

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN - TACNA

Facultad de Ingeniería Civil, Arquitectura y Geotecnia

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Geológica – Geotecnia

**“ANÁLISIS COMPARATIVO DE UN MODELO HIDRODINÁMICO
UNIDIMENSIONAL PARA FLUJO NEWTONIANOS
Y NO NEWTONIANOS DEL RÍO SECO ZONA
URBANA TACNA”**

TESIS

Presentada Por:

Bach. Miguel Angel Banda Flores

Para optar el título profesional de:

INGENIERO GEÓLOGO - GEOTÉCNICO

TACNA – PERÚ

2015

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN - TACNA

Facultad de Ingeniería Civil, Arquitectura Y Geotecnia

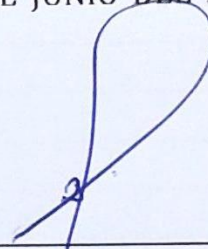
Escuela Académico Profesional de Ingeniería Geológica – Geotecnia

TESIS

**“ANÁLISIS COMPARATIVO DE UN MODELO HIDRODINÁMICO
UNIDIMENSIONAL PARA FLUJO NEWTONIANOS Y
NO NEWTONIANOS DEL RÍO SECO ZONA
URBANA TACNA”**


TESIS SUSTENTADA Y APROBADA EL 26 DE JUNIO DEL 2015, SIENDO EL
JURADO CALIFICADOR:

PRESIDENTE



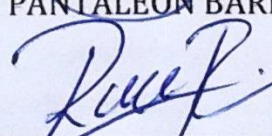
MSC. CONRADO GABINO BEDOYA JAÉN

SECRETARIO



ING. JORGE PANTALEÓN BARRIGA GAMARRA

MIEMBRO



ING. CARMEN ROSA ROMÁN ARCE

ASESOR



PH. D. EDWIN MARTÍN PINO VARGAS

DEDICATORIA

A mi madre Carmen. A mis hermanos Jose Luis, Virginia, Ricardo, María y Soledad por la confianza, apoyo y esfuerzo que hicieron posible la culminación de mis estudios.

AGRADECIMIENTOS

A todos los catedráticos de la Escuela de Ingeniería Geológica Geotecnia de la UNJBG quienes en sus lecciones y experiencias influyeron en mi formación profesional. Un agradecimiento muy especial a mi asesor Ph. D. Edwin Pino Vargas, a M. Sc. Robert Palomera Roman un gran amigo, por su apoyo y compartir sus conocimientos.

A todos mis compañeros de estudios Paul, Leandro, Salome y Jhony con los cuales compartí experiencias y vivencias inolvidables durante todos los años de carrera.

CONTENIDO

RESUMEN.....	v
CAPÍTULO I.....	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. ASPECTOS GENERALES	2
1.1.1. Ubicación y Accesibilidad.....	2
1.1.2. Aspectos Socioeconómicos	3
1.1.3. Aspectos Climáticos	4
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	5
1.2.1. Identificación del Problema.....	5
1.2.1.1. Problema General	5
1.2.1.2. Problemas Específicos	5
1.2.2. Hipótesis Planteada.....	6
1.2.3. Justificación.....	6
1.3. OBJETIVOS.....	7
1.3.1. Objetivo General.....	7
1.3.2. Objetivos Específicos	7
1.4. TRABAJOS ANTERIORES	8
CAPITULO II	10
2. FUNDAMENTO TEÓRICO.....	10
2.1. HIDRÁULICA DE LOS FLUJOS DE LODOS Y ESCOMBROS.	10
2.1.1. Tipos de Fluidos	11
2.2. CONCEPTO DE LOS FLUJOS DE LODO Y ESCOMBROS	13
2.2.1. Composición de los Flujos de Lodo y Escombros.	13
2.2.2. Clasificación de los Flujos de Lodo y Escombros	14
2.2.3. Modelamiento de los Flujos de Lodo y Escombros.....	18
2.3. EVALUACIÓN DE RIESGOS	20
CAPÍTULO III.....	23
3. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN	23
3.1. GEOLOGÍA LOCAL	23
3.1.1. Formación Huaylillas Superior (Nm-hu_s)	23
3.1.2. Depósitos Aluviales (Qh-al)	24

3.1.3.	Depósitos Fluviales (Qh-fl)	24
3.1.4.	Depósitos Antropogénicos (Qh-An)	24
3.2.	GEOMORFOLOGÍA	
3.3.	TOPOGRAFÍA	27
3.4.	CARACTERIZACIÓN HIDROLOGÍA	28
3.4.1.	Caracterización Hidrológica de la Cuenca Caplina	29
3.4.2.	Análisis de la Precipitación Máxima en 24 Horas	30
3.5.	MECÁNICA DE SUELOS	35
3.6.	GEODINÁMICA	37
CAPÍTULO IV	.....	41
4.	METODOLOGÍA	41
4.1.	DESCRIPCIÓN DEL MODELO	41
4.2.	ECUACIONES GENERALES	42
4.3.	ALGORITMO DEL FLO 2D	51
4.4.	LA IMPORTANCIA DE LA CONSERVACIÓN DE VOLUMEN	55
CAPÍTULO V	.....	57
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	57
5.1.	CONFIGURACIÓN DEL MODELO	57
5.3.	ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA CALIBRAR EL MODELO CON EVIDENCIAS DE CAMPO	67
5.4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA FLUJO NEWTONIANO Y NO NEWTONIANO	70
5.5.	SIMULACIÓN DE FLUJOS EXTREMOS ESTUDIO RIO SECO	72
5.6.	ELABORACIÓN DE UN MAPA DE PELIGROS	75
CAPÍTULO VI	.....	78
6.1.	CONCLUSIONES	78
6.2.	RECOMENDACIONES	80
BIBLIOGRAFÍA	.....	81
ANEXOS	.....	84

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 01: Área de aplicación del modelo FLO 2D.	03
Figura N° 02: Avenidas registradas en febrero de 1998.	11
Figura N° 03: Relación entre el esfuerzo cortante (T) y la tasa de deformación (du/dy) para diferentes tipo de flujo.	12
Figura N° 04: Clasificación de flujos hiperconcentrados .	17
Figura N° 05: Parte del plano topográfico desde la progresiva 0+100 hasta 0+140.	28
Figura N° 06: Modelo de cuenca – cuenca del rio Caplina.	29
Figura N° 07: Hidrograma para un periodo de retorno de 50 años.	33
Figura N° 08: Hidrograma para un periodo de retorno de 100 años.	34
Figura N° 09: Hidrograma para un periodo de retorno de 200 años.	34
Figura N° 10: Granulometría de las muestras recolectadas.	36
Figura N° 11: Diagrama de flujo del modelo FLO 2D.	54
Figura N° 12: Malla de Grilla 8 x 8 m tramo rio Seco.	58
Figura N° 13: Tirantes máximos Qp: 35.019 m ³ /s (Aguas claras).	63
Figura N° 14: Tirantes máximos Qp: 35.019 m ³ /s (Cv 22% a 25%).	64
Figura N° 15: Tirantes máximos Qp: 35.019 m ³ /s (Cv 22% a 30%).	66
Figura N° 16: Vista de la progresiva 0+400 altura aproximada 2,80 m.	68
Figura N° 17: Vista de la progresiva 0+900 altura aproximada 2,05 m.	68
Figura N° 18: Comparación de resultados con evidencias de campo.	69
Figura N° 19: Evolución de las tirantes máximas para el río Seco.	70
Figura N° 20: Tirantes máximos Qp: 44.8 m ³ /s (Cv 22% a 25%).	73
Figura N° 21: Tirantes máximos Qp: 54.7 m ³ /s (Cv 22% a 30%).	74
Figura N° 22: Mapa de amenazas generado por el modelo FLO 2D.	77

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 01: Comportamiento del flujo hiperconcentrados en función de la concentración de sedimentos.	15
Tabla N° 02: Definición de riesgo de inundación.	20
Tabla N° 03: Definición de intensidad de crecidas de aguas.	21
Tabla N° 04: Definición de intensidad de flujos o crecidas de barro.	22
Tabla N° 05: Hidrograma de máximas avenidas en la cuenca del río Caplina.	32
Tabla N° 06: Caudales máximos para diferentes periodos de retorno por subcuencas.	32
Tabla N° 07: Resultado de granulometría, límites de atterberg y clasificación SUCS.	36
Tabla N° 08: Valores de rugosidad del suelo.	47
Tabla N° 09: Parámetros de resistencias para flujo laminar.	47
Tabla N° 10: Tensión de corte y viscosidad como función de la concentración de sedimentos.	49
Tabla N° 11: Propiedades de las matrices de flujo de lodos (solo limo y arcilla).	50
Tabla N° 12: Velocidades máximas alcanzadas en el estudio del río Seco.	71

RESUMEN

Este trabajo presenta la modelación hidrodinámica para flujos hiperconcentrados de sedimentos utilizando el modelo FLO 2D versión 2004. Este modelo numérico permite simular flujo de fluidos newtonianos y no newtonianos en topografías complejas, el cual va a ser aplicado en el río Seco que se encuentra en el sector NE del Distrito de Gregorio Albarracín Lanchipa de la provincia y departamento de Tacna.

En esta zona, en temporadas de lluvia que comprende los meses de diciembre a marzo cuando viene la avenida del río Seco que registra un flujo de lodos y escombros el cual analizaremos con el fin de poder calcular los tirantes máximos del río, la velocidad de dicho flujo y las áreas inundadas.

Para ello ingresaremos datos de entrada como la topografía, hidrogramas registrados a partir del análisis de precipitaciones máximas en 24 horas, parámetros reológicos que se obtendrán del análisis de suelos del material dejado por el río, valores estimados de rugosidad del suelo y resistencia al flujo laminar.

Luego con las evidencias encontradas en el río Seco como son las marcas dejadas por el paso del río, se va a calibrar el modelo haciendo coincidir estas

marcas con los resultados del modelo, también realizaremos un análisis del flujo de aguas claras y flujo de aguas con sedimentos para diferentes escenarios. Finalmente se va elaborar un mapa de amenazas para riesgo de inundaciones con el fin de limitar las partes vulnerables.

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

Los flujos hiperconcentrados están compuesto por mezclas de agua, suelo, piedras, troncos, etc., que se originan generalmente en la parte alta de las ríos, quebradas y se desplazan torrencialmente por el cauce debido a las fuertes pendientes, causando destrozos a su paso, y cuando llegan a zonas de menor pendiente se depositan, formando conos de deyección o abanicos aluviales de gran poder destructivo, en algunos casos provocan desbordes y en consecuencia inundaciones.

Debido a que el flujo de lodos y escombros contiene un considerable porcentaje de sólidos, son un gran peligro para la población que vive al borde de estas quebradas, y un factor de riesgo para la infraestructura vital (carreteras, acueductos, muros de contención, etc.), siendo necesario considerar la teoría de flujo de hiperconcentrados.

Entonces, uno de los pasos a considerar para resolver esta problemática es evaluar la aplicabilidad de los modelos numéricos

disponibles en nuestro medio para evaluar este tipo de flujo para poder señalar medidas de mitigación y control.

1.1. ASPECTOS GENERALES

1.1.1. Ubicación y Accesibilidad

La zona de estudio se encuentra ubicada en el sector NE del Distrito de Gregorio Albarracín Lanchipa de la provincia y departamento de Tacna, hacia el sector Sur – oeste de las Faldas del Cerro Arunta. Ubicada geográficamente en la región costa en las coordenadas: 368909E – 8006002N y 368901E – 8004811N Sistema Geográfico UTM Datum WGS 84 Zona 19 S, con una distancia aproximada de 1,58 Km con diferencia de cotas entre 545 y 570 m.s.n.m.

El acceso a la zona de estudio inicia en la entrada principal del distrito Gregorio Albarracín Lanchipa, lo cual comienza en el ovalo Cuzco siguiendo la Avenida Collpa hasta llegar a la ruta del desvío hacia Urbanización los Delfines, el trayecto continua hasta llegar al muro perimétrico del Cuartel Tarapacá, es en esa zona urbana comienza el trayecto del tramo

del río Seco hasta el puente donde una red de calles permiten el libre tránsito. (Ver Figura N° 01, ANEXOS plano MB-01)



Fuente: Google Earth

Figura N° 01: Área de aplicación del modelo FLO 2D.

1.1.2. Aspectos Socioeconómicos

Tacna se encuentra dentro de las ciudades de mayor desarrollo del Perú, dentro de las zonas de mayor índice de pobreza se encuentran los distritos de Cono Sur, Ciudad Nueva y Alto de la Alianza, teniendo a cada uno con un crecimiento desordenado producto de invasiones de áreas destinadas a otros propósitos, tal es el caso de la parte inferior del río Seco que se encuentran Asociaciones de Viviendas, que están en riesgo

durante el período de avenidas de los cauces del río Caplina, Quebrada Palca y Río Vilavilani-Yungane.

1.1.3. Aspectos Climáticos

El clima es del tipo desértico, con escasas precipitaciones pluviales que se presentan en forma de garúas durante los meses de invierno originadas por las densas neblinas que se levantan del litoral. Las lluvias anuales que norman el régimen de los ríos cercanos a la zona de estudio se producen durante el verano austral a lo largo de la región andina, desde alturas superiores a las 2,000 m.s.n.m.

Existen ciertas variaciones de temperatura a lo largo del valle Caplina y zonas cercanas a nuestro estudio pero en general los meses de Enero y Febrero, tienen promedios de 20°C y 21°C respectivamente, son los más calurosos del año y los meses de Julio y Agosto, con promedios de 13°C y 17°C, son los más fríos.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.2.1. Identificación del Problema

1.2.1.1. Problema General

Actualmente no existe un modelo unidimensional que permita analizar el flujo newtoniano y no newtoniano para el análisis del comportamiento del flujo en las quebradas de la Región de Tacna.

1.2.1.2. Problemas Específicos

- En la región Tacna no cuenta con un modelo unidimensional para analizar el flujo no newtoniano.
- En la región Tacna no se ha llevado un análisis de flujos newtonianos y no newtonianos.

- En la zona de estudio no se ha llevado a cabo una evaluación de un mapa de peligros a causa de inundaciones.

1.2.2. Hipótesis Planteada

El modelo hidrodinámico bidimensional para flujo no newtoniano permitirá un mejor análisis del comportamiento del río seco de la zona urbana de Tacna.

1.2.3. Justificación

La zona de estudio no cuenta con antecedentes que refieran directamente a los flujos no newtonianos, esto refleja la necesidad de llevar a cabo dicha investigación. El cual resulta muy importante, ya que esta situación, se aproxima más a la situación real. Indudablemente existen estudios anteriores donde el modelamiento ha sido realizado usando únicamente modelos para flujos newtonianos unidimensionales.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo General

Elaborar y analizar un modelo unidimensional para realizar un análisis comparativo de un flujo newtoniano y flujo no newtoniano del río Seco de la zona urbana de la ciudad de Tacna, con la finalidad de determinar la vulnerabilidad del cauce ante desbordes e inundaciones.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Elaborar un modelo unidimensional para flujos no newtonianos.
- Evaluar y analizar el comportamiento de un flujo newtoniano y no newtoniano del tramo a estudiar.
- Desarrollar un mapa de amenazas de inundaciones para determinar las zonas vulnerables de dicho tramo de estudio.

1.4. TRABAJOS ANTERIORES

C. Tisnado (2013), realizó un “Modelamiento hidrodinámico para determinar zonas vulnerables en el cauce del río seco - zona urbana – Tacna” utilizando como herramienta básica el modelo HEC - RAS.

C. Pino (2013), hizo un estudio de “Caracterización Hidrogeomorfológica de la Cuenca del Río Caplina – Tacna” en este estudio logró caracterizar e interpretar geomorfológica e hidrológicamente el comportamiento de la cuenca hidrográfica del río Caplina.

F. Frisancho, M.A. Linares, E.M. Mamani, D. Tito, L. Feliciano, J.Solis, (2012). Maestría En Gestión Ambiental y Desarrollo Sostenible Escuela De Post Grado De La Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, realizaron el trabajo de “Modelamiento hidráulico HEC-RAS/ caso: defensa ribereña Río Seco-Arunta”.

E. Pino V. (2012) realizo el trabajo de “Análisis de Máximas Avenidas e Inundaciones”. Analizó y calculó los caudales máximos

anuales reportados en la estación Bocatoma Calientes cuyo período de registro es de 1959 al 2011, para diferentes períodos de retorno utilizando métodos estadísticos.

La Empresa SUSERING S.A.C. Supervisión de Servicios de Ingeniería 2011, realizó un estudio geotécnico, donde obtuvo parámetros físicos del terreno de la zona de estudio específicamente resultados de laboratorio de mecánica de suelos análisis granulométrico, peso específico y record de excavación.

En el año 2011 la Subgerencia de Ingeniería y Obras de la municipalidad distrital Gregorio Albarracín Lanchipa, hizo un estudio sobre defensas ribereñas.

ANA (2010), realizó un estudio hidrográfico de todas las cuencas del Perú, dando a conocer parámetros importantes de los diferentes ríos de las diferentes regiones del Perú, resaltó la importancia de los Recursos Hídricos de nuestras cuencas y ríos.

CAPITULO II

2. FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1. HIDRÁULICA DE LOS FLUJOS DE LODOS Y ESCOMBROS.

“La hidráulica de los flujos de escombros o hidráulica torrencial, es el estudio de las avenidas torrenciales en la que el transporte de sólidos es tan grande que las nociones de hidráulica fluvial se desvanecen. La fase sólida influye en el flujo, es decir, no puede separarse el flujo de agua por un lado, con sus ecuaciones de movimiento, y el transporte sólido por otro” (Castillo, 2006).

En un flujo de lodos y escombros podemos afirmar que el caudal de lodo alcanzado es mayor que en un flujo de agua sola (aguas claras) debido al aporte y transporte sólido. Además la densidad de la mezcla se eleva por encima de la densidad del agua.

A pesar de que los caudales normales del río Caplina son reducidos comparativamente con los demás ríos de la Costa Peruana, cuando se presentan eventos extremos, sus descargas crecen

súbitamente. Estas avenidas indudablemente causan daños, desbordes y colapso de estructuras tal como se evidencia y muestra en la Figura N° 02.



Fuente: Videos periodísticos

Figura N° 02: Avenidas registradas en febrero de 1998.

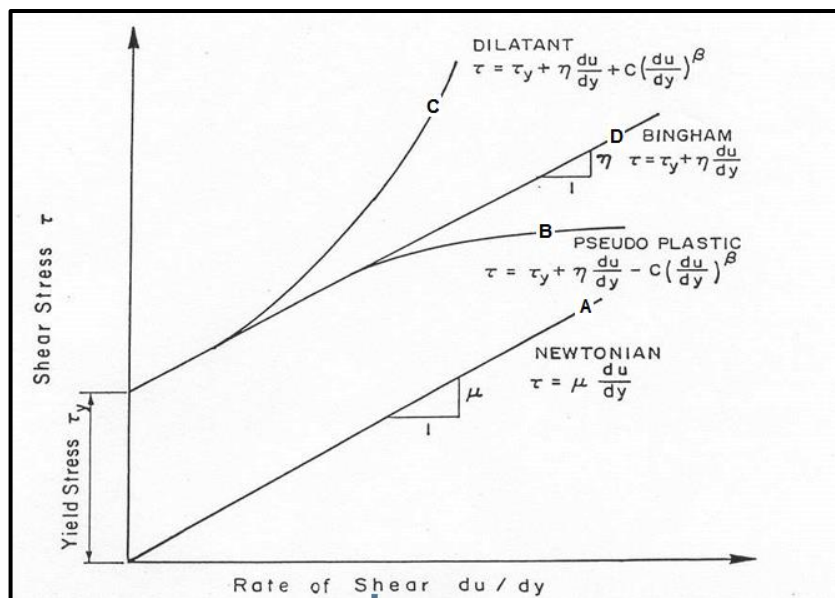
2.1.1. Tipos de Fluidos

En términos muy generales, a los fluidos que presentan una resistencia muy pequeña, o nula, a ser deformados se les conoce como fluidos Newtonianos, en tanto, a los fluidos que presentan mayor resistencia se les llama fluidos no-Newtonianos.

Para un fluido Newtoniano, la relación entre el esfuerzo cortante y la tasa de deformación (gradiente de velocidades) es lineal, como lo indica el caso (A) de la Figura N° 03. Este tipo de fluido es el que se obtiene para todos los líquidos puros

(agua clara), cuyo comportamiento es Newtoniano con una muy buena aproximación.

Sin embargo, los fluidos no-newtonianos comprenden en general mezclas complejas como barros, aceites lubricantes muy viscosos, fluidos orgánicos como la sangre, etc. Estos fluidos exhiben un comportamiento diferente, tal como se observa en los casos (B), (C) y (D) de la Figura N° 03. Dentro de este tipo de fluido (fluido no-newtoniano) se analizan los flujos de lodo o escombros.



Fuente: (Flo-2D Users Manual, 2009)

Figura N° 03: Relación entre el esfuerzo cortante (T) y la tasa de deformación (du/dy) para diferentes tipo de flujo.

2.2. CONCEPTO DE LOS FLUJOS DE LODO Y ESCOMBROS

Según Takahashi (1980) “Los flujos de lodo y escombros son flujos antiguos conformados por una mezcla viscosa y sedimentos de todos los tamaños con acumulaciones de cantos rodados que se vuelcan en el frente de la onda y forman lóbulos, detrás del cual siguen los granos más finos”.

Según Iverson (1997), “Los flujos de escombros ocurren cuando masas de sedimento pobremente graduadas, agitadas y saturadas de agua, caen precipitadamente por efecto de la atracción de la gravedad”

Existen diversas definiciones sobre flujos de escombros, pero básicamente se trata de una mezcla de agua con sedimento que transita hacia aguas abajo, sobre una pendiente pronunciada y que aumenta su volumen debido a rocas, arbustos y troncos que encuentra en su camino según (Castillo, 2006).

2.2.1. Composición de los Flujos de Lodo y Escombros.

La composición de los flujos de escombros varía enormemente debido a que éste es un flujo de múltiples fases

de granos desordenados con aire y agua mezclados entre sí. El tamaño de partículas varía desde materiales finos hasta cantos rodados sostenidos (suspendidos) en una matriz viscosa. Por lo tanto, entre los principales componentes tenemos: el agua, la matriz fina (partículas de arcilla) y los granos gruesos.

2.2.2. Clasificación de los Flujos de Lodo y Escombros

Los flujos muy viscosos hiperconcentrados de sedimentos son llamados en general flujo de barro o detritos. Los flujos de barro son no homogéneos, no newtonianos, eventos de crecida cuyas propiedades de fluido cambian significativamente cuando descienden por los canales de las cuencas o a través de los abanicos aluviales. Su comportamiento está definido por las propiedades de la matriz de fluido (consistente de agua y de sedimentos finos), la geometría del canal, la pendiente y rugosidad. A concentraciones suficientemente altas los sedimentos finos alteran las propiedades del fluido incluyendo la densidad, viscosidad y tensión de corte.

La tabla N° 01, desarrollada a partir de datos de laboratorio usando depósitos provenientes de Glenwood Springs, Colorado, detalla las cuatro diferentes categorías de flujos hiperconcentrados de sedimentos y las características dominantes del flujo (Flo-2D Users Manual, 2009).

Tabla N° 01: comportamiento del flujo hiperconcentrados en función de la concentración de sedimentos.

	Concentración de sedimentos		Características del flujo
	En volumen	En peso	
Deslizamientos	0,65 - 0,80	0,83 - 0,91	No fluye; falla por deslizamiento de bloques
	0,55 - 0,65	0,76 - 0,83	Falla por deslizamiento de bloques con deformación interna durante el deslizamiento; arrastre lento antes de la falla
Flujo de barros	0,48 - 0,55	0,72 - 0,76	Flujo evidente; flujo de barros sostenido de arrastre lento; deformación plástica bajo su propio peso; cohesivo; no se esparce en superficie llana
	0,45 - 0,48	0,69 - 0,72	Flujo que se aparece en superficie llana; flujo cohesivo; alguna mezcla
Crecida de barros	0,40 - 0,45	0,65 - 0,69	El flujo se mezcla fácilmente; muestras características fluidas en la deformación; se extiende en superficie horizontal pero mantiene una superficie fluida inclinada; asentamiento de partículas grandes (canto rodado); con aparición de ondas que disipan rápidamente
	0,35 - 0,40	0,59 - 0,65	Marcado asentamiento de gravas; desparramamientos casi completo en superficie horizontal; aparece la superficie líquida con dos fases fluidas; las ondas viajan en superficie
	0,30 - 0,35	0,54 - 0,59	Separación del agua en superficie; las ondas viajan fácilmente; la mayoría de la arena y de la grava ha asentado y se mueve como carga de fondo
	0,20 - 0,30	0,41 - 0,54	Acción distinta de la onda; superficie fluida; todas las partículas descansan sobre el lecho en condiciones de fluido quieto
Crecida de agua	< 0,20	< 0,41	Crecida de agua con carga de fondo suspendida convencional

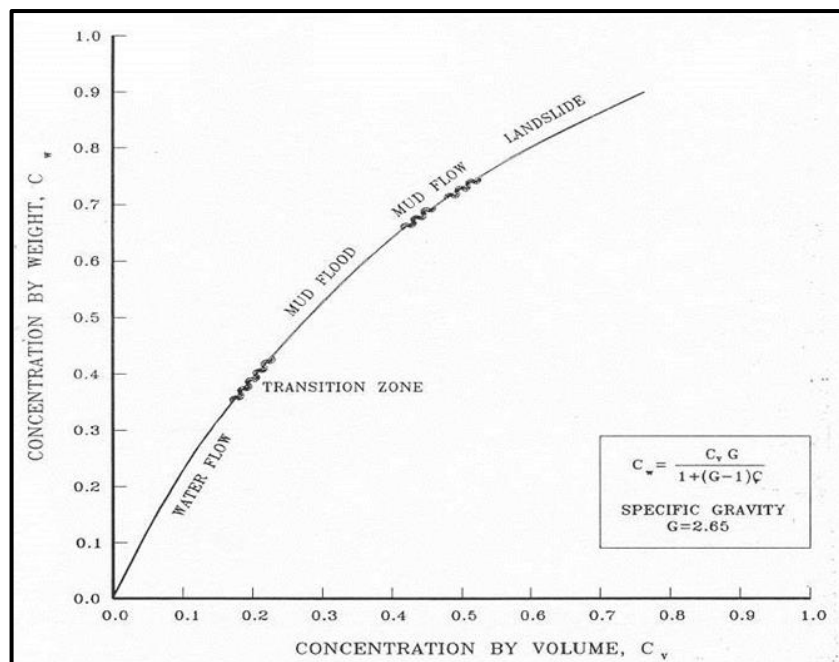
Fuente: (Flo-2D Users Manual, 2009)

El rango total de los fluidos hiperconcentrados de sedimentos cubre desde las crecidas de agua a crecidas de barro, flujos de barro y deslizamientos, distinguiéndose por los procesos físicos que involucran. Dentro de ellos, los flujos densos que pueden clasificarse como inundaciones o crecidas de barro (mud floods), flujo de barro (mudflows) y flujos de detritos (debris flows) Julien & León, 2000 (Ver figura N° 04).

- **Inundación de lodos o flujo de barro turbulento (mudfloods):** son típicamente hiperconcentraciones de partículas no cohesivas, que presentan un comportamiento muy fluido, tienen régimen turbulento, dependiendo la resistencia al flujo de la rugosidad de los bordes, como en los flujos turbulentos en agua clara (“Cv” entre 20 % y 45%).
- **Flujo de lodos o flujo de barro viscoso (mudflows):** por su parte, se caracterizan por una concentración de limos y arcillas ($d < 62.5 \mu$), lo suficientemente alta como para alterar las propiedades de la matriz del fluido, convirtiéndola en muy viscosa y a altas concentraciones,

capaz de transportar en superficie piedras de gran tamaño (“Cv” entre 45 % y 55 %).

- **Flujo de detritos y escombros o alud torrencial (debris flows):** Dominan esfuerzos dispersivos. Mezcla de materiales clásticos, incluyendo grandes piedras, troncos, etc., en los que la colisión lubricada entre las partículas es el mecanismo dominante de disipación de energía.



Fuente: (Flo-2D Users Manual, 2009)

Figura N° 04: Clasificación de flujos hiperconcentrados.

2.2.3. Modelamiento de los Flujos de Lodo y Escombros

Los primeros modelos matemáticos para la caracterización de los flujos de escombros partieron de la base de la resistencia de los materiales, de acuerdo a la ecuación de Coulomb (Johnson y Rodine, 1984). Posteriormente se involucraron modelos hidráulicos como los de Bingham y Bagnold, los cuales fueron adaptados al comportamiento de fluidos producto de la mezcla de suelo y agua.

De acuerdo a las características de la mezcla y a la pendiente y forma del canal se genera un fluido con diferentes características. El modelo de fluido involucra la dinámica interna de la mezcla y el tipo de flujo los mecanismos generales del movimiento.

Hay esencialmente dos caminos para la investigación del comportamiento de los flujos de escombros:

1. Considerar la masa entera (fluido y sólido) como un “fluido” con propiedades particulares. El modelamiento con este tipo de análisis se aproxima muy bien a los flujos con considerables finos, por ejemplo para el caso de flujos de lodo.
2. La otra posibilidad considera el agua (en algunos casos con finos) y material grueso por separado. A menudo se refiere a modelos de flujo granular, estos modelos se basan íntimamente en el conocimiento de las partículas y de su distribución de tamaño.

De los modelos disponibles en el medio, se va a utilizar el modelo cuadrático de O'Brien y Julien. Este modelo cuadrático reológico fue presentado por O'Brien y Julien (1985) el cual se va a desarrollar en el capítulo IV cuya ecuación principal es:

$$\tau = \tau_y + \mu \frac{\delta u}{\delta y} + C_1 \left(\frac{\delta u}{\delta y} \right)^2$$

Dónde:

τ_y Es el esfuerzo de cedencia.

μ Es la viscosidad dinámica.

C_1 Es el parámetro turbulento-dispersivo.

2.3. EVALUACIÓN DE RIESGOS

El análisis de riesgo o peligro de inundación en una localización específica, que incluye la afectación de las obras estructurales, es una función de la intensidad y de la probabilidad del evento. La intensidad de la crecida está definida por la profundidad y la velocidad de flujo y su probabilidad de ocurrencia se relaciona inversamente a la magnitud del evento. El riesgo de la crecida se define entonces, como una función combinada discreta de la intensidad del evento (severidad del acontecimiento) y de su período de retorno (frecuencia) y en general se acepta la categorización presentada en la tabla N° 02.

Tabla N° 02: Definición de riesgo de inundación.

NIVEL DE RIESGO	DESCRIPCIÓN
Alto	Peligro para las personas tanto en el interior como en el exterior de sus viviendas. Las estructuras están en peligro de ser destruidas
Medio	Las personas están en peligro fuera de sus casas. Los edificios pueden sufrir daños y es posible la destrucción de estructuras dependiendo de las características de la construcción
Bajo	El peligro para las personas es bajo o no existe. Los edificios pueden sufrir pequeños daños, pero la inundación o la sedimentación pueden afectar interiores de las estructuras.

Fuente: (Flo-2D Users Manual, 2009)

Para definir la intensidad del evento de crecida, algunos métodos utilizan una combinación de la profundidad y de la velocidad de flujo.

Por ejemplo el método austríaco (Fiebiger et al.1997) utiliza la energía total definida por $h + v^2/2g$.

El método suizo (OFEE et al. 1997) define la intensidad en términos de una combinación de la profundidad de flujo h y del producto de h y de v y permite asignar una intensidad alta a las grandes profundidades de flujo independientemente de las velocidades del flujo.

Si bien las condiciones específicas en una región pueden hacer necesario cambiar los umbrales de los niveles de peligro, frecuentemente se acepta la definición de intensidades de las crecidas de agua y de barro que se muestran en las tablas N° 03 y N° 04. Los flujos de barros y detritos son aún más destructivos que las crecidas de agua, por lo que el criterio de intensidad para estos flujos es más conservativo.

Tabla N° 03: Definición de intensidad de crecidas de aguas.

INTENSIDAD (m)	MÁXIMA PROFUNDIDAD h (m)		PRODUCTO DE MÁXIMA PROFUNDIDAD POR VELOCIDAD MÁXIMA(m ² /s)
Alto	$h > 1,5$ m	o	$v h > 1,5$ m ² /s
Media	$0,5$ m $< h < 1,5$ m	o	$0,5$ m ² /s $< v h < 1,5$ m ² /s
Baja	$h < 0,5$ m	y	$v h < 0,5$ m ² /s

Fuente: (Flo-2D Users Manual, 2009)

Tabla N° 04: Definición de intensidad de flujos o crecidas de barro.

INTENSIDAD (m)	MÁXIMA PROFUNDIDAD H (m)		PRODUCTO DE MÁXIMA PROFUNDIDAD POR VELOCIDAD MÁXIMA(m²/s)
Alto	$h > 1,0 \text{ m}$	o	$v h > 1,0 \text{ m}^2/\text{s}$
Media	$h < 1,0 \text{ m}$	y	$v h < 1,0 \text{ m}^2/\text{s}$
Baja	No definida		No definido

Fuente: (Flo-2D Users Manual, 2009)

CAPÍTULO III

3. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

3.1. GEOLOGÍA LOCAL

El valle de Tacna se ubica en el Antearco Sur del Perú, dentro de una cuenca elongada originada entre el sistema de Fallas Incapuquio – Challaviento (SFIC), y la cordillera de la costa. En esta zona encontramos unidades litoestratigráficas superficiales predominantes tales como depósitos cuaternarios conformados por arenas finas, depósitos antropogénicos, fluviales y aluviales, arenas y rocas identificadas pertenecientes a la formación Huaylillas miembro superior. (*Ver ANEXOS plano MB-03*).

3.1.1. Formación Huaylillas Superior (Nm-hu_s)

Hacia las faldas del cerro Arunta la parte del flanco izquierdo se encuentra cubierta por una capa delgada de suelo eólico residual, es netamente tobáceo y está constituido por

areniscas, tobas riolíticas y riolíticas de color rosáceo intercalados con delgados niveles de areniscas masivas de tonalidades beige clara.

3.1.2. Depósitos Aluviales (Qh-al)

Estos depósitos están compuestos por horizontes de arenas con limos de tonalidades gris marrón y beige clara ocupando los márgenes del lecho ordinario del río.

3.1.3. Depósitos Fluviales (Qh-fl)

Son acumulaciones de cantos rodados subredondeados y de baja esfericidad, gravas de diferente tamaño con arenas, gravas y limos de tonalidad gris clara ubicados en cauce principal del río.

3.1.4. Depósitos Antropogénicos (Qh-An)

Acumulaciones formadas por las actividades realizadas por el hombre trabajos de construcción, desmonte, movimiento

de tierra mezclada con material de relleno sanitario, sobre estos depósitos se construyó el muro de contención en el margen derecho.

3.2. GEOMORFOLOGÍA

Esta zona es un cauce de un río activo en época de lluvias, a menudo las terrazas se apoyan en las vertientes, en el caso de la zona de estudio la terraza aluvial estaría ocupada por el sector urbano las actividades de la poblaciones cercanas han modificado la forma del margen derecho dificultando el trabajo de identificación de la forma del lecho.

La geomorfología del margen derecho está compuesta por la terraza aluvial que alberga al sector urbano y los principales agentes modeladores de este margen son los depósitos recientes acumulaciones de residuos, material de relleno sanitario, movimiento de tierras y desmonte generado por la construcciones cercanas y la del muro de contención, estos materiales modificaron la sinuosidad de la corriente del río alterando la zona convirtiéndola en altamente riesgosa. Posee una pendiente de aproximadamente 40° calificada como alta en la

evaluación de estabilidad de taludes se tienen más alcances del margen derecho.

La geomorfología del margen izquierdo aguas abajo del río es parte del pie de la ladera del cerro Arunta, el perfil longitudinal de la ladera tiene en la parte baja una pendiente promedio de 12° calificada como baja, incrementándose a una pendiente promedio 24° calificada como media, el principal agente modelador del relieve lo constituye las variaciones climáticas extremas y el viento.

Al inicio del trayecto y cerca al muro perimétrico del cuartel Tarapacá está constituido superficialmente por depósitos eólicos de tipo loess, tobas arenas finas, limos y arcillas de tonalidades rosáceas y se extienden hasta la parte más sinuosa del cauce natural.

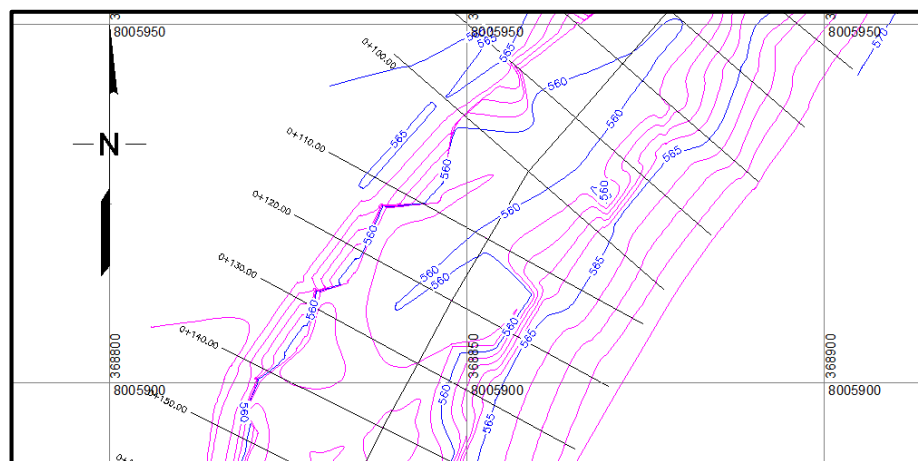
Antes de llegar a la parte más sinuosa los materiales predominantes que conforman la ladera del cerro Arunta son las tobas compactadas y areniscas de tonalidades rosáceas y beige claras.

La corriente del río a trasportado los materiales descritos anteriormente erosionando la roca arenisca en el sector más sinuoso del margen derecho.

Pasando la parte más sinuosa del trayecto se pueden identificar depósitos antropogénicos, esto quiere decir acumulaciones formadas en el proceso de los trabajos de construcción del muro de contención del margen derecho conformado por arenas transportadas para elaboración de concreto, y se extienden hasta el final del trayecto en el puente que conduce a las canteras.

3.3. TOPOGRAFÍA

La información topográfica disponible del tramo del río a estudiar fue elaborada en el 2013 por C. Tisnado, Para el estudio de modelamiento con el modelo hidrodinámico HEC-RAS. De este estudio se ha extraído la topografía de dicho tramo que consiste en curvas de nivel que tienen una separación de 5 m para las curvas principales y 1 m para las curvas secundarias como se muestra en la Figura N° 05. (*Ver ANEXOS plano MB-02*)



Fuente: elaboración AutoCAD

Figura N° 05: Parte del plano topográfico desde la progresiva 0+100 hasta 0+140.

3.4. CARACTERIZACIÓN HIDROLOGÍA

La morfología del cauce se caracteriza como un río entrecruzado, que está favorecido por una fuerte pendiente promedio de $S = 0,03064$ en 1752.0 m, la abundancia de carga sólida de grano grueso, un escurrimiento variable en épocas de avenidas y riberas fácilmente erosionables. La sedimentación del cauce desarrolla varias barras y otros cuerpos sedimentarios. Estos forman un obstáculo al flujo y lo dividen debido a las riberas erosionables. El cauce actual desarrolla fuerte erosión en las márgenes externas de las curvas del cauce (meandros) y en sus márgenes internas desarrollan procesos de sedimentación.

3.4.2. Análisis de la Precipitación Máxima en 24 Horas

La Autoridad Nacional del Agua (ANA) en el 2010 ejecuto un estudio hidrológico de máximas avenidas en las cuencas de la vertiente del pacífico - cuencas de la costa sur, para el análisis de la precipitación máxima en 24 horas, primero realizó el tratamiento de datos de las precipitaciones diarias de todas las estaciones que involucran la zona de estudio. Seguidamente seleccionó las estaciones más representativas por su calidad de información y su período de registro. Tercero realizó el análisis de consistencia por el Método del Vector Regional. Y por último determinó sus valores de precipitación máxima anual para cada una de las estaciones y su variación de las mismas por zonas.

Una vez determinado los valores de precipitaciones máximas diarias realizó un análisis de frecuencias de eventos hidrológicos máximos, procesando dicha información por medio de un análisis probabilístico, en donde se empleó las distribuciones de frecuencia más

usuales como son: La Distribución Gumbel (EV1), Distribución Pearson Tipo III (P3) y Distribución Log Pearson III (LP3).

Para la cuenca del río Caplina analizó la información de caudales diarios de la estación Calientes, ubicado en el distrito de Pachía en las coordenadas geográficas $70^{\circ}12'$ de longitud Oeste y $17^{\circ}85'$ de latitud Sur.

De acuerdo al análisis de distribución de frecuencias el que mejor se ajusta es la Distribución Log Pearson Tipo III, a la vez determinó su prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov.

Finalmente, obtuvo los resultados de precipitación máxima en 24 horas en la para diferentes períodos de retorno como se muestra en la Tabla N° 05.

Tabla N° 05: Hidrograma de máximas avenidas en la cuenca del río Caplina.

A		CUENCA RIO CAPLINA				
B		HEC HMS : AREA DE DRENAJE 1523.563 km ²				
C		FLOW	FLOW	FLOW	FLOW	FLOW
TR		25 años	50 años	75 años	100 años	200 años
F		MODIFIED-RUN:RUN 1	MODIFIED-RUN:RUN 1	MODIFIED-RUN:RUN 1	MODIFIED-RUN:RUN 1	MODIFIED-RUN:RUN 1
Units		m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s
Type Time		INST-VAL	INST-VAL	INST-VAL	INST-VAL	INST-VAL
1	31-dic-99	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	01-ene-00	0.999	1.000	1.052	1.102	1.305
3	02-ene-00	26.557	35.019	40.704	44.801	54.656
4	03-ene-00	20.144	25.816	29.537	32.204	38.509
5	04-ene-00	1.743	1.830	1.898	1.985	2.284
6	05-ene-00	1.433	1.465	1.484	1.521	1.650
7	06-ene-00	1.218	1.245	1.262	1.293	1.403
8	07-ene-00	1.035	1.058	1.073	1.099	1.192
9	08-ene-00	0.880	0.900	0.912	0.934	1.014

Fuente: Autoridad Nacional del Agua (ANA)

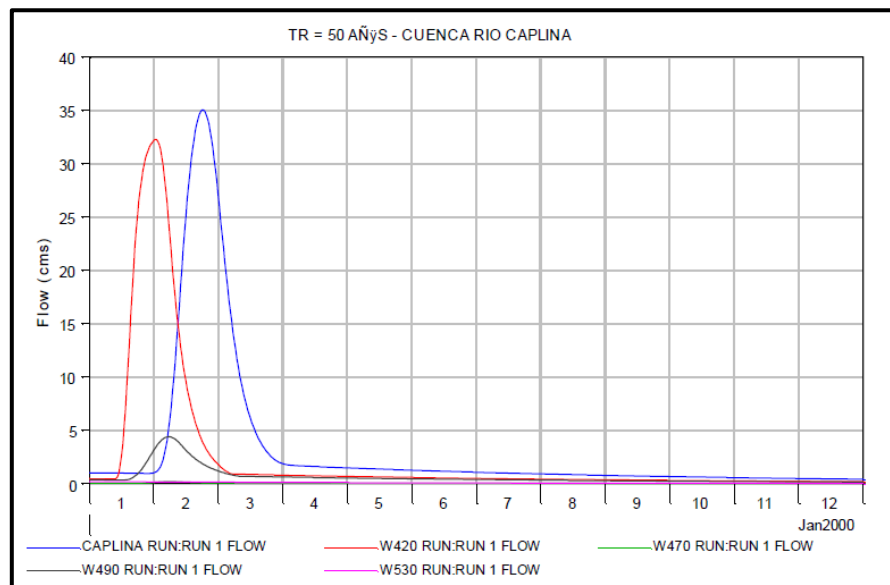
Tabla N° 06: Caudales máximos para Diferentes Periodos de Retorno por subcuencas.

Cuenca	Subcuencas	Área (Km ²)	Q25	Q50	Q75	Q100	Q200
RIO CAPLINA	Alto caplina	681.26	25.4	32.3	36.7	39.9	47.5
	Medio Bajo caplina	62.23	0.1	0.2	0.3	0.4	0.6
	Medio Alto caplina	518.32	2	4.4	5.6	6.5	8.5
	Bajo Caplina	261.75	0.1	0.2	0.2	0.2	0.4

Fuente: Autoridad Nacional del Agua (ANA)

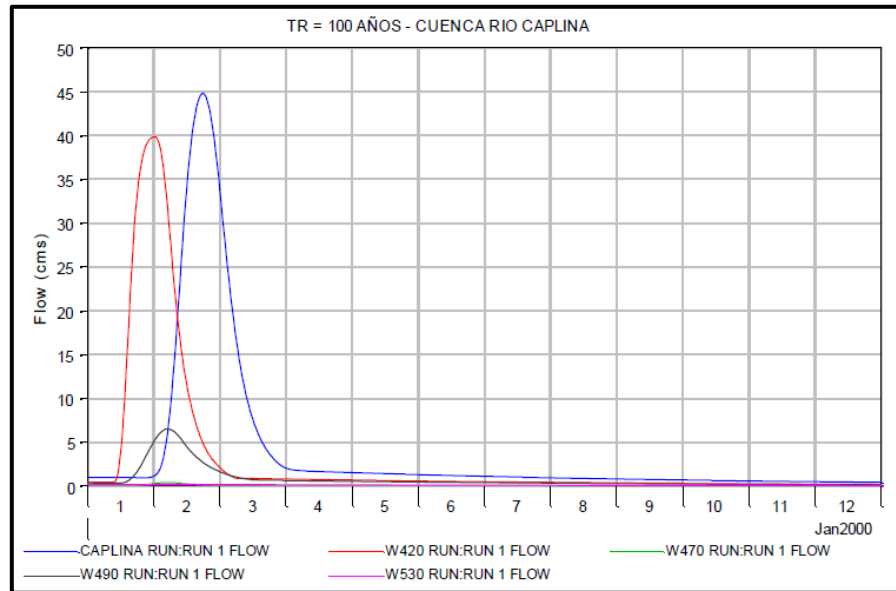
En la Tabla N° 05 se muestra los resultados del Hidrograma de salida de la cuenca completa del río Caplina; Tabla N° 06 se muestra los resultados de los caudales máximos para los diferentes periodos de retorno de 25, 50,

75, 100 y 200 años para cada subcuenca y en la Figura N° 07, 08 y 09 se presentan los hidrogramas de salida del modelamiento.



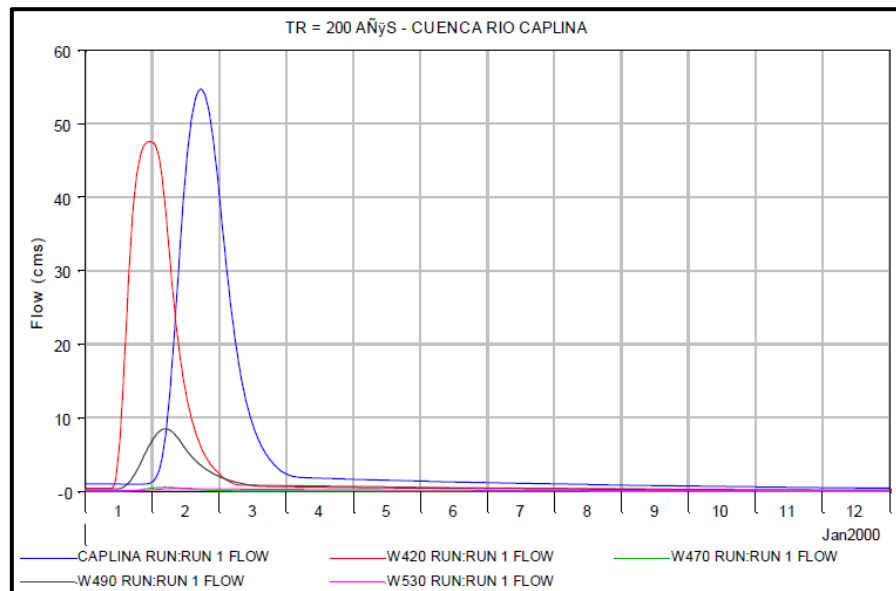
Fuente: Autoridad Nacional del Agua (ANA)

Figura N° 07: Hidrograma para un periodo de retorno de 50 años.



Fuente: Autoridad Nacional del Agua (ANA)

Figura N° 08: Hidrograma para un periodo de retorno de 100 años.



Fuente: Autoridad Nacional del Agua (ANA)

Figura N° 09: Hidrograma para un periodo de retorno de 200 años.

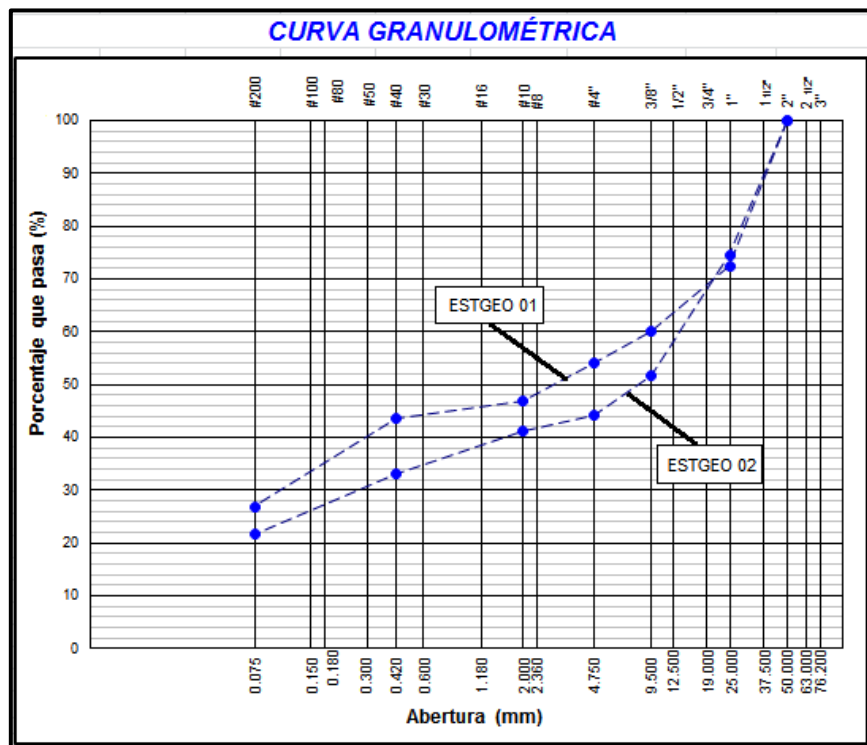
3.5. MECÁNICA DE SUELOS

Para realizar el estudio se ha tomado muestras de la matriz del material depositado en la parte baja del río ubicada ESTGEO 01 en las coordenadas 368926.84E 8004705.72N y ESTGEO 02 en las coordenadas 368909.88E 8004674.74N. Estas muestras se han llevado a laboratorio para realizar el análisis granulométrico y la determinación de los límites de atterberg y ensayos de peso específico, con la finalidad de poder relacionar dicho material con las muestras tipo que presenta el autor O'Brien & Julien (1985), las muestras tipo fueron recolectadas de depósitos naturales de flujos de lodo en Colorado Rocky Mountain cerca de las ciudades de Aspen y Glenwood Springs, USA presentadas en el capítulo IV tabla N° 11.

Los resultados obtenidos a partir de los ensayos de laboratorio son presentados en la tabla N° 07, que resumen características de las muestras donde indican una baja plasticidad, considerado un suelo GM (Gravas limosas, mezcla grava- arena-limo) según la Clasificación de Suelos Unificados (SUCS).

Tabla N° 07: Resultado de granulometría, límites de atterberg y clasificación SUCS.

Muestra	Diametro (d)		Límites de Atterberg			Clasificación según SUCS
	d<N° 200	d<N°200	% LL	%LP	%IP	
ESTGEO 01	73.07	26.93	NP	NP	NP	GM
ESTGEO 02	78.31	21.69	NP	NP	NP	GM



Fuente: propia

Figura N° 10: Granulometría de las muestras recolectadas.

ESTGEO 01: Material compuesto predominantemente de arenas y gravas mal gradadas, con limo y arcillas de coloración griz, la grava es de formas redondeadas y textura lisa con una granulometría que corresponde a un suelo GM según SUCS el material fino no presenta LL Y LP. El porcentaje del material que pasa por la malla N° 200 es 26.93%.

ESTGEO 02: Material compuesto predominantemente de arenas con poca gravas, limo y arcilla de coloración beige ligeramente grisáceo, la grava es de formas redondeadas y de textura lisa, con una granulometría que corresponde a un suelo GM según SUCS el material fino no presenta LL Y LP. El porcentaje del material que pasa por la malla N° 200 es 21.69%.

3.6. GEODINÁMICA

El aspecto tectónico ha jugado un papel importante en el modelamiento de muchas áreas en la región de Tacna, muchos de estos eventos acompañados de fuertes cambios climático, han modelado en sobremanera el relieve donde se han asentado las Asociaciones de viviendas al margen del área de estudio, asimismo los agentes erosivos como el agua, sol, la gravedad, viento y agentes químicos como sales y sulfatos que degradan muchas de las rocas blandas y sedimentos cementados por sales disminuyen las propiedades físicas de las rocas blandas.

Además de otros factores independientes de la geodinámica como son factor litológico, estratigráfico, tectónico, topográfico, climatológico, hidrológico y antrópicos, son los siguientes:

- **Procesos de Erosión.-** Los factores naturales que inciden en la ocurrencia del fenómeno de erosión de ladera en nuestra zona de estudio, son los climáticos (precipitaciones pluviales en menor medida para nuestro estudio, estacionales, escorrentía superficial de las aguas a través de cursos que disectan las laderas adyacentes a su cauce, terrenos en declive y planos principalmente la zona de acceso a nuestro estudio); pendiente natural de las laderas, gravedad, factores geológicos (litológicos o estructurales), etc.

Los factores antes mencionados actúan durante los procesos erosivos, y su producción son las manifestaciones de la erosión laminar, erosión eólica, erosión fluvial y erosión en cárcavas.

La erosión fluvial es producida en las quebradas por donde discurren los ríos Caplina y Uchusuma, durante los ingresos esporádicos en especial durante la ocurrencia de los Fenómenos del Niño. Dichos ingresos originan erosión en los flancos de los cauces de las quebradas y producen erosión lineal en los

flancos de las quebradas y ocasionan el crecimiento lateral, conjuntamente produce un desgaste vertical en su base cortando las rocas sedimentarias de la Formación Millo, del depósito aluvial antiguo y el cono aluvial profundizando su cauce, provocando derrumbes. Debido a la naturaleza deleznable de las formaciones geológicas antes mencionadas, el clima, han contribuido a acelerar el proceso erosivo contribuyendo y aportando material de arrastre hacia los cauces constituido por gravas, arenas y limos con presencia de cantos rodados y bloques.

La erosión eólica donde el viento juega un papel preponderante en el modelado de la superficie terrestre y contribuyen en forma directa a la formación del relieve actual. En nuestra área de estudio la erosión eólica es muy activa y actúa con mucha eficiencia en las rocas sedimentarias de la Formación Millo y en depósitos de aluviales antiguos.

La erosión ocasionada por las precipitaciones pluviales donde el agua es uno de los principales elementos que intervienen en el proceso del modelado del relieve, pero en nuestro caso este proceso erosivo es esporádico contribuyendo con garuas en los meses de invierno.

- **Procesos de Deposición.-** Los procesos de deposición en nuestra zona de estudio datan del Mioceno y Plioceno, los procesos sedimentarios provocaron la deposición de materiales sobre la superficie terrestre (Formación Huaylillas).

Durante el Pleistoceno se produjo las crisis climáticas que originaron la deposición de sedimentos provenientes de la Cordillera. Estos sedimentos se depositaron en la Pampa Costanera.

Las quebradas depositan materiales en bancos, los depósitos de coluviales constituyen otro tipo de deposición mecánica, son materiales heterogéneos transportados y acumulados por la acción de la gravedad al pie de los taludes, escarpas y laderas.

En la actualidad los procesos activos de deposición de los depósitos aluviales están relacionados con la presencia del Fenómeno de El Niño. Se puede observar que la quebrada por donde discurren los ríos Caplina y Uchusuma ha sido la que ha mostrado una gran actividad, ya que en las imágenes satelitales se observa los sedimentos ha interrumpido a los depósitos que alguna vez arrastraron las quebradas.

CAPÍTULO IV

4. METODOLOGÍA

4.1. DESCRIPCIÓN DEL MODELO

El modelo bidimensional de diferencias finitas FLO-2D (O'Brien) simula flujo de fluidos no-newtonianos, como flujos de huaycos y aludes torrenciales en ríos y quebradas, y en conos de deyección. El modelo permite simular flujo en topografías complejas, tales como planicies de inundación y áreas urbanizadas, así como el intercambio de fluido entre ríos y la planicie de inundación. Puede modelarse flujo de agua, flujo hiperconcentrados de sedimentos, flujo de huaycos y alud torrencial (flujo de barro). Como datos de entrada se requiere la topografía digital del terreno, la geometría del río, valores estimados de la rugosidad del río y de la planicie de inundación, hidrogramas de entrada (líquido y sólido), precipitación y propiedades reológicas de la mezcla agua-sedimento.

4.2. ECUACIONES GENERALES

Los flujos hiperconcentrados de sedimentos envuelven la interacción compleja de los procesos de fluidos y sedimentos incluyendo la turbulencia, la tensión viscosa, el intercambio de momento de las partículas-fluido sedimento y la colisión de las partículas. La cohesión de los sedimentos finos controla el comportamiento no newtoniano de la matriz de fluido y contribuye a la tensión y esfuerzo de cedencia (yield stress) τ_y que debe ser excedida para que se inicie el movimiento.

Para grandes tasas de corte (velocidad de deformación du/dy) como puede ocurrir en abanicos aluviales (10 s^{-1} a 50 s^{-1}), se pueden generar tensiones turbulentas. En los flujos turbulentos pueden producirse la tensión de corte dispersiva, a partir de la colisión de las partículas de sedimento que ocurre cuando partículas de sedimento no cohesivo dominan el flujo y el porcentaje de sedimentos finos cohesivos (limos y arcillas) es pequeño.

Cuando la concentración de sedimentos finos crece, la turbulencia de flujo y el impacto de las partículas cesan y el flujo

tendera a ser laminar. Como resultado de la dramática variación de la concentración en un evento de crecida dado, las tensiones de corte viscosa y turbulenta pueden dominar alternativamente originando flujos pulsantes.

El modelo FLO 2D utilizado rutea los flujos de barro como un continuo pronosticando el movimiento del fluido viscoso como función de la concentración de sedimentos utilizando un modelo cuadrático Reológico para predecir las tensiones de corte y viscosas que describe un continuo de regímenes de flujo desde el flujo viscoso al turbulento/dispersivo.

Las ecuaciones gobernantes incluidas en el desarrollo del modelo FLO 2D de acuerdo a O'Brien and Julien (1985) se presenta a continuación:

a) Ecuación de continuidad

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial[uh]}{\partial x} = \frac{\partial[vh]}{\partial y} = i \quad (1)$$

Donde h es la profundidad hidráulica, u y v son las componentes de la velocidad promediada en las direcciones x e y , i es la intensidad de la lluvia efectiva y t es el tiempo.

b) Ecuación de movimiento

$$S_{fx} = S_{ox} - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{u}{g} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{v}{g} \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{1}{g} \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2)$$

$$S_{fy} = S_{oy} - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{u}{g} \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} \quad (3)$$

Donde S_{ox} , S_{oy} son las componentes de la pendiente de fondo en las direcciones (x, y) y g es la aceleración de la gravedad, despreciando los últimos tres términos en las ecuaciones de arriba se obtiene la aproximación de las ecuaciones de la onda difusiva. Mientras que despreciando el término del gradiente de presiones se puede derivar la ecuación de la onda

c) **Modelo Reológico** (O'Brien & Julien , 1985)

Expresa la tensión de corte τ en flujos hiperconcentrados de sedimentos como la suma de cinco componentes: la tensión de corte de cedencia τ_c , tensión de corte de Mohr-Coulomb τ_{mc} , la tensión de corte viscosa τ_v , la tensión de corte turbulenta τ_t y la tensión de corte dispersiva τ_d :

$$\tau = \tau_c + \tau_{mc} + \tau_v + \tau_t + \tau_d \quad (4)$$

Escribiendo la ecuación anterior en términos de la tasa de corte du/dx o gradiente de velocidad con $\tau_y = \tau_c + \tau_{mc}$, se obtiene la ecuación cuadrática reológica:

$$\tau = \tau_y + \eta \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) + C \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \quad (5)$$

η Es la viscosidad dinámica y C denota el coeficiente de corte inercial que depende de la densidad de la mezcla ρ_m , de la longitud de mezcla de Prandtl l , del tamaño del sedimento d_s y de una función de la concentración volumétrica de sedimentos Cv :

$$C = \rho_m l^2 + f(\rho_m, C_v) d_s^2 \quad (6)$$

d) Bagnold (1954) dio la definición de la relación funcional

$f(\rho_m, C_v)$ como

$$f(\rho_m, C_v) = a_i \rho_m \left(\left(\frac{C_*}{C_v} \right)^{1/3} - 1 \right) \quad (7)$$

Donde a_i es un coeficiente empírico igual a 0,01 y C_* es la máxima concentración estática en volumen para las partículas de sedimento.

La ecuación (4) puede ser integrada en la profundidad y reescrita en la forma de gradiente adimensional:

$$S_f = S_y + S_v + S_{td} = \frac{\tau_y}{\gamma_m h} - \frac{K n u}{8 \gamma_m h^2} + \frac{n^2 u^2}{h^{4/3}} \quad (8)$$

Donde S_y es el gradiente de cedencia, S_v es el gradiente viscoso, S_{td} es el gradiente dispersivo turbulento, γ_m es el peso específico de la mezcla de sedimentos, K es el parámetro de resistencia, y n es el valor de rugosidad del suelo Manning equivalente que pueden ver en la tabla N° 08 y 09.

Tabla N° 08: Valores de rugosidad del suelo.

Valores de rugosidad n Manning para Flujos Densos	
Superficie	n-valor
Césped denso	0.17 - 0.80
hierba densa, vegetación densa	0.17 - 0.48
Arbustos y basura forestal, pasto	0.30 - 0.40
suelo cubierto de hierba media	0.20 - 0.40
suelo cubierto de hierba pobre en superficie áspera	0.20 - 0.30
Hierba de pradera corta	0.10 - 0.20
Vegetación escasa	0.05 - 0.13
Tierra de variedad escasa con escombros	0.09 - 0.34
Campos arados o cultivados sin residuo de hierbas	0.008 - 0.012
Arado de Cincel de cultivo convencional	0.06 - 0.22
Tierra abierta con escombros	0.10 - 0.20
Flujo Playo en asfalto o hormigón	0.10 - 0.15
Tierra abierta, ningunos escombros	0.04 - 0.10
Asfalto o hormigón	0.02 - 0.05

Fuente: (Flo-2D Users Manual, 2009)

Tabla N° 09: Parámetros de resistencias para flujo laminar.

Parámetros de resistencias de flujo laminar	
Superficie	Rango de K
Concreto/asfalto	24-108
Arena escasa	30-120
Superficie gradual	90-400
Arcilla escasa - suelo de marga erosionada	100-500
Poca Vegetación	1000-4000
Hierba corta de pradera	3000-10000
Césped de hierba añil	7000-50000

La tensión de corte y la viscosidad varían principalmente con la concentración de sedimentos y pueden ser expresados en una ecuación semiempírica como:

$$\tau_y = \alpha_1 e^{\beta_1 C}, \eta = \alpha_2 e^{\beta_2 C} \quad (9)$$

$$n = n_t + n_d = n_t + 0,0538 n_t e^{6,0896 C} \quad (10)$$

Donde n_t es el coeficiente de Manning turbulento y n_d es el valor de manning dispersivo. En las expresiones de la tensión de corte y viscosidad en la ecuación (9) como funciones de la concentración de sedimentos en volumen (de limos, arcillas y en algunos casos arenas finas), los parámetros α_1 , α_2 , β_1 , β_2 son coeficientes empíricos determinados en laboratorio.

(O'Brien & Julien , 1985) Resumieron los resultados de investigaciones previas que se presentan en la tabla N° 10.

Tabla N° 10: Tensión de corte y viscosidad como función de la concentración de sedimentos.

Fuente	$\tau_y = \alpha e^{\beta C_v}$		$\eta_y = \alpha e^{\beta C_v}$	
	α_1	β_1	α_2	β_2
Datos de campo				
Aspen Pit 1	0,181	25,7	0,0360	22,1
Aspen Pit 2	2,72	10,4	0,538	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 fill Source	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	6,20
Glenwood 3	0,000707	29,8	0,00632	19,9
Glenwood 4	0,00172	29,5	0,000602	33,1
Relaciones disponibles en la literatura				
Iida (1938)*	-	-	0,0000373	36,6
Dai et al. (1980)	2,60	17,48	0,00750	14,39
Kang and Zhang (1980)	1,75	7,82	0,0405	8,29
Qian et al. (1980)	0,00136	21,2	-	-
	0,050	15,48	-	-
Chien and Ma (1958)	0,0588	19,1 - 32,7	-	-
Fei (1981)	0,166	25,6	-	-
	0,00470	22,2	-	-

Fuente: (Flo-2D Users Manual, 2009)

La viscosidad de la matriz fluida es también una función del porcentaje y del tipo de limos y arcilla y de la temperatura del fluido. Los flujos de barro muy viscoso tienen altas concentraciones del sedimento y en correspondencia. Altas tensiones de cedencia y pueden dar lugar a flujo laminar aunque los flujos laminares en naturaleza son extremadamente raros. Los flujos menos viscosos (crecidas de barro) son siempre turbulentos.

Los parámetros de muestras de flujo de lodos en la tabla N° 11 presentan un rango de las características de los muestras tipo que realizaron en laboratorio que fueron recolectadas de depósitos naturales de flujos de lodo en Colorado Rocky Mountain cerca de las ciudades de Aspen y Glenwood Springs.

Tabla N° 11: Propiedades de las matrices de flujo de lodos (solo limo y arcilla).

Muestras Tipo	Distribucion del tamaño de sedimentos				Limite Liquido	Indice Plastico
	Arcilla (%)	D16 (mm)	D50 (mm)	D84 (mm)		
Glenwood original	4,8	0,01	0,034	0,062	-	-
Glenwood sample 1	6,8	0,009	0,023	0,050	-	-
Glenwood sample 2	3,0	0,016	0,035	0,061	-	-
Glenwood sample 3	4,8	0,011	0,025	0,053	-	-
Glenwood sample 4	7,6	0,001	0,018	0,032	-	-
Aspen Pit 1	31,3	0,001	0,011	0,032	0,32	0,11
Aspen natural soil	27,0	0,001	0,012	0,028	0,25	0,06
Aspen mine fill	27,8	0,001	0,013	0,030	0,24	0,06
Aspen natural soil source	31,6	0,001	0,016	0,039	-	-
Aspen mine fill source	25,2	0,001	0,018	0,061	-	-

Fuente: (Flo-2D Users Manual, 2009)

El modelo FLO 2D es un modelo que preserva la continuidad del agua y el sedimento en el traslado de una crecida o flujo de barro de entrada sobre un abanico aluvial o una planicie representada por una grilla de elementos cuadrados y permite agregar detalles a la simulación mediante una serie de controles para varios componentes como calles, alcantarillas, transporte de sedimentos y otros.

El flujo en el cauce es unidimensional, ya que sólo cuenta con una sola componente, este tipo de ríos son característicos de la costa por poseer alta pendiente, mientras que el flujo en planicie, cuando la capacidad del cauce es excedida, es bidimensional.

4.3. ALGORITMO DEL FLO 2D

El modelo usa un esquema centrado de diferencias finitas explícito para la solución de las ecuaciones diferenciales de movimiento. La topografía de la superficie se discretiza en una malla formada por celdas o elementos cuadrados de tamaño uniforme para toda el área de estudio y a cada elemento se le asigna una posición en la malla, una elevación o cota de terreno, un coeficiente de rugosidad (n de Manning), factores de reducción del flujo que atraviesa la celda para simular bloqueo por edificaciones.

El procedimiento computacional para flujos en terrenos involucra el cálculo de la descarga a través de cada contorno en las 8 potenciales direcciones del flujo y se inicia con una estimación lineal del tirante del flujo en cada contorno del elemento de malla. El

estimado del tirante del flujo en el contorno es un promedio de las alturas del flujo en los elementos de las 2 mallas, que direccionará los caudales en una de las 8 direcciones.

Para una celda y un tiempo dados, se calcula el caudal neto que entra y sale por cada uno de los lados de dicho elemento. El cambio en el volumen resultante se distribuye uniformemente en el área disponible del elemento. Los pasos de tiempo varían según el criterio de estabilidad de Courant, lo que resulta en pasos de tiempo relativamente cortos, (típicamente entre 0,1 y 30 segundos). Esto depende de los hidrogramas de entrada y del tamaño de la malla de cálculo.

En resumen el algoritmo de solución consiste de los siguientes pasos:

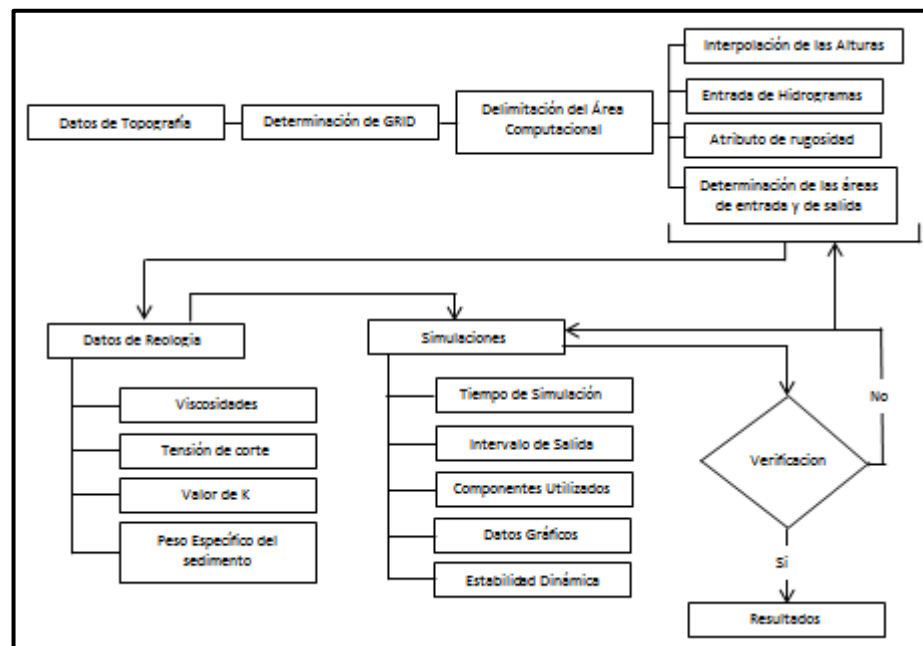
1. Se calcula el promedio de la geometría de flujo, rugosidad y pendiente entre dos elementos de la malla.
2. Se calcula el tirante del flujo “d” para determinar la velocidad a través del contorno de la malla para el siguiente nivel de tiempo (i+1) a partir del nivel de tiempo previo i aplicando una interpolación lineal (el promedio del tirante del flujo entre dos elementos de malla).

3. El primer estimado de la velocidad se calcula aplicando la ecuación de onda difusiva.

La única variable desconocida en la ecuación de onda difusiva es la velocidad. Este es para el caso de flujo sobre el terreno, río o en calles.

4. La velocidad estimada por la onda difusiva para el actual nivel de tiempo se aplica como dato inicial en la solución de Newton-Raphson para determinar la velocidad bajo la ecuación de la onda dinámica completa. Es necesario precisar que para flujos de sedimentos hiperconcentrados, tales como flujos de lodo y flujos de escombros (huaycos), el cálculo de la velocidad incluye los términos de la viscosidad adicional y el esfuerzo de cadencia (τ).
5. La descarga Q a través del contorno es calculada multiplicando la velocidad por el área de la sección transversal del flujo. Para flujos sobre el terreno, el ancho del flujo es ajustado por factores de reducción de ancho.
6. Se suman para cada nivel de tiempo la descarga incremental a través de los 8 contornos, y el cambio en el volumen (descarga neta por intervalo de tiempo) es distribuido sobre el área de almacenamiento disponible dentro de la malla o elemento de canal para determinar un aumento incremental en el tirante del flujo.

7. El criterio de estabilidad numérica es chequeado para el nuevo tirante del flujo del elemento de malla. Si no se cumple el criterio
8. de estabilidad, el tiempo de simulación se reinicia en el nivel de tiempo previo, y se reduce el intervalo de tiempo, se descartan los cálculos de los niveles de tiempo previos y el cálculo de la velocidad se reinicia nuevamente.
9. La simulación prosigue incrementándose el nivel de tiempo hasta que el criterio de estabilidad sea excedida.



Fuente: Manual USER Flo 2D

Figura N° 11: Diagrama de flujo del modelo FLO 2D.

4.4. LA IMPORTANCIA DE LA CONSERVACIÓN DE VOLUMEN

La conservación del volumen total y la conservación del volumen del río del modelo se reporta en el archivo SUMMARY.OUT. La conservación del volumen es un indicador de la estabilidad numérica y la precisión. Los volúmenes del flujo de entrada y de salida, el cambio en el almacenamiento, y las pérdidas por infiltración y evaporación del dominio computacional de mallas son sumados al final de cada nivel de tiempo. La conservación de volumen es la diferencia entre el volumen total del flujo de entrada y salida más el almacenamiento y las pérdidas. Los resultados de la conservación del volumen son reportados en los archivos de salida o en pantalla para niveles de tiempo especificados.

Los errores de datos, la inestabilidad numérica, las técnicas de simulación inapropiadas o inconsistentes causarán una pérdida de la conservación del volumen. Por ejemplo, el forzamiento del flujo subcrítico o supercrítico con valores de n inadecuados podría afectar la conservación del volumen. La conservación del volumen se puede utilizar para depurar el modelo y discernir si la falla del modelo ocurre en los componentes del río o de la planicie inundable. Cualquier

simulación que no conserve el volumen debe ser verificada. Se remarca que la conservación del volumen en cualquier simulación de avenida no es precisa. Mientras que algunos errores numéricos son introducidos por redondeo numérico, aproximaciones o interpolaciones (tales como tablas de descargas), el volumen debe ser conservado dentro de una fracción de un metro cúbico. El usuario debe decidir sobre un nivel aceptable de error en la conservación del volumen. Generalmente, la conservación del volumen dentro de 0.001 por ciento o menos será suficientemente precisa.

Es importante remarcar que se debe revisar los archivos de salida SUMMARY.OUT para determinar si se cumple la conservación de volumen. Si la simulación no conserva el volumen, el usuario debe identificar la localización del dato problema, desactivando varios componentes y corriendo el modelo con un solo componente (tal como calle o ríos) activado.

CAPÍTULO V

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

5.1. CONFIGURACIÓN DEL MODELO

El modelo de simulación implementado se desarrolla sobre el río Seco en un tramo de 1,58 km. Los aportes de agua y sedimentos son considerados de los afluentes y quebradas principales, entre el río Caplina a partir de la bocatoma Caliente.

Las condiciones de entrada corresponden a los hidrogramas calculados por la Autoridad Nacional del Agua del estudio hidrológico de máximas avenidas de la cuenca Caplina donde realizó un análisis de precipitaciones máximas de 24 horas con periodos de retorno de 50, 100 y 200 años que son presentados en las figuras N° 07, 08 y 09 en el capítulo III.

En cada área o región de flujo de lodos y escombros las características geológicas y condiciones del suelo tienen características reológicas únicas, por lo tanto es necesario la recolección de muestras

del material dejado por el paso del río, para determinar sus características específicas.

Según O'Brien (1985) la experiencia muestra que cuando se realizan las investigaciones reológicas de laboratorio para el sitio específico de un proyecto, los datos se encuentran dentro del rango de los datos recogidos por todo el mundo y compilados en la Tabla N° 11 del capítulo IV.

Se ha realizado ensayos de granulometría, límites de atterberg, peso específico y demás ensayos, para realizar un análisis del flujo de lodos y escombros, y estimar las características reológicas en función de la concentración de sedimentos comparando con las características de las muestras tipo.

Los parámetros reológicos utilizados para las simulaciones se establecieron en función a la aproximación con los valores comparados con las muestras tipo, en nuestro caso las muestras recolectadas en campo y llevadas a laboratorio, tiene como resultado un contenido promedio de 23% de material fino, no presenta límite líquido, límite plástico por lo tanto tampoco presenta índice de plasticidad, tiene peso

específico de 2,65 promedio y según la clasificación SUCS es un suelo GM (Gravas limosas, mezcla grava- arena-limo). Por lo tanto la muestra se asemeja a un material de la muestra tipo de aspen mine fill source, los parámetros reológicos utilizados serán los siguientes:

$$\tau_y = 0,291e^{14,3Cv}$$

$$\eta_y = 0,0002e^{33,1Cv}$$

Para eventos de flujo de lodos y escombros, se estima como primera aproximación una distribución de Cv en el tiempo partiendo de un valor cercano a 0.22 y aumentado gradualmente hasta 0.25 o 0.45 dependiendo del tipo de sedimento de la cuenca. El pico de Cv debe ubicarse unos minutos antes del pico del hidrograma líquido. Esta metodología descrita es una práctica común en estos trabajos (Castillo, 2006).

Características de entrada: los valores de rugosidad del suelo "n" de manning son extraídos de la tabla N° 10 y establecidos son de la siguiente manera:

Valores de rugosidad	Área específica
0,020	Tramo natural del lecho
0,015	Rugosidad del terreno
0,010	Estructuras de concreto

Se sume una resistencia al flujo laminar igual 200. Según la tabla N° 11 presentada por el autor en su manual considerando características según el tipo de terreno.

La topografía utilizada para este análisis será la del plano del estudio hidrodinámico con el modelo HEC-RAS elaborado por Tisnado, 2013 tramo aproximadamente de 1,58 km.

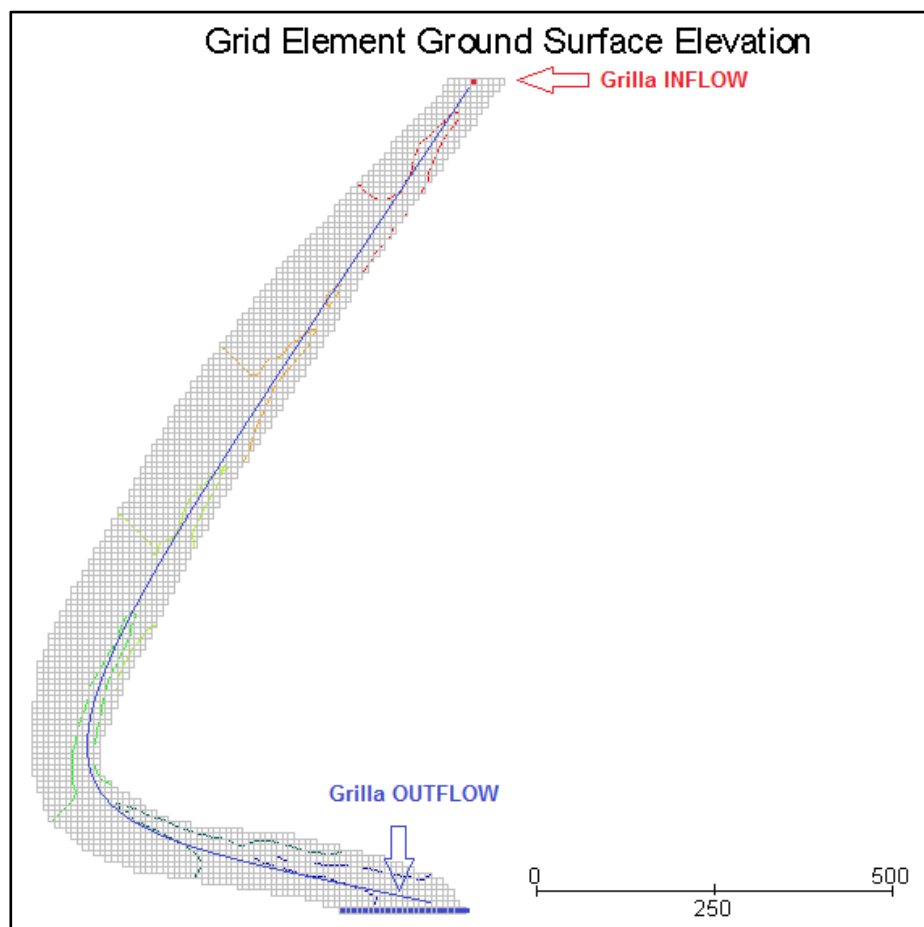


Figura N° 12: Malla de Grilla 8 x 8 m tramo rio Seco.

Para la simulación se generó una malla de cálculo de 2018 celdas de 8 m x 8 m cada una ver figura N° 12. En todas las simulaciones numéricas el paso de integración temporal se adoptó igual a $dt=0,1$ segundos analizándose un tiempo de simulación de 24 horas que permite la corrida completa de los hidrogramas de entrada.

Es importante resaltar que el modelo considera al fluido homogéneo, el cual no hace distinción de los diferentes tamaños de los materiales transportados.

5.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA DIFERENTES ESCENARIOS

Para analizar las simulaciones de flujos de agua del tramo a estudiar del río Seco realizaremos simulaciones en dos partes: primera parte realizaremos simulaciones para un escenario de aguas claras ingresaremos el hidrograma presentado en la figura N° 07 capítulo III, hidrograma que corresponde a un periodo de retorno de 50 años. En la segunda parte realizaremos simulaciones con el mismo hidrograma pero con valores de concentración volumétrica de sedimentos C_v

diferentes, partiendo de un valor inicial que será variable de 22% hasta 25 y 30%.

Primera parte: Análisis para $Q_p=35.019 \text{ m}^3/\text{s}$ (Aguas claras)

Se analizara el estudio de la avenida del rio Seco para un caudal líquido máximo de $35.019 \text{ m}^3/\text{s}$ tal como se presenta en el hidrograma para un periodo de retorno de 50 años los valores de rugosidad manning utilizados serán los siguientes:

Valores de rugosidad	Área especifica
0,020	Tramo natural del lecho
0,015	Rugosidad del terreno
0,010	Estructuras de concreto

Los resultados con la modelación con el FLO 2D da los siguientes resultados:

Flujo	Agua (m^3)	Agua con sedimentos(m^3)
Hidrograma de entrada (INFLOW)	17227.04	---
Almacenamiento dentro del área de análisis	110576.97	---
Flujo fuera del área de simulación	127804.01	---

El modelo simula un área inundada de: 25216.00 m^2 .

Las profundidades máximas varían de 2 a 4,59 m. con velocidades que llegan hasta 16.0 m/s como se muestra en la Figura N° 13.

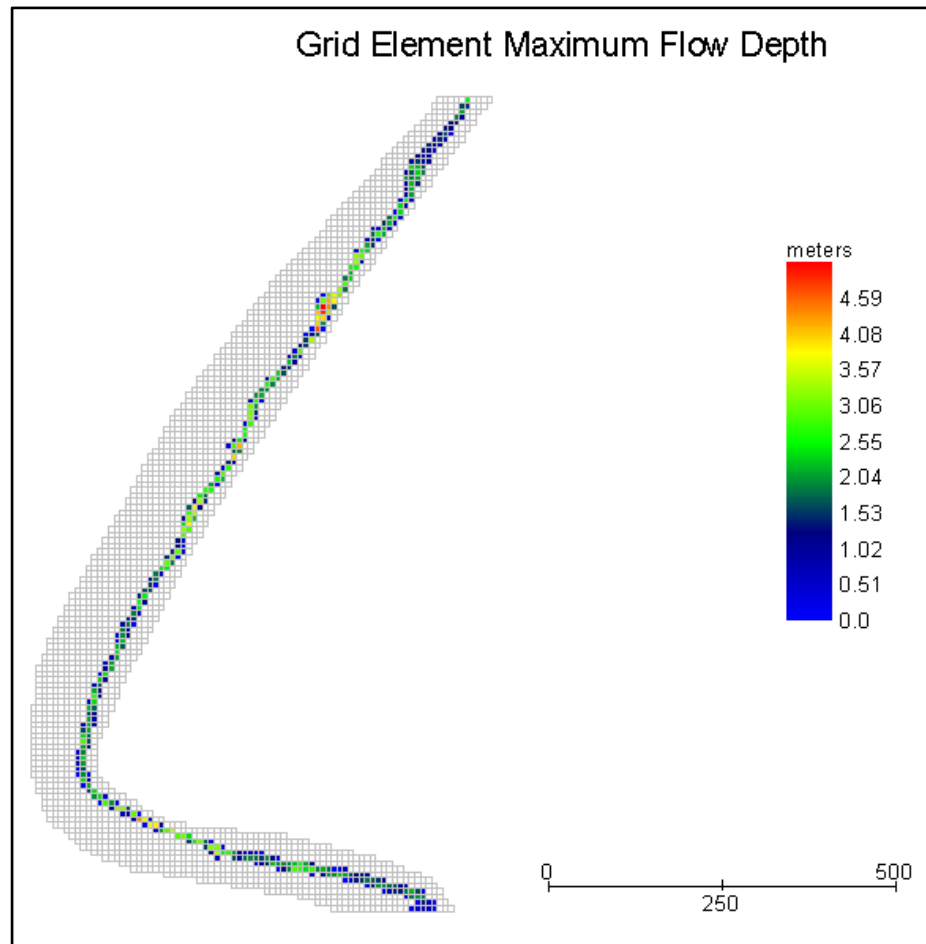


Figura N° 13: Tirantes máximos Q_p : 35.019 m³/s (Aguas claras).

Segunda parte: Análisis para $Q_{max}=35.019 \text{ m}^3/\text{s}$ (C_v 22% a 30%)

Primer escenario (C_v 22% a 25%). Se analizara el estudio de la avenida del rio Seco para un caudal líquido máximo de $35.019 \text{ m}^3/\text{s}$ tal como se presenta en dicho hidrograma para un periodo de retorno de

50 años los valores de rugosidad utilizados serán los mismos que se utilizamos en la simulación anterior, con una concentración volumétrica de sedimentos (C_v) inicial de 22% hasta un valor máximo de 25% para luego reducir hasta 22% que es el valor final.

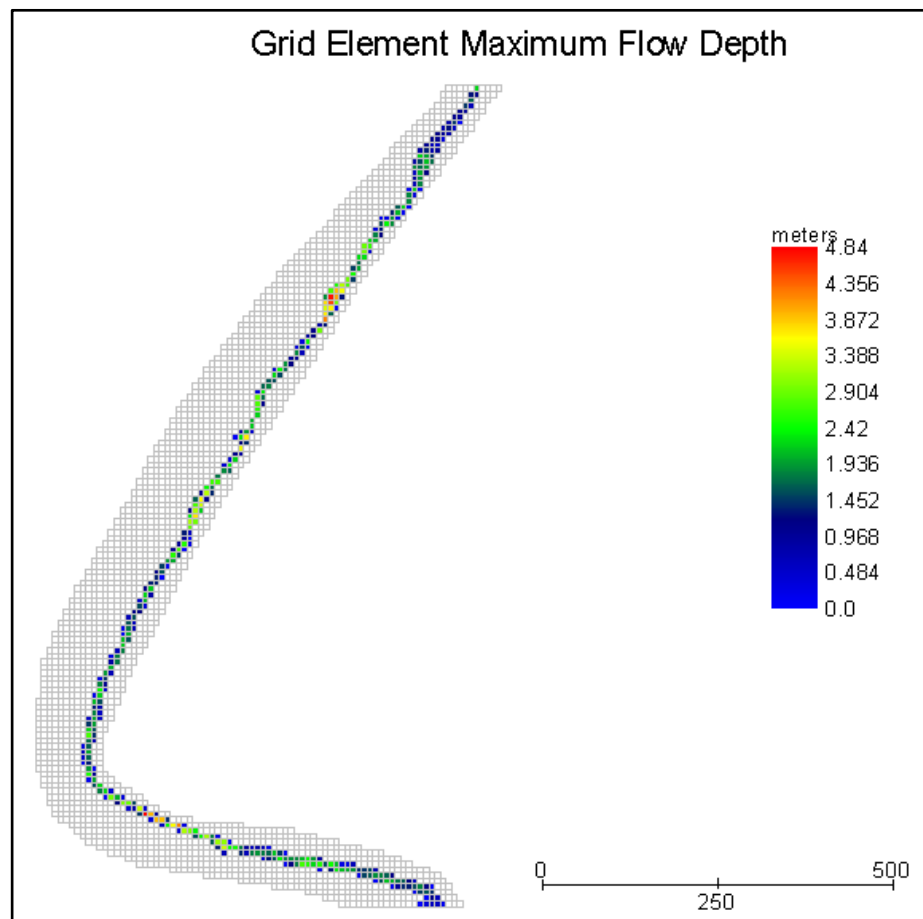


Figura N° 14: Tirantes máximos Q_p : 35.019 m³/s (C_v 22% a 25%).

Los resultados con la modelación con el FLO 2D da los siguientes resultados:

Flujo	Agua (m ³)	Agua con sedimentos(m ³)
Hidrograma de entrada (INFLOW)	15181.08	19465.06
Almacenamiento dentro del área de análisis	112626.24	145459.03
Flujo fuera del área de simulación	127807.31	164924.09

El modelo simula un área inundada de: 26304.00 m².

Las profundidades máximas varían de 2 a 4,84 m. con velocidades que llegan hasta 15.0 m/s como se muestra en la Figura N° 14.

Segundo escenario (Cv 22% a 30%). Se analizara el estudio de la avenida del rio Seco para un caudal líquido máximo de 35.019 m³/s tal como se presenta en dicho hidrograma para un periodo de retorno de 50 años, con una concentración volumétrica de sedimentos (Cv) inicial de 22% hasta un valor máximo de 30% para luego reducir hasta 22% que es el valor final. Los valores de rugosidad utilizados serán los mismos que se utilizaron en la simulación anterior,

Los resultados con la modelación con el FLO 2D da los siguientes resultados:

Flujo	Agua (m ³)	Agua con sedimentos(m ³)
Hidrograma de entrada (INFLOW)	15187.25	19483.41
Almacenamiento dentro del área de análisis	114419.68	152246.59
Flujo fuera del área de simulación	129606.93	171730.00

El modelo simula un área inundada de: 26880.00 m².

Las profundidades máximas varían de 2,5 m a 5,13 m con velocidades que llegan hasta 14.5 m/s como se muestra en la Figura N° 15.

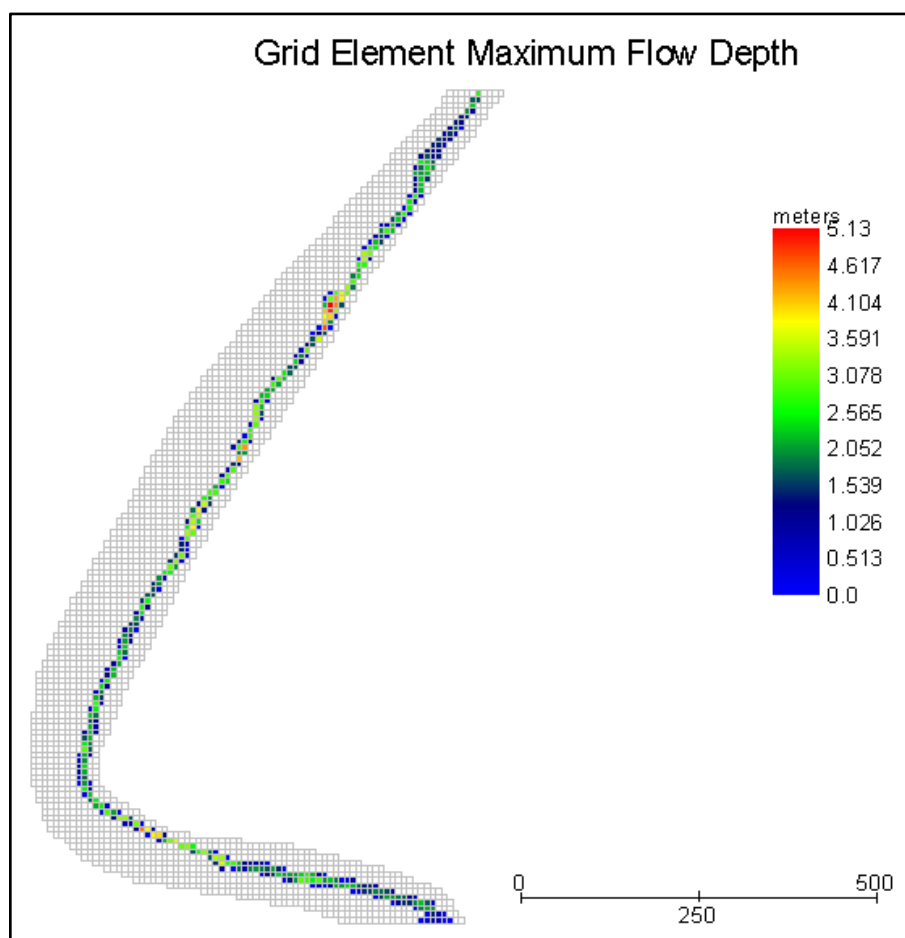


Figura N° 15: Tirantes máximos Q_p : 35.019 m³/s (Cv 22% a 30%).

Las velocidades observadas se encuentran en relación a menor tirante mayor velocidad. Y los valores dan como máximo velocidades hasta 14,5 m/s. Según los resultados obtenidos por el modelo FLO 2D Mapper.

En estos tres escenarios analizados podemos notar que a mayor concentración volumétrica de sedimentos el tirante máximo del flujo aumenta en función de la concentración de sedimentos, también podemos ver que la velocidad máxima de estos escenarios disminuye en función al aumentos de la concentración de sedimentos.

5.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA CALIBRAR EL MODELO CON EVIDENCIAS DE CAMPO

Para calibrar el modelo con evidencias dejadas en campo se puede realizar de dos formas: la primera es realizando un análisis de comparación con el volumen de sedimentos dejado por este tipo de eventos y la segunda forma es haciendo coincidir las marcas dejadas por el paso del río con los resultados de las simulaciones.

En nuestro caso como método de calibración utilizaremos la segunda forma que consiste en hacer coincidir los tirantes estimados a partir de las marcas dejadas por el paso del río con los resultados del modelo. Para ello vamos a definir puntos de control, como primer punto de control vamos a tomar las evidencias que se encuentran en la progresiva 0+400 donde podemos calcular una altura de 2,80 m como

se muestra en la figura N° 16. Como segundo punto de control lo vamos a ubicar en la progresiva 0+900 donde la altura calculada es de 2.05 m ver figura N° 17.



Fuente: Propia

Figura N° 16: Vista de la progresiva 0+400 altura aproximada 2,80 m.



Fuente: Propia

Figura N° 17: Vista de la progresiva 0+900 altura aproximada 2,05 m.

La calibración ajustada de las alturas estimadas dejadas por las marcas vistas en campo, se pueden ver en la figura N° 18. Estos resultados son contrastados con el primer escenario de la parte 2 el cual presenta un mejor ajuste. Donde se aplicó el hidrograma de 50 años de periodo de retorno con caudal máximo de $35.019 \text{ m}^3/\text{s}$ con concentraciones volumétricas de sedimentos de 22% a 25%.

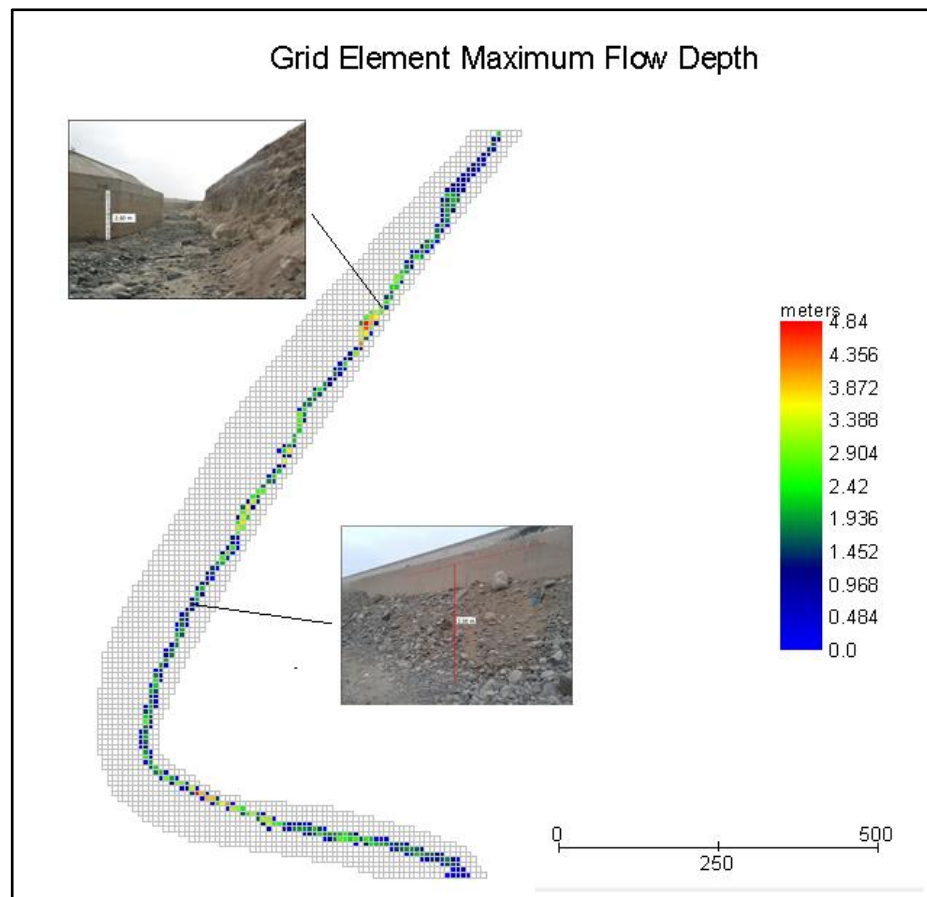


Figura N° 18: Comparación de resultados con evidencias de campo.

En este punto cabe resaltar que el flujo de barros y escombros es muy complejo y este modelo matemático es una aproximación a este tipo de acontecimientos donde podemos aproximar más a los resultados de un evento real.

5.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA FLUJO NEWTONIANO Y NO NEWTONIANO

Las simulaciones que se realizaron en los tres escenarios anteriores presentan diferentes resultados que en esta parte del trabajo a través de un análisis vamos a compararlos y entender sus comportamientos de cada uno.

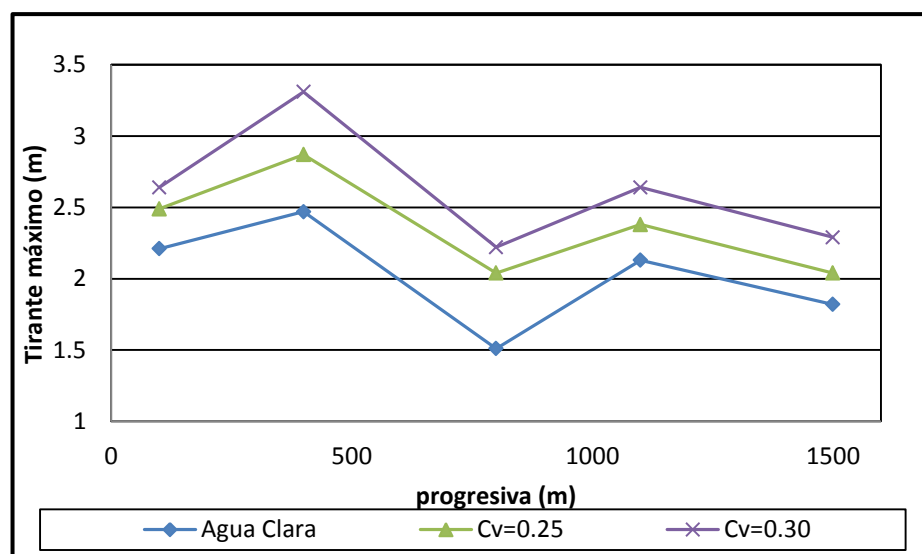


Figura N° 19: Evolución de las tirantes máximas para el río Seco.

Tabla N° 12: velocidades máximas alcanzadas en el tramo del río Seco.

	Velocidad máxima (m/s)
Agua clara	16,0
Cv=0.25	15,0
Cv=0.30	14,5

La figura N° 19 presentan la evolución de los tirantes máximos alcanzados para cada uno de las simulaciones, para poder analizarlos mejor se ha extraído los tirantes máximos de cuatro puntos que se encuentran ubicados en la progresiva 0+100, 0+400, 0+800 y 1+100. Los resultados de las simulaciones efectuados permiten mostrar claramente que la concentración volumétrica de sedimentos ocasiona un cambio notable en las alturas de los tirantes en cada punto.

Podemos afirmar que a mayor concentración de sedimentos mayor será la altura del tirante, por lo tanto la concentración de sedimentos en un factor importante que debemos de tener en cuenta para este tipo de eventos. Otro factor que también podemos analizar es en cuanto a las velocidades máximas alcanzadas donde podemos notar claramente en la tabla N° 12 que a mayor concentración volumétrica de sedimentos menor será la velocidad de sus desplazamientos esto se cumple siempre que sea en mismo hidrograma de entrada y la misma topografía.

5.5. SIMULACIÓN DE FLUJOS EXTREMOS ESTUDIO RIO SECO

En esta parte del trabajo vamos a presentar los resultados de las simulaciones de 100 y 200 años de periodo de retorno, para estas simulaciones vamos a tomar la misma topografía con grillas de 8 x 8, los hidrogramas líquidos corresponden a los presentados en el capítulo III donde los caudales picos 44.8 m³/s y 54.7 m³/s respectivamente, con una variación volumétrica de sedimentos de 22% a 30%, los parámetros reológicos utilizados serán los mismos utilizados anteriormente que corresponde a un suelo de aspen mine fill source, los valores de rugosidad del suelo y resistencia laminar al flujo serán también los mismos que se han utilizado en los escenarios anteriores.

Primer escenario: Qp 44.8 m³/s, Cv de 22 a 30%.

Los resultados con la modelación con el FLO 2D da los siguientes resultados:

Flujo	Agua (m ³)	Agua con sedimentos(m ³)
Hidrograma de entrada (INFLOW)	18462.27	24303.57
Almacenamiento dentro del área de análisis	237148.97	315989.86
Flujo fuera del área de simulación	255611.23	340293.43

El modelo simula un área inundada de: 29632.00 m².

Las profundidades máximas varían de 3,0 m a 5,41 m con velocidades que llegan hasta 18,0 m/s como se muestra en la Figura N° 20.

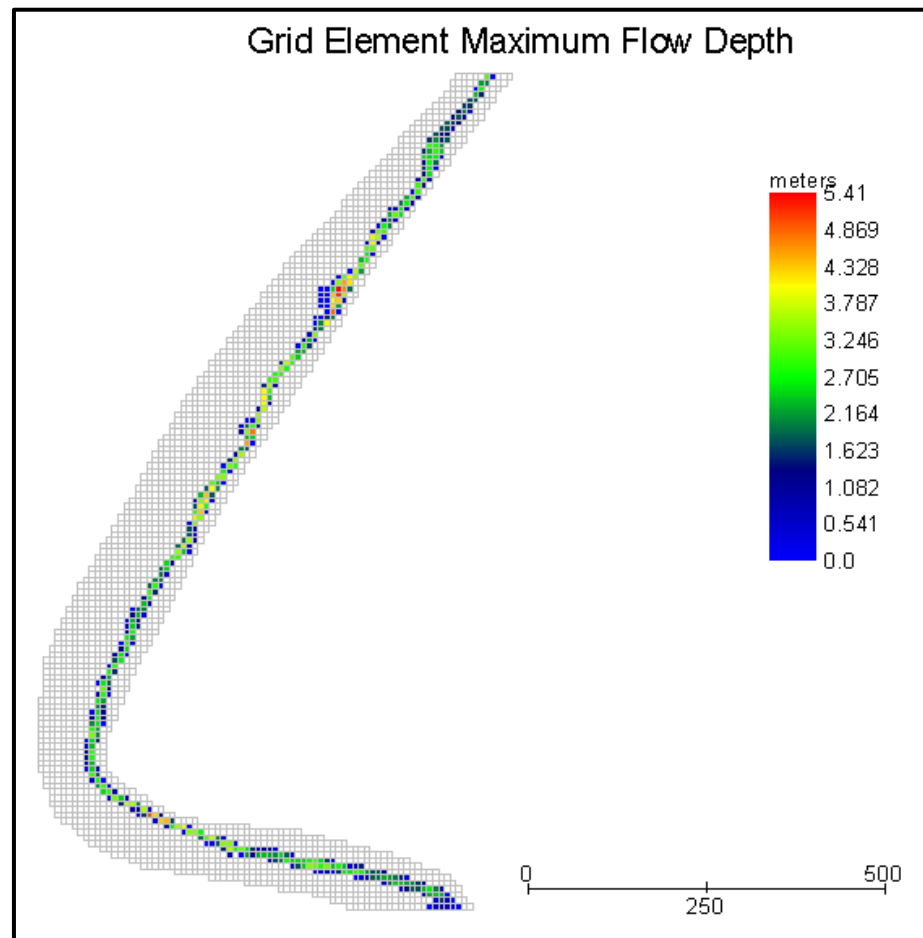


Figura N° 20: Tirantes máximos Q_p : 44.8 m³/s (Cv 22% a 30%).

Segundo escenario: Q_p 54.7 m³/s, Cv de 22 a 30%.

Los resultados con la modelación con el FLO 2D da los siguientes resultados:

Flujo	Agua (m ³)	Agua con sedimentos(m ³)
Hidrograma de entrada (INFLOW)	18462.27	24303.57
Almacenamiento dentro del área de análisis	237148.97	315989.86
Flujo fuera del área de simulación	255611.23	340293.43

El modelo simula un área inundada de: 29632.00 m².

Las profundidades máximas varían de 3 m a 5,75 m con velocidades que llegan hasta 18,0 m/s como se muestra en la Figura N° 21.

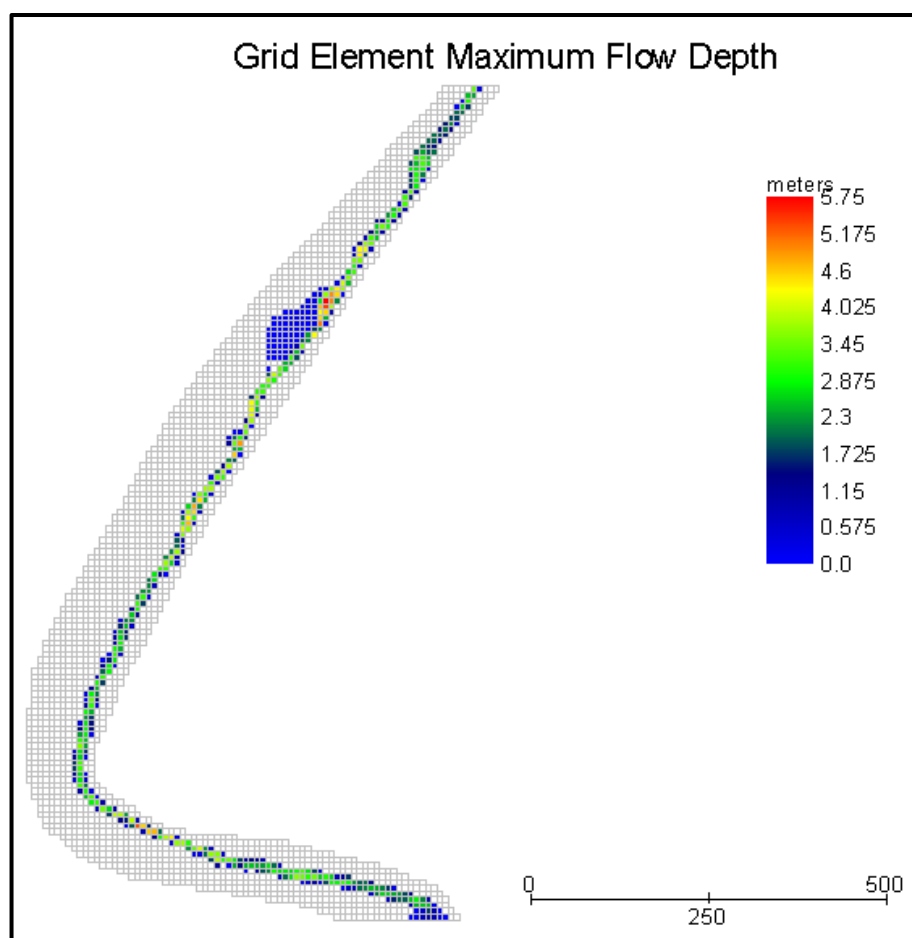


Figura N° 21: Tirantes máximos Q_p : 54.7 m³/s (Cv 22% a 30%).

De los resultados, las simulaciones de los dos escenarios anteriores, se observa en el primer escenario: para un periodo de retorno de 100 años con un caudal máximo de $44.8 \text{ m}^3/\text{s}$ el flujo del río fluye dentro del canal del río, que a diferencias del segundo escenario: para un periodo de retorno de 200 años con un caudal máximo de $54.7 \text{ m}^3/\text{s}$ podemos notar que existe un desborde a la altura de la progresiva 0+430, donde se puede ver un mayor tirante y el desborde del río, por lo tanto se va a considerar punto crítico a esta parte del río.

5.6. ELABORACIÓN DE UN MAPA DE PELIGROS

Para la elaboración de un mapa de peligros en el modelo FLO 2D, el comando Mapper analiza los resultados de las simulaciones previas y define por defecto un mapa de peligros en función de los tirantes máximos y la velocidad del flujo. Para elaborar el mapa de peligros vamos a seleccionar la simulación para el hidrograma periodo de retorno de 200 años con un caudal de punta de $54.7 \text{ m}^3/\text{s}$.

Amenaza Alta

En el Mapa de Amenaza se identifica como el área de color rojo. En este nivel de amenaza las personas están en peligro tanto dentro como fuera de las viviendas o edificios.

Amenaza Media

Es el área en color naranja en el Mapa de Amenaza. Las personas están en peligro fuera de las viviendas o edificios. Las edificaciones pueden sufrir daños pero no destrucción repentina, siempre y cuando su estructura sea adaptada a las condiciones del lugar. La zona de amenaza media debe ser una zona sujeta a reglamentación.

Amenaza Baja

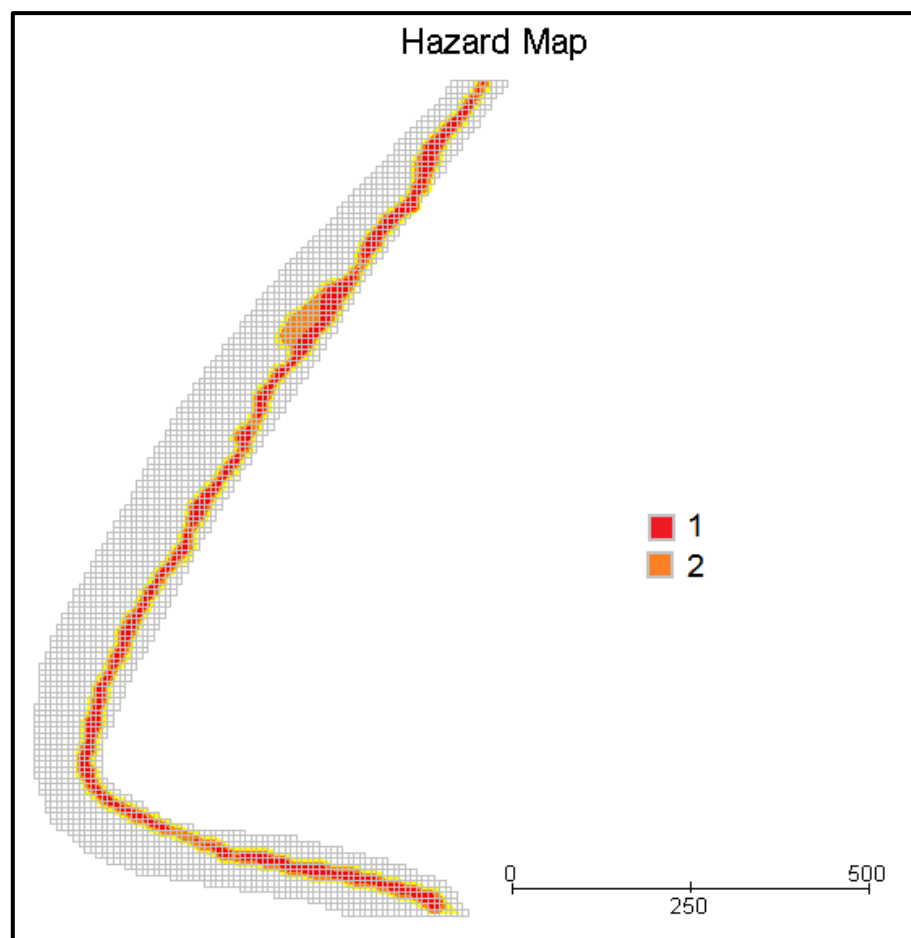
En el Mapa de Amenaza se encuentra de color amarillo. Esta área se ve afectada por eventos con probabilidad de ocurrencia baja. El peligro para las personas es débil o inexistente, las estructuras pueden sufrir daños leves en el exterior y fuertes daños en el interior de las mismas.

Definición de intensidad de flujos o crecidas de barro.

INTENSIDAD (m)	MÁXIMA PROFUNDIDAD H (m)		PRODUCTO DE MÁXIMA PROFUNDIDAD POR VELOCIDAD MÁXIMA(m²/s)
Alto	$h > 1,0 \text{ m}$	o	$v h > 1,0 \text{ m}^2/\text{s}$
Media	$h < 1,0 \text{ m}$	y	$v h < 1,0 \text{ m}^2/\text{s}$
Baja	No definida		No definido

Fuente: (Flo-2D Users Manual, 2009)

La tabla presentada nos define los límites en cuanto a la altura y velocidad para flujo o crecidas de barro, bajo este criterio se procede a crear un mapa de amenaza para el tramo del río Seco estudiado. Donde solamente encontramos una parte vulnerable que se encuentra a la altura de la progresiva 0+430 donde podemos ver desborde en el río. (Ver Figura N° 22, ANEXOS plano MB-04)



Fuente: Modelo FLO 2D Mapper

Figura N° 22: Mapa de amenazas generado por el modelo FLO 2D.

CAPÍTULO VI

6.1. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un modelo unidimensional que ha logrado analizar el comportamiento del flujo newtoniano y no newtoniano del río Seco en la Región de Tacna.

Se comparó el flujo de aguas claras y aguas con sedimentos donde claramente se ha notado que los tirantes del flujo aumentan en función de la concentración volumétrica de sedimentos y que la velocidad del flujo disminuye también en función del aumento de la concentración volumétrica de sedimentos.

Se ha calibrado el modelo con el hidrograma que corresponde a un periodo de retorno de 50 años de caudal máximo de $35.019 \text{ m}^3/\text{s}$ con concentración volumétrica de sedimentos de 22% a 25%, donde los resultados de los tirantes obtenidos por el modelo han presentado un mejor ajuste con las alturas de flujo dejadas por el paso del río evidenciadas en las marcas o rastros.

Se elaboró un mapa preliminar de peligros de inundaciones a partir del hidrograma de 200 años de periodo de retorno donde se ha encontrado una zona vulnerable del rio que se encuentra a la altura de la progresiva 0+430 donde ha presentado desborde del rio.

6.2. RECOMENDACIONES

Se recomienda hacer un modelamiento hidrodinámico con sedimentos a través de todo el trayecto del río Caplina para evaluar y poder determinar más áreas vulnerables a lo largo del cauce.

En temporadas de lluvia extraer una muestra “in situ”, y llevarlo a laboratorio para su análisis, para determinar sus parámetros reológicos para poder realizar un modelamiento con un mejor ajuste a eventos reales.

BIBLIOGRAFÍA

- ANA (2002), Evaluación y ordenamiento de los recursos hídricos en las cuencas de los ríos Caplina y Uchusuma.
- Bagnold, R. (1954). "Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear". (S. A.-2. of the Royal Society of London, Intérprete)
- Bertolo, P., & Wieczorek, G. (2005). Calibration of numerical models for small debris flows in Yosemite Valley. (5. 9.-1. Nat. Hazards Esrth Syst. Sci., Intérprete) California, USA.
- Edwin Pino Vargas (2012). Análisis de Máximas Avenidas e Inundaciones 2012. Tacna.
- O'Brien, J.S. (2009) Flo-2D Users Manual. Versión 2009. Arizona, USA.
- Hampton, M.A., (1972). The role of subaqueous debris flows in generating turbidity currents. *Journal of Sedimentary Petrology*, 42.
- INGEMMET (2009), Hidrología de la cuenca del río Caplina.
- Iverson, R.M. (1997). The physics of debris flows. *Reviews of Geophysics*.
- Jaime, P., Spalletti, P. D., & Brea, J. D. (2008). Simulación de flujo de barros: caso de estudio del río Iruya. Argentina.

- Julien, P., & León, C. (2000). Mud floods, mudflows and debris flows. Classification. Rheology and structural design". Jornadas de Investigación JIFI 2000: the debris flow disaster of december 1999 in Venezuela.
- O'Brien, J., & Julien, P. (1985). "Physical properties and mechanics of hyperconcentrated sediment flows". Proc. of the ASCE Specialty Conf. on the Delineation of Landslides, Floods.USA
- O'Brien, J., & Julien, P. (1988). Laboratory Analysis of Mudflow properties. (8. 8.-8. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE 114, Intérprete)
- Robert Palomera Roman (2013). Peligros y Riesgos Asociados a Flujos Hiperconcentrados y Debris Flow. (F. i. Libro de Resumenes, Intérprete) Arequipa.
- Riskermann, D. (1999). "Empirical relationships for Debris flow". (N. h. 47-77, Intérprete)
- Takahashi T. (1980). "Debris flow". International Association for Hydraulic Research. AA. Balkema. Rotterdam 165p.
- Tesis, María Esperanza Noya López (2009), "Análisis de la Amenaza por Aludes Torrenciales En La Cuenca del Río San José de Galipán" Trabajo de Grado presentado a la Universidad Central de Venezuela para optar al título de Magíster Scientiarum en Ingeniería-Venezuela.

- Tesis, Edgar Christian Jhonathan Tisnado Valdivia (2013), “Modelamiento hidrodinámico para determinar zonas vulnerables en el cauce del río seco zona urbana”, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann -Tacna.
- Tesis, Leonardo Franco Castillo Navarro (2006), “Aplicación de un Método Numérico de Flujo de Escombros y Lodos en una Quebrada en el Perú”, Universidad Nacional de ingeniería-Lima.

ANEXOS

Mecánica de suelos



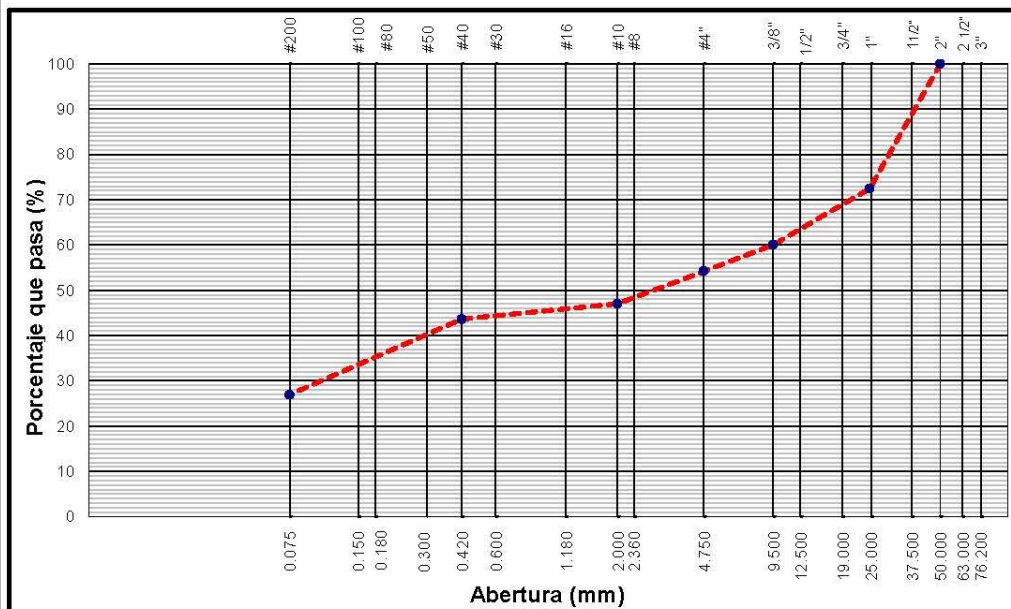
**ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO
 (NORMA MTC E - 204, AASHTO T - 88, ASTM D - 422)**

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

DESCRIPCIÓN : MATERIAL DEJADO POR EL PASO DEL RIO SECO REALIZADO : Bach. Miguel Banda
 MUESTRA : ESTGEO 01 FECHA : 25/08/2014
 COORDENADAS : 368926.84E 8004705.72N

TAMIZ Nº 003	ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO	PORCENTAJE RETENIDO	RETENIDO ACUMULADO	PORCENTAJE QUE PASA	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA
3"	76.200					
2 1/2"	63.500					LL. NP
2"	50.800	0.0	0.00	0.00	100.00	LP. NP
1 1/2"	38.100	285.0	3.27	3.27	96.73	IP NP
1"	25.400	2115.0	24.27	27.54	72.46	
3/4"	19.050	570.0	6.54	34.08	65.92	
1/2"	12.500	285.0	3.27	37.35	62.65	
3/8"	9.525	225.0	2.58	39.93	60.07	Clasificación :
Nº 4	4.750	510	5.85	45.78	54.22	AASHTO A - 2 - 4 (0)
Nº 8	2.360					
Nº 10	2.000	33.9	3.68	49.46	50.54	SUCS GM
Nº 16	1.190					
Nº 30	0.590	28.5	3.09	52.55	47.45	
Nº 40	0.420	35.3	3.83	56.38	43.62	Observaciones:
Nº 50	0.300	47.9	5.19	61.57	38.43	
Nº 80	0.180					
Nº 100	0.149	44.9	4.87	66.44	33.56	
Nº 200	0.075	61.1	6.63	73.07	26.93	
< Nº 200	FONDO	238.4	26.93	100.00	0.00	
Peso Fino Fracción		500.0				
Peso Inicial		8715.0				

CURVA GRANULOMÉTRICA





**ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO
 (NORMA MTC E - 204, AASHTO T - 88, ASTM D - 422)**

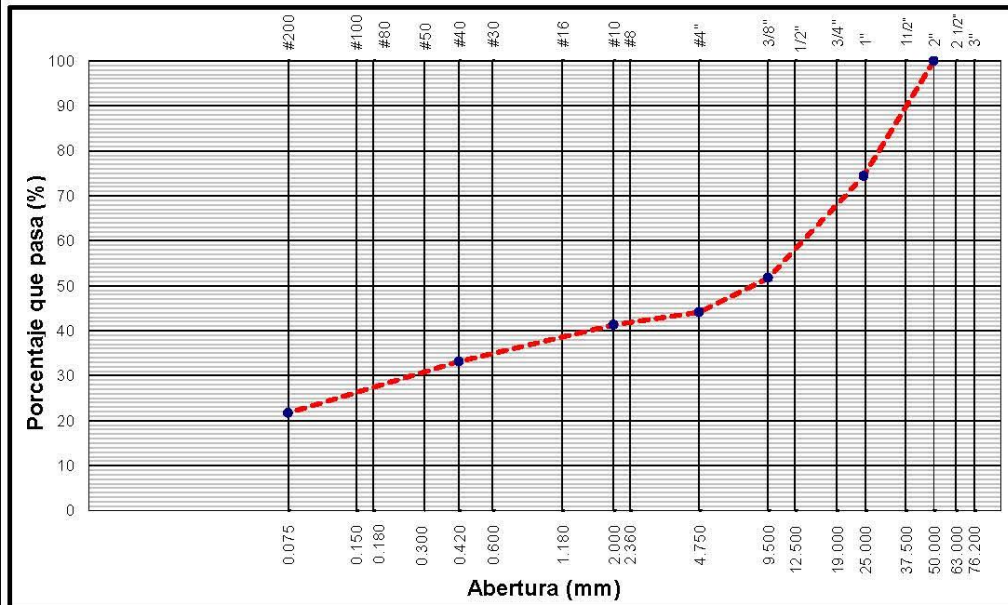
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

DESCRIPCIÓN : MATERIAL DEJADO POR EL PASO DEL RIO SECO REALIZADO : Bach. Miguel Banda
 MUESTRA : ESTGEO 02 FECHA : 25/08/2014
 COORDENADAS : 368909.88E 8004674.74N

TAMIZ Nº 003	ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO	PORCENTAJE RETENIDO	RETENIDO ACUMULADO	PORCENTAJE QUE PASA	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA
3"	76.200					
2 1/2"	63.500					LL. NP
2"	50.800	0.0	0.00	0.00	100.00	LP. NP
1 1/2"	38.100	604.0	7.11	7.11	92.89	IP NP
1"	25.400	1567.0	18.44	25.55	74.45	
3/4"	19.050	1045.0	12.30	37.84	62.16	
1/2"	12.500	542.0	6.38	44.22	55.78	
3/8"	9.525	342.0	4.02	48.25	51.75	Clasificación :
Nº 4	4.750	645	7.59	55.84	44.16	AASHTO A - 1 - b (0)
Nº 8	2.360					
Nº 10	2.000	32.0	2.83	58.66	41.34	SUCS GM
Nº 16	1.190					
Nº 30	0.590	63.3	5.59	64.25	35.75	
Nº 40	0.420	28.9	2.55	66.81	33.19	Observaciones:
Nº 50	0.420	36.8	3.25	70.06	29.94	
Nº 80	0.420					
Nº 100	0.420	49.9	4.41	74.46	25.54	
Nº 200	0.075	43.5	3.84	78.31	21.69	
< Nº 200	FONDO	245.6	21.69	100.00	0.00	

Peso Fino Fracción	500.0
Peso Inicial	8498.0

CURVA GRANULOMÉTRICA



PLANOS

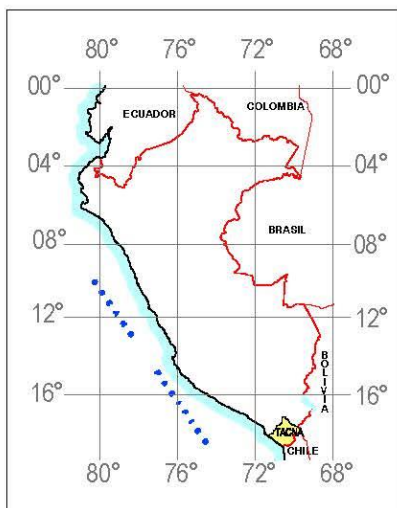
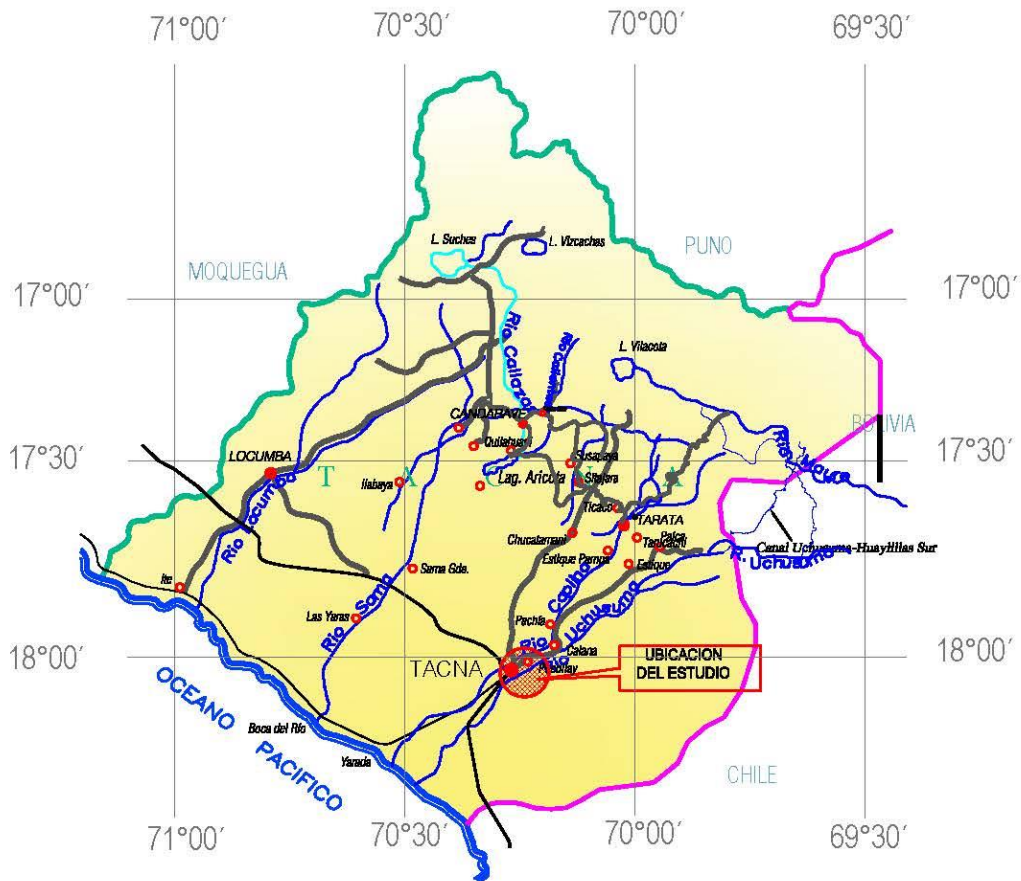
Plano 1: plano de ubicación

Plano 2: plano topográfico

Plano 3: plano geológico

Plano 4: plano preliminar de amenazas

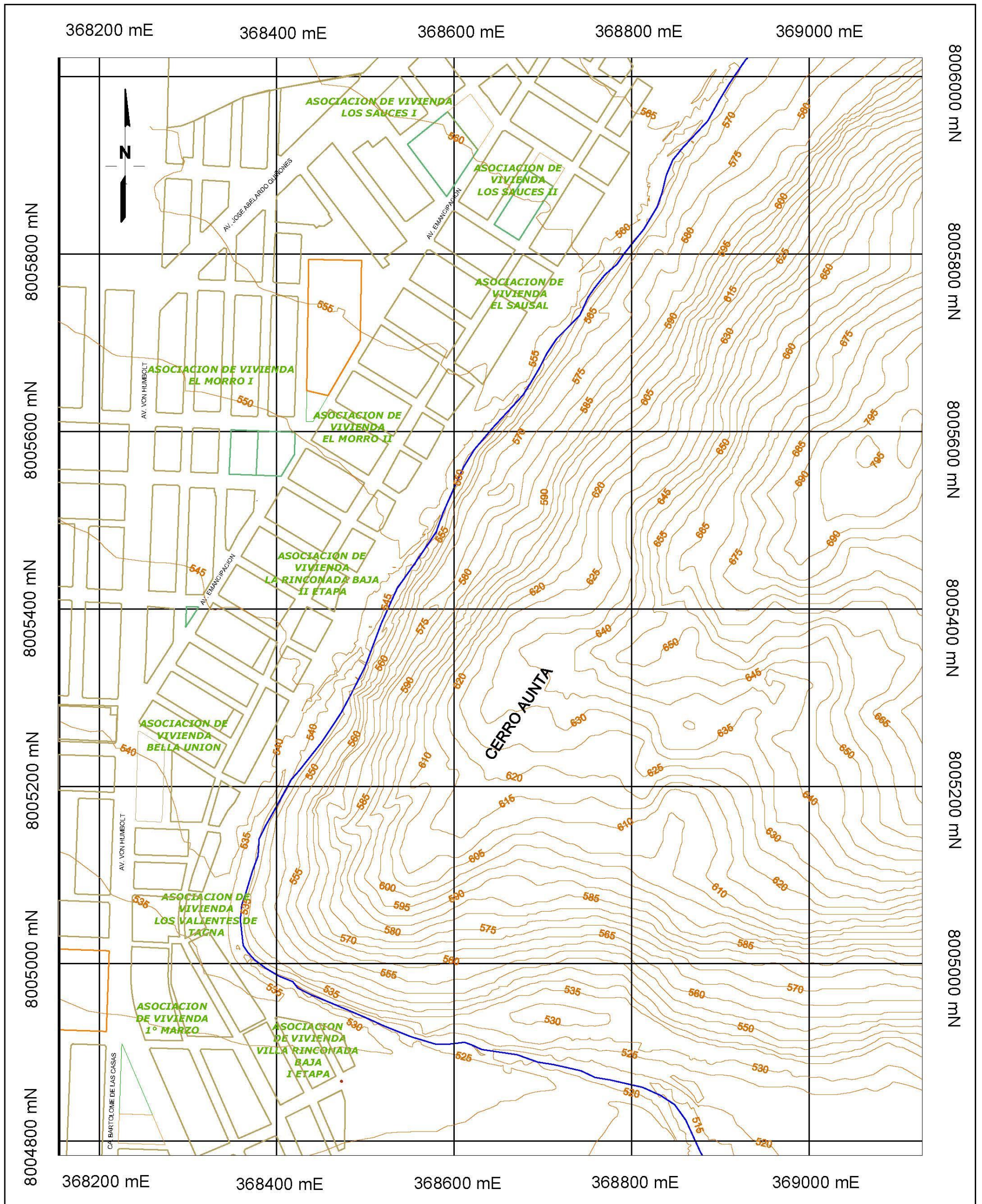
UBICACION DE LA REGION TACNA EN EL PERU



LEYENDA

- Capital del Departamento
- Capital de Provincia
- Capital de Distrito
- Límite Internacional
- Límite Departamental
- Carretera Panamericana
- UBICACION DEL ESTUDIO

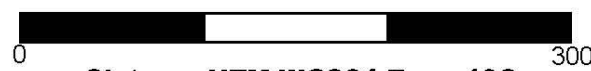
UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHOMANN E.A.P. INGENIERIA GEOLOGIA - GEOTECNIA			
TESIS: "ANALISIS COMPARATIVO DE UN MODELO HIDRODINAMICO UNIDIMENSIONAL PARA FLUJO NEWTONIANO Y NO NEWTONIANO DEL RIO SECO ZONA URBANA TACNA"			
PLANO DE UBICACION			
Fuente : Base ING	Elaboracion : Propia	Fecha : Agosto 2014	LAMINA
Escala : Grafica	Datum : WGS 84		MB-01



LEYENDA

-  500 Curvas de nivel
-  Rio
-  Viviendas
-  Areas verdes y de recreacion
-  Educacion

Metros



Sistema UTM WGS84 Zona 19S

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHOMANN
E.A.P. INGENIERIA GEOLOGIA - GEOTECNIA

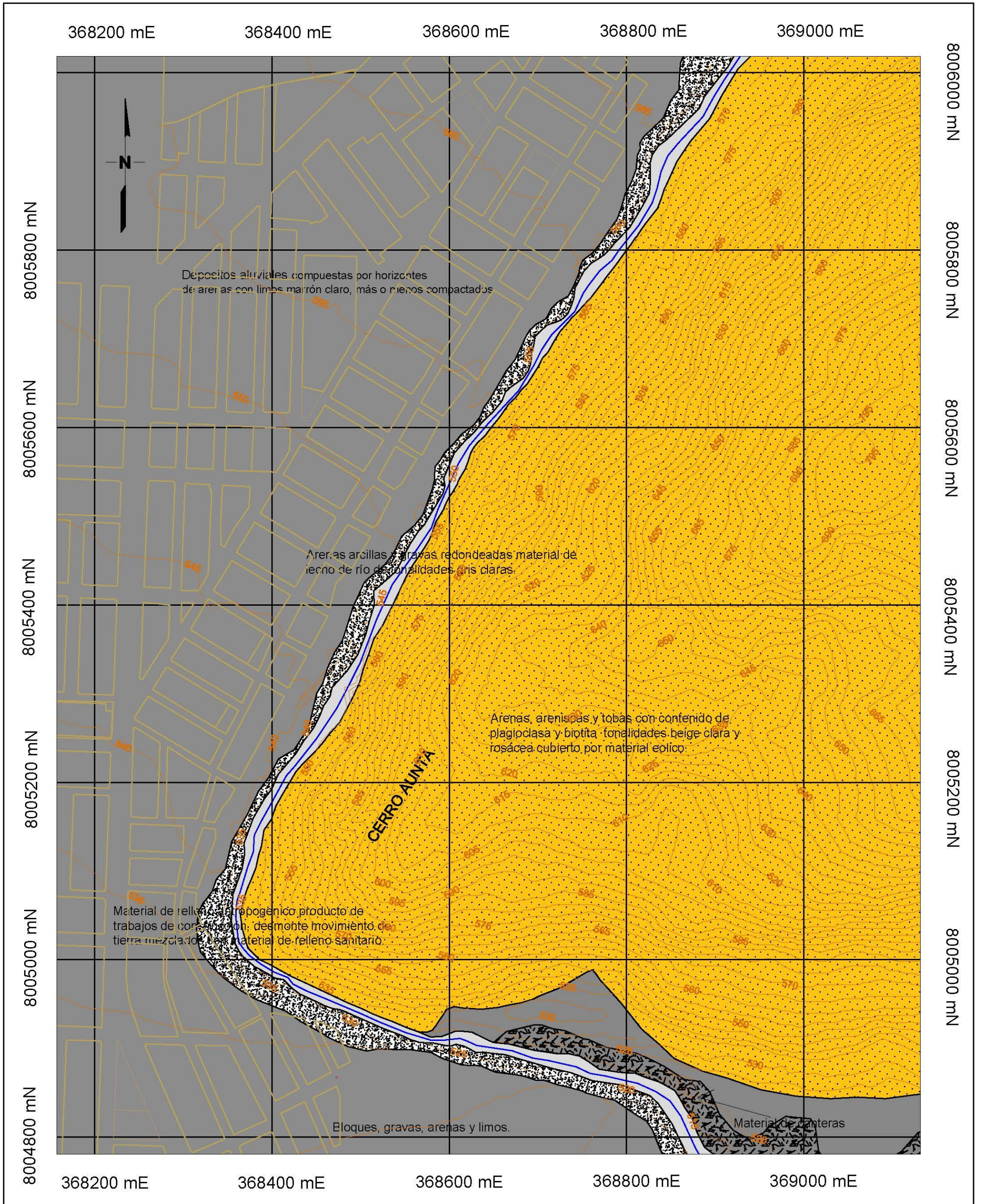
TESIS: "ANALISIS COMPARATIVO DE UN MODELO HIDRODINAMICO UNIDIMENSIONAL PARA FLUJO NEWTONIANO Y NO NEWTONIANO DEL RIO SECO ZONA URBANA TACNA"

PLANO TOPOGRAFICO

Escala : Grafica Fecha : Agosto 2014
Elaboración : Propia Datum : WGS 84

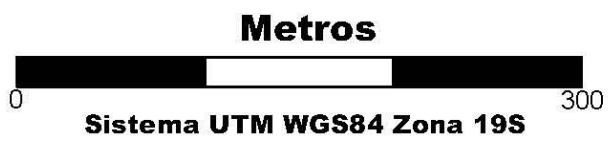
LAMINA

MB-02



LEYENDA

-  Canteras
-  Depósitos antropogénicos
-  Depósitos eólicos
-  Depósitos fluviales
-  Depósitos aluviales
-  Fm Hualillas - superior



SIMBOLOGIA

-  500 Curvas de nivel
-  Rio

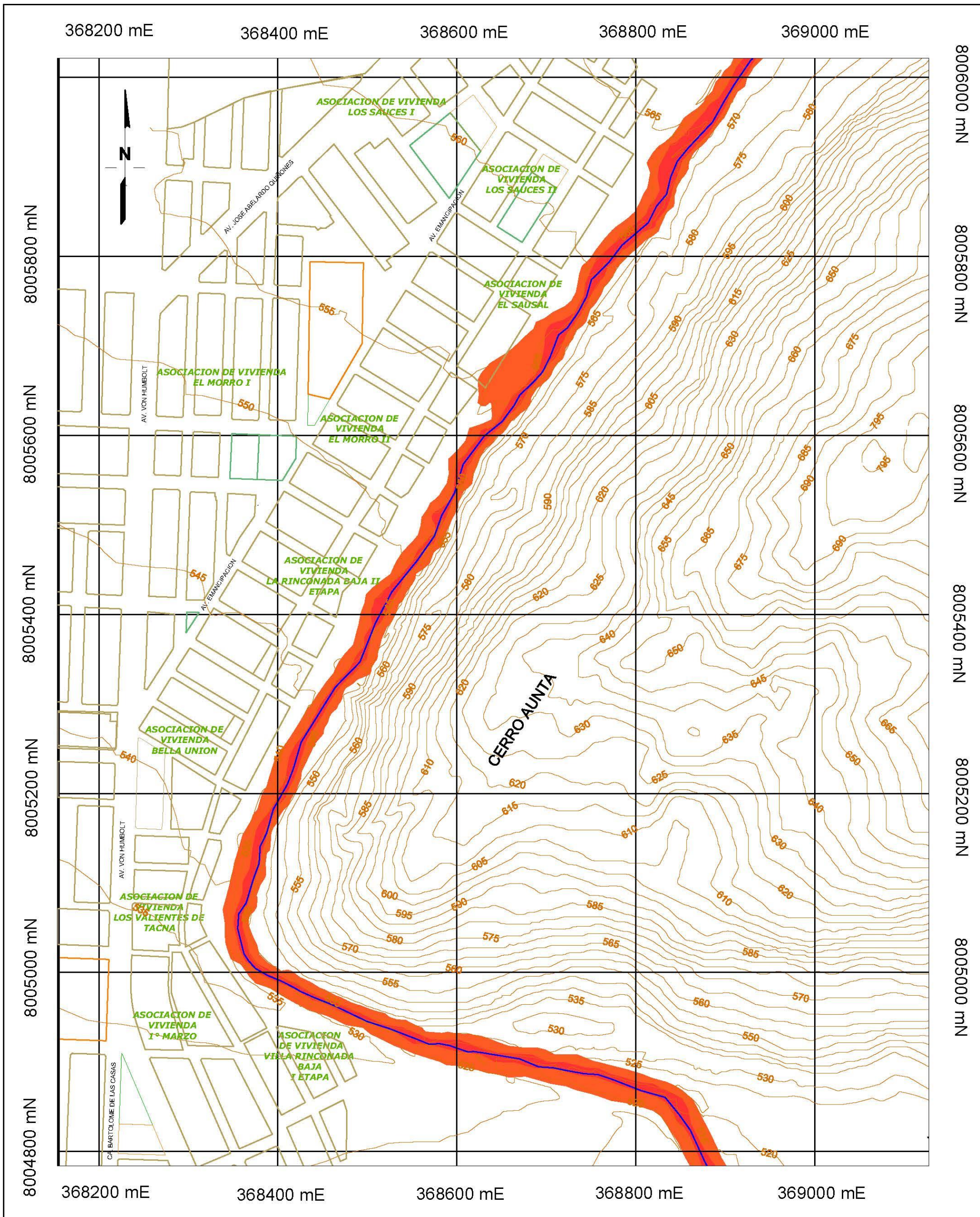
UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHOMANN
E.A.P. INGENIERIA GEOLOGIA - GEOTECNIA

TESIS: "ANALISIS COMPARATIVO DE UN MODELO HIDRODINAMICO UNIDIMENSIONAL PARA FLUJO NEWTONIANO Y NO NEWTONIANO DEL RIO SECO ZONA URBANA TACNA"

PLANO GEOLOGICO

Escala : Grafica	Fecha : Agosto 2014
Elaboración : Propia	Datum : WGS 84

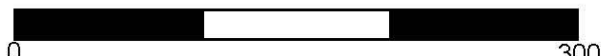
LAMINA
MB-03



LEYENDA

- Nivel 3
- Nivel 2

Metros



Sistema UTM WGS84 Zona 19S

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHOMANN
E.A.P. INGENIERIA GEOLOGIA - GEOTECNIA

TESIS: ANALISIS COMPARATIVO DE UN MODELO HIDRODINAMICO UNIDIMENSIONAL PARA FLUJO NEWTONIANO Y NO NEWTONIANO DEL RIO SECO ZONA URBANA TACNA

MAPA PRELIMINAR DE AMENAZAS CERRO ARUNTA

Escala : Grafica

Fecha : Agosto 2014

Elaboración : Propia

Datum : WGS 84

LAMINA

MB-04