, pérdida de momento en las curvas o disminución en la altura del canal y demás parámetros; lo que hace que el flujo sea menos confinado. Es más probable que esta zona tenga elementos en riesgo de ser golpeados por los depósitos de flujo de detritos como puentes, carreteras, propiedades y de más infraestructuras civiles.

### 2.2.5. Parámetro de Incertidumbre en el Modelo Reológico

La reología es la ciencia que estudia la respuesta de los materiales a esfuerzos de deformación, tanto líquidos como sólidos. Para ello se establecen las ecuaciones constitutivas, que derivan de los principios físicos [Shames \(1995\)](#). Este ítem provee una breve introducción a los principios y conceptos relacionados con la explicación del comportamiento de los flujos detríticos.

Los llamados fluidos newtonianos donde el esfuerzo tangencial que se produce entre dos laminas separadas una distancia ( $dy$ ), y que se desplaza de acuerdo al perfil parabólico de velocidades ( $v$ ) y  $(v + (\partial v / \partial y) dy)$ , (Figura 6); en

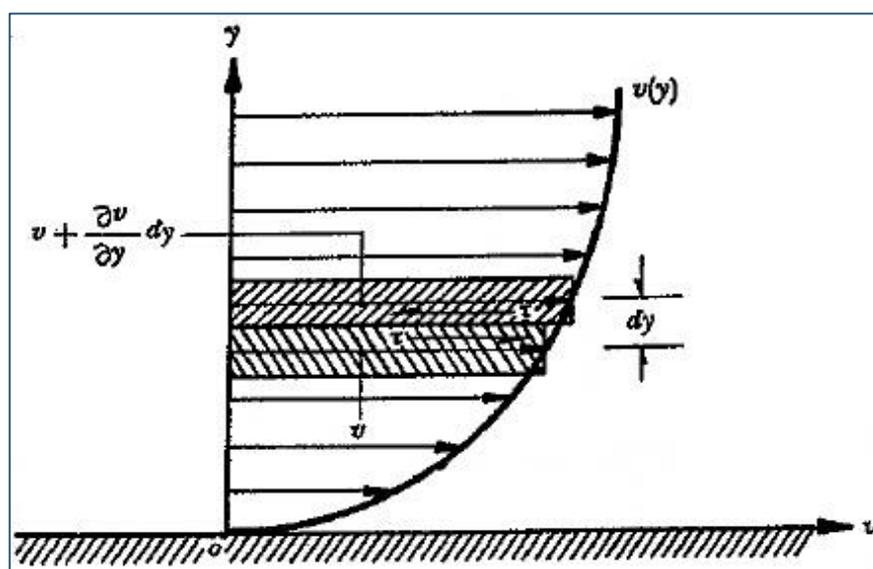


Figura 6 Viscosidad de un fluido  
Fuente: Sotelo Avila (1997)

cambio los no newtonianos también son materiales viscosos en los cuales el esfuerzo cortante está relacionado con la tasa de corte  $(\partial v / \partial y)$ . La ley de potencia es una forma de describir el comportamiento de materiales viscosos [Sotelo Avila \(1997\)](#), [Shames \(1995\)](#). Para flujos paralelos está dada como:

$$\tau = k \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^n \quad (2)$$

Para un fluido newtoniano  $k = \mu$  y  $n = 1$ . Para otros valores de  $n$  se tendría un fluido no newtoniano.

a. Modelo Reología de Bingham

El modelo de Bingham es una función de la profundidad de flujo, la velocidad, el límite elástico constante ( $\tau_c$ ) y la viscosidad dinámica ( $\eta$ ) (ecuación 3). Se supone una relación lineal de la tensión-deformación una vez que se excede el límite elástico. La velocidad de flujo media se deriva del aumento lineal del esfuerzo cortante con la profundidad. Los flujos de detritos a menudo se han modelado como materiales viscoplásticos con el modelo de Bingham. Este modelo se puede usar para materiales donde la fracción fina es lo suficientemente grande como para lubricar los contactos entre los granos [Quan Luna, et al \(2010\)](#).

$$\tau(y) = \tau_c + \eta \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (3)$$

donde,  $\tau(y)$  es el esfuerzo cortante resistente a una profundidad dada "y",  $\tau_c$  es un límite elástico constante debido a la cohesión,  $\frac{\partial v}{\partial y}$  es la velocidad de corte, y  $\eta$  es el parámetro de viscosidad. El límite elástico y la viscosidad del flujo están estrechamente relacionados con la concentración de sólidos.

b. Modelo Cuadrático de O'brien y Julien

El modelo cuadrático propuesto por O'Brien y Julien (1985) describe la continuidad de los regímenes de flujo, del flujo viscoso al flujo turbulento / dispersivo.

Flo-2D dirige los flujos detríticos, como un continuo fluido al predecir el movimiento, del fluido viscoso en función de la concentración de sedimentos. Se emplea un modelo reológico cuadrático para predecir tensiones viscosas y de fluencia en función de la concentración de sedimentos y se observa su continuidad. A concentraciones suficientemente altas, los sedimentos finos alteran las propiedades del fluido, incluida la densidad, la viscosidad y la tensión de cedencia.

Existen varias relaciones importantes de concentración de sedimentos que ayudan a definir la naturaleza de los flujos detríticos. Como la concentración de sedimentos por volumen, la concentración de sedimentos por peso (ver Tabla 10), la densidad de sedimentos, la densidad de la mezcla de flujo detrítico y el factor de carga. Al examinar los parámetros relacionados con los flujos detríticos, es importante identificar la concentración de sedimento como una medida de peso o volumen. La concentración de sedimento en volumen “Cv” viene dada por la ecuación 4, en ello el volumen de sedimentos no incluye los poros:

$$C_v = \frac{\text{Volumen del Sedimento}}{\text{Vol. del Sed.} + \text{Vol. de Agua}} \quad (4)$$

Cv: se relaciona con la concentración de sedimento en peso Cw por:

$$C_v = \frac{C_w \gamma}{[\gamma_s - C_w(\gamma_s - \gamma)]} \quad (5)$$

donde  $\gamma$  = peso específico del agua,  $\gamma_s$  = peso específico del sedimento. El peso específico de la mezcla de flujo detrítico  $\gamma_m$  es una función de la concentración de sedimento por volumen:

$$\gamma_m = \gamma + C_v(\gamma_s - \gamma) \quad (6)$$

De manera similar, la densidad de la mezcla de flujo de lodo  $\rho_m$  viene dada por:

$$\rho_m = \rho + C_v(\rho_s - \rho) \quad (7)$$

$$\rho_m = \gamma_m / g \quad (8)$$

donde  $g$  es la aceleración gravitacional. Finalmente, el volumen total de mezcla de agua y sedimento calculada por el modelo Flo-2D, automáticamente supone una descarga aumentada que está en función de la concentración volumétrica. El factor de aumento de volumen (Bulking) es:

$$BF = 1 / (1 - C_v) \quad (9)$$

Estas relaciones básicas serán valiosas al analizar simulaciones de flujos detríticos. La mayoría de los estudios requieren estimaciones de la concentración de sedimento por volumen y el factor de aumento para describir la magnitud del evento. Las concentraciones medias y máximas de sedimento para el hidrograma de inundación son variables importantes para el diseño de mitigaciones.

Tabla 10 Comportamiento de flujos de sedimentos en función de la concentración de sedimentos.

DESCRIPCIÓN DEL TIPO DE FLUJO	CONCENTRACIÓN DE SEDIMENTOS		CARACTERÍSTICAS DEL FLUJO
	En Volumen	En Peso	
<b>Deslizamientos</b>	0.65 - 0.80	0.83 - 0.91	No hay flujo; falla por deslizamiento de bloques
	0.55 - 0.65	0.76 - 0.83	Derrumbe de bloques con deformación interna durante el deslizamiento, movimiento paulatino del terreno antes de fallar.
<b>Flujos de lodo (Mudflow)</b>	0.48 - 0.55	0.72 - 0.76	Flujo evidente; deslizamiento lento sostenido por el flujo de lodo; deformación plástica bajo su propio peso; cohesivo, no se expande en la superficie.
	0.45 - 0.48	0.69 - 0.72	Flujo se extiende sobre la superficie; flujo cohesivo; algo de mezcla.
<b>Avenida de lodo (Mud Flood)</b>	0.40 - 0.45	0.65 - 0.69	El flujo se mezcla fácilmente; muestra las propiedades fluidas en la deformación; distribuido en la superficie horizontal pero mantiene una superficie fluida inclinada; partículas grandes se depositan (peñones); aparecen ondas pero se disipan rápidamente.
	0.35 - 0.40	0.59 - 0.65	Deposición marcada de gravas y cantos rodados; se expande casi completamente sobre la superficie horizontal; aparece la superficie líquida con dos fases del fluido; los pulsos viajan en la superficie.
	0.30 - 0.35	0.54 - 0.59	Separación del agua en la superficie; los pulsos viajan fácilmente; la mayoría de las arenas y gravas se han sedimentado y se mueven como arrastre de fondo.
	0.20 - 0.30	0.41 - 0.54	Se distinguen claramente las olas y ondas; todas las partículas descansando en el fondo en condición inmóvil.
<b>Inundación de agua</b>	< 0.20	< 0.41	Inundación de agua con carga suspendida convencional y arrastre de fondo.

Fuente: Manual de Referencia, FLO-2D

La gama completa de flujos de sedimentos abarca desde inundaciones de agua, inundaciones de lodo, flujos hiperconcentrados, flujos de detritos y deslizamientos de tierra (figura 7). La concentración de sedimento en volumen expresada como porcentaje es la medida más utilizada. La tabla 11, resume los criterios generales y para determinar el tipo de flujo, requerido para modelar flujos detríticos [Suárez Díaz \(2009\)](#).

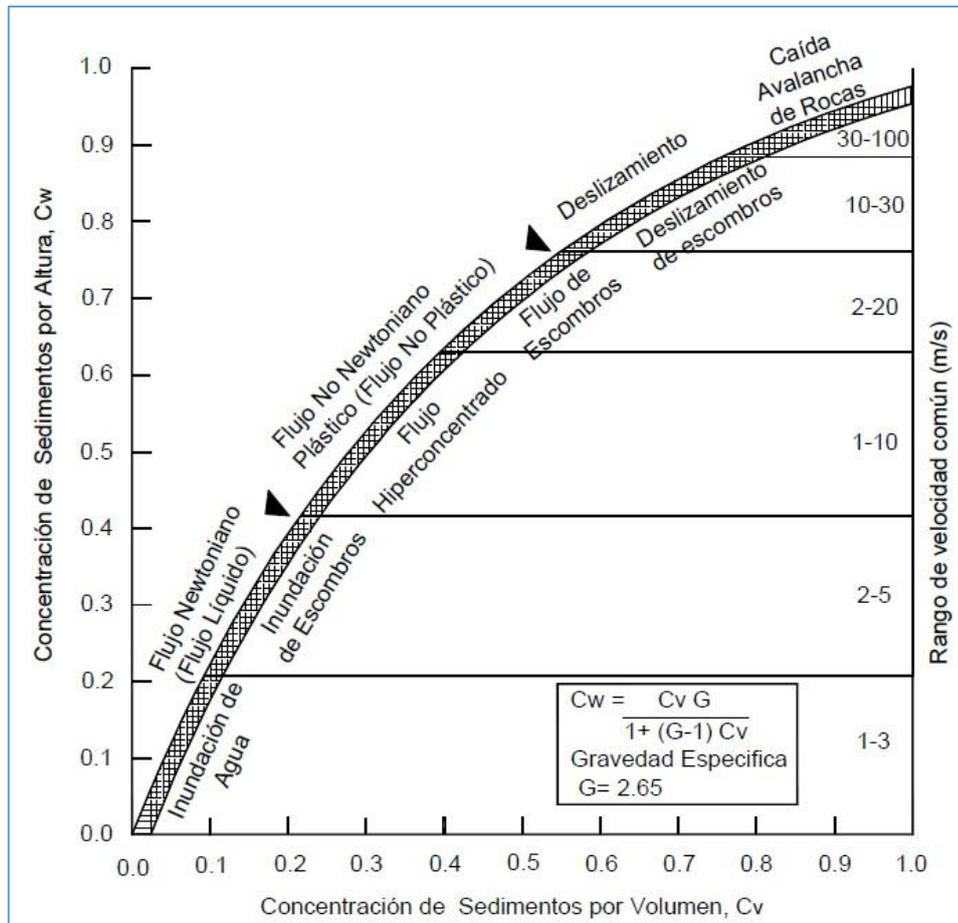


Figura 7 Clasificación de los flujos de acuerdo con la velocidad y concentración de sedimentos  
 Fuente: (Modificada de O' Brian, 2000).

Tabla 11 Tipos de flujo de acuerdo con las características de la mezcla y del canal

Características de los sedimentos	Concentración de sedimentos de la mezcla (kg/m <sup>3</sup> )	PENDIENTE DEL CANAL				
		> 100% (45°)	100 a 50%	50 a 20%	20 a 10%	10 a 5%
Tipo de flujo						
Más del 20% del peso total de sedimentos son partículas finas (d<ASTM#200)	<90	Flujo hiperconcentrado		Flujo de lodo		
	>90	Flujo de lodo				
	<300	Flujo hiperconcentrado				
Menos del 20% del peso total de sedimentos son partículas finas (d<ASTM#200)	300 a 600	Flujo turbulento de residuos (Debris flow)		Flujo hiperconcentrado		
	600 a 900	Flujo turbulento de residuos (Debris flow)				
	>900	Flujo laminar de residuos				

Fuente: Suárez (2009)

O'Brien y Julien (1988), Julien y Lan (1991), y Major y Pierson (1992) investigaron flujos de lodo con altas concentraciones de sedimento fino en la matriz fluida. Estos estudios mostraron que los flujos detríticos se comportan como fluidos de Bingham con bajas tasas de corte ( $<10 \text{ s}^{-1}$ ). En matrices fluidas con bajas concentraciones de sedimentos, las tensiones turbulentas dominan en el flujo del núcleo. Se requieren altas concentraciones de partículas no cohesivas combinadas con bajas concentraciones de partículas finas para generar esfuerzo dispersivo.

Los flujos de sedimentos hiperconcentrados implican la interacción compleja de procesos de fluidos y sedimentos, incluida la turbulencia, el corte viscoso, el intercambio de momento de partículas de líquido-sedimento y la colisión de partículas de sedimento. Las partículas de sedimento pueden chocar, moler y girar en su movimiento uno al lado del otro. La cohesión del sedimento fino controla el comportamiento no newtoniano de la matriz fluida. Esta cohesión contribuye a la tensión de cedencia " $\tau_y$ " que debe ser superada por una tensión aplicada para iniciar el movimiento del fluido. Al combinar la tensión de rendimiento y los componentes de tensión viscosa, se prescribe el conocido modelo reológico de Bingham.

La tensión de cizallamiento en los flujos detríticos, flujos e inundaciones de lodo, puede calcularse a partir de la suma de cinco componentes de tensión de cizallamiento. El esfuerzo cortante total " $\tau$ " depende del esfuerzo de fluencia cohesivo  $\tau_c$ , la cortante Mohr-Coulomb  $\tau_{mc}$ , el esfuerzo cortante viscoso  $\tau_v$  ( $\eta \frac{\partial v}{\partial y}$ ), el esfuerzo cortante turbulento  $\tau_t$  y el esfuerzo cortante dispersivo  $\tau_d$ .

$$\tau = \tau_c + \tau_{mc} + \tau_v + \tau_t + \tau_d \quad (10)$$

Cuando se escribe en términos de velocidades de corte ( $\frac{\partial v}{\partial y}$ ), se puede definir el siguiente modelo reológico cuadrático (O'Brien y Julien, 1985):

$$\tau = \tau_y + \eta \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right) + C \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \quad (11)$$

Donde:

$$\tau_y = \tau_c + \tau_{mc} \quad (12)$$

Y

$$C = \rho_m l^2 + f(\rho_m, C_v) d_s^2 \quad (13)$$

En estas ecuaciones,  $\eta$  es la viscosidad dinámica;  $\tau_c$  es el límite elástico cohesivo; la cortante de Mohr Coulomb  $\tau_{mc} = \rho_s \tan \phi$  depende de la presión intergranular  $\rho_s$  y del ángulo de reposo  $\phi$  del material; C denota el coeficiente de tensión de cizallamiento inercial, que depende de la densidad de masa de la mezcla  $\rho_m$ , la longitud de mezcla de Prandtl l, el tamaño de sedimento “ds” y una función de la concentración volumétrica de sedimento “Cv”. Bagnold (1954) definió la relación de función f ( $\rho_m$ , Cv) como:

$$f(\rho_m, C_v) = ai \rho_m \left[ \left( \frac{C^*}{C_v} \right)^{1/3} - 1 \right] \quad (14)$$

donde “ai” (~ 0.01) es un coeficiente empírico y (C\*) es la concentración máxima de volumen estático para las partículas de sedimento. Cabe señalar que Takahashi (1979) encontró que el coeficiente “ai” puede variar en varios órdenes de magnitud y sugirió lo siguiente:

$$f(\rho_s, C_v) = \frac{\pi}{12} \left( \frac{6}{\pi} \right)^{1/3} \sin^2 \alpha_1 \rho_s (1 - e_n^2) C_v^{1/3} \quad (15)$$

donde el coeficiente de restitución de energía en después del impacto varía 0.70 < “en” < 0.85 para arenas, “ $\alpha_1$ ” es el ángulo de impacto de partículas promedio y ( $\rho_s$ ) es la densidad másica de las partículas de sedimentos.

Los primeros dos términos de tensión en el modelo reológico cuadrático se conocen como las tensiones de corte de Bingham (Figura 8). La suma de la tensión de fluencia y la tensión viscosa definen la tensión de corte total de un flujo de lodo cohesivo en un régimen de flujo viscoso. El último término es la suma de las tensiones de corte dispersiva y turbulenta y define un régimen de flujo inercial para una inundación de lodo. Este término es una función del cuadrado del gradiente de velocidad.

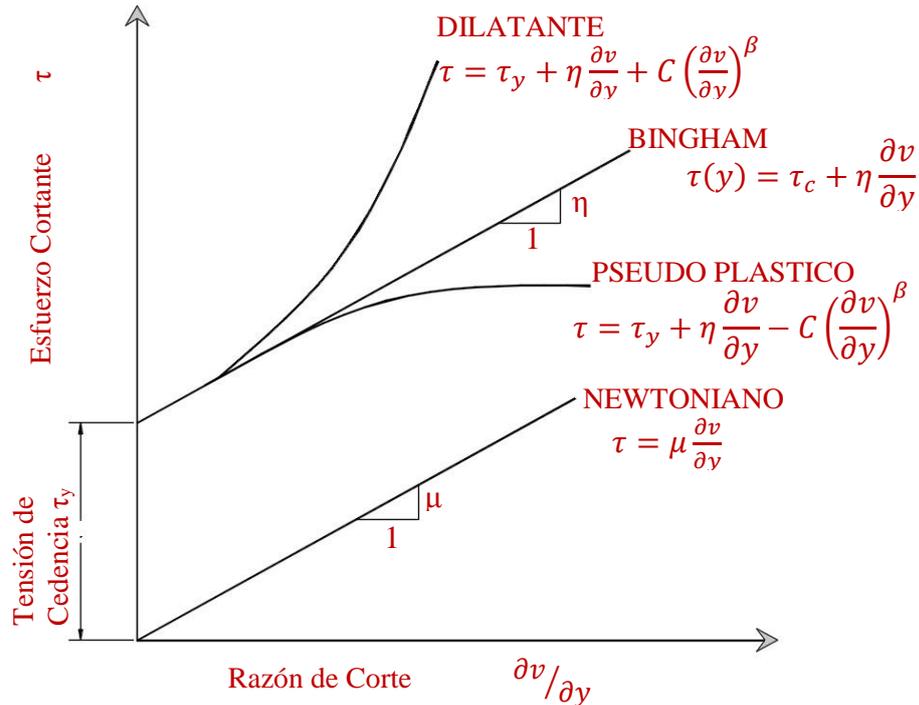


Figura 8 Esfuerzo cortante, en función de la velocidad de corte, para modelos de deformación fluida  
Fuente: Manual de Referencia, Flo-2D

Las variaciones en los valores de los parámetros reológicos tienen una consecuencia en grandes incertidumbres en las simulaciones de modelos, que deben abordarse adecuadamente en las evaluaciones de riesgos. Esta tesis presenta una caracterización de los rangos de parámetros calibrados que están presentes en las simulaciones de flujo. Los parámetros calibrados se obtienen a partir de una base de datos preliminar de análisis retrospectivos de diversos eventos pasados compilados a partir de varios eventos.

Los esfuerzos cortantes del modelo, se reescriben de la siguiente manera:

$$S_f = S_y + S_v + S_{td} \tag{16}$$

donde la pendiente de fricción total  $S_f$  es la suma de los componentes: la pendiente de cedencia  $S_y$ , la pendiente viscosa  $S_v$ , y la pendiente turbulenta dispersiva  $S_{td}$ . La pendiente de viscosidad puede ser escrito como:

$$S_v = \frac{K\eta}{8\gamma_m} \frac{V}{h^2} \tag{17}$$

donde  $Y_m$  es el peso específico de la mezcla de sedimentos,  $K$  es el parámetro de resistencia para flujos laminares. Los valores de  $K$ , están clasificados de acuerdo al tipo de superficie en la que pasa el flujo, resumidas en la tabla 12.

Tabla 12 Parámetros de resistencia para flujo laminar

SUPERFICIE	RANGO DE K
Concreto / Asfalto	24 - 108
Arena desnuda	30 - 120
Superficie graduada	90 - 400
Arcilla descubierto - suelo magro, erosionado	100 - 500
Vegetación escasa	1,000 - 4,000
Pasto de pradera corto	3,000 - 10,000
césped bluegrass	7,000 - 50,000

Fuente: Manual de Referencia, Flo-2D

La resistencia al flujo  $n_{td}$ , de los componentes de tensión de cizallamiento turbulento y dispersivo se combina en un valor  $n$  equivalente de Manning.

$$S_{td} = \frac{n_{td}^2 V^2}{h^{4/3}} \tag{18}$$

donde la resistencia del flujo  $n_{td}$  de las componentes de esfuerzos cortantes turbulentos y dispersivos es una función exponencial de la concentración de sedimentos y el coeficiente de Manning.

Las componentes de las pendientes de fricción se ordenan en la siguiente forma:

$$S_f = \frac{\tau_y}{\gamma_m h} + \frac{K\eta V}{8\gamma_m h^2} + \frac{n_{td}^2 V^2}{h^{4/3}} \tag{19}$$

Se ha formulado una solución de ecuación cuadrática a la ecuación de pendiente de fricción en el modelo Flo-2D para estimar la velocidad para el uso en la ecuación de momento. La velocidad estimada representa la velocidad de flujo calculada a través de la llanura de inundación o el límite del elemento del canal utilizando la profundidad de flujo promedio entre los elementos. Se pueden asumir valores razonables de “K” y “n”-valores de Manning para el canal y la resistencia del flujo terrestre. El peso específico de la matriz fluida ( $\gamma_m$ ), la tensión de rendimiento ( $\tau_y$ ) y la viscosidad ( $\eta$ ) varían principalmente con la concentración de sedimentos. A menos que esté disponible un análisis reológico del material del sitio de flujo de lodo, se pueden usar las siguientes relaciones empíricas para calcular la viscosidad y la tensión de rendimiento:

$$\tau_y = \alpha 2 e^{\beta_2 C_v} \tag{20}$$

$$\eta = \alpha 1 e^{\beta_1 C_v} \tag{21}$$

donde (αi) y (βi) son coeficientes empíricos (ver tabla 13), definidos por experimentos de laboratorio (O'Brien y Julien, 1988). La viscosidad (poises) y la tensión de cedencia (dinas/cm<sup>2</sup>) se muestran como funciones exponenciales de la concentración volumétrica de sedimentos Cv de limos y arcillas (y en algunos casos, arenas finas) y no incluyen material clástico flotado junto con el flujo.

Tabla 13 Esfuerzo de rendimiento y viscosidad en función de la concentración de sedimentos

RENDIMIENTO DEL ESFUERZO Y VISCOSIDAD EN FUNCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE SEDIMENTOS				
Source	$\tau_y = \alpha e^{\beta C_v}$		$\eta = \alpha e^{\beta C_v}$	
	α	β	α	β
<b>DATOS DE CAMPO</b>				
Aspen Pit 1	0.181	25.7	0.036	22.1
Aspen Pit 2	2.72	10.4	0.0538	14.5
Aspen Natural Soil	0.152	18.7	0.00136	28.4
Aspen Mine Fill	0.0473	21.1	0.128	12.0
Aspen Watershed	0.0383	19.6	0.000495	27.1
Aspen Mine Source Area	0.291	14.3	0.000201	33.1
Glenwood 1	0.0345	20.1	0.00283	23.0
Glenwood 2	0.0765	16.9	0.0648	6.2
Glenwood 3	0.000707	29.8	0.00632	19.9
Glenwood 4	0.00172	29.5	0.000602	33.1
<b>RELACIONES DISPONIBLES EN LA LITERATURA</b>				
lida (1938)*	-	-	0.0000373	36.6
Dai et al. (1980)	2.6	17.48	0.0075	14.39
Kang and Zhang (1980)	1.75	7.82	0.0405	8.29
Qian et al. (1980)	0.00136	21.2	-	-
	0.05	15.48	-	-
Chien and Ma (1958)	0.0588	19.1 - 32.7	-	-
Fei (1981)	0.166	25.6	-	-
	0.0047	22.2	-	-
<b>* Ver O'Brien (1986) para las referencias.</b>				

Fuente: Manual de Referencia, FLO-2D

Finalmente [Quan Luna, et al \(2010\)](#). Hace mención a tres enfoques principales para estimar estos parámetros: pueden derivarse de pruebas de laboratorio o leyes empíricas a partir de muestras recolectadas en el campo después de la ocurrencia de un evento; pueden obtenerse de una calibración

posterior de un modelo a un evento pasado; o pueden ser derivado de eventos y valores retrocalculados previamente publicados en la literatura.

### 2.2.6. Evaluación de Peligro de Movimientos en Masa Tipo Flujo

Los procesos de movimientos en masa requieren para su análisis y representación, considerar tanto sus características espaciales como las temporales [Glade & Crozier \(2005\)](#), conservando en mente que el objetivo de la evaluación y representación del peligro, es el análisis de riesgo para la gestión de emergencias o el ordenamiento territorial.

#### a. Componentes de un Mapa de Peligro

Dada la complejidad de los movimientos en masa, la caracterización y representación de los parámetros llevan a entender su potencial destructivo matizado por el enfoque que se le dé al estudio [Picarelli, Oboni, Evans, Mostyn, & Fell \(2005\)](#). Un enfoque orientado al riesgo responderá las preguntas: ¿Cuál es el mecanismo y probabilidad del evento?, ¿Cuál es la distancia de viaje?, ¿La velocidad?, ¿Alcanzará una zona poblada?, ¿Cuáles son las señales de alerta?, conceptos como vulnerabilidad, peligro y riesgo, son términos que se van a utilizar reiteradamente en este trabajo de tesis, su utilización rigurosa es importante para la correcta comprensión. Algunos autores se refieren al peligro como “la probabilidad de ocurrencia” de un fenómeno potencialmente dañino en un período de tiempo y área determinada. Otros en cambio, emplean el término para referirse a un evento o proceso potencialmente dañino caracterizado por una magnitud, intensidad, probabilidad, localización, etc. [Andinas \(2007\)](#).

#### Magnitud

La mayor parte de la bibliografía asocia el término magnitud de un movimiento en masa para representar al tamaño, ya sea en volumen o en área. En ambos casos debe indicarse cuando se trata del movimiento inicial, de la zona de depósito, o el total. Frecuentemente se emplea como medida de magnitud el área total. Para el cálculo de volumen, se estima el área y espesor de la zona de arranque o se emplean formulas empíricas que relacionan el área de la zona de arranque con el volumen, [Picarelli, Oboni, Evans, Mostyn, & Fell \(2005\)](#).

#### Intensidad

Para referirse al potencial destructivo de un movimiento en masa, o intensidad, se emplean parámetros tales como la velocidad, las fuerzas de impacto, el espesor o la altura. La intensidad varía de acuerdo con la localización.

[Cruden & Varnes \(1996\)](#) Establecen una escala de velocidades para movimientos en masa en 7 categorías, desde extremadamente lenta ( $5 \times 10^{-7}$  mm/s) a extremadamente rápida (mayor a 5 m/s) (ver la Tabla 1). Sin embargo, algunos movimientos en masa importantes por su potencial destructivo, como son los flujos de detritos, se encuentran todos por encima de la categoría “extremadamente rápido”. A este tipo de movimiento en masa se le categoriza como catastrófico por su potencial de causar pérdida de vidas humanas [Andinas \(2007\)](#).

#### □ Frecuencia o probabilidad de ocurrencia

Además de la caracterización del proceso, la estimación de la frecuencia es un componente en la evaluación de peligro por movimientos en masa. [Picarelli, Oboni, Evans, Mostyn, & Fell \(2005\)](#), describen los métodos para la estimación de la frecuencia, su aplicabilidad y limitaciones. Entre ellos se mencionan los siguientes:

- Evaluación de registros históricos de movimientos en masa.
- Relación entre movimientos en masa y geología / geomorfología.
- Análisis multivariado entre la ocurrencia de movimientos en masa y parámetros tales como geología, geomorfología, geometría, etc.
- Relación entre la ocurrencia de movimientos en masa, geometría de la ladera y registros históricos de precipitación y su duración.
- Relación entre la ocurrencia de movimientos en masa, geometría de la ladera y registros históricos de precipitación y propiedades geotécnicas.
- Modelamiento de niveles piezométricos en la ladera versus precipitación, y su relación con ocurrencia de movimientos en masa o con el factor de seguridad.
- Empleo de métodos probabilísticos.

De esta manera un estudio y mapa de peligro por movimientos en masa idealmente debería contener información sobre lo siguiente:

El tipo de proceso; localización; el potencial de daño que pueda causar, ya sea expresado en términos de su magnitud (volumen) o su intensidad; y la posibilidad de su ocurrencia, ya sea expresada cualitativamente en términos de posibilidad (alta, media o baja) o cuantitativamente en términos de frecuencia o probabilidad.

b. Etapas para la Evaluación de Peligro

Algunas de las etapas que requiere un estudio de peligro por movimientos en masa son comunes para todos los casos (figura 9). En general los diferentes autores describen este procedimiento en etapas más o menos estándar, y es de consenso general que el procedimiento debe ser interactivo durante su aplicación.

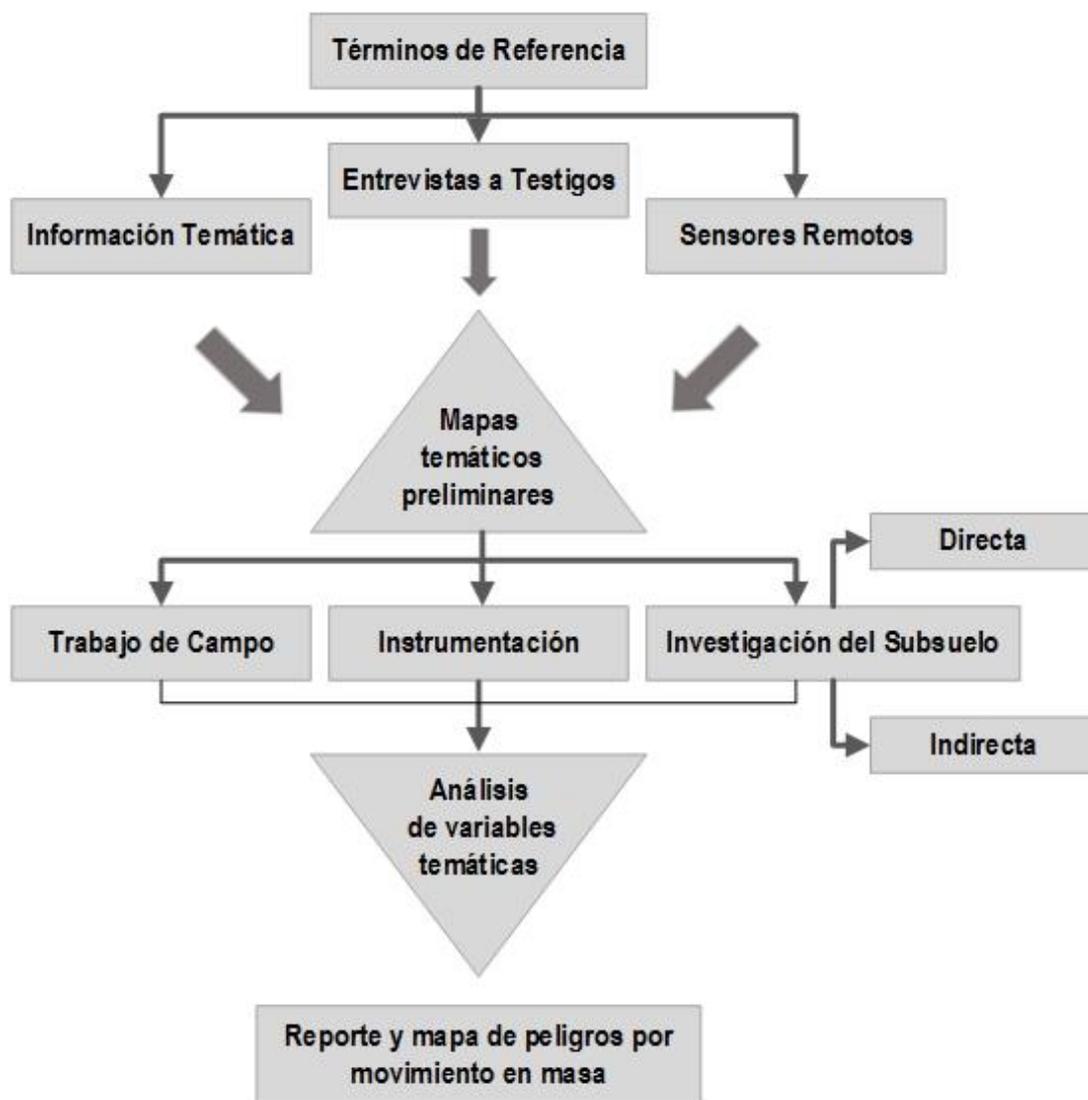


Figura 9 Procedimiento general para la realización de un estudio de amenaza por movimientos en masa.

Fuente: Movimientos en Masa en la Región Andina (2007)

#### Términos de referencia

En esta etapa se incluye la definición del objetivo de la investigación, la escala de trabajo, los requerimientos de los clientes. La elaboración de los términos de referencia debe responder a preguntas como las siguientes: ¿Quiénes participan en el proyecto?, ¿A quién le reportamos?, ¿Cuáles son las preocupaciones acerca de peligro por movimientos en masa en el área?, ¿Qué cambios en el uso del territorio se pueden predecir?, ¿Se trata de una evaluación preliminar/ general o una final de detalle?, ¿Se requiere solo una evaluación de peligros o también una evaluación de riesgo?, ¿Se requiere la recomendación y el diseño de las medidas de remediación? y ¿Cuáles son las limitaciones del cronograma y del costo?.

#### Información temática

Esta etapa incluye la captura y análisis de la información existente del sitio de estudio. Esto incluye mapas topográficos, mapas y publicaciones geológicas, artículos en periódicos o en revistas y fotos que describan la historia del sitio, informes geotécnicos, geológicos o geomorfológicos, bases de datos, precipitaciones, deshielos, etc.

Esta etapa es crucial para el buen desarrollo del proyecto. Se trata de una compilación de información multidisciplinaria y requiere por lo tanto interacción a nivel interinstitucional. Entre las instituciones que poseen información que se debe analizar, se encuentran gobiernos locales y regionales, oficinas de planificación y transporte, instituciones de protección civil, etc.

#### Informe de testigos presenciales

En el caso de estudios locales se debe identificar e interrogar sistemáticamente a personas que viven cerca del sitio, con el fin de obtener información acerca de la estabilidad de las laderas en el área y las características de eventos pasados. Sus informes deben registrarse con detalle, fechas y cualquier dato cuantitativo que ellos puedan recordar.

#### Análisis de productos de sensores remotos

En el caso de estudios regionales de pequeña escala o de un gran deslizamiento individual, se pueden utilizar imágenes satelitales como ayuda

para el mapeo e inventario de movimientos en masa. En algunos casos, se pueden compilar mapas topográficos o modelos del terreno mediante imágenes satelitales. Para cualquier proyecto siempre se debe realizar la interpretación multitemporal de fotografías aéreas. El procedimiento recomendado es estudiar primero con fotos de gran altura y luego continuar con fotos de mayor detalle.

#### Análisis del terreno y cartografía preliminar

Es importante en cada caso establecer el marco geomorfológico de cada lugar, identificar las características y origen de las geoformas en el área, los tipos de materiales que se pueden esperar, y los procesos geomorfológicos que ocurran o puedan ocurrir. La escala del análisis dependerá de la escala del proyecto, pero los mapas del terreno no deben ser de escala menor a 1:25,000.

#### Inventario de movimientos en masa

Todas las ocurrencias de movimientos en masa próximas a la localidad deben registrarse en un mapa de inventario y en una base de datos que incluya: tipo de movimiento en masa, magnitud, tiempo de ocurrencia o de su reactivación y datos similares. El inventario debe incorporar inicialmente los datos obtenidos del desarrollo de las tareas 1 a 4, de la figura 9. Luego, debe actualizarse con la información recogida durante el trabajo en terreno.

#### Investigaciones preliminares en terreno

La investigación de cada sitio debe comenzar por un trabajo de reconocimiento de sitio. Si el presupuesto lo permite, la observación aérea, abarcando el área de la geodesia, pueden ser muy útiles en terrenos inaccesibles. Se deben realizar los recorridos de campo con el fin de cubrir los vacíos de información, reconocer en el terreno las unidades que se bosquejaron en las fotos aéreas, y comprobar los tipos de suelos y de rocas y los sitios con movimientos en masa.

Los afloramientos de suelo y roca deben registrarse con su localización y elevación altimétrica. En el levantamiento geológico se deben registrar cuidadosamente las características geológicas de los materiales aflorantes estrechamente relacionados con sus características físicas mecánicas como unidades litológicas y límites estratigráficos, tipos de suelos y rocas, grado de meteorización, elementos estructurales (diaclasas, fallas, foliaciones,

esquistosidad), evidencia de filtraciones y signos de inestabilidad (grietas, material triturado, flexiones, cambios en la vegetación, etc.).

#### Investigación de subsuelo

La investigación del subsuelo se requiere sólo en casos donde pueden ocurrir movimientos en masa profundos. En general no es necesaria en la evaluación de movimientos en masa de detritos como los flujos y avalanchas de detritos, ni en estudios regionales que cubran áreas de gran extensión.

#### Instrumentación

Se deben instalar instrumentos de monitoreo de acuerdo con la necesidad, pueden ser piezómetros del tipo Casagrande e inclinómetros en sitios donde puedan ocurrir movimientos en masa, siendo estos los más básicos. Para identificar movimientos también se pueden realizar monitoreo de puntos o de líneas de referencia en la superficie, empleando por ejemplo un sistema de posicionamiento global diferencial.

#### Análisis

De acuerdo con el tipo de caso se podrán realizar análisis para determinar mapas de susceptibilidad a movimientos en masa, mapas de intensidad de peligros, zonas de peligro y retiros. Es importante seleccionar el método de análisis más apropiado, y a la disponibilidad de los datos. Si se emplean programas de computador, deben ser seleccionados cuidadosamente y tener en cuenta que muchos modelos modernos de programas de computador requieren datos detallados, que no están disponibles comúnmente en investigaciones de rutina. Los resultados del análisis mediante el software pueden depender totalmente de la calidad de los datos proporcionados por el usuario.

#### Informes

Es importante distinguir entre los informes de carácter científico o ingenieril o de carácter interno, de aquellos informativos y para uso externo por el público. El contenido de ambos es similar pero los segundos deben ser más generales, explicativos y orientados hacia el usuario. Asimismo, deben explicarse conceptos que un usuario no técnico podría ignorar, tales como terminología, métodos, etc.

### 2.3. DESCRIPCIÓN DEL MODELO HIDRÁULICO FLO-2D

Flo-2D es un modelo simple de conservación de volumen. Mueve el volumen de la inundación alrededor de una serie de mosaicos para el flujo terrestre o a través de segmentos de flujo para el enrutamiento del canal. La progresión de la onda de inundación sobre el dominio de flujo se controla mediante la topografía y la resistencia al flujo. El enrutamiento de inundaciones en dos dimensiones se logra a través de una integración numérica de las ecuaciones de movimiento y la conservación del volumen de fluido, ya sea para una inundación de agua o un flujo de sedimento hiperconcentrado. A continuación se presenta una discusión de las ecuaciones gobernantes.

Para este trabajo de tesis se extrae conceptos referidos al modelo Flo-2D, del manual de referencia del software Flo-2D, 2017.

#### 2.3.1. Ecuaciones Gobernantes

Las ecuaciones constitutivas de movimiento de fluidos incluyen la ecuación de continuidad y la ecuación de momento:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hV}{\partial x} = i \quad (22)$$

$$S_f = S_o - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} \quad (23)$$

donde “h” es la profundidad del flujo y “V” es la velocidad promediada en la profundidad en una de las ocho direcciones de flujo x. El exceso de intensidad de lluvia (i) puede ser distinto de cero en la superficie del flujo. El componente de pendiente de fricción  $S_f$  se basa en la ecuación de Manning. Los otros términos incluyen el gradiente de presión de la pendiente del lecho ( $S_o$ ) y los términos de convección y aceleración local. Esta ecuación representa el flujo del canal promediado en una dimensión. Para la planicie de inundación, mientras que Flo-2D es un modelo de flujo multidireccional, las ecuaciones de movimiento en Flo-2D se aplican calculando la velocidad de flujo promedio a través de un límite de elemento de cuadrícula en una dirección a la vez. Hay ocho direcciones de flujo potenciales, las cuatro direcciones de la brújula (norte, este, sur y oeste) y las cuatro direcciones diagonales (noreste, sureste, suroeste y noroeste). Cada cálculo de velocidad es unidimensional y se resuelve independientemente de las otras siete direcciones. Dado que el flujo se comparte con todos los elementos

vecinos de un elemento de cuadrícula dado, no se requiere la resolución de los vectores de velocidad. La estabilidad de este esquema numérico explícito se basa en criterios estrictos para controlar la magnitud de la variable, paso de tiempo computacional.

Comprensión, la magnitud relativa de los componentes de aceleración a la pendiente del lecho y los términos de presión es importante. La magnitud relativa de los términos de la ecuación de momento para un canal aluvial moderadamente pronunciado y un hidrograma de rápido ascenso de la siguiente manera:

*Tabla 14 Magnitud relativa de los componentes de aceleración a la pendiente y la presión del lecho*

	Pendiente del Cauce	Gradiente	Aceleración	Aceleración Local
Término de la ecuación de impulso	$S_o$	$\partial h / \partial x$	$V \partial V / g \partial x$	$\partial V / g \partial t$
Magnitud (ft/min)	26	0.5	0.12 - 0.25	0.5

Fuente: Manual de referencia Flo-2D

Esto ilustra que la aplicación de la onda cinemática ( $S_o = S_f$ ) en pendientes moderadamente abruptas con un flujo relativamente estable y uniforme es suficiente para modelar la progresión de la onda de inundación y la contribución del gradiente de presión y los términos de aceleración se pueden descuidar. La adición del término de gradiente de presión para crear la ecuación de onda difusiva mejorará la simulación del flujo terrestre con topografía compleja. La ecuación de onda difusiva con el gradiente de presión es necesaria para predecir la atenuación de la onda de inundación y el cambio en el almacenamiento en la llanura de inundación. Los términos de aceleración local y convectiva en la ecuación de onda dinámica completa son significativos para la ruta de la inundación para pendientes planas o adversas o pendientes muy pronunciadas o condiciones de flujo inestable. Solo la ecuación de onda dinámica completa se aplica en el modelo Flo-2D y la contribución de cada término en la ecuación se calcula independientemente de una suposición de negligencia.

### 2.3.2. Algoritmo de Soluciones: Cómo Funciona el Modelo

La forma diferencial de las ecuaciones de continuidad y momento en el modelo Flo-2D se resuelve con un esquema numérico central de diferencias finitas. Este algoritmo explícito resuelve la ecuación de impulso para la velocidad de flujo a través del límite del elemento de la cuadrícula, elemento por elemento. La solución a la forma diferencial de las ecuaciones de continuidad y momento resulta de una representación discreta de la ecuación cuando se aplica en un solo punto. Los esquemas explícitos son fáciles de formular, pero generalmente están limitados a pequeños pasos de tiempo por estrictos criterios numéricos de estabilidad. Los esquemas de diferencias finitas pueden requerir largos recorridos por computadora para simular ondas de inundación de ascenso pronunciado o muy lento, canales con secciones transversales altamente variables, cambios abruptos en la pendiente, áreas de flujo dividido y de flujo estancado.

El dominio computacional Flo-2D se discretiza en elementos de cuadrícula uniformes y cuadrados. El procedimiento computacional para el flujo por tierra implica el cálculo de la descarga a través de cada uno de los límites en las ocho direcciones de flujo potencial (figura 10) y comienza con una estimación lineal de la profundidad del flujo en el límite del elemento de la cuadrícula. La profundidad de flujo límite estimada es un promedio de las profundidades de flujo en los dos elementos de la rejilla que compartirán la descarga en una de las ocho direcciones. Se intentaron estimaciones no lineales de la profundidad del límite en versiones anteriores del modelo, pero no mejoraron significativamente los resultados. También se promedian otros parámetros hidráulicos entre los dos elementos de la rejilla para calcular la velocidad del flujo, incluida la resistencia del flujo (valor  $n$  de Manning), el área de flujo, la pendiente, la elevación de la superficie del agua y el perímetro humedecido. La velocidad de flujo (variable dependiente) a través del límite se calcula a partir de la solución de la ecuación de momento. Usando el área de flujo promedio entre dos elementos, la descarga para cada paso de tiempo se determina multiplicando el área de flujo de tiempos de velocidad.

La ecuación de onda dinámica completa es una ecuación diferencial parcial, no lineal, de segundo orden. Para resolver la ecuación de la velocidad

de flujo en un límite del elemento de la cuadrícula, inicialmente la velocidad de flujo se calcula con la ecuación de onda difusiva utilizando la pendiente promedio de la superficie del agua (pendiente del lecho más gradiente de la cabeza de presión). Esta velocidad se usa luego como una primera estimación (o una semilla) en el método de la tangente de Newton-Raphson de segundo orden para determinar las raíces de la ecuación de onda dinámica completa. La ecuación de Manning se aplica para calcular la pendiente de fricción. Si la solución de Newton-Raphson no converge después de 3 iteraciones, el algoritmo toma como valor predeterminado la solución de onda difusiva.

En la ecuación de momento de onda dinámica completa, el término de aceleración local es la diferencia en la velocidad para la dirección de flujo dada en el paso de tiempo anterior. El término de aceleración convectiva se evalúa como la diferencia en la velocidad de flujo a través del elemento de la cuadrícula respecto al paso de tiempo anterior. Por ejemplo, el término de aceleración local ( $1 / g * \partial V / \partial t$ ) para el elemento de cuadrícula 251 en la dirección este (2) se convierte en:

$$\Delta(V_t - V_{t-1})_{251} / (g * \Delta t) \quad (24)$$

donde  $V_t$  es la velocidad en la dirección este para el elemento de cuadrícula 251 en el tiempo  $t$ ,  $V_{t-1}$  es la velocidad en el paso de tiempo anterior ( $t-1$ ) en la dirección este,  $\Delta t$  es el paso de tiempo en segundos, y  $g$  es la aceleración debida a la gravedad. Se puede hacer una construcción similar para el término de aceleración convectiva ( $V_x / g * \partial V / \partial x$ ) donde  $V_2$  es la velocidad en la dirección este y  $V_4$  es la velocidad en la dirección oeste para el elemento de cuadrícula 251:

$$V_2 * \Delta(V_2 - V_4)_{251} / (g * \Delta x) \quad (25)$$

La descarga a través del límite del elemento de la cuadrícula se calcula multiplicando la velocidad por el área de flujo de la sección transversal. Después de calcular la descarga para las ocho direcciones, el cambio neto en la descarga (suma de la descarga en las ocho direcciones de flujo) dentro o fuera del elemento de la cuadrícula se multiplica por el paso del tiempo para determinar el cambio neto en el volumen de agua del elemento de la cuadrícula. Este cambio

neto en el volumen se divide luego por el área de superficie disponible ( $A_{surf}$  = área de almacenamiento) en el elemento de la cuadrícula para obtener el aumento o la disminución de la profundidad de flujo  $\Delta h$  para el paso del tiempo.

$$\sum Q_X^{i-1} = Q_n + Q_e + Q_s + Q_w + Q_{ne} + Q_{se} + Q_{sw} + Q_{nw} = A_{surf} \Delta h / \Delta t \quad (26)$$

dónde:

$Q_x$  = descarga a través de un límite

$A_{surf}$  = área de superficie de un elemento de rejilla

$\Delta h / \Delta t$  = cambio en la profundidad del flujo en un elemento de cuadrícula durante un paso de tiempo

La integración del enrutamiento del canal se realiza esencialmente de la misma manera, excepto que la profundidad del flujo es una función de la geometría de la sección transversal del canal y, por lo general, solo hay un elemento de rejilla de canal ascendente y uno descendente para compartir la descarga. El índice computacional es la dirección del flujo (1 de 8 direcciones) no el elemento de cuadrícula. Esto simplifica y reduce el número de pasos en el algoritmo de solución. Cada dirección se visita solo una vez durante un barrido del dominio del sistema de cuadrícula e involucra dos elementos de cuadrícula, mientras que un índice de elemento de cuadrícula requiere que cada elemento de cuadrícula sea visitado (figura 10).

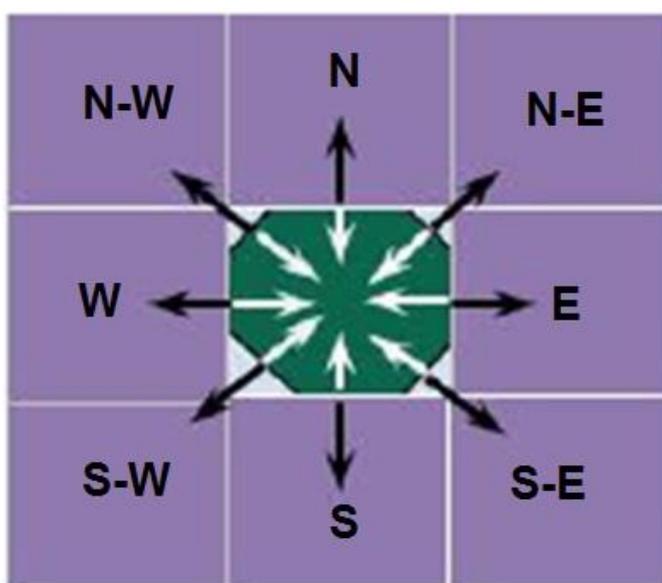


Figura 10 Dirección de flujo es el índice computacional.  
Fuente: Manual de referencia Flo-2D

Para resumir, el algoritmo de solución incorpora los siguientes pasos:

1. Para una ubicación de dirección de flujo dada en el sistema de cuadrícula, se calculan la geometría, la rugosidad y la pendiente del flujo promedio entre dos elementos de cuadrícula.

2. La profundidad de flujo  $d_x$  para calcular la velocidad a través de un límite de cuadrícula para el siguiente paso de tiempo ( $i + 1$ ) se estima a partir del paso de tiempo anterior  $i$  utilizando una estimación lineal (la profundidad promedio entre dos elementos).

$$d_x^{i-1} = d_x^1 + d_{x+1}^i \quad (27)$$

3. La estimación de la velocidad de la primera velocidad en la dirección del flujo, el canal 1-D o la calle se calcula utilizando la ecuación de onda difusiva. La única variable desconocida de la ecuación de onda difusa es la velocidad.

4. La velocidad de onda difusora predicha para el paso de tiempo actual se usa como una semilla en el método de Newton-Raphson para resolver la ecuación de onda dinámica completa para la velocidad. Cabe señalar que para los flujos de sedimentos hiperconcentrados, como los flujos de lodo y escombros, los cálculos de velocidad incluyen los términos de viscosidad adicional y tensión de rendimiento.

5. La descarga "Q" a través del límite se calcula multiplicando la velocidad por el área de flujo de la sección transversal. Para el flujo terrestre, el ancho del flujo se ajusta por los factores de reducción de ancho (WRF).

La descarga incremental para el paso de tiempo a través de los ocho límites (o elementos de canal ascendente y descendente) se suman:

$$\Delta Q_X^{i+1} = Q_n + Q_e + Q_s + Q_w + Q_{ne} + Q_{se} + Q_{sw} + Q_{nw} \quad (28)$$

y el cambio en el volumen (descarga neta x paso de tiempo) se distribuye sobre el área de almacenamiento disponible dentro de la cuadrícula o elemento del canal para determinar un aumento incremental en la profundidad del flujo.

$$\Delta d_x^{i+1} = \Delta Q_x^{i+1} \Delta t / A_{surf} \quad (29)$$

donde  $\Delta Q_x$  es el cambio neto en la descarga en las ocho direcciones de planicie de inundación para el elemento de la cuadrícula para el paso de tiempo  $\Delta t$  entre el tiempo  $i$  y  $i + 1$ . Ver figura 11.

6. Los criterios de estabilidad numérica se verifican para la nueva profundidad de flujo. Si se exceden los criterios de estabilidad del número de Courant, el paso de tiempo se reduce al paso de tiempo calculado del número de Courant, todos los cálculos de paso de tiempo anteriores se descartan y los cálculos de velocidad comienzan de nuevo con la primera dirección de flujo.

7. La simulación avanza con pasos de tiempo crecientes utilizando un algoritmo de paso de tiempo hasta que los criterios de estabilidad se excedan

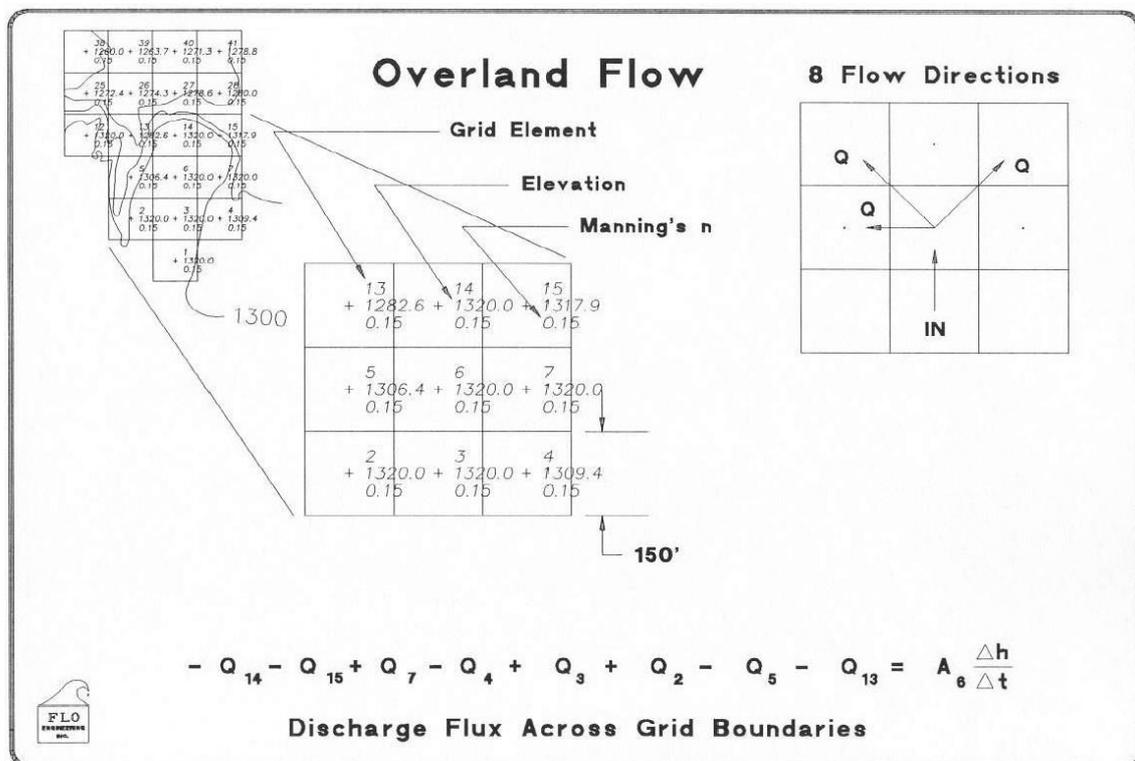


Figura 11 Flujo de descarga a través de los límites de los elementos de la cuadrícula Fuente: Manual de referencia Flo-2D

nuevamente para lograr el intercambio de descargas entre los elementos de la cuadrícula según la dirección del flujo, el modelo configura una serie de conexiones laterales en tiempo de ejecución como se muestra en la figura 11. A estas direcciones del flujo solo se accede una vez durante un paso de tiempo en lugar de la doble visita requerida por la búsqueda elementos contiguos. Este enfoque facilita el procesamiento paralelo adicional para la aceleración del modelo y tiene los beneficios adicionales de:

- ❑ Reducir los cálculos de descarga requeridos en aproximadamente un 40%, aumentando la velocidad del modelo.
- ❑ Ignorando los lados completamente bloqueados.
- ❑ Eliminando la asignación de NOFLOC para los canales.

En esta secuencia de cálculo, la descarga de flujo de entrada del sistema de red y la lluvia se calcula primero, y luego se calcula el flujo del canal. A continuación, si se están simulando las calles, se calcula la descarga de la calle y, finalmente, se determina el flujo por tierra en 8 direcciones (figura 12). Una vez que se ha completado todo el enrutamiento de flujo para estos componentes, se prueban los criterios de estabilidad numérica para cada área de inundación, canal o elemento de calle. Si se exceden los criterios de estabilidad de cualquier elemento, el paso de tiempo se reduce mediante varias funciones, dependiendo de la historia anterior del éxito de la estabilidad y se reinicia la secuencia de cálculo. Si todos los criterios de estabilidad numérica se cumplen con éxito, el paso de tiempo aumenta para el siguiente barrido computacional del sistema de cuadrícula. Durante un barrido del sistema de rejilla para un paso de tiempo, el flujo de descarga se agrega a los elementos de entrada, la velocidad de flujo y la descarga entre elementos de la rejilla se calculan y se determina el cambio en el volumen de almacenamiento en cada elemento de la rejilla, tanto para el agua como para el sedimento. Todo el volumen de entrada, el volumen de salida, el cambio en el almacenamiento o la pérdida del área del sistema de la red se suman al final de cada paso de tiempo y se calcula la conservación del volumen. Los resultados se escriben en los archivos de salida o en la pantalla en intervalos de tiempo de salida especificados por el usuario.

El esquema de enrutamiento de inundación Flo-2D se basa en que el paso del tiempo es lo suficientemente pequeño como para asegurar la estabilidad numérica (es decir, sin incremento numérico). La clave para un enrutamiento de inundación de diferencias finitas eficiente es que los criterios numéricos de estabilidad limitan el paso del tiempo para evitar el aumento numérico y, sin embargo, permiten que los pasos de tiempo suficientemente grandes completen la simulación en un tiempo razonable. Flo-2D tiene un paso de tiempo variable dependiendo de si no se superan los criterios de estabilidad numérica. Los

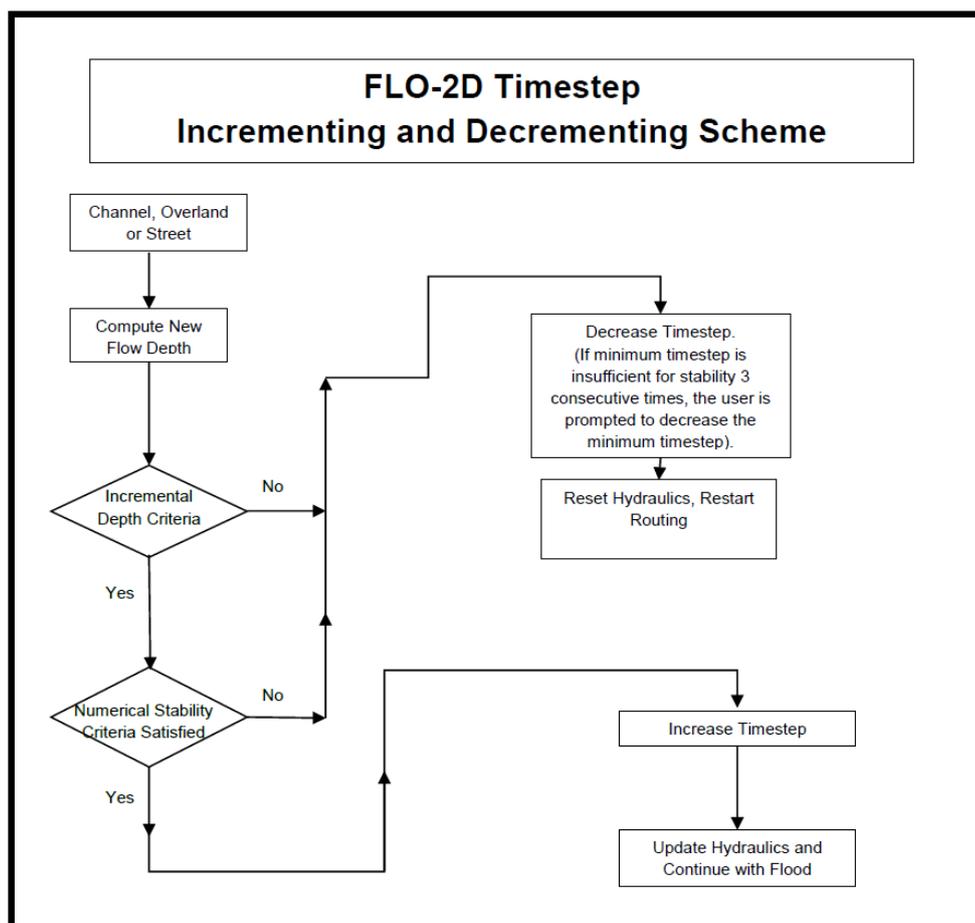


Figura 12 Diagrama de flujo de los criterios de estabilidad de Flo-2D  
Fuente: Manual de referencia Flo-2D

Los criterios de estabilidad numérica se verifican para cada elemento de la cuadrícula en cada paso de tiempo para garantizar que la solución sea estable. Si se superan los criterios de estabilidad numérica, se reduce el paso de tiempo y se descartan todos los cálculos hidráulicos anteriores para ese paso de tiempo. La mayoría de los esquemas explícitos están sujetos a la condición de estabilidad numérica de Courant-Friedrich-Lewy (CFL). La condición CFL relaciona la celeridad de la onda de inundación con el tiempo del modelo y los incrementos espaciales. La interpretación física de la condición CFL es que una partícula de fluido no debe viajar más de un incremento espacial  $\Delta x$  (lado del elemento de cuadrícula) en un paso de tiempo  $\Delta t$  (Fletcher, 1990). Flo-2D utiliza la condición CFL para la planicie de inundación, el canal y el enrutamiento de la calle. El paso de tiempo  $\Delta t$  está limitado por:

$$\Delta t = C \Delta x / (\beta V + c) \tag{30}$$

dónde:

$C$  es el número de Courant ( $C \leq 1.0$ )

$\Delta x$  es el ancho del elemento de la cuadrícula cuadrada o la longitud del canal

$V$  es la velocidad media calculada de la sección transversal

$\beta$  es un coeficiente ( $5/3$  para un canal ancho)

$c$  es la celeridad de la onda computada

Si bien el coeficiente  $C$  puede variar de 0.2 a 1.0 según el tipo de algoritmo de enrutamiento explícito, se recomienda un valor predeterminado de 0.6 en el modelo Flo-2D. Cuando  $C$  se establece en 1.0, la difusividad artificial o numérica es teóricamente cero para una ecuación convectiva lineal. Si la simulación tiene algún aumento numérico identificado por velocidades o picos excesivamente altos en un hidrograma de descarga de flujo de salida, el número de Courant debe reducirse en 0.1 hasta que se alcance un valor de 0.2 o 0.3. El número de Courant es espacialmente variable por elemento de cuadrícula dentro de un rango pequeño. Si se completa con éxito, se permite que el número de Courant de la celda aumente en 0.0001 hasta un valor de 0.05 mayor que el valor asignado. Si se excede el número de Courant, el valor disminuye en 0.002 hasta que se alcanza el valor asignado. El Courant asignado es el valor mínimo permitido.

Puede que no sea posible evitar por completo la difusividad artificial o la dispersión numérica utilizando el número de Courant para limitar el paso del tiempo. Los pasos de tiempo generalmente varían de 0,1 segundos a 30 segundos, con un paso de tiempo típico del orden de 1 segundo durante el flujo de descarga más alto. El modelo comienza con un paso de tiempo mínimo igual a 5 segundos y lo aumenta hasta que se superan los criterios numéricos de estabilidad, luego el paso de tiempo se restablece al paso de tiempo del número de Courant calculado. Si los criterios de estabilidad continúan superándose y el paso de tiempo mínimo no es lo suficientemente pequeño para conservar el volumen o mantener la estabilidad numérica, entonces los datos de entrada deben modificarse. Los pasos de tiempo son una función del flujo de descarga para un elemento de cuadrícula dado y su tamaño. Los elementos de rejilla pequeños con un hidrograma ascendente pronunciado y una descarga pico grande requieren pequeños pasos de tiempo. La precisión no se ve

comprometida si se utilizan pequeños pasos de tiempo, pero el tiempo de ejecución puede ser largo si el sistema de cuadrícula es grande.

Las funciones de incremento y disminución de los intervalos de tiempo se diseñaron para respaldar la función del número de Courant en la estabilidad del modelo. Se determinó que al variar el número de Courant dentro de un cierto rango del valor original se redujo el número de reducciones de tiempo ineficaces. Además, los incrementos y reducciones en el paso del tiempo se redujeron para permitir que el paso del tiempo computacional se ajustara gradualmente a los criterios numéricos de estabilidad. Esto reemplazó el método de una disminución de paso de tiempo grande seguida de aumentos de paso de tiempo pequeños más numerosos. Los resultados muestran que hubo un aumento significativo en la aceleración del modelo de tiempo de ejecución de 15 a 40%. Los criterios de estabilidad se aplican de la siguiente manera:

### **2.3.3. Asignación de Números de Courant Separados para Terrenos Inundables.**

Variación espacial automatizada en la llanura de inundación, el canal o el número de Courant de la calle dentro de un rango específico dependiendo de si se superó o no se superó el criterio del número de Courant.

Un parámetro de acelerador de paso de tiempo (TIME\_ACCEL) fue codificado en el modelo. El valor predeterminado se cambió de 0.1 a 1.0. Un valor más alto de TIME\_ACCEL dará como resultado incrementos de paso de tiempo más grandes. Cuando el paso de tiempo computacional es inferior a 1.0 segundo y se completó con éxito un bucle de paso de tiempo de simulación sin exceder los criterios de estabilidad, el paso de tiempo se incrementa en TIME\_ACCEL (valor predeterminado 1.0) + 0.001. Entonces, si el paso de tiempo fue 0.5, entonces el siguiente paso de tiempo se incrementaría a 0.501 segundos. Si el paso de tiempo es mayor que 1 segundo, entonces el incremento del paso de tiempo es:

$$DSEC = DSEC + TIME\_ACCEL * 0.0085/XFAST \quad (31)$$

dónde:

DSEC = paso de tiempo computacional en segundos

TIME\_ACCEL = parámetro definido por el usuario que va de 0.1 a 10.0 con un valor predeterminado de 1.0

XFAST = XFAST + 0.001 para cada bucle de paso de tiempo completado con éxito cuando DSEC > 1.0 segundo.

XFAST se restablece a 1.0 cada vez que se disminuye el paso de tiempo DSEC.

Este algoritmo aumenta el paso de tiempo de manera uniforme hasta que el DSEC de paso de tiempo es mayor que 1 segundo. Cuando DSEC > 1.0, los incrementos sucesivos en DSEC dan como resultado valores mayores de XFAST que comienzan a ralentizar la tasa de cambio en el tiempo. El paso de tiempo máximo está limitado a 30 segundos.

#### **2.3.4. La Importancia de la Conservación del Volumen**

Una revisión de los resultados de simulación de cualquier modelo de inundación comienza con la conservación del volumen. La conservación del volumen indica precisión y estabilidad numérica. El volumen de entrada, el volumen de salida, los cambios en el almacenamiento y las pérdidas (infiltración) se suman al final de cada paso de tiempo. Los resultados de la conservación del volumen Flo-2D se escriben en los archivos de salida o en la pantalla en intervalos de tiempo de salida especificados por el usuario. Los errores en los datos, la inestabilidad numérica o los componentes poco integrados pueden causar una pérdida de conservación del volumen. Cualquier simulación que no conserve el volumen debe ser revisada. Cabe señalar que la conservación del volumen en cualquier simulación de inundación no es exacta. Si bien se introduce algún error numérico al redondear números, aproximaciones o interpolaciones (como en las tablas de clasificación), el volumen debe conservarse dentro de una fracción del porcentaje del volumen de entrada. El usuario debe decidir sobre un nivel aceptable de error en la conservación del volumen. Si bien la conservación de volumen con 0.001 por ciento se considera muy precisa, la mayoría de las simulaciones Flo-2D tienen una precisión de conservación de volumen dentro de algunas millonésimas de una por ciento.

## 2.4. MEDIDAS DE MITIGACIÓN

Las obras civiles inmersas en el control de la ocurrencia de flujos detríticos, debe mantener relación con las características; del flujo, las zonas de deposición, propósito del control, recursos, construcción y mantenimiento de las obras. Diferentes tipos de obras de control son muchas veces utilizadas en conjunto [VanDine \(1996\)](#), [Montserrat \(2005\)](#).

Las obras de mitigación se localizan en distintas partes, de la zona afecta al peligro, tal como se muestra en la figura 13.

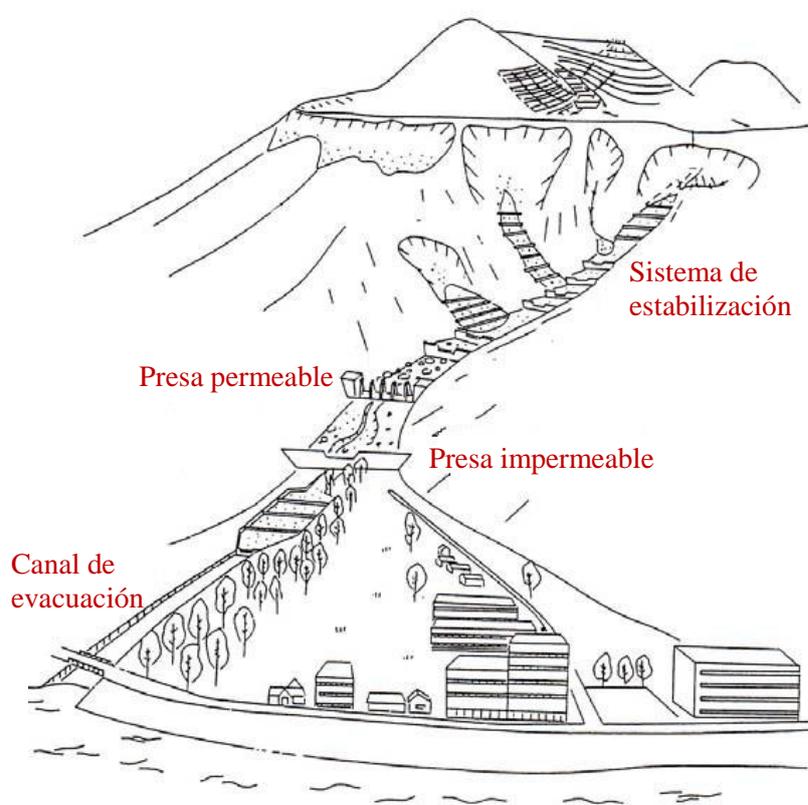


Figura 13 *Combinación de distintas soluciones de protección contra aluviones*  
Fuente: [Seminara y Tubino, 1993](#) en [Montserrat \(2005\)](#).

[Mizuyama \(2008\)](#) refiere al diseño de contramedidas ante flujos de detritos, pueden clasificarse como medidas estructurales o no estructurales. La primera incluyen el control de presas, estructuras tipo “sabo”, diques y canales de evacuación, mientras que la segunda incluyen sistemas de advertencia y evacuación, uso adecuado de la tierra y mejoras de los edificios. Debido a su inmovilidad geográfica, las estructuras tales como las carreteras y los ferrocarriles pueden ser vulnerables a los flujos de detritos.

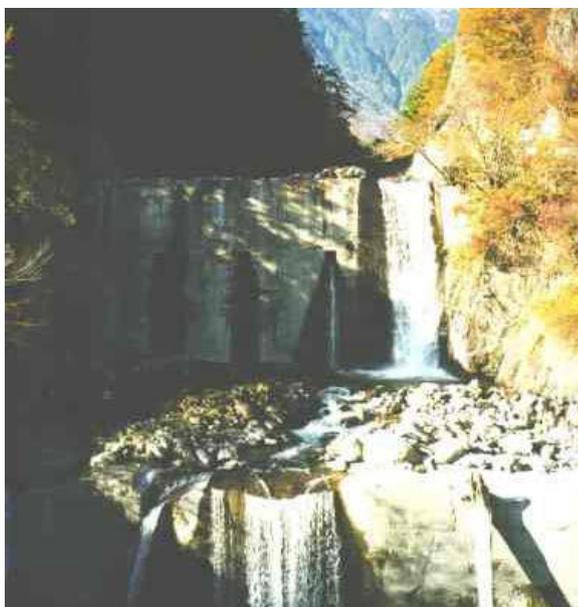
### 2.4.1. Sabo Dams

Las SABO dams (también llamadas check dams o debris dams), son presas construidas dentro de la hoya de una cuenca. Este tipo de presas tiene como objetivo captar los sedimentos como si fuera un embalse pero dejando el paso al agua o fracción más fina de sedimentos. De esta forma bajo condiciones normales se permite el flujo de los sedimentos sin afectar la dinámica fluvial, pero en episodios de gran flujo de sedimentos, estos serán detenidos temporalmente por la presa para prevenir desastres aguas abajo [Gómez Cortés \(2012\)](#).

#### a. Tipología de Sabo Dams

##### Presa vertical.

Este tipo de SABO dam, son presas verticales de una altura considerable, que se coloca en las partes altas de la hoya de la cuenca, posterior al salto, se tiene una estructura disipadora, (figura 14). Su funcionamiento consiste en atrapar los sedimentos que bajan por el río y cuando se encuentra llena de sedimentos, produce un cambio en la pendiente del cauce. Lo cual va a servir para disminuir la fuerza de futuros flujos de detritos y disminuye las velocidades haciendo que se genere menos erosión [Gómez Cortés \(2012\)](#).



*Figura 14 Captación de Hayagawa, Japón.  
Fuente: Montserrat (2005)*

##### Presas abiertas (slit-dam)

Este tipo de presa, posee más de una aperturas verticales, las que usualmente se prolongan al lecho del cauce. El efecto principal es de graduar los

volúmenes de sedimentos transportados en avenidas (figura 15). El funcionamiento de esta presa, consiste en permitir el paso del agua en condiciones normales de flujo evitando lo más posible la retención de sedimentos. Pero en caso de producirse un flujo de detritos por su misma configuración, en la que la fracción más gruesa se produce en la parte frontal, el flujo de detritos queda retenido en la presa. Posterior a este evento y en eventos de crecientes menores del cauce gran parte de los sedimentos atrapados en la presa son llevados aguas abajo, pero en condiciones que no llegan a afectar infraestructuras civiles. [Garrido Urzúa \(2012\)](#), [Gómez Cortés \(2012\)](#).



*Figura 15 Presas de aperturas verticales  
Fuente: Montserrat (2005)*

#### □ Presas permeables

Estas presas, se distinguen de las presas abiertas al incorporar tubos de acero o barras de hierro, las aberturas están diseñadas para el control de grandes rocas del frente de los flujos detríticos, los márgenes del cauce se conforman por estructuras de concreto (figura 16). Su funcionamiento es muy similar a la de las presas abiertas. La diferencia entre ambos tipos de presa, es que las presas permeables por su configuración metálica retienen menos sedimentos en condiciones normales del río [Mizuyama \(2008\)](#), [Gómez Cortés \(2012\)](#).

#### □ Redes de alambre (barreras dinámicas)

Las barreras de redes son elementos deformables, absorben la energía cinética del impacto en virtud de las deformaciones elástico-plásticas de sus componentes; estas barreras son utilizadas también, para contener deslizamientos originados por arrastres de materiales o aluviones.

Esta estructura se compone por unos cimientos a ambas márgenes del cauce que en condiciones normales no deben afectar la dinámica del flujo. A estos cimientos se anclan unos cables metálicos llevando una red de alambre, la cual se encuentra ubicada en la zona del (figura 17). Esta red metálica es la encargada de retener los flujos de detritos. Mizuyama (2008), Gómez Cortés (2012).



Figura 16 Tuberías de acero abiertas, imagen de la izquierda, Presas permeables, Uesugi-tani river, Japón.  
Fuente: (Extraído de SABO Division 2006)

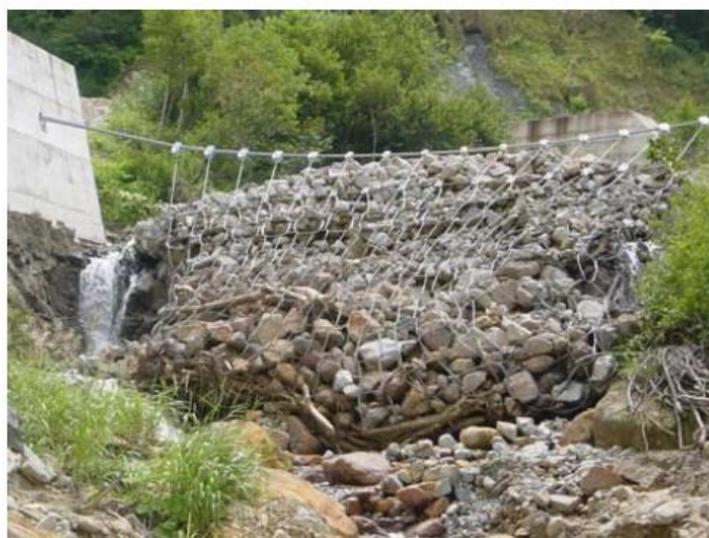
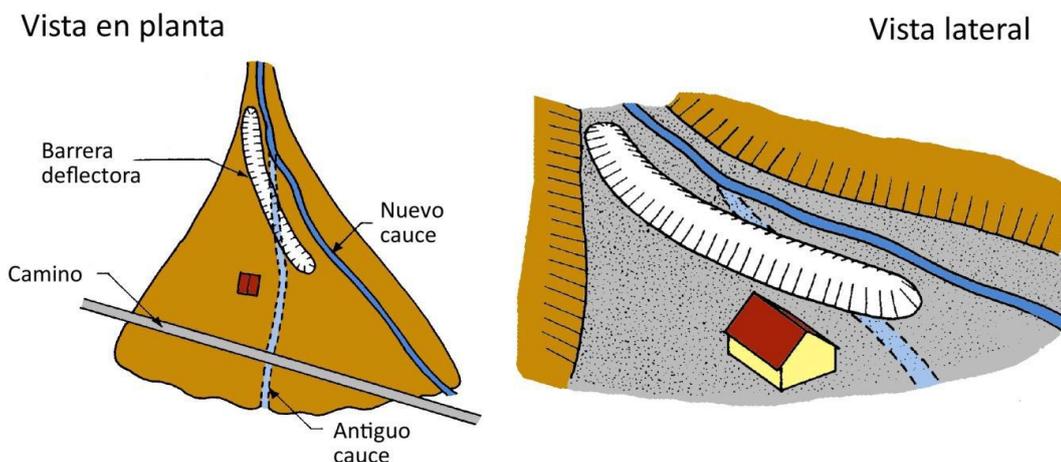


Figura 17 Red Metálica. Mount Tateyama, Japan  
Fuente: Montserrat (2005)

#### b. Diques Desviadores del Flujo o Barreras Deflectoras

Los muros o bermas deflectoras son diques suficientemente altos para prevenir rebases, se construyen generalmente cuesta abajo desde el vértice del cono de deyección (abanico). La diferencia con las barreras laterales es que este

tipo de obras impide que el flujo mantenga su dirección natural desviándolo hacia otra zona. Su uso brinda protección a estructuras, desviar el flujo a otras áreas del abanico o incrementar en longitud la trayectoria del flujo, disminuyendo así su pendiente para favorecer la deposición (figura 18) [VanDine \(1996\)](#).



*Figura 18 Diques desviadores*  
Fuente: [VanDine \(1996\)](#)

c. Obras Controladoras de Dirección del Flujo

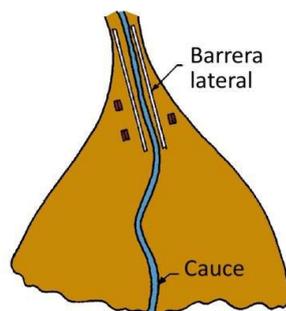
Los flujos detríticos pueden ser conducidos mediante canales capaces de conducir el máximo de la descarga a lugares seguros o hacia áreas con menor interés de protección. Generalmente se conectan con obras de almacenamiento o deposición (figura 19) [Montserrat \(2005\)](#).



*Figura 19 Canales conductores de flujos detríticos*  
Fuente: [Montserrat \(2005\)](#).

Las barreras laterales son también un tipo de canal conductor, capaz de contener el flujo dentro de ellas, protegiendo así ciertas zonas o estructuras ubicadas en el sector (figura 20) [VanDine \(1996\)](#).

Vista en planta



Vista lateral

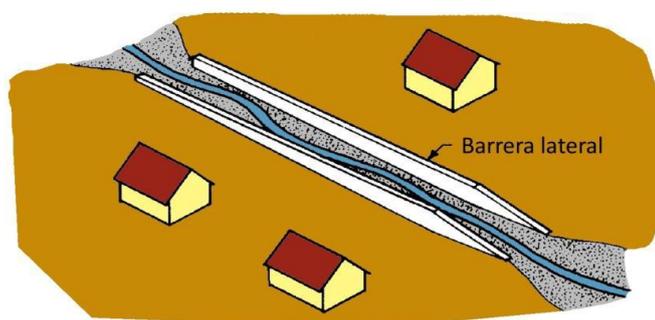


Figura 20 Barreras laterales  
Fuente: VanDine (1996).

Este tipo de obras, ya sean canales o barreras laterales, debe mantener la alineación, paralela a la dirección natural de flujo como sea posible. De presentarse zonas en curva, el radio de curvatura de éstas debe ser lo más grande posible. Además, las obras deben ser diseñadas para que no ocurra sedimentación dentro de ellas [Montserrat \(2005\)](#).

#### 2.4.2. Contramedidas para Infraestructuras Viales

Las estructuras descritas anteriormente pueden proteger eficazmente áreas extensas así como corredores lineales, como carreteras y ferrocarriles. Los cobertizos de flujo de escombros pueden usarse si un lecho de torrente es suficientemente más alto que los caminos o los ferrocarriles [Mizuyama \(2008\)](#).

Por lo accidentado del territorio Peruano (orografía, geología y climatología), la mayoría de las infraestructuras viales discurren por los fondos de los valles cortando las quebradas y pasando sobre los conos de deyección. Ciertas rutas nacionales como medida de mitigación, están equipadas con obras de arte especiales: Puentes, Falso Túnel, Badenes, Variantes (ajuste de trazo). Estas soluciones evitan que los flujos detríticos provenientes de las microcuencas dañen la infraestructura vial (Gaizka Buruaga, ingeniero de Alauda).

## CAPITULO III

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. MATERIALES

##### 3.1.1. Información Cartográfica y Fotogramétrica

La información cartográfica para la delimitación de la quebrada Llocllamayo, se obtuvo de la siguiente hoja de la carta nacional a escala 1:100 000 del Instituto Geográfico Nacional (IGN), como se muestra (ver tabla 15).

*Tabla 15 Información Cartográfica Utilizada*

DENOMINACIÓN	HOJA	ESCALA	ZONA	INSTITUCIÓN
Masuco	27-V	1:100 000	19-S	IGN

*Fuente: IGN*

La información fotogramétrica se obtuvo del Digital Globe (Google Earth), y Filmaciones aéreas por medio de drones, como se muestra (ver tabla 16).

*Tabla 16 Información Fotogramétrica Utilizada*

LANSAT 8	DIGITAL GLOBE	FOTOS AÉREAS	FILMACIONES AÉREAS
Grabada	Grabada	Año	Años
03/06/2014	17/09/2014	1985	2012, 2015, 2017

*Fuente: propia*

##### 3.1.2. Información Topográfica

El elipsoide utilizado es el World Geodesic System 1984 (WGS84), (ver tabla 17) se muestran los parámetros:

*Tabla 17 Información Topográfica*

ELIPSOIDE	DATUM	SEMI EJE MAYOR	ACHATAMIENTO	ZONA
WGS84	Geocéntrico	6' 378, 137 m	1/298,257	19-S

*Fuente: Datos del IGN de la República de Perú. (Resolución Jefatural N° 079-2006-IGN/OAJ/DGC)*

*Obs: (Proyecto de Normas Técnicas de Levantamientos Geodésicos– 2005).*

Las labores de levantamiento topográfico se iniciaron con una comprobación de los BMs instalados previamente por la concesionaria vial del tramo 4, enmarcados en el sistema de referencia WGS84, en los cuales se sustentó todo el levantamiento, (ver tabla 18).

Tabla 18 Información Topográfica (BM y Puntos de Apoyo PA) del sector Llocllamayo

BM 1	UTM Z - 19 S		ALTITUD COTA	PROGRESIVA	LADO
	NORTE	ESTE			
PA4469E	8515242.174	351407.421	574.632	295+309.420	DER = 10.048
BM 4469N	8515144.743	351215.429	570.035	295+091.534	DER = 5.876
PA4470AN	8515156.408	351954.888	560.293	295+978.146	DER = 10.72
BM 4470	8515221.568	351745.071	565.180	295+664.74	DER = 11.59
PA4469D	8515275.429	351643.509	572.481	295+551.361	IZQ = 7.196

Obs: Datos de coordenadas de hitos topográficos. Fuente: IIRSA tramo 4.

### 3.1.3. Información Geológica

Recolección y análisis de datos geológicos, la información utilizada corresponde al mapa geológico del cuadrángulo de Masuco, Carta Geológica del Perú del Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET) ver tabla 19.

Tabla 19 Información Geológica Utilizada

DENOMINACIÓN	HOJA	ESCALA	ZONA	INSTITUCIÓN
<b>Masuco</b>	27-V	1:100 000	19-S	INGEMMET

Fuente: INGEMMET

### 3.1.4. Información Pluviométrica

El registro de precipitaciones fue obtenido de la estación meteorológica “San Gabán” del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), como se muestra (ver tabla 20).

Tabla 20 Información Pluviométrica Utilizada

ESTACIÓN	UBICACIÓN			PERIODO	INSTITUCIÓN
<b>CO. 113077</b>	Latitud:	Longitud:	Altitud:	1997 al	SENAMHI
<b>CO. San Gabán</b>	13° 26' 25.9"	70° 24' 16.7"	820 m.s.n.m	2015	

Fuente: SENAMHI

### 3.1.5. Volúmenes de Eliminación de Derrumbes

El regulador (OSITRAN) recaba los volúmenes de remoción y eliminación de material detrítico, a través de reportes (MEmer), ver tabla 21.

Tabla 21 Información de Volúmenes Eliminados

SECTOR CRITICO	PROGRESIVA	PERIODO	MANTENIMIENTO DE EMERGENCIA
<b>Llocllamayo</b>	Km 295+350	2013 al 2015	MEmer

Fuente: IIRSA tramo 4.

### 3.2. MÉTODOS

#### 3.2.1. Zona de Estudio

##### a. Ubicación:

El área de estudio, de esta tesis; Geográficamente, se sitúa en la vertiente de la cordillera oriental del sur del Perú; Hidrográficamente, contribuyente de la hoya del Atlántico, dentro del sistema de drenaje de la cuenca del río Inambari, es una micro cuenca formada por la quebrada Llocllamayo; Políticamente, se ubica dentro del distrito de San Gabán, provincia Carabaya, departamento de Puno; como se muestra (figura 21).

Las coordenadas UTM del mismo es: 351487.50 E, 8515283.40 N, sobre los 605 metros sobre el nivel del mar.



Figura 21 Ubicación Política de la quebrada Llocllamayo  
Fuente: propia

En el Anexo D, plano de código TLL-PL-01-R1 / LAM01, se muestra la ubicación general.

##### b. Vías de Acceso:

El área de investigación correspondiente a esta “Tesis”; se encuentra sobre el cono de deyección de la quebrada Llocllamayo, por donde pasa el corredor vial interoceánico IIRSA sur tramo 4, Azángaro – puente Inambari (figuras 22 y 23), siendo las progresivas de interés Km: 295+200 al Km: 295+600.



Figura 22 Ubicación de la quebrada Llocllamayo, imagen modificada de google earth  
Fuente: propia

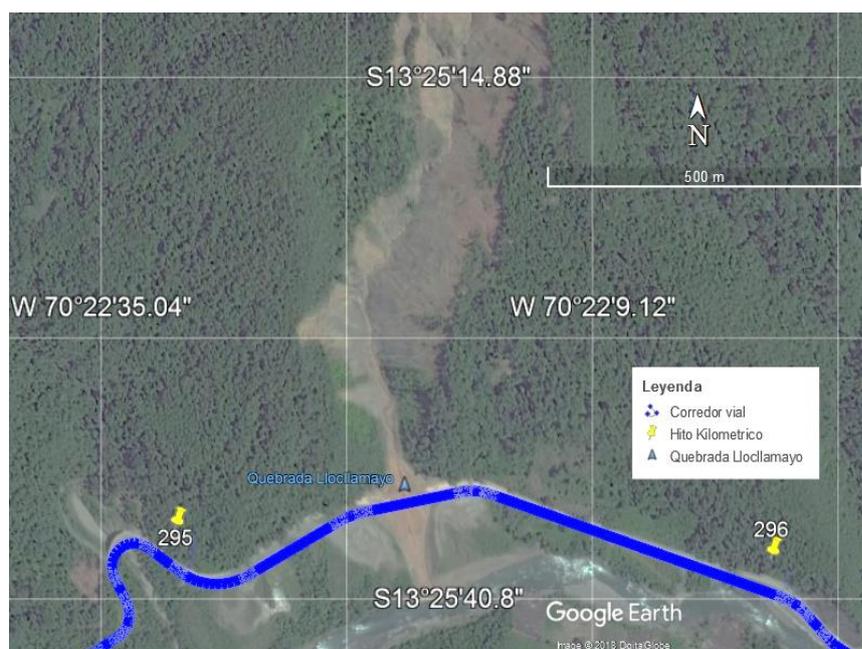


Figura 23 Acceso hacia la quebrada Llocllamayo, imagen modificada de google earth  
Fuente: propia

En el Anexo D, plano de código TLL-PL-01-R1 / LAM02, se muestra la ubicación del sector Llocllamayo.

### 3.2.2. Geología y Geotecnia de la Quebrada Llocllamayo

#### a. Geología Regional

La geología regional que incluye al sector Llocllamayo, está conformada por rocas sedimentarias del Paleozoico, Mesozoico y depósitos del Cuaternario. La Cordillera Oriental, ha controlado las condiciones climáticas de la región, originando una variedad de relieves debido a los diferentes procesos geomorfológicos que han actuado sobre las diversas litologías presentes, (ver figura 24).

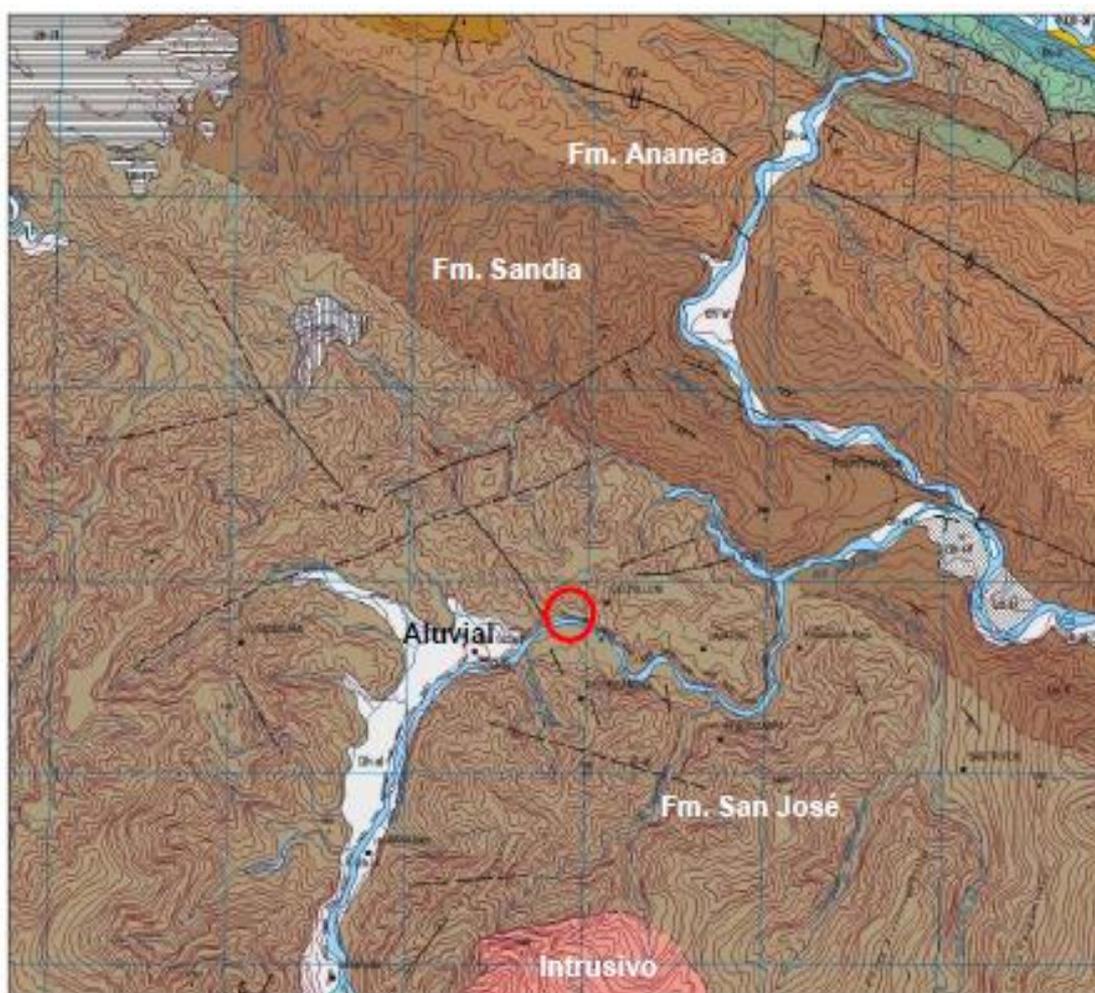


Figura 24 Mapa geológico, zona 27-V

Obs: Extracto del mapa geológico del cuadrángulo de Mazuco (hoja 27-v) en escala 1:100.000 con indicación de las principales unidades geológicas. En rojo el área de estudio. Fuente: IINGEMMET.

En el Anexo D, plano de código TLL-PL-02-R1 / LAM03, se muestra la ubicación del sector Llocllamayo.

El marco geológico regional se compone por las siguientes formaciones:

❑ Formación San José

Esta formación se extiende paralela al rumbo de la Cordillera Oriental, está conformada por lodolitas calcáreas gris oscura en estratos delgado, con alteraciones amarillentas por oxidación, contiene pizarras con esquistosidad y hacia la parte superior lutitas calcáreas gris verdosas, intercaladas con areniscas cuarzosas que intemperizan a un color pardo amarillentas.

❑ Formación Sandia

Está representada por areniscas cuarzosas de grano fino a medio, de color gris claro a blanquecinos, en estratos delgados a medianas, con intercalaciones de lutitas pizarrosas gris oscuras finamente laminadas. Hacia la parte superior las areniscas podrían clasificarse como cuarcitas, muy dura, en algunos niveles muestra laminaciones cruzadas.

❑ Formación Ananea

Está conformada por una secuencia de sedimentos lutáceos y en su base por pizarras negras laminadas, seguidas de arenisca cuarzosas gris claras que intemperizan a marrón, se les encuentra intercaladas con lutitas que intemperizan a un color marrón rojizo con laminaciones paralelas. Hacia la parte superior las lutitas son gris oscuras, en partes carbonosas y piritosas, en capas delgadas.

❑ Cuaternario

• Depósito aluvial

Conformado por fragmentos heterogéneos dentro de una matriz arenosa de grano grueso a fino, con cantos redondeados a subredondeados que se acumulan en los flancos de los valles, formando terrazas y llanuras aluviales.

• Depósitos Coluviales

Están conformados por fragmentos de roca del tamaño de gravas, cantos, boleos, de bordes angulosos, englobados en matriz areno-limosa, con escaso porcentaje de finos, de compacidad media a baja.

• Suelos Residuales

Conformados por fragmentos de bordes angulosos, de dureza media a blanda, englobados en una matriz areno-limosa, con regular % de finos, de compacidad media a baja, con índices de plasticidad en rangos de bajo a medio, abarcando áreas donde los taludes presentan erosión e inestabilidad.



*Figura 25 Comparativa entre los años 1985 (izquierda) y 2014 (derecha) del sector Llocllamayo.*

*Fuente: (Google Earth. 1985 – 2014)*

#### b. Geología Local

##### Impluvium

Se trata de canales, generalmente secos o con poco caudal, que son afectados por escurrimiento concentrado de agua en ocasión de fenómenos meteorológicos. El escurrimiento de agua produce erosiones concentradas de suelos. Se encuentran sobre toda la margen izquierda, donde las pendientes de las laderas son más marcadas respecto al lado derecho. En el mapa anexo están representados como elementos lineales con flechas que indican la dirección del escurrimiento.

##### Escarpes de derrumbe

Se trata de escarpes que delimitan la parte superior de los derrumbes. Tienen un borde recto que delimita un cambio ordenado de la pendiente de la ladera y muestran generalmente una forma de arco que representa el límite de la zona de donde se originó el movimiento del depósito deslizado. En el mapa se representan como elementos lineales.

Fueron distinguidos dos tipos de escarpes en base a las evidencias morfológicas:

- “Activos” por los derrumbes en la quebrada Llocllamayo y algunos ubicados a lo largo de la margen izquierda, por las formas abruptas y recientes;
- “Inactivos” por los fenómenos ocurridos en época antigua y que no muestran señales de actividad actual, marcados por formas suaves; además son identificados por nuevo crecimiento de vegetación.

En la figura 26, se muestra la situación morfológica de la quebrada. Se observa como todo el perfil del sector ya deslizado es asociado a escarpes activos inestables (líneas rojas) en la parte superior de las laderas, además existen porciones de laderas ya deslizadas, hasta 200m de longitud, que se presentan en estado de estabilidad precaria. La fofointerpretación satelital ha permitido también de identificar un escarpe antiguo (línea naranja) en el margen derecho de la quebrada. Se observa además que el cauce de la quebrada presenta inclinaciones de 25-30° en los tramos ocupados por los detritos y de unos 40° en los tramos donde aflora roca.

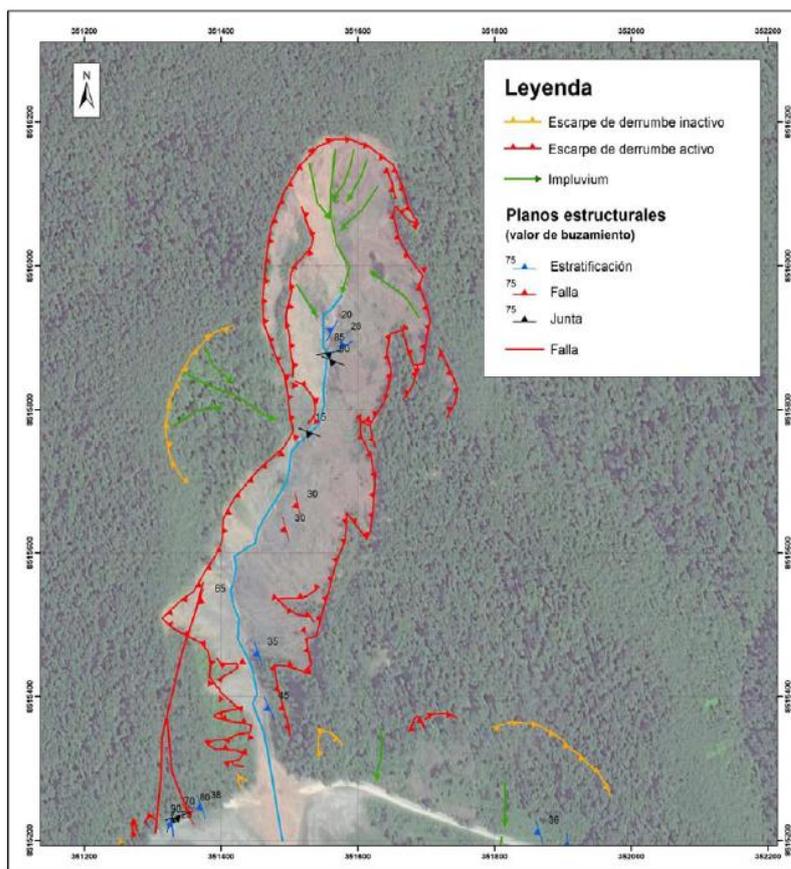


Figura 26 Mapa geomorfológico del sector crítico de la Quebrada Llocllamayo. En el Anexo D, plano de código TLL-PL-02-R1 / LAM04, se muestra la ubicación del sector llocllamayo.

### ☐ Erosión Superficial

La erosión es el desprendimiento, transporte y depósito de partículas o masas pequeñas de suelo o roca, por la acción de las fuerzas generadas por el movimiento del agua. El impacto de las gotas de lluvia contribuye al desprendimiento de las partículas o granos, lo cual produce sedimentación de materiales en el pie del talud. Los procesos de erosión son muy comunes en los suelos residuales poco cementados o en suelos aluviales, especialmente, en aquellos compuestos por limos y arenas finas donde la cobertura vegetal ha sido removida

### ☐ La Cobertura Vegetal

La vegetación cumple efectos protectores importantes, en la mayoría de los taludes protege contra la erosión y la infiltración del agua. Las condiciones hidrológicas de un talud son afectadas directamente por la vegetación. La vegetación también cumple un efecto de estabilización por el refuerzo del suelo (la acción de las raíces) y por la producción de materia orgánica, la cual puede ayudar a cementar las partículas del suelo.

Los coluviones son afectados en forma positiva por el refuerzo de los sistemas de raíces y la pérdida de esta resistencia, cuando se deterioran las raíces debido a la deforestación puede producir grandes deslizamientos. Los sistemas de plantas pueden incrementar la estabilidad de los taludes en altas pendientes. El efecto es el agrupar las partículas, en tal forma que estas solo puedan moverse en forma integrada, formando una gran masa. En ocasiones las raíces de la vegetación anclan el coluvión a la roca subyacente, especialmente en coluviones de poco espesor.

Al eliminar la protección vegetal (cualquiera que sea ésta) se deja el terreno expuesto al impacto de las gotas de lluvia, las cuales producen erosión laminar, seguida por formación de surcos, que pueden convertirse en cárcavas. La situación se agrava aún más cuando se remueve la parte superficial del terreno o descapote, ya que éste funciona como una segunda capa de protección natural contra la erosión y la infiltración de agua.

### 3.2.3. Hidrología e Hidráulica de la Quebrada Llocllamayo

#### a. Hidrología de la Quebrada Llocllamayo

La data pluviométrica de la estación San Gabán fue registrada por el SENAMHI durante el periodo de 1997-2015. Corresponde a las precipitaciones máximas en 24 horas mensuales (ver anexo D, de Hidrología), a partir de dicha información se infiere los caudales máximos para diferentes periodos de retorno. Su selección será usada en el diseño de mecanismos para mitigar efectos de flujo de detritos (huayco) en la quebrada Llocllamayo, el mismo que está ubicado a 5km de la estación San Gabán.

#### Evaluación de cuenca.

De acuerdo a la información analizada se observa que el régimen hidrológico de la quebrada Llocllamayo, considerada en las inmediaciones de San Gabán, corresponde a un clima de ceja de selva; de bosque alto, cálido y propio de las regiones más lluviosas.

La cuenca se muestra en el anexo D, plano de código TLL-PL-03-R1 / LAM05

Las características de la cuenca analizada se muestran en la tabla 22:

*Tabla 22 Características de la Cuenca*

QUEBRADA	UBICACIÓN PROGRESIVA	ÁREA (KM <sup>2</sup> )	LONGITUD (KM)	DIF. COTAS (M)	PENDIENTE (%)
Llocllamayo	295+350	0.28	0.75	300	40.0

*Fuente: propia*

#### Análisis de la Precipitación Máxima de 24 hr

Para la estimación de caudales se efectuó un análisis de frecuencias de eventos hidrológicos máximos, aplicable en las precipitaciones máximas.

En la tabla 23, se muestra las precipitaciones máximas de 24 horas por año.

#### Análisis de los datos Dudosos para Precipitaciones Máximas Anuales en 24 horas.

La data analizada consta de 19 valores de precipitaciones máxima en 24 horas. Se calculó los umbrales altos y bajos obteniendo los valores de 716.666 y 71.169, como precipitaciones máximas y mínima aceptada. Los últimos resultados mencionados son los que permiten verificar, si dentro de este rango

existe algún tipo de dato dudoso en la data de precipitaciones máximas en 24 horas. (Ver anexo B, Hidrología), se muestra a detalle el análisis de consistencia de datos.

Tabla 23 Precipitaciones máximas en 24 horas (mm), Estación San Gabán

AÑO	Pp 24 hr (mm)
1997	152.4
1998	195
1999	383.7
2000	394.8
2001	231.6
2002	318.3
2003	117.7
2004	112.9
2005	234
2006	160.8
2007	683.4
2008	441.7
2009	306.5
2010	144.3
2011	187.6
2012	149.8
2013	179.8
2014	162.4
2015	290.2

Fuente: SENAMHI

#### Análisis de Bondad de Ajuste

Para determinar cuál de las distribuciones estudiadas se adapta mejor a la información histórica, se emplearon los métodos:

- ✓ Test de Chi – Cuadrado “ $X^2$ ”
- ✓ Test de Kolmogorov – Smirnov.

En la presente tesis se empleó el método de “Chi- Cuadrado” a la distribución: “Normal” y “Log Normal”, como recomienda el manual de hidrología, hidráulica y drenaje del MTC, (ver anexo B, de Hidrología).

Mientras que la prueba de “Kolmogorov-Smirnov” se aplicó a todas las distribuciones: “Normal”, “Log Normal”, “Gumbel”, “Gumbel Modificado” y “Log Person III”, (ver anexo B, de Hidrología).

La prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov – Smirnov, tiene como objetivo determinar la función de distribución que más se ajusta a los datos de las estaciones. Para tal efecto, se agruparon en orden descendente los valores de la precipitación máxima en 24 horas.

Realizado el test tanto “Chi – cuadrado” y “Kolmogorov-Smirnov” la distribución que mejor se ajusta son, “Log Normal” y “Log Person III” respectivamente, optando por la distribución “Log Person III”, por presentar menor valor de “D” crítico, (ver anexo B, de Hidrología). Análisis de Frecuencia

El procedimiento está basado en las diferentes distribuciones de frecuencia usadas en el análisis de eventos hidrológicos máximos.

Las distribuciones usuales de frecuencia son:

- Distribución normal (N).
- Distribución LogNormal de 2 Parámetros (LN).
- Distribución Gumbel (EV1).
- Distribución Gumbel Modificado (EV2).
- Distribución LogPearson III (LP 3).

Del análisis de Frecuencia (anexo B, de Hidrología) se obtiene que los valores de precipitaciones de acuerdo a la distribución Log Person III, para diferentes períodos de retorno en la estación analizada son los mostrados en la tabla 24:

*Tabla 24 Precipitaciones (mm) para Diferentes Períodos de Retorno (T), Estación San Gabán*

T (años)	Pp (mm)
2	215.075
5	333.548
10	432.218
20	544.013
25	583.349
50	717.557
100	872.476
500	1332.319

*Fuente: propia*

#### Determinación del Caudal

Teniendo en cuenta la extensión de la cuenca Llocllamayo, se aplicó el Método Racional para la generación de descarga (estimado este para diferentes

periodos de retorno e intensidades), es seleccionando un coeficiente de escorrentía de acuerdo a las características de la quebrada.

#### Método Racional

La descarga se determina con la siguiente ecuación:

$$Q = 0.278 * C * I * A \quad (32)$$

Dónde:

Q: Caudal máximo (m<sup>3</sup>/s)

C: Coeficiente de escorrentía, adimensional.

I: Intensidad máxima de lluvia (mm/h)

A: Área de la cuenca (Km<sup>2</sup>)

El coeficiente de escorrentía para las condiciones topográficas y de cobertura vegetal, está comprendida entre 0.39 y 0.61, según lo descrito en la siguiente tabla 25.

Tabla 25 Coeficiente de Escorrentía C – Método Racional (\*)

CARACTERÍSTICAS DE LA SUPERFICIE	PERÍODO DE RETORNO (AÑOS)						
	2	5	10	25	50	100	500
<b>Áreas no desarrolladas</b>							
Áreas de cultivos							
Plano 0-2%	0.31	0.34	0.36	0.4	0.43	0.47	0.57
Promedio 2-7%	0.35	0.38	0.41	0.44	0.48	0.51	0.6
Pendiente superior a 7%	0.39	0.42	0.44	0.48	0.51	0.54	0.61
<b>Pastizales</b>							
Plano 0-2%	0.25	0.28	0.3	0.34	0.37	0.41	0.53
Promedio 2-7%	0.33	0.36	0.38	0.42	0.45	0.49	0.58
Pendiente superior a 7%	0.37	0.4	0.42	0.46	0.49	0.53	0.6
<b>Bosques</b>							
Plano 0-2%	0.22	0.25	0.28	0.31	0.35	0.39	0.48
Promedio 2-7%	0.31	0.34	0.36	0.4	0.43	0.47	0.56
Pendiente superior a 7%	0.35	0.39	0.41	0.45	0.48	0.52	0.58

Fuente: (\*) "Hidrología Aplicada" de Ven Te Chow, pag. 511

#### Tiempo de Concentración (Tc).

La hipótesis en el diseño hidrológico radica en la suposición de que la duración de la lluvia máxima o de diseño coincide con el tiempo de concentración

de la cuenca, (dato utilizado para el cálculo de la intensidad) ya que lluvias con mayores duraciones no producen aumento en los caudales punta.

El tiempo de concentración es una de las variables que caracteriza la escorrentía superficial de una cuenca y se define como el tiempo que una gota de agua, caída en el punto más lejano, emplea para llegar en la sección de cálculo.

Existen varias fórmulas para calcular este parámetro; para el caso de la cuenca Llocllamayo se usa el criterio conservador planteado por US Corps of Engineers<sup>1</sup>:

$$T_c = 0.3 * \frac{L^{0.76}}{S^{0.19}} \tag{33}$$

Dónde:

- TC: Tiempo de concentración en horas.
- L: Máxima longitud del recorrido, en km.
- S: Pendiente promedio a lo largo del cauce en m/m.

Tabla 26 Tiempo de Concentración

Quebrada	Área (Km <sup>2</sup> )	Longitud (Km)	Cota Mayor (msnm)	Cota Menor (msnm)	Dif. Cotas (m)	Pendiente (%)	Tiempo de Concentración	
							(hrs)	(min)
Llocllamayo	0.28	0.75	880	580	300	40.0	0.29	17.22

Fuente: propia

☐ Intensidad de la lluvia (I).

La intensidad de lluvia es determinada usando el método del IILA-SENAMHI-UNI a partir de la sub división del territorio nacional en zonas y subzonas pluviométricas y cuyas relaciones son las siguientes:

Para t >= 3 horas

$$I(t, T) = a * (1 + K * \text{Log}(T)) * (t)^{n-1} \tag{34}$$

Para t < 3horas

$$I(t, T) = a * (1 + K * \text{Log}(T)) * (t + b)^{n-1} \tag{35}$$

<sup>1</sup> Según el estudio Carreteras-MOPU, Calculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales, Mayo 1987, Madrid. A través de este estudio enfocado a cuencas pequeñas, justifica teórico-empíricamente un método para el cálculo de los caudales máximos, siendo el tiempo de concentración un parámetro de estudio, después de haber hecho un análisis crítico a las formulas tradicionales, infiere la elección de la ecuación planteado por US Corps of Engineers

Las mismas que para ser ajustadas a los datos de precipitación máxima de 24 horas, se emplea la ecuación 36:

$$I(t,T) = \left(\frac{P_{24h}}{24}\right) \left(\frac{t+b}{24+b}\right)^{n-1} \tag{36}$$

Teniendo en cuenta (figura 27), El plano n 2-C: Subdivisión del territorio en zonas y subzonas pluviométricas que se muestra a continuación:

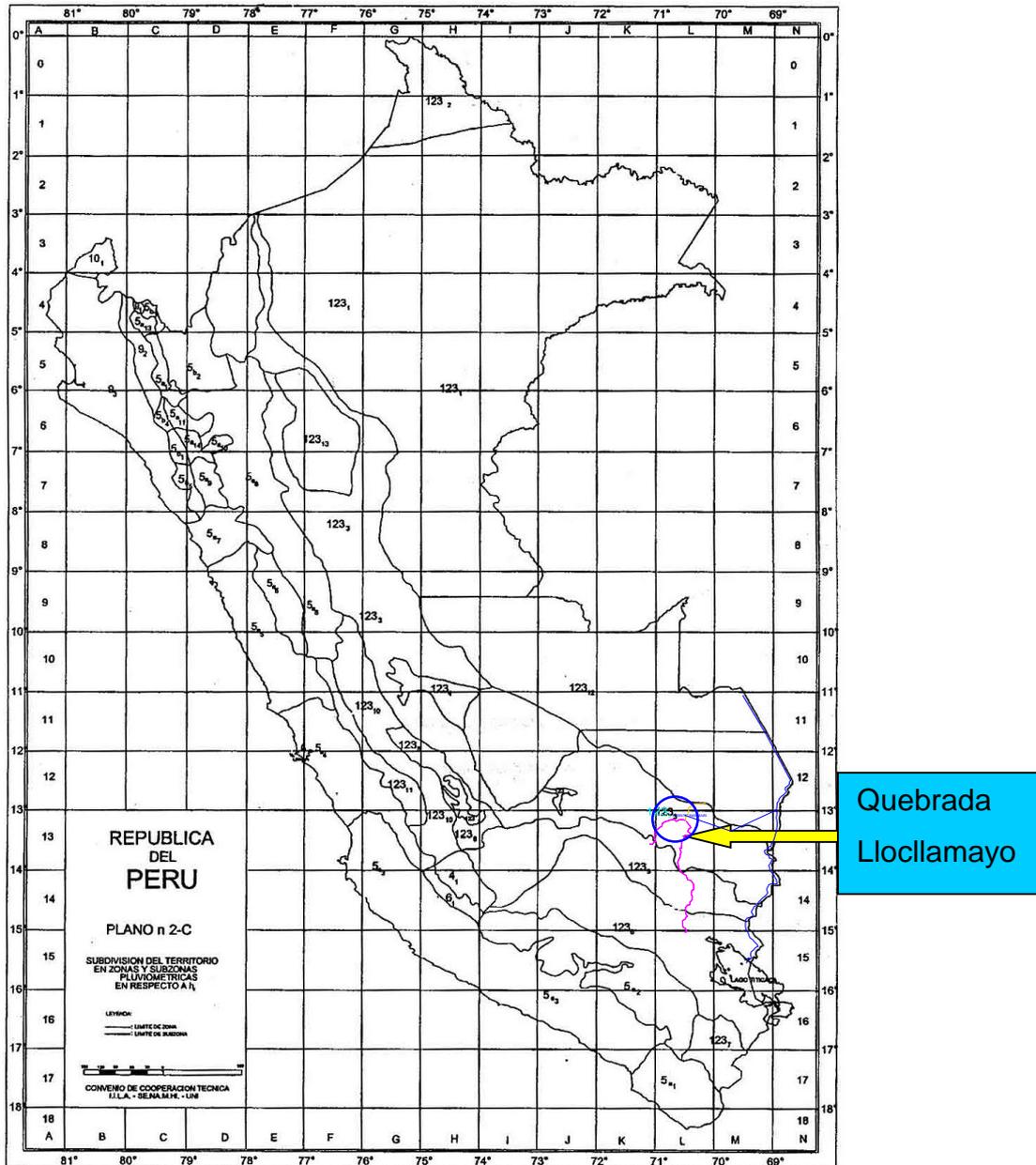


Figura 27 La zona quebrada Llocllamayo, le corresponde la región 123<sub>3</sub>  
 Fuente: Reglamento Nacional de Edificaciones 2006 – OS-060 Drenaje Pluvial Urbano.

Donde se obtiene los siguientes parámetros:

**Región 123<sub>3</sub> (Quebrada Llocllamayo Km 295+350)**

- I: Intensidad de precipitación, en mm/h
- a: Parámetro de intensidad
- y: Altitud en msnm

SUBZONA	ESTACION	N° TOTAL DE ESTACIONES	VALOR DE n	VALOR DE a
123 <sub>1</sub>	321-385	2	0.357	32.2
123 <sub>3</sub>	384-787-805	3	0.405	a = 37.85 - 0.0083 Y

Figura 28 Valores, de los parámetros “a” y “n”.

Fuente: Reglamento Nacional de Edificaciones 2006 – OS-060 Drenaje Pluvial Urbano.

ZONA	K'₀	Subzona	ε₀
123	K'₀ = 0.553	123 <sub>1</sub>	ε₀ = 85.0
		123 <sub>2</sub>	ε₀ = 75.0
		123 <sub>3</sub>	ε₀ = 100 - 0.022 Y
		123 <sub>4</sub>	ε₀ = 70 - 0.019 Y
		123 <sub>5</sub>	ε₀ = 24.0
		123 <sub>6</sub>	ε₀ = 30.5
		123 <sub>7</sub>	ε₀ = -2 + 0.006 Y
		123 <sub>8</sub>	ε₀ = 26.6
		123 <sub>9</sub>	ε₀ = 23.3
		123 <sub>10</sub>	ε₀ = 6 + 0.005 Y
		123 <sub>11</sub>	ε₀ = 1 + 0.005 Y
		123 <sub>12</sub>	ε₀ = 75.0
		123 <sub>13</sub>	ε₀ = 70

Figura 29 Valores del parámetro “k”

Fuente: Reglamento Nacional de Edificaciones 2006 – OS-060 Drenaje Pluvial Urbano.

n = Parámetro de duración (adimensional) = 0.405

k = Parámetro de frecuencia = 0.553

b = Parámetro (hora) = 0.20

t = Duración de lluvia (h)

T = Periodo de retorno (años).

Lo mismo que se resume en la tabla 27.

Tabla 27 Determinación de parámetros para la quebrada Llocllamayo

Quebrada	Zona según el IILA	Parametros			
		a	n	k	b
Llocllamayo	123 <sub>3</sub>	37.85-0.0083Y	0.405	0.553	0.2

Fuente: propia

Y: altura media de la cuenca = 760 msnm

Progresiva quebrada Llocllamayo = 295+350

Una vez reemplazados los valores, se obtiene el caudal de escorrentía por el método racional, estimado para diferentes periodos de retorno como se muestra en la tabla 28.

Tabla 28 Caudales para cada periodo de retorno

Periodo de Retorno	Intensidad (mm/h)	C	Descarga (m³/s)
2	91.871	0.39	<b>2.789</b>
5	142.477	0.42	<b>4.658</b>
10	184.624	0.44	<b>6.323</b>
20	232.378	0.47	<b>8.441</b>
25	249.181	0.48	<b>9.310</b>
50	306.509	0.51	<b>12.168</b>
100	372.683	0.54	<b>15.665</b>
500	569.108	0.61	<b>27.023</b>

Fuente: propia

Tabla 29 Cálculo del caudal pico (Qp) para cuencas pequeñas (A< 2.5 Km2) mediante el método racional Tr = 100 años.

Quebrada	Área (Km²)	Longitud (Km)	Cota Mayor (msnm)	Cota Menor (msnm)	Pendiente (%)	T <sub>c</sub> (min)	Intensidad (mm/h)	Descarga (m³/s)
Llocllamayo	0.28	0.75	880	580	40	17.22	372.683	15.665

Fuente: propia

Tabla 30 Cálculo del caudal pico (Qp) para cuencas pequeñas (A< 2.5 Km2) mediante el método racional Tr = 500 años.

Quebrada	Área (Km²)	Longitud (Km)	Cota Mayor (msnm)	Cota Menor (msnm)	Pendiente (%)	T <sub>c</sub> (min)	Intensidad (mm/h)	Descarga (m³/s)
Llocllamayo	0.28	0.75	880	580	40	17.22	569.108	27.023

Fuente: propia

- b. Hidráulica de Flujo de Detritos
  - Identificación de los Movimientos en Masa

Al respecto existen diferentes propuestas de clasificaciones, algunas de las principales en uso son las de Varnes y Cruden (1996), Hungr (2014), que utilizan los aspectos cinemáticos como criterio clave, que es complementado con

el tipo de material, la litología y los cambios climáticos, incluyendo los factores condicionantes y desencadenantes de estos movimientos.

En relación a su clasificación, se identifican los factores condicionantes y los desencadenantes de los movimientos en masa tipo flujo, en el caso particular de la quebrada Llocllamayo, al mermar la primera cobertura vegetal de “raíces”, se eliminó el material de retención, el segundo miembro arcilloso y posteriormente el conglomerado, está expuesto a la energía cinética de la lluvia, la cual se procede a estimar según la expresión de (Wischmeier y Smith en Control de Erosión en Zonas Tropicales, Suarez 2001).

$$K_e = 11.87 + 8.73 * \log_{10} i \quad (37)$$

$K_e$ : Energía cinética de la lluvia [Joule/m<sup>2</sup>/mm]

$i$ : Intensidad de la lluvia [mm/hr]

Este análisis se realizó en función a las intensidades de lluvia proporcionadas por el capítulo de hidrología, y se obtiene un valor de energía cinética de 35,92 Joule/m<sup>2</sup>/mm, para un periodo de retorno de 500 años.

La figura 30, vista hacia aguas abajo de la quebrada Llocllamayo, con una distancia aproximada hacia la zona de descarga de 500 m, se aprecia perdida del primer miembro o cobertura.



*Figura 30 Quebrada Llocllamayo vista hacia aguas abajo  
Fuente: propia*

La iniciación, desestabilización de una ladera siempre es controversial, a menudo es una decisión que pasa por diferentes criterios, entre los más aceptados están los atribuidos a tracción, flexión, pandeo y corte; en el caso de la quebrada LLocllamayo, de acuerdo a los rasgos observados en campo, puede asumirse que la iniciación del mecanismo del movimiento de la ladera es por corte.

La desestabilización/rotura en la quebrada, es consecuencia de varios factores, tales como: infiltración, saturación, ascenso del nivel freático, con mayor intensidad durante la tormenta de diseño, efectos de erosión interna debido a la gran precipitación existente en la zona.

#### Factores Condicionantes y Desencadenantes

Los factores condicionantes que evolucionan lentamente, son el relieve, la litología en su dimensión resistente y la escasa cobertura vegetal; los factores desencadenantes como se describe en el estudio hidrológico, son la precipitación y el clima.

El relieve del terreno, definido sobre el plano que contiene a la pendiente longitudinal media del terreno estimada en  $S = 40,0\%$ , es un relieve del tipo medio, es decir, aquel en el que las deformaciones sobresalen del plano.

El clima es húmedo con precipitaciones persistentes en todo el año, con fuerte incidencia en el periodo anual diciembre-marzo.

El movimiento en masa, por su ocurrencia, es del tipo primario, es decir, seguido inmediatamente a una rotura, con deslizamiento de flujo bifásico (líquido + sólido) con tendencia a un comportamiento viscoso y sin superficie de rotura visible.

#### Estimación de Parámetros Hidráulicos

Los aspectos de la dinámica de los fluidos, indican que un flujo originado por precipitaciones torrenciales sobre un suelo de gran inclinación tiene una gran capacidad de transporte, sí existen los sedimentos disponibles; tales condiciones están presentes en la quebrada Llocllamayo, que sin duda, ante un evento lluvioso de duración extrema, descargará una importante carga de agua y sólidos.

Como parámetro de distinción entre uno y otro se define la concentración “C”, expresada como relación del caudal solido al caudal líquido:

- Los flujos con “C” < 25 % y con densidades menores de 1.4 gr/cm<sup>3</sup>, son los flujos de baja concentración.
- Los flujos con 25% < “C” < 100 % son los flujos hiperconcentrados y flujos detríticos y con densidades entre 1.4 y 1.8 gr / cm<sup>3</sup>.

Aplicación del Modelo Flo-2D

Para realizar las simulaciones con el Flo-2D fue necesario entrar con los datos de topografía, los datos reológicos y datos de intensidad para reproducir los eventos de flujos de detritos. Para facilitar la comprensión del funcionamiento y el uso del modelo, los pasos de entrada de datos se mostrarán en la figura 31.

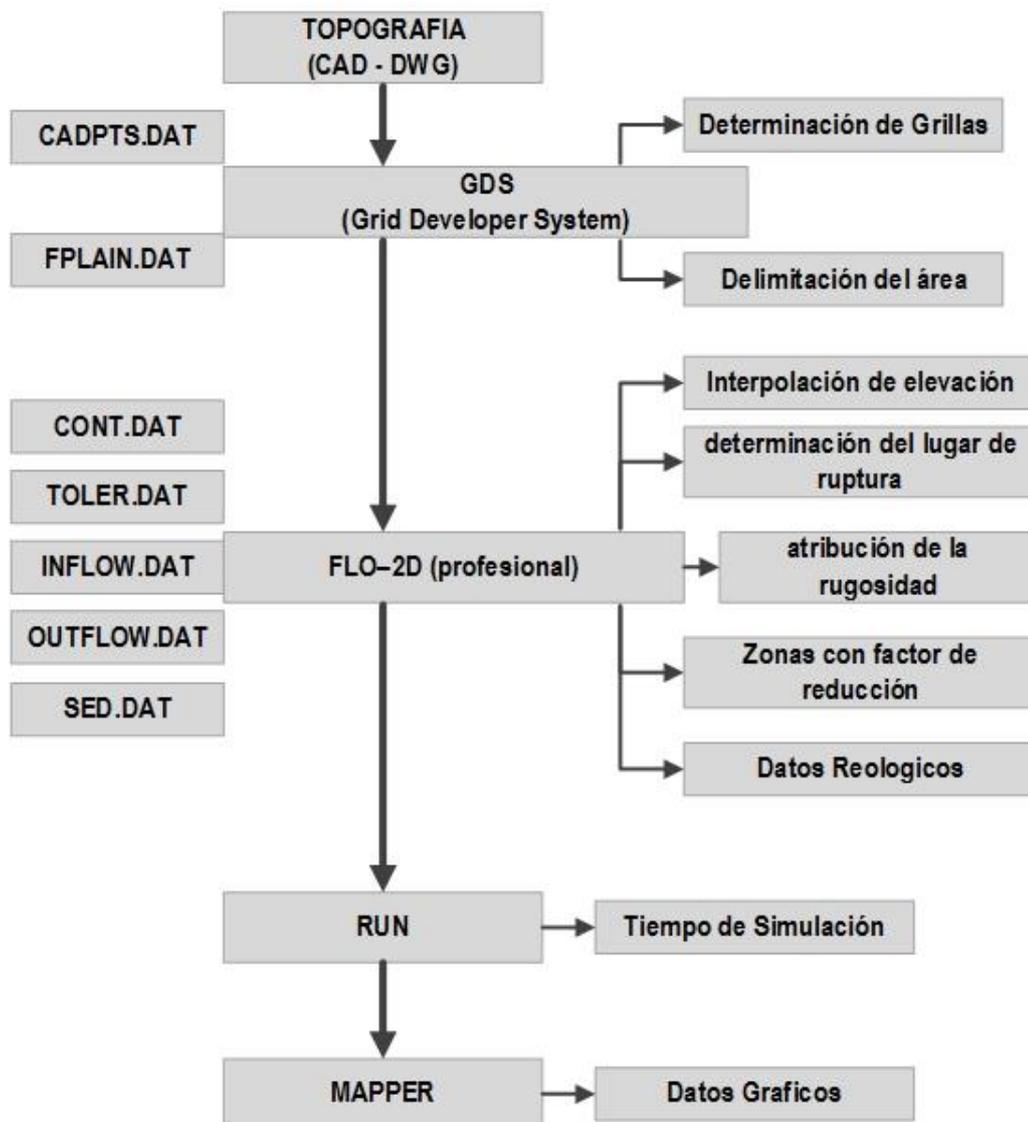


Figura 31 Flujoograma con pasos realizados para simulación con modelo Flo-2D.

Para los pronósticos en cuanto a la estimación de la magnitud de deposición máxima, intensidad velocidades del flujo, áreas de inundación, planos de peligro de flujo detrítico, se ha realizado los diagramas unitarios para los diferentes periodos de retorno (50, 100 y 500), realizados en el estudio hidrológico, se tiene el relieve del terreno, concentración de sedimentos en porcentaje, otros, (ver tabla 31).

Tabla 31 Valores de los caudales totales para los Tr.

Periodo de Retorno (años)	Coefficiente de Rugosidad de Manning	Concentración de Sedimentos (C %)	Caudales Máximos (m <sup>3</sup> /s)
50	0.075	20 - 25	36.0
100	0.065	25 - 35	50.8
500	0.055	35 - 45	84.5

Fuente: Propio

### 3.2.4. Eventos de Flujo de Detritos, Antecedentes en la Quebrada Llocllamayo

Los acontecimientos de flujo de detritos producidos en la quebrada Llocllamayo, son reportados al ente regulador (OSITRAN), de parte del concesionario vial, la forma de intervención que corresponde es a través de los mantenimientos de emergencia (ME). Mediante este mecanismo se consignan volúmenes de remoción final, acorde a la hora y fecha según lo ocurrido la intervención. En las siguientes tablas 32 Y 33, se muestra un filtro de dicha información.

Tabla 32 Resumen MEmer – quebrada Llocllamayo

Ítem	ME/ Año	Nº de interv.	Frente	Tipo de Trabajo	VOLUMEN
01	ME - 2012	5.0	Frente 4	Remoción	19,676.60
02	ME - 2013	157.0	Frente 4	Remoción	133,146.80
03	ME - 2014	331.0	Frente 4	Remoción	166,711.40
04	ME - 2015	125.0	Frente 4	Remoción	65,903.00
<b>Promedio de remoción de flujo de detritos por año</b>					<b>150,000.00 m<sup>3</sup>/año</b>

Fuente: IIRSA tramo 4.

Tabla 33 Volúmenes de remoción de flujo de detritos quebrada Llocllamayo

Ítem	ME/ Mes Año	Intervenciones	Frente	Tipo de Trabajo	VOLUMEN
01	ME- Dic 2012	5.0	Frente 4	Remoción	19,676.60
02	ME- Ene 2013	4.0	Frente 4	Remoción	32,910.00
03	ME- Feb 2013	15.0	Frente 4	Remoción	5,206.80
04	ME- Mar 2013	8.0	Frente 4	Remoción	4,570.00
05	ME- Abr 2013	17.0	Frente 4	Remoción	20,936.00
06	ME- May 2013	3.0	Frente 4	Remoción	904.00
07	ME- Jun 2013	12.0	Frente 4	Remoción	7,664.00
08	ME- Jul 2013	23.0	Frente 4	Remoción	19,461.00
09	ME- Ago 2013	14.0	Frente 4	Remoción	3,730.00
10	ME- Set 2013	15.0	Frente 4	Remoción	5,856.00
11	ME- Oct 2013	10.0	Frente 4	Remoción	6,941.00
12	ME- Nov 2013	14.0	Frente 4	Remoción	10,612.00
13	ME- Dic 2013	22.0	Frente 4	Remoción	14,356.00
14	ME- Ene 2014	34.0	Frente 4	Remoción	18,582.00
15	ME- Feb 2014	41.0	Frente 4	Remoción	29,737.00
16	ME- Mar 2014	41.0	Frente 4	Remoción	37,504.00
17	ME- Abr 2014	27.0	Frente 4	Remoción	15,992.00
18	ME- May 2014	31.0	Frente 4	Remoción	15,240.00
19	ME- Jun 2014	32.0	Frente 4	Remoción	8,233.00
20	ME- Jul 2014	20.0	Frente 4	Remoción	9,169.40
21	ME- Ago 2014	18.0	Frente 4	Remoción	8,808.00
22	ME- Set 2014	26.0	Frente 4	Remoción	4,542.00
23	ME- Oct 2014	7.0	Frente 4	Remoción	1,005.00
24	ME- Nov 2014	18.0	Frente 4	Remoción	5,714.00
25	ME- Dic 2014	36.0	Frente 4	Remoción	12,185.00
26	ME- Ene 2015	31.0	Frente 4	Remoción	13,186.00
27	ME- Feb 2015	19.0	Frente 4	Remoción	13,526.00
28	ME- Mar 2015	5.0	Frente 4	Remoción	1,209.00
29	ME- Abr 2015	10.0	Frente 4	Remoción	5,094.00
30	ME- May 2015	17.0	Frente 4	Remoción	10,896.00
31	ME- Jul 2015	7.0	Frente 4	Remoción	4,312.00
32	ME- Ago 2015	18.0	Frente 4	Remoción	5,680.00
33	ME- Set 2015	18.0	Frente 4	Remoción	12,000.00

Fuente: IIRSA tramo 4.

### 3.2.5. Alternativas de Mitigación

El Proyecto inicial, en la zona de cono de deyección de la quebrada Llocllamayo Km 295+350, contemplaba la construcción de un badén; sin embargo, a lo largo de la etapa de conservación de obra, se ha observado actividad de la quebrada con remoción y acumulación de gran cantidad de

material proveniente de las partes altas de la quebrada dificultando la habilitación inmediata de la vía en este tramo (ver anexo C, panel fotográfico).

Teniendo en cuenta que la frecuencia de lluvias y la cantidad de material acumulado representarían un alto costo para la operatividad de la vía se propone el estudio de otras estructuras a efectos de mitigar el fenómeno de flujo detrítico, como alternativa de paso para este sector se plantea a nivel de ingeniería conceptual las alternativas:

- Alternativa 1 – Intervención en la quebrada con presas abiertas (slit-dam).
- Alternativa 2 – Intervención sobre el cono de deyección con un puente de 150 m de luz.
- Alternativa 3 – Intervención por debajo de la quebrada con un falso túnel
- Alternativa 4 – intervención bordeando la quebrada con 2 puentes sobre el río San Gabán

## CAPITULO IV

### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. RESULTADOS

##### 4.1.1. Resultados de la Simulación $T_r = 50$ años.

Los resultados de la simulación para  $T_r$ : 50 años, proporciona un caudal de flujo de detritos de  $36.0 \text{ m}^3/\text{s}$ , se aprecia una altura de sedimentación, la cual varía desde 0.3 a 1.2 m.

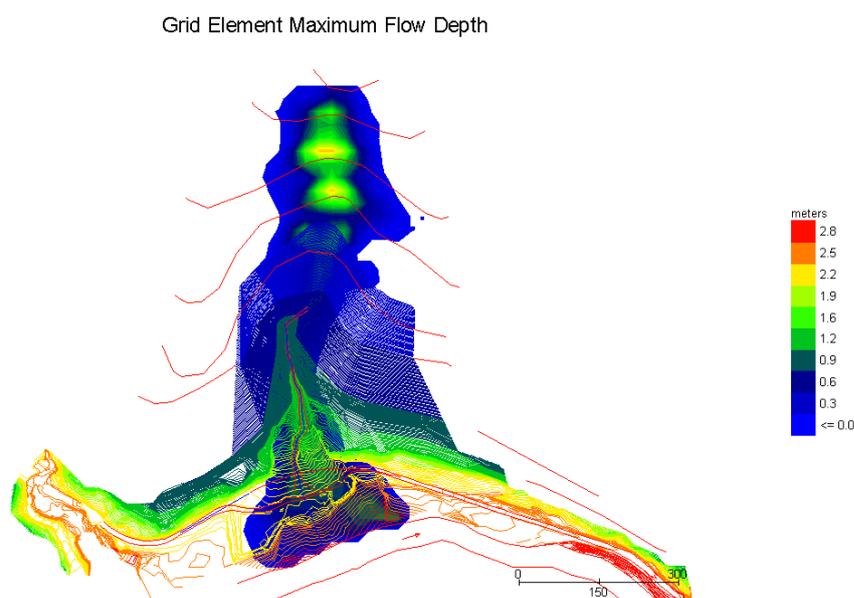


Figura 32 Magnitud de flujo de detritos para  $T=50$  años

En relación a las velocidades que alcanza el torrente estas varían 0.9 a 2.1 m/s

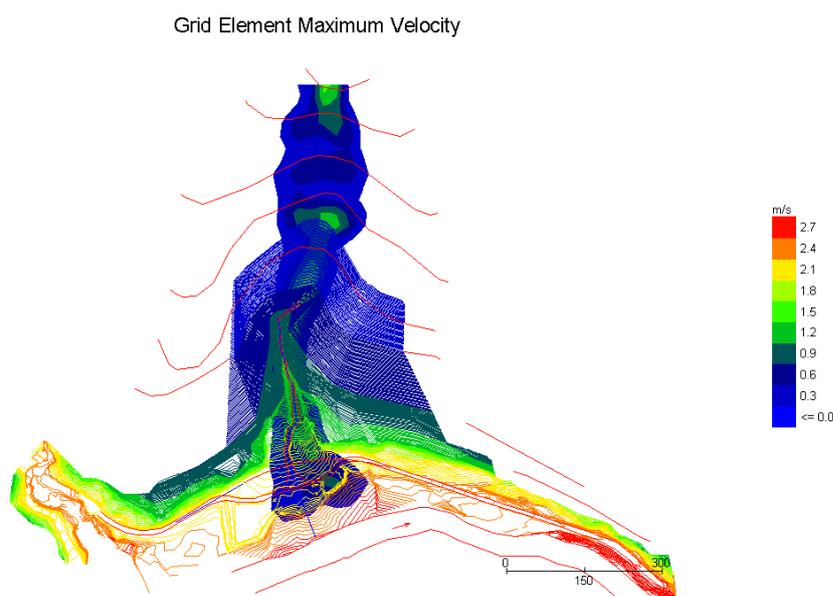


Figura 33 Intensidad de flujo de detritos para  $T=50$  años

Para el trazado del mapa de peligros se aprecia una intensidad alta en el canal recolector.

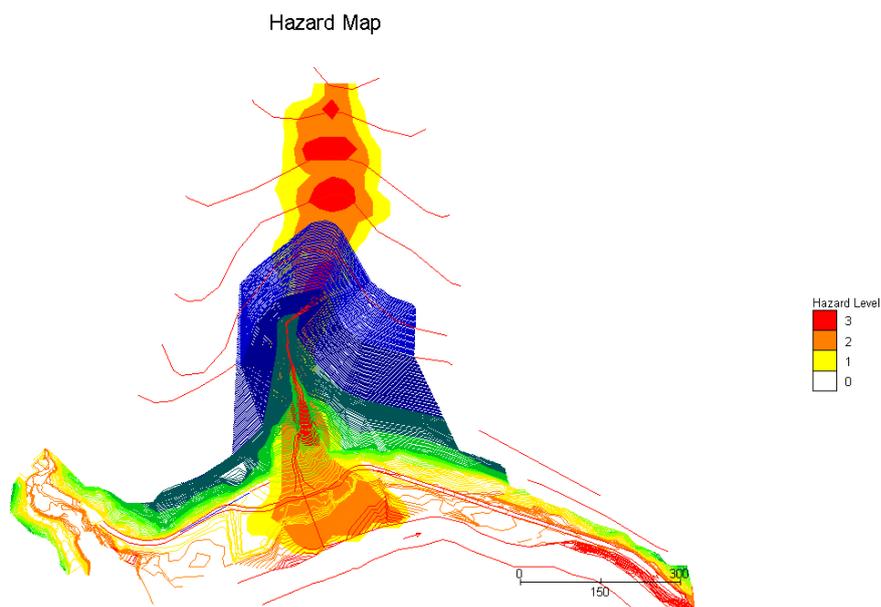


Figura 34 Peligro de flujo de detritos para T=50 años

#### 4.1.2. Resultados de la Simulación Tr = 100 años.

Los resultados de la simulación para Tr: 100 años, proporciona un caudal de flujo de detritos de 50.8 m<sup>3</sup>/s, se puede apreciar una altura de sedimentación, la cual varía desde 1.5 a 0.8 m.

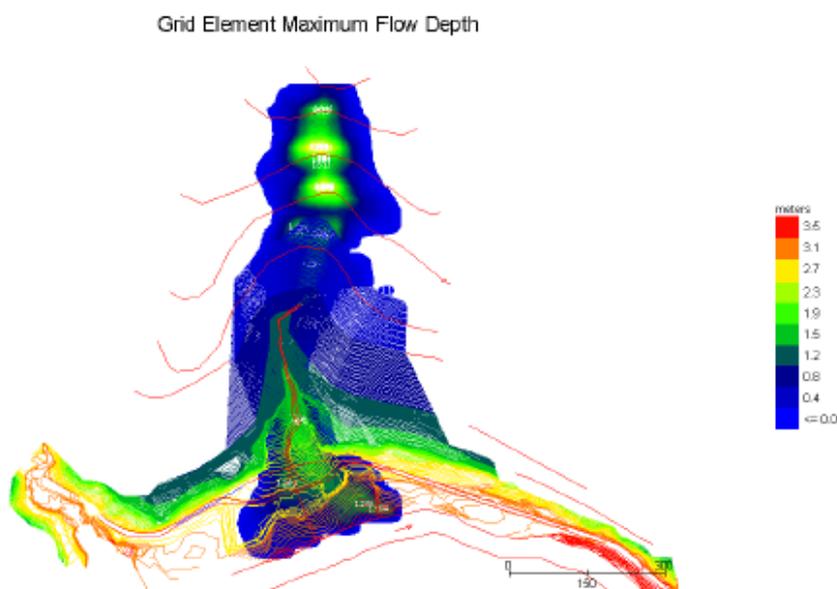


Figura 35 Magnitud de flujo de detritos para T=100 años

En relación a las velocidades que alcanza el torrente estas varían 0.8 a 1.9 m/s.

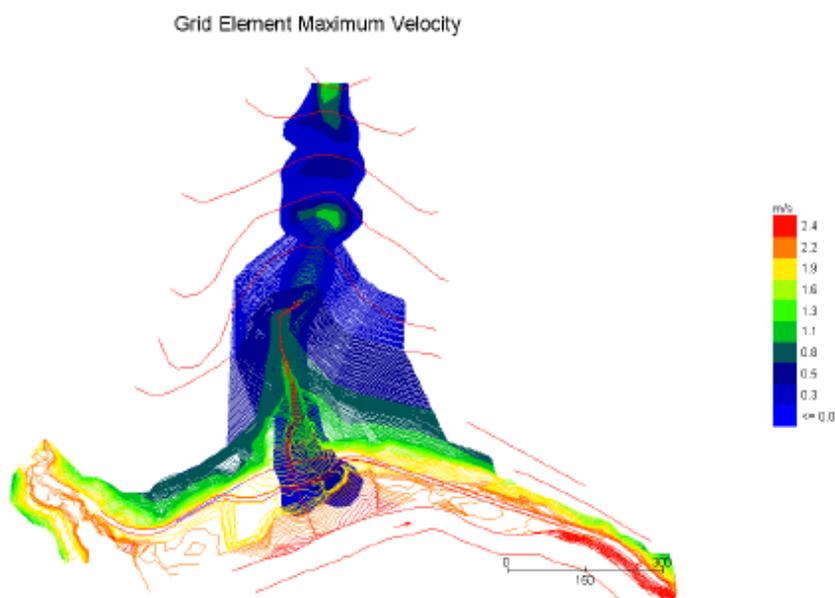


Figura 36 Intensidad de flujo de detritos para  $T=100$  años

Para el trazado del mapa de peligro se aprecia una intensidad alta en el canal recolector y en la zona de deposición.

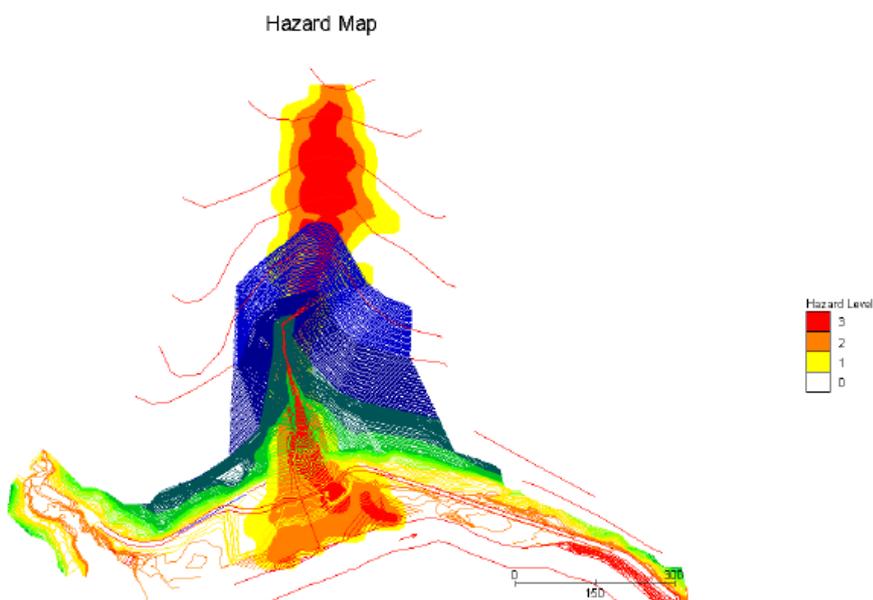


Figura 37 Peligro de flujo de detritos para  $T=100$  años

#### 4.1.3. Resultados de la Simulación $T_r = 500$ años.

Los resultados de la simulación para  $T_r: 500$  años, proporciona un caudal de flujo de detritos de  $84.5 \text{ m}^3/\text{s}$ , se puede apreciar una altura de sedimentación, la cual varía desde 1.5 a 3.0 m.

Grid Element Maximum Flow Depth

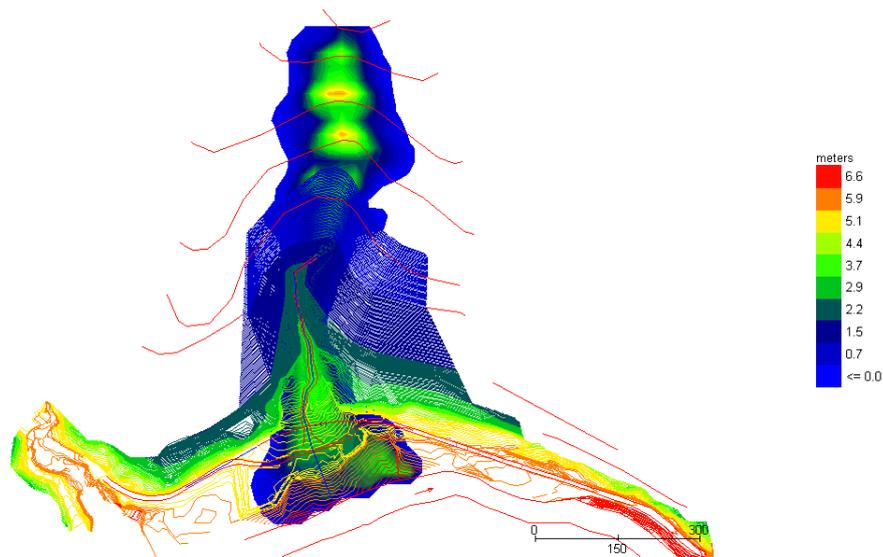


Figura 38 Magnitud de flujo de detritos para T=500 años

En relación a las velocidades que alcanza el torrente estas varían 1.1 a 2.5 m/s.

Grid Element Maximum Velocity

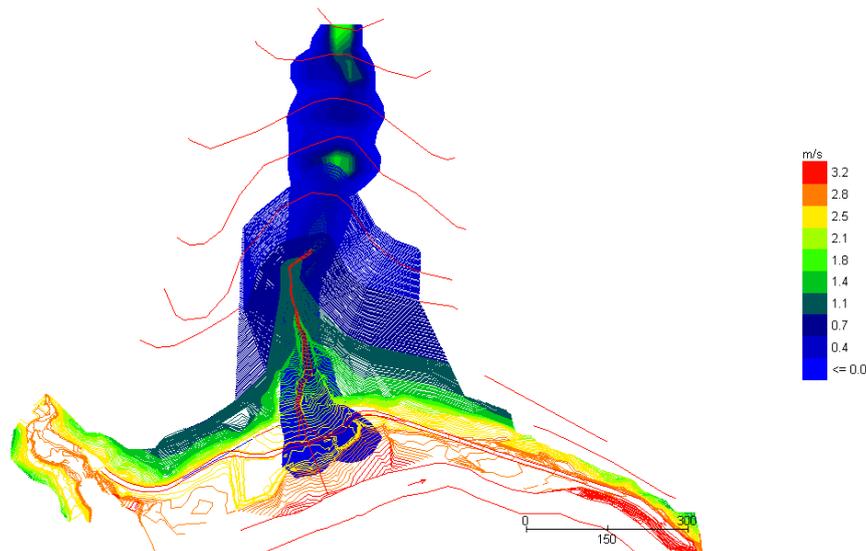
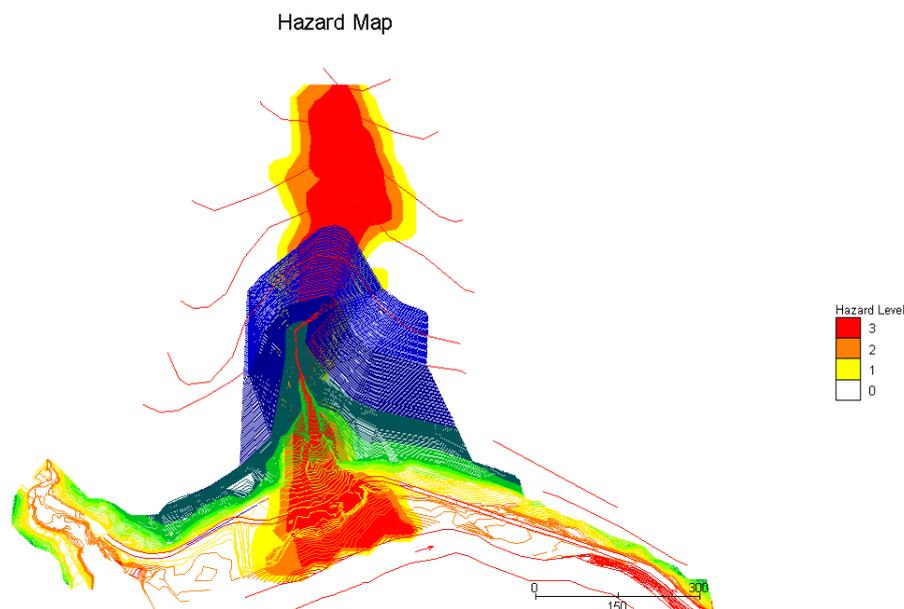


Figura 39 Intensidad de flujo de detritos para T=500 años

Para el trazado del mapa de peligro se aprecia una intensidad alta en la zona de desprendimiento, canal recolector y en la zona de deposición.



*Figura 40 Peligro de flujo de detritos para  $T=500$  años*

#### 4.1.4. Geomorfología.

Los rasgos geomorfológicos presentes en la zona de estudio quebrada Llocllamayo, son el resultado de los procesos de geodinámica externa que han modelado el relieve en base a un control litológico y estructural. Las unidades geomorfológicas más importantes son:

##### - Laderas de Montañas:

Conforman el relieve montañoso donde están los afloramientos de roca basamento, con una topografía abrupta de fuerte pendiente y escasa cuenca, con una escorrentía temporal, donde el mayor tiempo están secas.

##### - Conos de Escombros:

Se ubican en las laderas y/o al pie de las laderas, cubriendo los afloramientos de roca y ocupando las depresiones formadas por las cárcavas de la quebrada Llocllamayo. Así como se muestra en las fotos del Anexo C de Fotografías.

##### - Cauce Actual:

La quebrada presenta un cauce principal por donde pasa la escorrentía y donde transitan los flujos de detritos, formando un relieve semiplano en forma casi simétrica de bordes escarpados y donde sobresalen acumulaciones de bloques que aparentemente forman un relieve semi abrupto. El cauce principal de la quebrada mide 0.75 km.

- Conos de Deyección:

Se ubican en la parte inferior de la quebrada Llocllamayo, sobre un relieve de baja pendiente, con valores entre los  $10^\circ$  y  $20^\circ$ , en forma de un abanico y con cauces no definidos, actualmente sobre el cono de deyección de la quebrada se impone la infraestructura vial tipo badén, que es esta estructura la que soporta la acumulación detrítica. En la foto 3 y 4, Anexo C, se observa la sobre posición del material detrítico.

#### 4.1.5. Hidrología e Hidráulica

- a. Análisis de los datos dudosos para precipitaciones máximas anuales en 24 horas.

La data hidrológica analizada consta de 19 valores de precipitaciones máxima en 24 horas, corresponden a los años de 1997 al 2005, que arrojaron como resultados a 255.10 de promedio aritmético y 142.89 desviación estándar. También se calculó los umbrales altos y bajos obteniendo los valores de 716.66 y 71.169 como precipitaciones máxima y mínima aceptada. Los últimos resultados mencionados son los que nos permiten verificar si dentro de este rango existe algún tipo de dato dudoso en la data de precipitaciones máximas en 24 horas. la estación San Gabán ubicado en el distrito del mismo nombre y a una distancia de 5 km respecto a la quebrada Llocllamayo. En el anexo B.3 análisis de frecuencias – Hidrología, se muestra a detalle el análisis de consistencia de datos.

- b. Distribución de las probabilidades

Muestra como resultado las tablas y graficas de ajuste de las distribuciones Normal, Gumbel, Gumbel Modificado, Log-Normal, Log- Pearson de Tipo III. De la comparación de las gráficas se notó que las mejores distribuciones que se ajustan a la data son la Log- Pearson de tipo III y Log-Normal. Ver Anexo B.3, Análisis de frecuencias – Hidrología, permite visualizar las distribuciones de probabilidades.

- c. Prueba de bondad de ajuste de precipitaciones máximas anuales en 24 horas.

De la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov – Smirnov se obtiene las ordenes de ajuste para todas las distribuciones empleadas, siendo el N° 1 Lo-

Pearson de tipo III el mejor ajuste de todas. En el anexo B.4, prueba de bondad de ajuste – Hidrología, se muestra dicho análisis.

d. Cálculo de la intensidad mediante el método de la IILA-SENAMHI-UNI.

La quebrada Llocllamayo se encuentra ubicado en la zona 123<sub>3</sub>, como región hidrológica de la zona de estudio, tal como se indica el anexo B.6 Método IILA de Hidrología.

Siendo una de las metodologías adoptadas para el cálculo de cuencas en la selva occidental de la región Puno, la concesionaria al desarrollar el proyecto de ingeniería de detalle asumieron para un total de 155 cuencas dicha metodología.

e. Tiempo de concentración

El tiempo de concentración de la tormenta estimado fue de 17.22 minutos, según la ecuación US Corps of engineers.

La elección de la ecuación obedece al estudio desarrollado en España a pequeñas cuencas naturales, luego del análisis a diversas ecuaciones empíricas quien mejor resultado reflejo a la realidad física corresponde a la ecuación de la US Corps of engineers, el mismo que también es empleado en el estudio de ingeniería de detalle del corredor vial interoceánico sur tramo IV.

f. Concentración de sedimentos (Cv)

La concentración de sedimentos varía en el orden, entre: 20% al 25% para el periodo de retorno de 50 años, 25% al 35% para el periodo de retorno de 100 años y 35% al 45% para el periodo de retorno de 500 años. Haciendo referencia a la tabla 10, de O'Brien y Julien (1988) Clasificación del flujo en función de la concentración del sedimento.

g. Descarga de flujo

Luego de realizar las corridas respectivas se nota que el análisis ante eventos detríticos acarrea consigo un volumen extra de material según como se muestra en la tabla 34.

Tabla 34 Comparativo de descargas

Periodo de Retorno (años)	Intensidad (mm/h)	Descarga Flujo Libre (m <sup>3</sup> /s)	Descarga Flujo Detrítico (m <sup>3</sup> /s)
50	306.51	12.2	36.0
100	372.68	15.7	50.8
500	569.11	27.0	84.5

Fuente: propio

#### 4.2. DISCUSIÓN

Respecto a la tesis de [Lucini \(2011\)](#); de la misma forma de identificaron los factores condicionantes y se agregaron los factores desencadenantes, separando uno del otro por poseer particularidades al momento de iniciar los flujos de detritos; de la misma forma se analizaron las lluvia de un total de 19 datos, los mismos que fueron adquiridos del SENAMHI, se trabajó sobre la topografía existente del terreno, ratificamos que las ecuaciones empíricas es la base de ingreso de datos para la calibración del modelo Flo-2D; y por último los resultados muestran extensiones de área con potencial peligro ante flujo de detritos.

Respecto a la tesis de [García \(2016\)](#); las alternativas de mitigación ante flujos de detritos se infieren a partir de los mapas de peligro; de la misma forma se extrapola la data topográfica a fin representar la superficie real del terreno; la data geológica es identificada a partir del instituto geológico minero del Perú; difiriendo en la obtención de mapas de peligro puesto que el modelo reologico obtenido corresponde al modelo de Bingham, mientras que esta tesis presenta el modelo cuadrático reologico.

Respecto al estudio [Karl-Heinz \(2011\)](#); la cuencas occidentales de la región puno presentan en su mayoría un potencial peligro ante flujos de detritos, por el mismo hecho de presentar taludes de elevada pendiente, convierten a muchas de ellas de alto riesgo; ratificando al factor clima como uno de los factores desencadenantes para la ocurrencia de los movimientos en masa.

## CAPITULO V

### 5. CONCLUSIONES:

#### 5.1. CONCLUSIONES

- ❑ La evaluación de peligros en el tramo de carretera en Llocllamayo, frente a lluvias intensas, deslizamientos y/o huaycos, derrumbes, es considerado con un grado de significancia de PELIGRO ALTO. Dicho análisis es desarrollado a través del modelo “Flo-2D”, Basado en un modelo reologico cuadrático de Bingham.
- ❑ De la evaluación del mapa de peligros para un periodo de retorno de 100 años, se manifiesta sobre el cono de deyección de la quebrada Llocllamayo, llegando hasta el cauce principal del rio San Gabán, un volumen de detritos de 51,627.0 m<sup>3</sup>, el potencial de peligro interpretado en el corredor vial interoceánico, abarca desde la progresiva 295+250 al 295+600 siendo esta extensión de vial caracterizado como sector crítico.
- ❑ Los factores condicionantes (pasivos), que se presentan en la hoya y cono de deyección de la quebrada Llocllamayo, que manifiesta a la quebrada como vulnerable son la topografía del terreno por el hecho de presentar una variación de cotas de: 300m, la longitud del cauce principal de 0.75Km, una pendiente de 40% y una área de 0.28 Km<sup>2</sup>, de este último el 70% carece de cobertura vegetal, fruto de la constante erosión y por último la litología de la quebrada (formación San José) que prácticamente son considerados como materiales residuales.
- ❑ Los factores desencadenantes (activos) que dan lugar a la iniciación de los movimientos en masa de tipo flujo de detritos y principal causante de los constantes cambios geomorfológicos en la quebrada Llocllamayo, corresponde a las precipitaciones propias de la zona cuyas intensidades son calculadas mediante el método del IILA-SENAMHI-UNI, siendo su energía de impacto de 35,92 Joule/m<sup>2</sup>/mm; el factor reologico es una consecuencia de las extraordinarias lluvias presentes en la quebrada cuyo valor ayuda a inferir las concentraciones volumétricas de agua y sedimentos que se traducen en un aumento de los caudales de un flujo libre de material detrítico para diferentes periodos de retorno.

- ❑ Según los datos hidrológicos se infiere descargas totales entre 12.2 m<sup>3</sup>/s, 15.7 m<sup>3</sup>/s y 27.0 m<sup>3</sup>/s para periodos de retorno de 50, 100 y 500 años respectivamente, dicha condición es considerada a flujo libre de detritos. Mientras que los caudales estimados ante el transporte de material detrítico son de 30.0 m<sup>3</sup>/s, 50.8 m<sup>3</sup>/s y 84.5 m<sup>3</sup>/s, para periodos de retorno de 50, 100 y 500 años respectivamente.

## CAPITULO VI

### 6. RECOMENDACIONES

- ❑ Se recomienda revegetar la zona a fin de proteger el suelo de la erosión, generando también un ambiente más acorde con el paisaje existente.
- ❑ Con respecto a los flujos de detritos (huaycos), para que estos fenómenos se activen, deberán existir condiciones de suelos residuales, sin cobertura vegetal, suelos erosionables, lluvias intensas y continuas, pendientes elevadas, parámetros que en la quebrada Llocllamayo están presentes en gran medida, dada la característica de humedad de la zona, con cauces o torrentes poco profundos, pendiente media a alta; debiendo tomar las precauciones del caso, realizando la limpieza y canalización de los cauces, de manera que el material detrítico al generarse, pueda ser canalizado y tenga los correspondientes disipadores de energía.
- ❑ La bibliografía presenta distintas formas de mitigar el efecto de huaycos para zonas urbanas, la quebrada Llocllamayo, debido al cruce del corredor vial interoceánico tramo 4 y por tratarse de una red vial corresponde intervenir con una infraestructura especial, correspondiendo a la alternativa 01 como mejor opción.
- ❑ La relación entre la probabilidad de ocurrencia de estos eventos extraordinarios (sismos, huaycos) y el proyecto de colocar un puente, o realizar tunelería, debe contemplar las vías, las cuales tendrán la suficiente capacidad de contener los flujos, que podrían generarse, lo que constituye el control del potencial de peligro, por huaycos, así como caída de rocas (desquinche y control de taludes)

## CAPITULO VII

### 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alcantara, A. I. (2000). Landslides: ¿Deslizamientos o Movimientos del Terreno? Definición, Clasificaciones y Terminología. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, nº41, 7-25.
- Andinas, P. M. (2007). *Movimientos en Masa en la Región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas*, Servicio Nacional de Geología y Minería. Publicación Geológica Multinacional No. 4.
- Coussot, P., & Meunier, M. (1996). Recognition, classification and mechanical description of debris flows. *Earth-Science Reviews / Elsevier Science*, nº 40, 209-227.
- Cruden, D. M. (1991). A simple definition of a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology - Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur* 43, nº. 1, 27-29.
- Cruden, D. M., & Varnes, D. J. (1996). Landslide types and processes. In: Turner AK, Schuster RL (eds) *Landslides investigation and mitigation. Transportation research board, US National Research Council. Special Report 247*, nº 03, 36–75.
- García, R. (2016). *Alternativas para la Estabilización de la Quebrada Cantuta II con Fines de Mitigación de Huaycos*. Tesis de Pregrado, Universidad Nacional Agraria la Molina, Facultad de Ingeniería Agrícola, Lima.
- Garrido Urzúa, N. P. (2012). *Determinación de Peligro de Flujo de Detritos en la Quebrada de Malu, Cuenca Santiago*. Tesis Pregrado, Universidad de Chile, Departamento de Geología, Santiago.
- Glade, T., & Crozier, M. (2005). A review of scale dependency in landslide hazard and risk analysis. en Glade, T., et al. ed., *Landslide hazard and risk: Chichester, England, John Willey & Sons*, 75-139.
- Gómez Cortés, D. A. (2012). *Medición de los esfuerzos generados por un Flujo de detritos sobre una superficie plana*. Tesis de Maestría, Universitat Politècnica de Catalunya, Pos-Grado en Recursos Hídricos , Madrid.

- González de Vallejo L. et al. (2002). Ingeniería Geológica. En L. I. González de Vallejo, M. Ferrer, L. Ortuño, & C. Oteo, *Ingeniería Geológica* (págs. 630-744). Madrid: Pearson Educación.
- Gutiérrez Elora, M. (2008). Geomorfología. En M. Gutiérrez Elora, *Geomorfología* (págs. 235-920). Madrid: Pearson Educación, S.A.
- Gutiérrez Elorza, M. (2008). *Geomorfología*. Madrid, España: Pearson Educación, S.A.
- Highland, L. (2004). Landslide Types and Processes. *United States Geological Survey (USGS)*, Fact Sheet 2004-3072.
- Hungr O., L. S. (2013). The varnes classification of landslide types, an update. *Springer- Landslides 11*, no. 2, 167–194.
- Hungr, O., Evans, S. G., Bovis, M. j., & Hutchinson, J. N. (2001). Review of the classification of landslides of the flow type. *Environmental Engineering Geoscience Vol. VII*, nº03, 221-238.
- Hungr, O., McDougall, S., & Bovis, M. (2005). Entrainment of material by Debris Flows. In: *Jakob M, Hungr O (eds) Debris flow hazards and related phenomena Chapter 7. Springer,, 135–158.*
- Iverson, R. M. (1997). The Physics of Debris Flows. *U.S. Geological Survey*, 245-296.
- Iverson, R. M. (2014). Debris flows: behaviour and hazard assessment. *US Geological Survey & The Geological Society of London, Geology Today, Vol. 30, No. 1*, 15-20.
- Jakob, M., & Hungr, O. (2005). Debris-flow Hazards and Related Phenomena. *Chichester: Springer-Praxis.*
- Karl-Heinz, N. (2011). *Estudio de Vulnerabilidad de la casa de Maquinas Central Hidroeléctrica San Gabán I*. Informe de Vulnerabilidad, Consultoría SwissHydro, Universidad Técnica de Berlín, San Gabán.
- Lucini, H. (2011). *Aplicación del Modelo Flo-2D para la Simulación de Flujos de Detritos en la Cuenca del Rio Cunha, Rio de Cedros/SC*. Tesis de Maestria, Universidad Federal de Santa Catarina, Pos-Grado en Ingeniería Ambiental, Florianopolis.

- Mizuyama, T. (2008). Structural Countermeasures for Debris Flow Disasters. *International Journal of Erosion Control Engineering*, Vol. 1, No. 2, 38-43.
- Montserrat, M. S. (2005). *Estudio Experimental de Obras de Protección contra Aluviones*. Tesis de Maestría, Universidad de Chile, PostGrado Escuela de Ingeniería y Ciencias, Santiago.
- Picarelli, L., Oboni, F., Evans, S. G., Mostyn, G., & Fell, R. (2005). Hazard characterization and quantification. *en Memorias, International Conference on Landslide Risk Management, Vancouver, Canada, 27-63*.
- Pierson, T. C. (1986). Flow behavior of channelized debris flows. *In Hillslope Processes, edited by A. D. Abrahams, 269-2++*.
- Quan Luna, B., van Westen, C. J., Jetten, V., Cepeda, J., Stumpf, A., & al., e. (2010). A preliminary compilation of calibrated rheological parameters used in dynamic simulations of landslide run-out. *In J.-P. Malet, T. Glade & N. Casagli (Eds.), Mountain risks : bringing science to society : proceedings of the Mountain Risks International Conference, Firenze, Italy, 255-260*.
- Rickenmann, D. (2005). Runout prediction methods. *In: Jakob, M., Hungr, O. (Eds.), Debris-flow Hazards and Related Phenomena. Springer, 305-324*.
- Shames, I. H. (1995). Nociones fundamentales. En I. H. Shames, *Mecánica de fluidos* (págs. nº 15 / 1-847). Colombia: McGraw-hill Interamericana S.A.
- Sotelo Avila, G. (1997). Propiedades de los fluidos. En G. Sotelo Avila, *Hidráulica General* (págs. nº 24, 1-561). Mexico D.F.: Editorial Limusa, S.A. de C.V. Grupo Noriega Editores.
- Suárez Díaz, J. (2009). Flujo. En J. Suárez Díaz, *Deslizamientos* (págs. nº 174, 588). Bucaramanga: División de Publicaciones UIS - Cra 27 con calle 9, Ciudad Universitaria.
- VanDine, D. F. (1996). Debris Flow Control Structures for Forest Engineering. *Res. Br., B.C. Ministry of Forests, Victoria, B.C., Work, 1-68*.
- Varnes, D. J. (1978). Slope movement types and processes. *In: Schuster RL, Krizek RJ (eds) Landslides, analysis and control, special report 176: Transportation research board, National Academy of Sciences(Special Report 176), 11-33*.

## ANEXOS