

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



**“MODELACIÓN DE FLUJOS DE ESCOMBROS CON DAN3D EN
QUEBRADAS SUSCEPTIBLES DEL SECTOR NORTE DEL AMSS”**

PRESENTADO POR:

**CRUZ CÁRCAMO, JAVIER STANLEY
MORENO FERRUFINO, JOSÉ NEFTALÍ
SEGOVIA ALFARO, TATIANA ELIZABETH**

PARA OPTAR AL TITULO DE:

INGENIERO CIVIL

CIUDAD UNIVERSITARIA, OCTUBRE DE 2019

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

MSc. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIO GENERAL:

MSc. CRISTOBAL HERNAN RIOS BENITEZ

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

DECANO:

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCON SANDOVAL

SECRETARIO:

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

DIRECTOR:

ING. JORGE OSWALDO RIVERA FLORES

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO CIVIL

Título:

**“MODELACIÓN DE FLUJOS DE ESCOMBROS CON DAN3D EN
QUEBRADAS SUSCEPTIBLES DEL SECTOR NORTE DEL AMSS”**

Presentado por:

**CRUZ CÁRCAMO, JAVIER STANLEY
MORENO FERRUFINO, JOSÉ NEFTALÍ
SEGOVIA ALFARO, TATIANA ELIZABETH**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Asesores:

**ING. EDWIN SANTIAGO ESCOBAR RIVAS
MSc. ING. INGRID ALTAGRACIA ALFARO LOPEZ**

CIUDAD UNIVERSITARIA, OCTUBRE DE 2019

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Asesores:

ING. EDWIN SANTIAGO ESCOBAR RIVAS

MSc. ING. INGRID ALTAGRACIA ALFARO LOPEZ

AGRADECIMIENTOS.

Agradezco a Dios por darme sabiduría, perseverancia y disciplina, para lograr una de las metas propuestas en mi vida. A mis padres, por brindarme educación, gracias infinitas por el esfuerzo, dedicación, apoyo y amor incondicional. A mis hermanos por darme fuerzas en los momentos difíciles. Agradecer en gran manera a los ingenieros Edwin Santiago Escobar e Ingrid Altagracia Alfaro, por la paciencia, enseñanza y atención en todo momento. A mis compañeros de Tesis Tatiana y Neftalí por el apoyo en nuestra formación profesional, pero principalmente en el tiempo de desarrollo de este trabajo. Gracias a mi novia y mis amigos los cuales han compartido conmigo momentos buenos y malos y por brindarme su apoyo siempre. Finalmente, gracias a todas las personas que de una u otra forma me ayudaran a terminar esta etapa de mi vida.

Javier Stanley Cruz Cárcamo.

A la Universidad de El Salvador por ser el medio de formación académica, y mediante la cual fue posible la canalización del conocimiento adquirido durante los años de estudio. A mi madre, por su vocación natural de madre le llevó a estar siempre conmigo y mostrarme el amor incondicional que solo una madre puede dar, por ser siempre un ejemplo a seguir, de lucha continua y superación. Agradecer en gran medida a los ingenieros Edwin Santiago Escobar e Ingrid Altagracia Alfaro, por todo el apoyo brindado, su conocimiento y paciencia a lo largo de la elaboración de este documento. A mis compañeros de Tesis, por

apoyarnos mutuamente. Finalmente, a todos aquellos que para bien o para mal ayudaron en este proceso de formación profesional.

José Nefalí Moreno Ferrufino

Quiero dedicar este logro en primer lugar a Dios por haberme permitido llegar hasta este punto en mi vida. A mis padres, que me han brindado su apoyo incondicional en los momentos más difíciles, gracias por su amor, confianza, palabras de aliento para seguir adelante y por ser un ejemplo de superación, los quiero mucho. A mis hermanos gracias por estar conmigo, por su apoyo y amistad que desde niños nos ha acompañado y a toda mi familia especialmente a mi Mama Julia por creer en mí y darme la fuerza para continuar. A mis asesores, ingenieros Edwin Santiago Escobar e Ingrid Altagracia Alfaro por brindarnos su apoyo y paciencia a lo largo de todo el proceso de elaboración de este trabajo de graduación. También quiero agradecer a todos los catedráticos que brindaron su tiempo y conocimientos. Por último, pero no menos importantes, quiero agradecer a todos mis amigos que han estado conmigo y me brindaron su apoyo durante toda mi carrera.

Tatiana Elizabeth Segovia Alfaro

Dedicatoria especial en honor al profesor Oldrich Hungr (1947 – 2017):

También se quiere agradecer al profesor Oldrich Hungr por haber proporcionado una licencia a la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de El Salvador del software DAN3D, herramienta que fue clave para el desarrollo de la investigación en el trabajo de graduación, para el análisis de flujos de escombros y la modelación de posibles escenarios que pueden afectar a la zona norte del AMSS.

Javier Stanley Cruz Cárcamo

José Neftalí Moreno Ferrufino

Tatiana Elizabeth Segovia Alfaro

INDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO I: GENERALIDADES	1
1.1 RESUMEN.....	1
1.2 ANTECEDENTES.....	4
1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	9
1.4 OBJETIVOS	11
1.4.1 Objetivo general:.....	11
1.4.2 Objetivos específicos:	11
1.5 ALCANCES	12
1.6 LIMITACIONES	13
1.7 JUSTIFICACIÓN.....	14
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	16
2.1 RESUMEN.....	16
2.2 GENERALIDADES	17
2.2.1 Los Flujos de Escombros.....	17
2.2.2 Conceptos de Flujos de Escombros	18
2.2.3 Características de los flujos de escombros.....	20
2.2.4 Composición de los Flujos de Escombros	22

2.2.5 Clasificación de los flujos de escombros	25
2.2.6 Clasificación de flujos de escombros según, Takahashi y Norem y Sandersen	26
2.2.7 Clasificación de flujos de escombros según Costa (1988).....	30
2.2.8 Clasificación de flujos de escombros según Coussot (1997).....	31
2.2.9 Clasificación de flujos de escombros según Suárez (2001).....	32
2.3 CONCEPTOS IMPORTANTES DEL MECANISMO DE SOPORTE DE PARTÍCULA	36
2.4 PROPIEDADES DEL FLUJO DE ESCOMBROS	38
2.4.1 Velocidad	39
2.4.2 Pendiente.....	40
2.4.1 Angulo de deposición.....	42
2.4.2 Caudal de flujo de escombros	42
2.5 CAUSAS DE LOS FLUJOS DE ESCOMBROS	49
2.5.1 Debido al agua.....	50
2.5.2 Por aumento de la presión de poro.....	50
2.6 DINÁMICA DE FLUJO DE ESCOMBROS.....	52
2.7 MODELOS DINÁMICOS	58
2.7.1 Métodos numéricos.....	59

2.7.2 Clasificación de los modelos.....	62
2.8 MODELO DAN3D (DYNAMIC ANALYSIS OF LANDSLIDES)	65
2.8.1 Fluidos y Reologías Hipotéticos.....	66
2.8.2 Descripción general del programa	68
2.8.3 Concepto de flujo equivalente.....	71
2.8.4 Requisitos del modelo.....	75
2.8.5 Teoría del modelo	76
2.8.6 Interpolación de superficie libre	79
2.8.7 Material de arrastre.....	80
2.9 MODELOS REOLÓGICOS UTILIZADOS EN EL DAN3D	82
2.10 TÉRMINOS DE PRESIÓN.....	87
2.11 METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN	89
CAPÍTULO III: RECOPIACIÓN DE DATOS DE ENTRADA	91
3.1 RESUMEN.....	91
3.2 CARACTERIZACIÓN EN EL ÁREA DE ESTUDIO.....	92
3.2.1 Ubicación de la Zona de Estudio	92
3.2.2 Topografía de la Zona de Estudio.....	94
3.2.3 Delimitación de Cuencas del Área de Estudio	104
3.2.4 División Política-Administrativa	109

3.2.5 División política-administrativa del área de estudio	117
3.2.6 Hipsometría de las Cuencas en Estudio	120
3.2.7 Geología	122
3.2.8 Tipo De Suelos	125
3.2.9 Uso de Suelos	129
3.2.10 Características Morfométrica de las Cuencas de Estudio.....	132
3.2.11 Parámetros Asociados al Desempeño Hidrológico de la Cuenca .	137
3.2.12 Morfometría Asociada al Relieve	144
3.2.13 Morfometría de la Red de Drenaje.....	157
3.2.14 Resumen de las Características Físicas y de Comparación de las Cuencas en Estudio.....	166
CAPITULO IV: ANÁLISIS HIDROLÓGICO DE LA ZONA DE ESTUDIO	167
4.1 RESUMEN.....	167
4.2 MÉTODO DEL NÚMERO DE CURVA.....	169
4.2.1 Cálculo de las Áreas mediante Qgis para la Determinación de CN por medio del Método de Ven Te Chow.....	175
4.2.2 Determinación Del CN	180

4.3 TRÁNSITO DE AVENIDAS POR CAUCES.....	188
4.3.1 Método del Cálculo para los Parámetros del Método de Muskingum	188
4.3.2 Cálculo de Pendientes para cada tramo de las Cuencas en Estudio	189
4.4 PRECIPITACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	196
4.4.1 Curvas I-D-F a utilizar	197
4.4.2 Método de los Bloques Alternos	201
4.5 MODELO DE LA CUENCA SAN ANTONIO EN EL HEC-HMS	213
4.6 INTRODUCCIÓN DE DATOS AL SOFTWARE HEC-HMS	223
4.6.1 Introducción de información a Subcuencas	223
4.6.2 Introducción de información a tramos del Rio (Método Muskingum)	225
4.6.3 Precipitación en software HEC-HMS	227
4.6.4 Simulación de Estudio Hidrologico en HEC-HMS.....	236
CAPÍTULO V: MODELACIÓN DE FLUJOS DE ESCOMBROS EN DAN3D	242
5.1 RESUMEN.....	242
5.2 GENERACIÓN DE ARCHIVOS MALLA	244

5.2.1 Archivo de la Topografía del área en estudio (Path Topography), para cada una de las cuencas	244
5.2.2 Archivo de la Topografía de la Masa Deslizante (Source Depth) ...	259
5.3 EJECUCIÓN DE UNA SIMULACIÓN EN DAN3D	267
5.4 GENERACIÓN DE MAPAS	285
CAPÍTULO VI: ANÁLISIS DE RESULTADOS	292
6.1 RESUMEN.....	292
6.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS	293
6.2.1 Escenarios Simulados en el DAN3D.....	293
6.2.2 Elementos de Salida del DAN3D	295
6.3 MAPAS DE INTENSIDADES PARA CADA ESCENARIO	301
6.4 SECCIONES TOPOGRÁFICAS DE FLUJO	312
6.5 MAPA DE AMENAZA	334
6.6 CONCLUSIONES	341
6.7 RECOMENDACIONES.....	346
BIBLIOGRAFÍA	348
ANEXOS.....	352

A. DIGITALIZACIÓN DE CUADRANTES	353
B. CURVAS I-D-F	359
C. RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS MODELOS REALIZADOS EN DEL DAN3D PARA CADA ESCENARIO.....	364

INDICE DE FIGURAS

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

Figura 2-1 Ejemplo de flujo de escombros, en el picacho en montebello en 1982, el salvador.....	18
Figura 2-2 División de la trayectoria de flujo de un flujo de escombros.	22
Figura 2-3 Tipos de fluidos.....	23
Figura 2-4 Variación del esfuerzo cortante con la razón de deformación para fluidos newtonianos y no-newtonianos.	23
Figura 2-5 Diagrama de viscosidad vs velocidad para fluidos newtonianos y no-newtonianos.....	24
Figura 2-6 Composición de un flujo de escombros.	24
Figura 2-7 (a) pendiente de ladera. (b) canal.....	25
Figura 2-8 Regímenes de flujos de escombros y su dependencia de re , ba y h/d	28
Figura 2-9 Clasificación reológica de los flujos según coussot.	32
Figura 2-10 Clasificación de flujos según jaime suarez (2001).	33
Figura 2-11 Clujo de agua. 5% de volumen de sedimentos.....	34
Figura 2-12 Flujo hiperconcentrado. 40% de volumen de sedimentos.....	34
Figura 2-13 Flujo de escombros. 65% de volumen de sedimentos.....	35
Figura 2-14 Esquema de mecanismos de presión dispersiva y fuerza de cohesión..	37

Figura 2-15 Diagrama para determinar la velocidad del flujo según johnson y rodine,1984.	40
Figura 2-16 Diagrama para calcular esfuerzos cortantes y normales según morh-coulomb.	41
Figura 2-17 Concentración de sedimentos vs. Factores de engrosamiento. ...	47
Figura 2-18 Ilustración de las fuerzas que actúan sobre un volumen que baja por una pendiente.	54
Figura 2-19 El marco de euler se fija en el espacio, mientras que el marco de referencia langrangiano se mueve con el flujo (mcdougall, 2006).	64
Figura 2-20 SPH puso en un marco de promedios de profundidad (hungr y mcdougall, 2009).	65
Figura 2-21 Los materiales de deslizamiento de tierra reales son complicados, por lo que se modelan como fluidos hipotéticos simples.	68
Figura 2-22 Ilustración del enfoque de fluido equivalente (hungr, 1995).....	74
Figura 2-23 Estado de tensión total en un elemento de material dentro de un deslizamiento de tierra y convención de ejes de dirección (hungr y mcdougall, 2009).....	76
Figura 2-24 Arrastre del material del camino por arado y erosión en la base (mcdougall, 2006).	77
Figura 2-25 Estado de tensión total en un elemento de material dentro de un deslizamiento de tierra y convención de ejes de dirección (hungr y mcdougall, 2009).....	82

CAPITULO III: RECOPIACIÓN DE DATOS DE ENTRADA

Figura 3-1 País de zona de estudio.	92
Figura 3-2 Macro-localización de las cuencas entre los departamentos de La Libertad y San Salvador.....	93
Figura 3-3 Localización a detalle de la zona de estudio.....	93
Figura 3-4 Representación de los cuadrantes utilizados y demarcación de zona de estudio	94
Figura 3-5 Cuadrante 37201 proporcionado por el CNR, se muestra el cerro de Nejapa	95
Figura 3-6 Creación de capa shape con etiqueta de elevación.	96
Figura 3-7 Valores de elevación de las curvas de nivel.	97
Figura 3-8 Digitalización de curvas de nivel del cuadrante 37201 a cada 5 metros utilizando Qgis.	98
Figura 3-9 Interpolación para obtención del DEM de la zona de estudio.	100
Figura 3-10 Análisis del mapa de sombras del área de estudio en Qgis	102
Figura 3-11 Modelación de área de estudio en 3D	104
Figura 3-12 Ejemplo del trazo del parteaguas en Qgis	105
Figura 3-13 Área metropolitana de San Salvador.	109
Figura 3-14 División administrativa del municipio de Nejapa.	111
Figura 3-15 División administrativa del municipio de Apopa.	115
Figura 3-16 Modelo de curvas hipsométricas del ciclo de erosión..	153

CAPITULO IV: ANÁLISIS HIDROLÓGICO DE LA ZONA DE ESTUDIO

Figura 4-1 Creación de una nueva capa de archivo shape, en Qgis.....	176
Figura 4-2 Determinación del tipo de geometría y creación de tabla de atributos	177
Figura 4-3 Traslape de mapa pedológico y de vegetación.....	178
Figura 4-4 Detalle de atributos para la determinación de áreas según uso y tipo de suelo.	179
Figura 4-5 Detalle de tabla de atributos para cada subcuenca perteneciente a la cuenca San Antonio con el área respectiva según su uso y tipo de suelo.....	180
Figura 4-6 Tramos de la cuenca El Ángel para la determinación de la constante de almacenamiento k.....	190
Figura 4-7 Perfil longitudinal del tramo 4 correspondiente a la cuenca El Ángel	191
Figura 4-8 Perfil del tramo 4 correspondiente a la cuenca El Ángel.....	192
Figura 4-9 Polígonos de thiessen en la zona de estudio.....	199
Figura 4-10 Hietograma de diseño para un periodo de retorno de 50 años de la cuenca del río El Ángel.	212
Figura 4-11 Hietogramas de diseño para un periodo de retorno de 50 años de la cuenca del río San Antonio.....	212
Figura 4-12 Creación del proyecto “c_San Antonio”	213
Figura 4-13 Comando de la representación del modelo de la cuenca.	214

Figura 4-14 Creación de nuevo modelo con el nombre de cuenca "San Antonio"	214
Figura 4-15 Shape de rios y sub-cuencas elaborados en Qgis añadidos al HEC- HMS.....	215
Figura 4-16 Representación del modelo de la cuenca San Antonio.....	216
Figura 4-17 Creación de sub-cuencas del rio San Antonio en HEC-HMS.	217
Figura 4-18 Tramos de ríos para el método de muskingum en cuenca San Antonio.....	218
Figura 4-19 Conectores de subcuencas y efluente del rio San Antonio.....	219
Figura 4-20 Tramos de rio desconectados con el punto de interés de la cuenca San Antonio en software HEC-HMS.	220
Figura 4-21 Ejemplo del panel para la unión de elementos en el HEC-HMS.	221
Figura 4-22 Ramificación del modelo de la cuenca San Antonio	222
Figura 4-23 Introducción de datos de subcuenca "El Remolino"	223
Figura 4-24 Datos de CN en subcuenca "El Remolino".	224
Figura 4-25 Tiempo de retraso en subcuenca "El Remolino".....	225
Figura 4-26 Selección del método muskingum en el tramo de rio 1.....	226
Figura 4-27 Valores del tramo un de "X" y "K"	227
Figura 4-28 Carpeta de precipitación de cada subcuencas del rio San Antonio.	228

Figura 4-29 Carpeta de precipitación de subcuencas	229
Figura 4-30 Duración de la tormenta.....	230
Figura 4-31 Datos de intervalo de tiempo (min) vs. Precipitación (mm) de cuenca San Antonio	231
Figura 4-32 Hietograma de diseño de cuenca San Antonio en HEC-HMS	232
Figura 4-33 Especificación de control de cuenca San Antonio	233
Figura 4-34 Información de control HEC-HMS.....	234
Figura 4-35 Creación del modelo meteorológico.....	235
Figura 4-36 Inclusión de cuencas al modelo meteorológico	235
Figura 4-37 Hietograma en el modelo meteorológico	236
Figura 4-38 Creación de la simulación de la cuenca San Antonio	237
Figura 4-39 Simulación del análisis hidrológico	238
Figura 4-40 Continuación del análisis hidrológico	239
Figura 4-41 Hidrograma generado por el hec-hms para la cuenca del río San Antonio.....	239
Figura 4-42 Resultados del estudio hidrológico de la cuenca San Antonio....	240
Figura 4-43 Hidrograma generado por el hec-hms para la cuenca del río El Ángel	240
Figura 4-44 Resultados del estudio hidrológico de la cuenca El Ángel.....	241

CAPITULO V: MODELACIÓN DE FLUJOS DE ESCOMBROS EN DAN3D

Figura 5-1 Modelo digital de elevación elaborado con curvas de nivel a cada 5 metros.....	245
Figura 5-2 Lectura de las filas y columnas en arcgis y verificación de que estas no superen el valor de 1000.....	246
Figura 5-3 Generación de un sample en Arcgis.....	247
Figura 5-4 Tabla de valores generada al efectuar un sample sobre un DEM en Arcgis.....	248
Figura 5-5 Exportación de un sample a archivo tipo texto.	249
Figura 5-6 Tabla de valores generados con el sample hecho en Arcgis.....	249
Figura 5-7 Exportación de un sample tipo *.txt a archivo con formato *.dat...	250
Figura 5-8 Representación del origen de coordenadas que debe tener el archivo de topografía.....	251
Figura 5-9 Cambiando el origen de coordenadas para las direcciones x e y.	252
Figura 5-10 Tabla finalizada y lista para ser interpolada en un archivo tipo *.grd.	252
Figura 5-11 Cuadro de dialogo grid data donde se escogerá el método de interpolación a utilizar	257
Figura 5-12 Archivo de topografía de la ruta a utilizar.....	258
Figura 5-13 Exportación de archivo tipo malla (.grd) a uno tipo imagen (.bmp).	259

Figura 5-14 Zonificación de riesgo por lahares para el volcán de San Salvador	260
Figura 5-15 Generación de archivo tipo .bln de la zona de inicio de flujo.	261
Figura 5-16 Archivo area.bln modificado para luego pasar al proceso de blanqueo del mismo.....	262
Figura 5-17 Proceso de blanqueo del archivo area.bln.....	263
Figura 5-18 Asignación de valor de 0 a puntos fuera del área trazada	264
Figura 5-19 Asignando el valor de 1 a los puntos dentro del área trazada	265
Figura 5-20 Interpolación de archivo tipo (.dat) archivo tipo malla (.grd) para poder ser utilizado en el software DAN3D	266
Figura 5-21 Verificación del volumen en software DAN3D	267
Figura 5-22 Cuadro de dialogo de parámetros de control en software DAN3D	268
Figura 5-23 Cuadro de dialogo de asignación de archivos tipo malla en software DAN3D.....	271
Figura 5-24 Cuadro de dialogo de asignación de características de los materiales a simular en software DAN3D	272
Figura 5-25 Cuadro de dialogo de parámetros generales en software dan3d	276
Figura 5-26 Cuadro de dialogo de asignación ubicación donde se guardará la simulación en software DAN3D	279
Figura 5-27 Cuadro de dialogo de asignación de archivos que generara la simulación en software DAN3D	279

Figura 5-28 Cuadro de control, run control box, en el cual se observarán los datos generales de la simulación en software DAN3D.....	283
Figura 5-29 Mancha del flujo de escombros en cuenca San Antonio, para un volumen de 50,000m ³ en software DAN3D.....	284
Figura 5-30 Introducción de archivo *.grd al software surfer 8.0.....	286
Figura 5-31 Ubicación de archivo “maxthick100”.....	286
Figura 5-32 Exportación de archivo maxthick100.grd a formato *.shp.....	287
Figura 5-33 Selección del formato a exportar, así como su nombre y ubicación en donde se guardará dicho archivo.....	288
Figura 5-34 Escala de exportación al archivo tipo shape.....	288

CAPITULO VI: ANÁLISIS DE RESULTADOS

Figura 6-1 Zona de liberación en cuenca San Antonio y El Ángel.....	294
Figura 6-2 Informe “finaloutput” del escenario 1: vol. 50,000m ³ e=1,500 m/s ² cuenca San Antonio.....	296
Figura 6-3 Informe “output” del escenario 1: vol. 50,000m ³ e=1,500 m/s ² cuenca San Antonio.....	297
Figura 6-4 Representación de las zonas de inicio, transporte y depósito del flujo según la pendiente en cuenca San Antonio.....	313
Figura 6-5 Representación de las zonas de inicio, transporte y depósito del flujo según la pendiente.....	314
Figura 6-6 Secciones transversales a analizar en la cuenca San Antonio.....	314

Figura 6-7	Secciones transversales a analizar en la cuenca San Antonio.....	315
Figura 6-8	Sección transversal csa-01 correspondientes a los escenarios sa-01 (sección superior) y sa-02 (sección inferior) de la cuenca San Antonio.....	317
Figura 6-9	Sección transversal csa-01 correspondientes a los escenarios sa-03 (sección superior) y sa-04 (sección inferior) de la cuenca San Antonio.....	318
Figura 6-10	Sección transversal csa-02 correspondientes a los escenarios sa-01 (sección superior) y sa-02 (sección inferior) de la cuenca San Antonio.....	319
Figura 6-11	Sección transversal csa-02 correspondientes a los escenarios sa-03 (sección superior) y sa-04 (sección inferior) de la cuenca San Antonio.....	320
Figura 6-12	Sección transversal csa-03 correspondientes a los escenarios sa-01 (sección superior) y sa-02 (sección inferior) de la cuenca San Antonio.....	321
Figura 6-13	Sección transversal csa-03 correspondientes a los escenarios sa-03 (sección superior) y sa-04 (sección inferior) de la cuenca San Antonio.....	322
Figura 6-14	Sección transversal csa-04 correspondientes a los escenarios sa-01 (sección superior) y sa-02 (sección inferior) de la cuenca San Antonio.....	323
Figura 6-15	Sección transversal csa-04 correspondientes a los escenarios sa-03 (sección superior) y sa-04 (sección inferior) de la cuenca San Antonio.....	324
Figura 6-16	Sección transversal cea-01 correspondientes a los escenarios ea-01 (sección superior) y ea-02 (sección inferior) de la cuenca El Ángel.....	326
Figura 6-17	Sección transversal cea-01 correspondientes a los escenarios ea-03 (sección superior) y ea-04 (sección inferior) de la cuenca El Ángel.....	327

Figura 6-18 Sección transversal cea-02 correspondientes a los escenarios ea-01 (sección superior) y ea-02 (sección inferior) de la cuenca El Ángel.....	328
Figura 6-19 Sección transversal cea-02 correspondientes a los escenarios ea-03 (sección superior) y ea-04 (sección inferior) de la cuenca El Ángel.....	329
Figura 6-20 Sección transversal cea-03 correspondientes a los escenarios ea-01 (sección superior) y ea-02 (sección inferior) de la cuenca El Ángel.....	330
Figura 6-21 Sección transversal cea-03 correspondientes a los escenarios ea-03 (sección superior) y ea-04 (sección inferior) de la cuenca El Ángel.....	331
Figura 6-22 Sección transversal cea-04 correspondientes a los escenarios ea-02 (sección superior) y ea-03 (sección inferior) de la cuenca El Ángel.....	332
Figura 6-23 Sección transversal cea-04 correspondientes a los escenarios ea-04 de la cuenca El Ángel	333

INDICE DE TABLAS

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

Tabla 2.2-1 Clasificación según Costa (Parte I).	30
Tabla 2.2-2 Clasificación según Costa (Parte II).	31
Tabla 2.2-3 Clasificación de flujo de escombros.	35
Tabla 2.4-1 Propiedades físicas de los flujos de escombros observados..	48

CAPITULO III: RECOPIACIÓN DE DATOS DE ENTRADA

Tabla 3.2-1 Nombre de las sub-cuencas de estudio	107
Tabla 3.2-2 División administrativa del municipio de Nejapa.....	112
Tabla 3.2-3: División administrativa del municipio de Apopa.....	115
Tabla 3.2-4 Municipios en cuenca San Antonio.....	119
Tabla 3.2-5 Municipios en cuenca El Ángel.....	119
Tabla 3.2-6 Quebradas en el área de estudio	120
Tabla 3.2-7 Cronoestratigrafía.....	123
Tabla 3.2-8 Información geológica presente en las cuencas.....	123
Tabla 3.2-9 Distribución de la clasificación pedológica del área de estudio ...	127
Tabla 3.2-10 Descripción de las categorías de usos de suelos.....	129
Tabla 3.2-11 Uso de suelos.....	130
Tabla 3.2-12 Parámetros morfométricos generales de las cuencas.....	135
Tabla 3.2-13 Categorías que definen la forma de la cuenca según el valor de Kc.	141

Tabla 3.2-14 Valores utilizados para el cálculo de la pendiente media del cauce principal de la cuenca del río El Ángel.....	146
Tabla 3.2-15 Valores utilizados para el cálculo de la pendiente media del cauce principal de la cuenca del río San Antonio.....	147
Tabla 3.2-16 Puntos y elevaciones por el método de la red de puntos del río El Ángel.....	151
Tabla 3.2-17 Puntos y elevaciones por el método de la red de puntos del río San Antonio.....	152
Tabla 3.2-18 Índices de sinuosidad.....	162
Tabla 3.2-19 Resumen de las características físicas y de comparación de la cuenca del río El Ángel y río San Antonio.....	166

CAPITULO IV: ANÁLISIS HIDROLÓGICO DE LA ZONA DE ESTUDIO

Tabla 4.2-1: Grupos hidrológicos del suelo	171
Tabla 4.2-2 Correspondencia del valor de CN para las condiciones de humedad del suelo dadas.....	173
Tabla 4.2-3 Valor de CN para las condiciones de humedad del suelo, en base a las ocupaciones de suelo adaptadas al país.	174
Tabla 4.2-4 Determinación de CNIII de Qda. Chacalapa de la cuenca El Ángel	182
Tabla 4.2-5 CN ponderado para las subcuencas del río El Ángel (Parte I). ..	183
Tabla 4.2-6 CN ponderado para las subcuencas del río El Ángel (Parte II). .	184

Tabla 4.2-7 CN ponderado para cada una de las subcuencas del río San Antonio (Parte I).....	185
Tabla 4.2-8 CN ponderado para cada una de las subcuencas del río San Antonio (Parte II).....	186
Tabla 4.2-9 Determinación del número de curva CN para las cuencas en estudio	187
Tabla 4.3-1 Desniveles del tramo 4 correspondiente a la cuenca El Ángel para la determinación de la pendiente media.	193
Tabla 4.3-2 Pendientes de los tramos correspondiente a la cuenca El Ángel.	194
Tabla 4.3-3 Pendientes de los tramos correspondiente a la cuenca San Antonio	194
Tabla 4.3-4 Determinación de los valores de K para cada cuenca en estudio	196
Tabla 4.4-1 Estaciones pluviométricas cercanas a la zona de estudio.....	198
Tabla 4.4-2 Áreas de influencia de cada estación sobre cada cuenca en estudio	199
Tabla 4.4-3 Intensidades y las áreas de influencia de la estación El Boquerón para el periodo de retorno de 50 años de la cuenca del río El Ángel.....	204
Tabla 4.4-4 Intensidades y las áreas de influencia de la estación San Salvador ITIC para un periodo de retorno de 50 años de la cuenca del río El Ángel.....	205
Tabla 4.4-5 Intensidades y las áreas de influencia de la estación El Boquerón para un periodo de retorno de 50 años de la cuenca del río San Antonio	206

Tabla 4.4-6 Intensidades y las áreas de influencia de la estación San Salvador ITIC para un periodo de retorno de 50 años de la cuenca del río San Antonio.	207
---	-----

Tabla 4.4-7 Alturas de precipitación para un periodo de retorno de 50 años de la cuenca del río El Ángel	210
---	-----

Tabla 4.4-8 Alturas de precipitación para un periodo de retorno de 50 años de la cuenca del río San Antonio.....	211
---	-----

CAPITULO VI: ANÁLISIS DE RESULTADOS

Tabla 6.2-1 Escenarios simulados en el DAN3D.....	295
--	-----

Tabla 6.2-2 Valores de coordenadas del flujo en cuenca San Antonio..	299
---	-----

Tabla 6.2-3 Valores de las características del flujo de escombros en cuenca San Antonio.....	299
---	-----

Tabla 6.2-4 Valores de coordenadas del flujo en cuenca El Ángel.....	300
---	-----

Tabla 6.2-5 Valores de las características del flujo de escombros en cuenca El Ángel.....	300
--	-----

Tabla 6.4-1 Ubicación de secciones transversales de la cuenca San Antonio..	316
---	-----

Tabla 6.4-2 Ubicación de secciones transversales de la cuenca El Ángel....	325
---	-----

Tabla 6.5-1 Posibles áreas a ser afectadas por un flujo de escombros y área de protección de la cuenca El Ángel.....	334
---	-----

Tabla 6.5-2 Áreas a ser afectadas por un flujo de escombros y área de protección de la cuenca San Antonio	338
--	-----

INDICE DE MAPAS

Mapa 1 Digitalización de las curvas de nivel del área de estudio.....	99
Mapa 2 Modelo de elevación digital (DEM) realizado en el software Qgis del área de estudio	101
Mapa 3 Hipsometría de la zona de estudio de la zona norte del AMSS	103
Mapa 4 Delimitación de cuencas	106
Mapa 5 Sub-cuencas de las cuencas en estudio.....	108
Mapa 6 División política-administrativa del área de estudio	118
Mapa 7: Mapa hipsométrico de las cuencas.....	121
Mapa 8: Geología de la zona de estudio	124
Mapa 9: Tipos de suelos	128
Mapa 10 Uso de suelos.	131
Mapa 11: Cauce principal de cuencas de estudio	136
Mapa 12: Representación de longitud axial.....	139
Mapa 13: Orden de las cuencas en estudio	158
Mapa 14: Mancha de flujo de escombros en cuenca San Antonio, de diferentes volúmenes simulados en el DAN3D.....	290
Mapa 15: Mancha de flujo de escombros en cuenca El Ángel, De Diferentes volúmenes simulados en el DAN3D.....	291
Mapa 16: Simulación de flujo de escombros correspondiente al escenario SA-01, con un volumen de liberación de 50,000 m ³	303

Mapa 17 Simulación de flujo de escombros correspondiente al escenario SA-02, con un vol de liberación de 100,000 m ³	304
Mapa 18 Simulación de flujo de escombros correspondiente al escenario SA-03, con un volumen de liberación de 300,000 m ³	305
Mapa 19 Simulación de flujo de escombros correspondiente al escenario SA-04, con un volumen de liberación de 500,000 m ³	306
Mapa 20 Simulación de flujo de escombros correspondiente al escenario EA-01, con un volumen de liberación de 50,000 m ³	308
Mapa 21 Simulación de flujo de escombros correspondiente al escenario EA-02, con un volumen de liberación de 100,000 m ³	309
Mapa 22 Simulación de flujo de escombros correspondiente al escenario EA-03, con un volumen de liberación de 300,000 m ³	310
Mapa 23: Simulación de flujo de escombros correspondiente al escenario EA-04, con un volumen de liberación de 500,000 m ³	311
Mapa 24 Mapa de amenaza de la cuenca el Ángel. Representación de las posibles zonas afectadas y una propuesta de zona de protección.....	336
Mapa 25 Estructuras civiles afectadas por un flujo de escombros en cuenca El Ángel.....	337
Mapa 26 Mapa de amenaza de la cuenca El Ángel. Representación de las posibles zonas afectadas y una propuesta de zona de protección.....	339
Mapa 27 Flujo de escombros en cuenca San Antonio	340

TABLA DE SIGLAS

AMSS:	Área metropolitana de San Salvador.
CNR:	Centro Nacional de Registro.
COAMSS:	Consejo de Alcaldes y Oficina de Planificación del Área metropolitana de San Salvador.
DAN3D:	Análisis Dinámico en tres dimensiones (Dynamic Analysis in three dimensions).
DEM:	Modelo digital de elevación (Digital Elevation Model).
DIGESTYC:	Dirección General de Estadística y Censos.
MAG:	Ministerio de Agricultura y Ganadería.
MARN:	Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
MSNM:	Metros Sobre el Nivel del Mar.
OPAMSS:	Oficina de Planeación del Área Metropolitana de San Salvador.
SCS:	Servicio de conservación de suelos (Soil Conservation Service-SCS).
UES:	Universidad de El Salvador.
USGS:	Servicio Geológico de los Estados Unidos (United States Geological Survey).

TABLA DE UNIDADES

Corrientes/km²:	Corriente por Kilómetro cuadrado
h:	Horas
Km:	Kilómetro
Km²:	Kilómetro cuadrado
Km/km²:	Kilómetro por Kilómetro cuadrado
m:	Metro
m²:	Metro cuadrado
m³:	Metro cubico
min:	Minutos
mm:	Milímetros
mm/min:	Milímetros por minuto
msnm:	Metros sobre el nivel del mar
m/s:	Metros por segundo
m³/s:	metros cúbicos por segundo

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Flujo: Es un deslizamiento que adquiere grandes velocidades y que se comporta como fluido viscoso en movimiento.

Flujo lagrangiano: Es un flujo bidimensional aplicado a la hidrodinámica de partículas suavizadas para calcular el descentramiento a lo largo de un modelo de elevación digital tridimensional prescrito por el usuario en el DAN3D.

Fluido newtoniano: Se caracterizan por cumplir la Ley de Newton, es decir, que existe una relación lineal entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación.

Fluidos no newtonianos: Son aquellos en los que la relación entre esfuerzo cortante y la velocidad de deformación no es lineal.

Geología: Ciencia que analiza la forma interior y exterior del globo terrestre. De esta manera, la geología se encarga del estudio de las materias que forman el globo y de su mecanismo de formación. También se centra en las alteraciones que estas materias han experimentado desde su origen y en el actual estado de su colocación.

Geomorfología: El término geomorfología proviene del griego: γῆ, ge, es decir, geos (Tierra), μορφή o morfeé (forma) y λόγος, logos (estudio, conocimiento); Es la rama de la geología y de la geografía que estudia las formas de la superficie terrestre y los procesos que las generan.

HEC-HMS: Sistema de Modelación Hidrológico (Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System) está diseñado para simular los procesos de precipitación-escorrentía de las cuencas de drenaje dendrítico, aplicable en una amplia gama de áreas geográficas para resolver problemas.

Hipsometría: Parte de la topografía que estudia el conjunto de métodos y procedimientos para determinar y representar la altura, también llamada "cota", de cada uno de los puntos, respecto de un plano de referencia. Se consigue representar el relieve del terreno.

I-D-F: Una curva IDF o de Intensidad-Duración-Frecuencia es una relación matemática, generalmente empírica, entre la intensidad de una precipitación, su duración y la frecuencia con la que se observa.

Lahar: También conocido como flujo de escombros; término indonesio utilizado en geología para designar las corrientes detríticas muy fangosas que contienen fragmentos de roca volcánica de dimensiones muy variables (rocas, piroclastos, fragmentos de lava ya consolidada) que, a causa de altas precipitaciones, se desliza, especialmente por las laderas de elevada pendiente y mal consolidadas de los aparatos volcánicos; sus efectos a menudo son peores que las propias erupciones catastróficas

Mapas de riesgos: Son métodos de prevención que ayudan a detectar nuevos riesgos y amenazas para el área de análisis.

Morfometría: Conjunto de técnicas, procedimientos y métodos, utilizados para determinar atributos configuracionales del relieve y, en base a ellos, conocer el sistema de relaciones espaciales que caracterizan a las formas del terreno. (Pedraza Gilsanz, 1996).

Número de Curva (CN): Fue desarrollado para calcular la precipitación efectiva como una función de la lluvia acumulada, la cobertura del suelo, el uso del suelo y las condiciones de humedad.

Reología: Es la ciencia del flujo que estudia la deformación de un cuerpo sometido a esfuerzos externos, resumidamente, se puede decir que la reología se encarga de estudiar la viscosidad, la plasticidad y la elasticidad de los fluidos.

Precipitación: Es la caída de agua desde la atmósfera hacia la superficie terrestre, se genera por la condensación de agua, o sea, la acumulación de agua en la atmósfera creando nubes.

Proyección Lambert: Es una de proyección cartográfica donde superpone un cono sobre la esfera de la Tierra, con dos paralelos de referencia secantes al globo e intersecándolo. Esto minimiza la distorsión proveniente de proyectar una superficie tridimensional a una bidimensional.

Qgis: Es un Sistema de Información Geográfica (SIG) de software libre que, permite manejar formatos raster y vectoriales así como bases de datos. Se agrupan varias aplicaciones para la captura, edición, análisis, tratamiento, diseño, publicación e impresión de información geográfica.

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1 RESUMEN

El Salvador, un país con una extensión territorial de 21,040 Km², y concentra aproximadamente un 27.3% de su población en el Área Metropolitana de San Salvador, conocida como AMSS, en un territorio de 610 Km² (equivalente a un 2.8% del territorio nacional), a partir de un conglomerado de 14 municipios, que están estrechamente relacionados geográficamente, así como en sus actividades económicas, sociales, culturales, ambientales y políticas.

La ciudad de San Salvador, la capital de El Salvador, está ubicada en una región de alta sismicidad conocida como “El Valle de las Hamacas” al pie del volcán de San Salvador, a una latitud de 13° 42’ Norte y una longitud de 89° 11’ Oeste, una altura media de 750 m.s.n.m.; sus límites geográficos más notables, son el volcán de San Salvador al Norponiente, el cerro de Nejapa al Norte, el Lago de Ilopango al Oriente, el cerro (volcán extinto) de San Jacinto al Sureste y la Cordillera del Bálsamo al Sur.

Debido a su Geomorfología, en el AMSS se pueden encontrar grandes elevaciones montañosas con pendientes pronunciadas, incrementando la susceptibilidad a derrumbes o deslizamientos, flujos de escombros, inundaciones por altas precipitaciones, siendo estos y otros factores los que pueden afectar a los habitantes aledaños a las quebradas o áreas de influencia.

Teniendo en cuenta el crecimiento acelerado y descontrolado en varias zonas del AMSS, debido a razones económicas, sociales y culturales, es que muchas personas habitan en las riberas de los ríos y quebradas en condiciones no adecuadas y muchas veces ilegales; sin embargo, son éstas las más expuestas a cualquier desastre que puede ser causado por desprendimientos de suelos poco consolidados o rocas y arrastrados por el agua que conducen las quebradas aguas abajo, convirtiéndose en zonas de riesgo y vulnerables a flujos de escombros.

Por lo tanto, es necesario investigar, analizar y mapear las zonas de posible ocurrencia, incluyendo la determinación de las probabilidades de ocurrencia de estos fenómenos naturales, para planificar las actuaciones en el territorio.

En el presente Trabajo de Graduación se realizará una investigación que abarcará desde el análisis de flujos de escombros hasta la posible ocurrencia de estos eventos; el estudio principalmente se llevara a cabo en las cuencas que drenan hacia el norte desde las laderas del volcán de San Salvador, específicamente desde la estructura con mayor elevación conocida como El

Picacho, ya que históricamente se cuenta con registros de este tipo de eventos, donde se ha visto afectada la zona Nor-este del Área Metropolitana de San Salvador (AMSS); además, se pretende con el análisis de la información recopilada en la investigación, proponer medidas de protección en zonas de alta vulnerabilidad en base a modelos de propuestas que se realizaran con el software DAN3D, utilizando la recopilación de datos necesarios sobre los cauces a investigar.

Históricamente, en El Salvador se han generado este tipo de flujos, que han sido catastróficos, de los cuales se ha recolectado información teórica y datos de las zonas de estudio que servirán de apoyo para establecer parámetros y criterios de análisis, encontrando características que serán útiles para modelar eventos en el software DAN3D, y de esta manera conocer posibles comportamientos que estos tendrían como: la trayectoria del flujo, su volumen y la posible distancia recorrida, para establecer zonas de protección y evitar en gran medida que se generen pérdidas humanas, como también daños en infraestructuras, por futuros eventos.

1.2 ANTECEDENTES

Históricamente en El Salvador, se han registrado diferentes fenómenos naturales (huracanes, erupciones volcánicas, terremotos, flujos de escombros, etc.), generando pérdidas humanas y daños materiales que¹, alrededor del mundo y en un periodo de diez años (2005-2015), en estos eventos más de 700,000 personas han perdido la vida, 1.4 millones han sufrido heridas y han ocasionado daños que superan los 1.600 millones de dólares. Además, entre 2008 y 2012, 144 millones de personas resultaron desplazadas por desastres. Los países más afectados son los que están en vías de desarrollo, entre los cuales se encuentra El Salvador.

El Salvador es un país altamente vulnerable a flujos de escombros, debido a que en él se encuentran estructuras con altas elevaciones, con pendiente y relieves pronunciados entre ellos el Volcán de San Salvador y sus alrededores.

El Área Metropolitana de San Salvador es una de las ciudades con mayor densidad poblacional del país, con 2,907 Hab/Km² (DIGESTYC, 2016). Esto ha generado invasión de forma gradual en las faldas del volcán de San Salvador, aumentando el riesgo de que incluso los eventos pequeños puedan tener consecuencias sociales muy serias. La parte central del volcán, que contiene un gran cráter circular, se conoce como El Boquerón, el cual se eleva con una altitud

¹ Marco de Sendai para la Reducción de Desastres 2015-2030, Naciones Unidas, Pág. 10, 2015.

de aproximadamente 1,890 metros. El Picacho, es el prominente pico con la mayor elevación (altitud de 1960 metros), ubicado al noreste del cráter, y representan los restos de un edificio más antiguo y de mayores dimensiones (Major, J.J., et al, 2001).

Históricamente se cuentan con registros de flujos de escombros en los alrededores del volcán de San Salvador, exactamente en la ladera este del cerro El Picacho, de los cuales se registran dos: el primer flujo de escombros fue en 1934, los deslizamientos de tierra se desencadenaron después de un periodo de lluvias, que se prolongó por 7 días y que afectó a todo el país. En los últimos 2 días del evento lluvioso, ocurrieron los mayores deslizamientos; se produjo un flujo de escombros que arrastró toda la capa vegetal y el suelo, dejando al descubierto todas las lavas adyacentes, específicamente sobre la ladera Este del Picacho; el deslizamiento se condujo por La Quebradona, afluente de la quebrada El Níspero, hasta el área que ahora ocupa el Reparto Montebello, provocando un flujo de escombros que se cree sobrepasó el 1,000,000 m³. A diferencia del flujo de escombros de 1982, en 1934 no se lamentaron pérdidas humanas ya que esta zona no estaba habitada².

El segundo deslizamiento se produjo en septiembre de 1982, se registró otro temporal entre los días 17 y 20; en varios observatorios meteorológicos se registraron las mayores intensidades del siglo (cerca de 350 mm. durante los 4

² Levantamiento de deslizamientos de Tierra en el Volcán de San Salvador, Julio Rubio, Pág. 4, 2001.

días), especialmente entre la noche del 18 y la mañana del 19. Esto provocó números deslizamientos por todo el país. Nuevamente en el Picacho, se vuelve a generar otro flujo de escombros, que ocurrió desde la cota 1,925 msnm, y descendió a través de la quebrada El Níspero hasta las zonas urbanizadas que se encontraban sobre la cota 790 msnm, en el Reparto Montebello.

El área ocupada por la zona de deslizamiento alcanzó entre las 10 y las 15 hectáreas, extendiéndose el área afectada directamente por el deslizamiento, movimientos de tierra y asentamientos hasta las 60 hectáreas. Se estima que el área implicada por el deslizamiento fue de 700 metros de largo por 65 metros de ancho y un aproximado de 7 metros de profundidad. El flujo de lodo, vegetación y agua se estimó en su parte baja en 200,000 m³ y afecto principalmente al Reparto Montebello Poniente, pero también a la Colonia Lorena, Colonia San Mauricio, Residencial Montebello, Colonia San Ramón y Colonia Santa Margarita. Este evento dejó pérdidas humanas en un estimado de 300 a 500.

En 1996, Kiernan y Ladru, del Royal Institute of Technology de Estocolmo, Suecia, realizaron una investigación sobre este último evento, y según estos autores, en una superficie de 6.5 hectáreas alrededor de la cicatriz de 1982, en cualquier momento, pueden producirse nuevos deslizamientos debido al estado de degradación e inestabilidad del suelo.

Luego de estos eventos, ocurre en 2007, un flujo de escombros, esta vez ocasionado por acumulación de ceniza volcánica, lluvias y aumento de

sismicidad en la zona del volcán de San Salvador. En octubre de 2008, otro pequeño flujo de escombros tuvo lugar cerca del área de liberación del flujo de 1982, pero debido al volumen relativamente pequeño (aproximadamente 3,000 m³), no desarrolló un gran recorrido, por lo que no llegó a ninguna población o áreas construidas.

Según el documento de Cepeda et al (2009), sobre flujos de escombros amenazando el territorio del AMSS, específicamente en la ladera Norte del picacho; menciona que los factores anteriormente mencionados, tienen conexión con la actividad sísmica de la zona. *“En el año de 1986, un terremoto de poca profundidad provocó licuefacción del suelo y varios deslizamientos de tierra en la zona epicentral del AMSS, por otra parte, el terremoto del 13 de enero de 2001 provocó un derrumbe en la Cordillera del Bálsamo y se deslizó sobre la colonia Las Colinas que mató a más de 600 personas en una zona al suroeste del AMSS. Actualmente en esta zona, los niveles de riesgo han sido controlados gracias a la construcción de obras de mitigación; sin embargo, la repoblación en la zona de impacto ha sido prohibida por las autoridades”*

También en distintos departamentos de El Salvador existen registros de flujos de escombros en zonas cercanas a volcanes que se han visto afectados por este tipo de evento, como, por ejemplo, el volcán Chichontepec ubicado en el departamento de San Vicente, durante el paso del Huracán Ida, en noviembre del año 2009, se generaron, entre la noche del sábado 7 y domingo 8, un

promedio de 355 mm. de lluvia. Esta cantidad de precipitación produjo un gran flujo de escombros, ocasionando pérdidas humanas y daños a la propiedad, principalmente en los municipios de Verapaz y Guadalupe. El MARN ha estimado un volumen de 240,000 m³ para el flujo de escombros que impacto a Verapaz. Con un recorrido de 6 kilómetros desde el inicio del flujo hasta la parte final de la zona de la altura del flujo fue de dos metros. En el municipio de Guadalupe de acuerdo al MARN, se produjo un flujo de 370,000 m³ con un recorrido de 6 kilómetros y en la quebrada Los Infernillos se produjo un flujo de 250,000 m³. El Director de Protección Civil, aseguró que debido a estas lluvias se registraron 176 deslizamientos, 13 grandes inundaciones y 123 desbordamientos de ríos. Que afectaron a 1,779 viviendas y destruyeron otras 220, el número de fallecidos asciende a 184 personas, 58 desaparecidos y 14,000 damnificados. De haberse registrado esa acumulación de lluvia sobre el Picacho las consecuencias hubieran sido catastróficas.

Más recientemente, el 3 de septiembre de 2014 en el Volcán Chaparrastique del departamento de San Miguel, debido a las intensas lluvias (que en 20 minutos alcanzaron 70 mm) se registró un flujo de escombros sobre la ladera Noroeste del volcán que afecto a dos viviendas donde solo hubo daños materiales, debido a que los habitantes ya habían sido evacuados³. Este flujo de escombros

³ *Deslave por intensas lluvias sobre el volcán Chaparrastique, MARN, Informe Especial N° 251, 2014.*

contenía ceniza emanada del volcán Chaparrastique de sus erupciones del 29 de diciembre de 2013 y del 14 de febrero de 2014.

1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El crecimiento urbano y la necesidad de asentarse en las cercanías de la capital, ha provocado que las nuevas construcciones se desplacen hacia la zona norte del AMSS, extendiéndose incluso a territorios de alto valor ambiental, como el Volcán de San Salvador.

Siendo el AMSS la región política, económica y financiera más importante del país; la cual concentra el 27.3% de la población en una extensión de 2.8% del territorio nacional y dada la alta densidad poblacional de 2,907 Hab/km² hasta el año 2016, se concentra aquí la mayor actividad comercial, industrial y urbana⁴.

El crecimiento urbano se ha expandido principalmente en dirección este-oeste, desde el extremo poniente en Santa Tecla, hasta el extremo oriente, en San Martín, favorecida por la presencia de infraestructura vial que atraviesa todo el territorio Metropolitano, generando una fuerte presión a la urbanización; por lo que, se requiere investigar las zonas con mayor vulnerabilidad a eventos como flujos de escombros y lograr un importante insumo para las aprobaciones de los

⁴ Observatorio Metropolitano a partir de la Encuesta de Hogares de Propósitos Múltiples EHPM. Dirección General de Estadística y Censos DIGESTYC, 2016.

usos del suelo o de propuestas de mitigación para las zonas de mayor probabilidad a ser afectadas⁵.

Los flujos de escombros pueden ser generados por intensas lluvias, movimientos de tierra y taludes con altas pendientes, comúnmente en áreas con relieves topográficos pronunciados y precipitación pluvial alta y son peligrosos para las personas que viven en las proximidades de los cauces que descienden del volcán de San Salvador.

El análisis de los flujos de escombros requiere una evaluación detallada de las características topográficas, geológicas, geotécnicas e hidrológicas de las áreas susceptibles, sin embargo, existen estudios realizados en el AMSS por diversas instituciones nacionales como extranjeras, sobre amenazas y gestión de riesgos; del cual se pretende con dicha información actualizada y con el uso del software DAN3D, considerar más parámetros reológicos de la zona, ya que son un fenómeno común en los alrededores de los volcanes, por las características escarpadas y geomorfológicas de los mismos; además que muchos de los cauces nacen en ellos; por lo que es necesario determinar volúmenes y magnitudes de flujo, con la ayuda de propiedades mecánicas y características de la zona.

⁵ *Resumen Ejecutivo, Esquema Director, Área Metropolitana de San Salvador, COAMSS-OPAMSS, 2018*

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo general:

Modelar en el software DAN3D pronóstico de eventos de flujos de escombros, para zonas con mayor susceptibilidad a ser afectados por flujos provenientes de la ladera Norte del volcán de San Salvador y que pueden afectar directamente a la zona Norte del AMSS.

1.4.2 Objetivos específicos:

- Recopilar información topográfica, geotécnica e hidrológica de la zona de estudio.
- Modelar posibles escenarios de flujos de escombros que se puedan presentar en la zona Norte del AMSS, utilizando el software DAN3D (Análisis Dinámico de Deslizamientos de tierra en 3 dimensiones).
- Determinar las zonas de peligrosidad e establecer zonas de protección y otros, y manejo de la cuenca.

1.5 ALCANCES

El presente Trabajo de Graduación abarcará el estudio de la cuenca del Rio San Antonio ubicado en el municipio de Nejapa y la cuenca del Rio El Ángel ubicado en el municipio de Apopa, ambas pertenecientes a la zona norte del AMSS, debido a que presentan eventos históricos de flujos de escombros y son de alta susceptibilidad, lo cual incrementa el riesgo para personas que viven en las proximidades de éstas, ya que los flujos y cauces descienden de las laderas del volcán.

Se realizará la modelación en un programa de análisis dinámico en 3D con posibles escenarios de flujos de escombros proyectados que podrían ocurrir. Dicho estudio se modelará en base a características topográficas, geológicas, geotécnicas e hidrológicas de la zona y a partir de los datos obtenidos como velocidades, magnitudes e intensidades de flujo, se podrán delimitar zonas susceptibles a flujos de posible afectación; además, de determinar por medio de la clasificación de la peligrosidad de Lahares en función de la probabilidad de ocurrencia y de los volúmenes producidos realizado por el MARN–USGS, que indica que para volúmenes menores a 300,000 m³ la probabilidad de ocurrencia anual es de 1 en 100 (1%) y para el caso más desfavorable 1 en 10 (10%), y para

volúmenes mayores a 500,000 m³ el informe de la USGS indica que es difícil de determinar, pero define la probabilidad de ocurrencia anual de 1 en 40,000⁶.

1.6 LIMITACIONES

Existen pocas investigaciones acerca del uso del software DAN3D para el análisis de flujos de escombros realizados en el país, aunque de diversas maneras dichos flujos si se han estudiado en el AMSS.

Se realizará el análisis de los flujos de escombros y modelaciones en el software DAN3D de posibles eventos obtenidos de la información de la zona de estudio e ingresada en el programa, en donde no se cuentan con registros anteriormente.

El software DAN3D para la modelación de flujos de escombros no es de uso libre, por lo que, se cuenta con una única laptop que tiene Licencia en la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de El Salvador (UES), para uso académico y de investigación, la licencia del software DAN3D fue proporcionada por el profesor *Oldrich Hungr*, destacado experto en evaluación de riesgos de deslizamientos de tierra, quien completo su licenciatura y maestría en ingeniería civil en la Universidad de Ottawa, Canadá.

⁶ Estudio de Amenazas Naturales y gestión del Riesgo, USGS, Pág. 15, 2014.

1.7 JUSTIFICACIÓN

Los flujos de escombros son comunes en áreas con relieves topográficos pronunciados, como las zonas cercanas a volcanes y de alta precipitación pluvial. Usualmente, el desencadenamiento de un flujo de escombros significa el movimiento de grandes acumulaciones de sedimentos formando una consistencia viscosa (semisólido), que son peligrosos y pueden generar la destrucción de urbanizaciones o carreteras adyacentes. Los flujos de escombros se conducen en los canales de drenaje primario (quebradas) donde el agua mueve grandes cantidades de suelo, roca, detritos, arboles, vegetación entre otros, ladera abajo, estos pueden viajar varios kilómetros, con velocidades de decenas de kilómetros por hora, dependiendo de la distancia del volcán estos afectan zonas en pocos minutos o en algunas horas. Su poder destructivo es alto y arrasa cuanto encuentra a su paso.

Históricamente en El Salvador los flujos de escombros o Lahares han ocurrido en el volcán de San Salvador con registros de volúmenes de más de 100,000 metros cúbicos. Se cuenta con registros realizados por la USGS sobre los riesgos de posibles deslizamientos en el AMSS, con los cuales se pretende (con información topográfica actualizada) obtener otros parámetros geológicos que ayuden a delimitar las posibles zonas afectadas por este tipo de eventos. En las zonas volcánicas y de alta pendiente los flujos de escombros son un evento común, en ríos y quebradas es donde su transporte toma lugar preferencialmente, ya que

por medio de estas se presentan formaciones de sedimentos aguas arriba del punto de interés que pueden ser arrastrados aguas abajo y generar grandes volúmenes de escombros, por lo que se necesita conocer las propiedades mecánicas del suelo, topografía, caudal y las zonas de influencia de cada río o quebrada en estudio, para realizar la modelación de proyección de flujos de escombros con la utilización del software DAN3D.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 RESUMEN

El término “Lahar” abarca una gama de flujos de sedimentos y agua, técnicamente a este tipo de evento se le conoce como flujo hiperconcentrado y como flujo de escombros, se usa para referirse a una mezcla de fragmentos de roca, de diferentes tamaños y agua que fluye rápidamente en las laderas de un volcán bajo la acción de la gravedad y es uno de los procesos de remoción en masa más efectivos para movilizar sedimentos poco consolidados. Los Lahares se clasifican como extremos debido a las grandes cantidades de agua descargada, que son poco frecuentes pero catastróficos con la capacidad de modificar la geomorfología de los cauces por donde fluyen; además, de causar daños a la infraestructura (carreteras, puentes, ciudades) e incluso pérdidas humanas.

El estudio de la mecánica de un flujo de escombros (Lahares) puede resultar bastante complejo debido a su naturaleza mixta, pues dentro del flujo de escombros, interactúan material granular de diversos tamaños, además de sedimentos, agua y en menor medida, aire. Es por ello por lo que no existe un enfoque único para el tratamiento de los flujos de escombros.

Por tanto, aquí se presentarán sus características principales, su composición y clasificación efectuada por diversos investigadores, teniendo en cuenta las propiedades y dinámica que caracterizan a estos flujos. Finalmente se describirán modelos numéricos necesarios para el análisis de movimientos gravitacionales rápidos, así como también una descripción de lo que es el modelo DAN-3D para el análisis de flujos de escombros.

2.2 GENERALIDADES

2.2.1 Los Flujos de Escombros

Un deslizamiento de tierra es un transporte masivo de agua, roca o suelo que se mueve debido a la gravedad. La mayoría de los deslizamientos de tierra naturales son una combinación de estos materiales pétreos mezclados con agua. El agua es altamente inherente a la velocidad y distancia de salida. Cuando la masa está dominada por el agua, el movimiento de deslizamiento se rige por leyes hidrodinámicas, si hay un bajo contenido de agua en el deslizamiento de tierra, la dinámica granular, es decir, el movimiento entre las partículas determinará el comportamiento. La mayoría de los deslizamientos de tierra son una interacción entre estos dos procesos. Norem y Sandersen (2012).

Los flujos son deslizamientos que adquieren grandes velocidades y que se comportan como fluidos viscosos en movimiento, las masas se comportan como un fluido, pero su comportamiento es diferente al de los fluidos convencionales como el agua.



Grietas en el Picacho producidas por deslave 1982.
Foto: Archivo EDDH.



Zona de Montebello "casa rosada" después del deslave de El Picacho 1982. Foto: Archivo EDDH.

FIGURA 2-1 Ejemplo de flujo de escombros, en el Picacho y en Montebello en 1982, El Salvador [Fuente: Periódico El Diario De Hoy, 1982].

Los flujos de escombros tienden a moverse en forma de impulsos o pequeños aumentos, esto se debe principalmente a que el flujo debe superar las fuerzas de fricción y los posibles obstáculos que se puedan presentar en su camino, también se caracterizan por generarse en episodios muy cortos de tiempo y con condiciones de lluvias extremas en lugares comúnmente desolados.

2.2.2 Conceptos de Flujos de Escombros

Se conoce como flujos formados por material no consolidado que al saturarse y desestabilizarse debido a episodios de lluvias con alta intensidad se generan deslizamientos de tierra que descienden por los cauces o las laderas de las montañas. Este tipo de flujos se caracteriza, porque en la parte delantera o "cabeza" están formados por material grueso como rocas, piedras, madera, y en la parte posterior se encuentra la fracción más fina limos y arcillas. Los flujos de

escombros se originan principalmente en lugares de alta pendiente donde este tipo de flujos cobra mayor fuerza.

Se presenta algunos conceptos según los autores, del significado de flujo de escombros:

- **Según Hampton (1972)**, “Los flujos de escombros son el resultado de alguna forma de colapso en el talud. Los escombros que caen como un deslizamiento colectan humedad y se mueven a lo largo de la pendiente, éste se licua o se dilata conforme avanza, aumentando la movilidad del fluido”
- **Según Iverson (1997)**, “Los flujos de escombros ocurren cuando masas de sedimento pobremente graduadas, agitadas y saturadas de agua, caen precipitadamente por una pendiente bajo efecto de la atracción de la gravedad”
- **Según la USGS (2005)**, “Los flujos de escombros se forman cuando una mezcla de sedimentos y agua se convierte en una pasta, similar al concreto fluido, capaz de contener en suspensión partículas de tamaños igual al de las gravas, cuando fluye lentamente o se detiene”.
- **Según Takahashi (1980)**, “Los Lahares son un flujo antiguo conformado 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”. Este será el concepto de flujo de escombros que se utilizará en este documento.

También se presentan a continuación, Otros nombres de cómo se han identificado los flujos:

- **“Lahares”**, término utilizado en Indonesia para identificar los flujos de lodo provenientes del deshielo de conos volcánicos.
- **“Huaycos”** nombre de terminología peruana para los flujos rápidos de aguas turbias y turbulentas de corta duración, cargados de sólidos de diferentes tamaños y tipos de rocas.
- **“Riadas”** utilizado en Bolivia para identificar los flujos torrenciales cargados de sedimentos, flujos de tierra, flujos de lodo, flujos de lodo rocoso, flujos de escombros, aluviones, flujos de residuos (“Debris Flows”), flujos hiperconcentrados de sedimentos, flujos torrenciales, entre otros.

Si bien se toma como concepto el utilizado por Takahashi, se utiliza flujo de escombros en lugar de lahares para referirse a los flujos estudiados en este documento.

2.2.3 Características de los flujos de escombros

A pesar de una variación significativa en el contenido de agua, la distribución del tamaño del grano y el comportamiento de la turbulencia, un flujo de escombros se moverá como un flujo fijo con un perfil de longitud ondulada. La sección media de la corriente contiene una masa más pequeña, principalmente arena del

tamaño de grano, y es seguida por una corriente de suspensión de limo y arcilla. La parte frontal del flujo de escombros está expuesta a la resistencia más grande, y el flujo naturalmente intentará disminuir la velocidad desarrollando un movimiento pulsante en la parte delantera. Cuando la presión del movimiento detrás del frente alcanza un nivel suficiente, el frente volverá a acelerarse. Lied et al., (2014).

El camino de escombros se divide en: zonas de iniciación, transporte y de deposición (ver Figura 2-2). La zona de iniciación es donde se libera el flujo de escombros y comienza la aceleración. En la zona de transporte, el arrastre de material aumenta el volumen del flujo, aquí es donde se alcanza la velocidad más alta; el volumen depende de la masa disponible, y la velocidad de arrastre depende de la distribución y el grosor del tamaño del grano.

Para que el flujo alcance una velocidad en la que se produce erosión, la pendiente normalmente debe ser más empinada que 15° ; la deposición de crestas, llamadas diques, es causada por velocidades más bajas en los límites y la deposición puede ocurrir si el terreno se curva o aplana, aunque la acumulación de material se produce principalmente en la zona de depósito.

Normalmente, el material grueso se deposita primero, mientras que la masa más fina se deposita sucesivamente a medida que el flujo se mueve más. La transición del transporte a la deposición comienza cuando la pendiente se encuentra en el rango de 15 a 20 grados. Norem y Sandersen (2012).

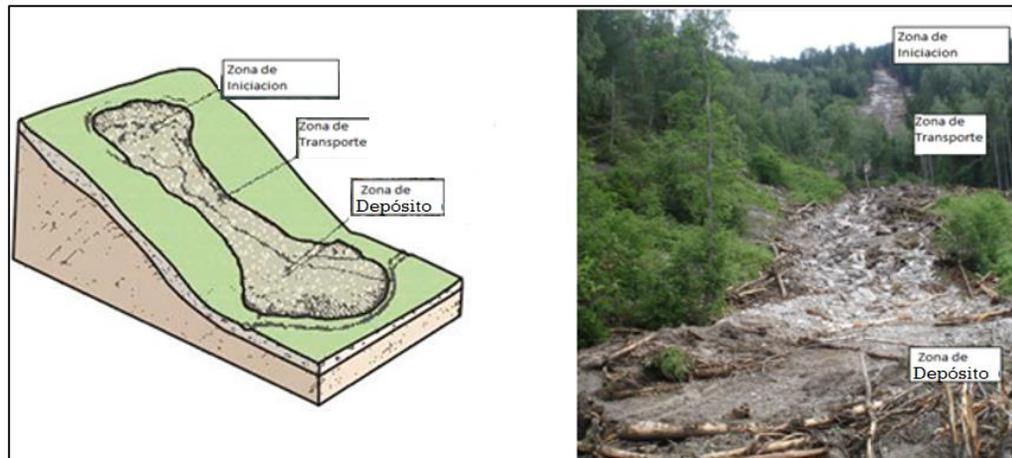


FIGURA 2-2 División de la trayectoria de un flujo de escombros⁷.

2.2.4 Composición de los Flujos de Escombros

Para conocer la composición de los flujos de escombros es necesario tener conocimiento del comportamiento del agua que forma parte, para ello, es necesario conocer acerca de los tipos de fluidos que hay, ya que tanto el agua como el flujo de escombros, son fluidos, pero con diferente composición.

Un fluido es un líquido que se deforma continuamente por esfuerzos cortantes, y que ofrece una pequeña o nula resistencia a las fuerzas tangenciales que se le aplican (por ejemplo, un vaso de agua al voltearse). Los fluidos que presentan una resistencia muy pequeña a ser deformados se les conoce como fluidos Newtonianos (por ejemplo, el agua en su estado puro), en tanto, a los fluidos que presentan mayor resistencia se les llama fluidos No-Newtonianos.

⁷ Reporte Técnico, Norem and Sandersen, 2012.

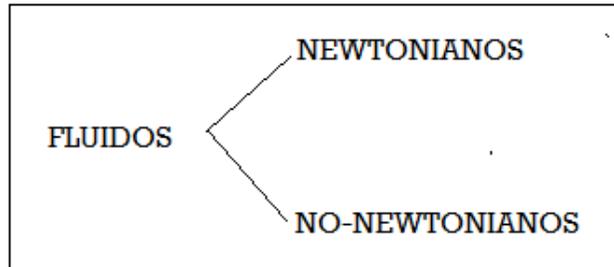


FIGURA 2-3 Tipos de fluidos [Fuente: Elaboración propia].

Cuando el transporte de sólidos es tan grande y la densidad de la mezcla se eleva por encima de la densidad del agua, las nociones de hidráulica fluvial se desvanecen y se introducen los conceptos de fluidos No-Newtonianos. Los fluidos No-Newtonianos comprenden en general mezclas como barros, aceites lubricantes muy viscosos, fluidos orgánicos como la sangre, etc. Los fluidos No-Newtonianos se subdividen en 3 tipos: Fluidos Dilatantes, Pseudoplásticos y de tipo Bingham. (ver figura 2-4 y 2-5).

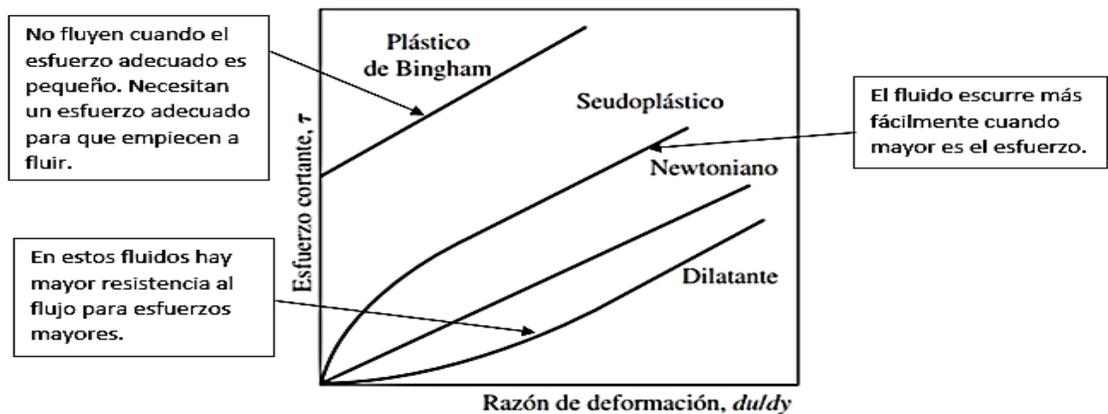


FIGURA 2-4 Variación del esfuerzo cortante con la razón de deformación para fluidos newtonianos y no-newtonianos⁸.

⁸ Mecánica de Fluidos: Fundamentos y Aplicaciones, Yunus Cengel y John Cimbala, Pág. 48, 1ra. Edición, 2006.

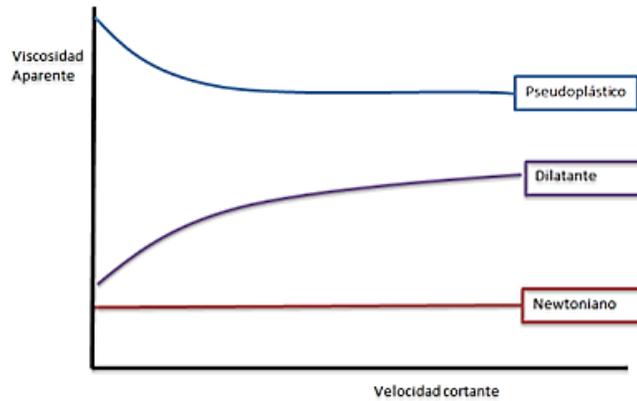


FIGURA 2-5 Diagrama de viscosidad vs velocidad para fluidos newtonianos y no-newtonianos

[Fuente: *Mecánica de Fluidos: Fundamentos y Aplicaciones*, Yunus Cengel y John Cimbala, P49, 1ra. Edición, 2006].

Entre los principales componentes tenemos: el agua, la matriz fina (partículas finas como la arcilla) y los granos gruesos, pudiéndose distinguir 3 regiones (ver figura 2-6):

Región 1: fragmentos de rocas altamente desordenados que parecen hincharse hacia el exterior.

Región 2: región de agua enlodada, altamente turbulenta con guijarros de diversos tamaños cargados adelante.

Región 3: región de agua enlodada con arena y guijarros con altas de barro.

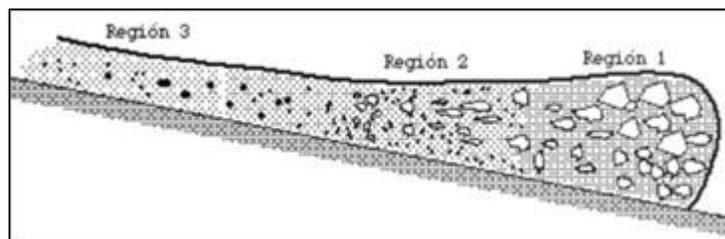


FIGURA 2-6 Composición de un flujo de escombros⁹.

⁹ *Aplicación de un modelo numérico de flujos de escombros y lodos en una quebrada en el Perú*, Ing. Leonardo Castillo, Pág. 115, 2006.

2.2.5 Clasificación de los flujos de escombros

En general, los flujos de escombros se han clasificado en: canalizados ocurren en grandes barrancos, mientras que los no canalizados se originan en pendientes muy pronunciadas, (ver Figura 2-7). Por otra parte, los flujos de ladera se producen debido a la resistencia al corte reducido en una capa débil. En las laderas de las montañas esta capa normalmente consta de labranza de grano fino. La profundidad de falla varía entre 0,2 - 1,0 m. La infiltración de agua es la razón más común para la estabilidad reducida. Un deslizamiento superficial es más probable que se convierta en un residuo si la masa tiene un grano fino, debido a una mayor presión de poro, ya que el agua deja fácilmente los poros cuando se inicia. Norem y Sandersen (2012).

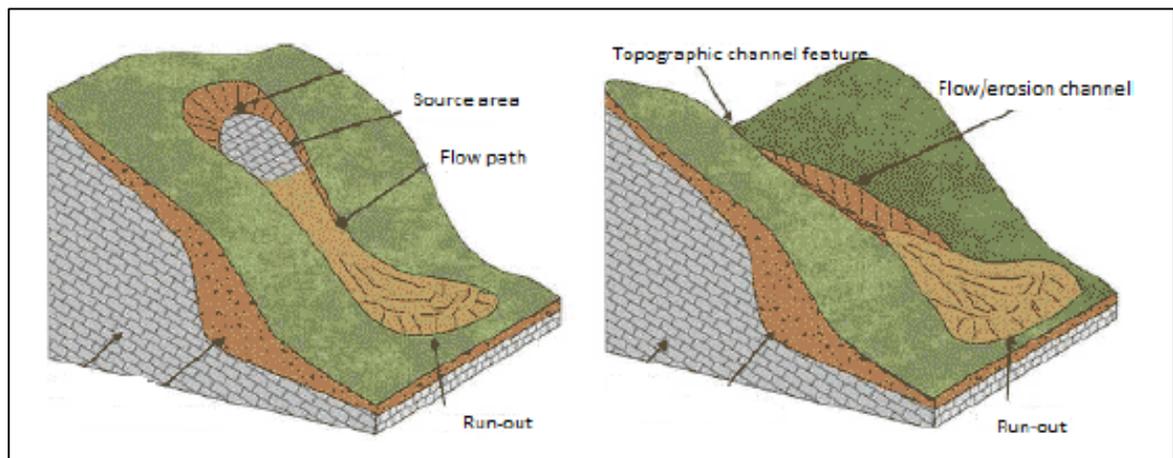


FIGURA 2-7 (a) Pendiente de ladera.

(b) Canal.

[Fuente: Nettleton et al. (2005)].

El comportamiento del flujo de escombros depende de las interacciones, las propiedades del material y la proporción de sólidos y fluidos. En consecuencia, existen muchas clasificaciones. Estas clasificaciones se centran en el mecanismo dominante del flujo, como interacciones sólido-sólido o líquido-sólido. Bagnold (1954).

2.2.6 Clasificación de flujos de escombros según, Takahashi y Norem y Sandersen

Una combinación de las clasificaciones de Takahashi (2007) y Norem y Sandersen (2012) conduce a la siguiente subdivisión:

- Flujos de desechos completamente desarrollados:
- Flujos de escombros pedregosos.
- Flujos viscosos de escombros.
- Flujo turbio-fangoso de escombros turbulentos.

El tipo pedregoso y viscoso representa flujos de escombros completamente desarrollados, mientras que los de desechos turbulentos simbolizan la transición de un flujo de desechos a un flujo de escombros. Esto significa que las partículas de escombros completamente desarrolladas tienen una mayor concentración volumétrica de partículas que un flujo de desechos turbulento. Edvardsen (2013).

Según Norem y Sandersen (2012), la presión de poro es alta en un flujo de desechos completamente desarrollado, mientras que es moderada en un flujo turbulento y baja en un flujo de desechos pedregosos. Los flujos de desechos pedregosos también contienen menos sedimentos finos.

Los diferentes tipos de desechos se pueden ilustrar por su dependencia de tamaños adimensionales (ver Figura 2-8). Una clasificación común se basa en el número de Reynolds (Re), el número de Bagnold (Ba) y la profundidad relativa (H/d).

El número de Reynolds expresa el grado de turbulencia sobre el flujo laminar, un bajo número de Reynolds coincide con los laminados. La pérdida de fricción dispersiva sobre la fricción viscosa se expresa mediante el número de Bagnold. La profundidad relativa es la relación entre la altura del flujo (H) y el tamaño de la partícula (d). Si el flujo tiene un bajo contenido de material grueso, las fuerzas viscosas serán aplicables (Norem, 2008). En una nube viscosa, tanto el número de Reynolds como el número de Bagnold serán pequeños y solo turbulentos en el frente. Un flujo de escombros fangoso tiene un movimiento turbulento. Breien (2005).

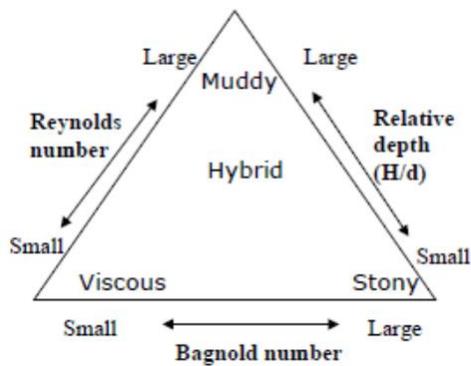


FIGURA 2-8 Regímenes de flujos de escombros y su dependencia de Re , Ba y H/d [Fuente: Breien, 2005].

Flujos de desechos completamente desarrollados.

En un escombros pedregoso, grandes rocas se acumulan en la parte delantera y superior. La profundidad de flujo en la parte delantera es grande. El contenido de agua es más bajo en comparación con la cola. Esto conduce a una alta permeabilidad entre las partículas grandes en el frente. No puede ocurrir licuefacción en este espacio de poro, por lo tanto, se mueve como un flujo granular. Las partículas más finas se depositan más atrás. El tamaño promedio de las partículas disminuirá hacia abajo en el perfil de flujo vertical, llamado clasificación inversa. Takahashi (2007). Según Norem y Sandersen (2012), esta clasificación ocurre debido a la colisión de partículas, lo que hace que la masa fluya continuamente. Los diques se pueden formar si el flujo de escombros de piedra se acerca a un camino angosto o poco profundo, y la masa se depositará en los bordes del camino. Takahashi (2007).

En un residuo viscoso, se acumula menos cantidad de rocas en la parte delantera, en comparación con un tipo de piedra. Las partículas gruesas se moverán como un continuo de agua y partículas, y todo el flujo se comporta como un fluido viscoso homogéneo.

Un flujo de escombros viscoso se reconoce por sus contrapesos característicos. La distancia entre las sobretensiones puede variar de segundo a minutos. Takahashi (2007). La colisión entre las partículas más gruesas se amortigua y la cantidad de sedimentos es alta en comparación con un flujo de escombros turbulento. Las oleadas de frente y su límite suelen contener cantos rodados más grandes, y tienen una presión de poro más baja que la presión hidrostática. Norem y Sandersen (2012).

Escombros de lodo turbulento.

La fuerza impulsora en un flujo de escombros turbulento es la turbulencia del agua, mientras que en los flujos de escombros completamente desarrollados no se puede alcanzar la turbulencia debido a la falta de espacio entre las partículas. Suele ocurrir cuando muchos materiales de grano fino pueden erosionarse fácilmente debido a la turbulencia. Un escombros turbio-fangoso está estrechamente relacionado con el transporte de sedimentos de un río o agua. Norem y Sandersen (2012). Según Takahashi (2007) es la cantidad de masa limitada en relación con la cantidad de agua. Un flujo de escombros turbulento nunca tendrá una densidad de masa volumétrica de más del 30%, en donde el

75% de las partículas tienen un diámetro inferior a 1 mm. Esta relación agua-masa es necesaria para obtener turbidez, las partículas se suspenden y juntas se comportan como un líquido con mayor viscosidad que el agua misma.

2.2.7 Clasificación de flujos de escombros según Costa (1988)

Costa (1988) diferencia 3 tipos de flujo: avenidas de agua (water flood), flujos hiperconcentrados y flujos de detritos (debris flow).

Flujo	Concentración de sedimentos	Densidad de sólidos (g/cm ³)	Esfuerzo cortante (dn/cm ²)	Tipo de fluido
Avenida de Agua	1-40% en peso 0.4-20% en volumen	1.01-1.33	0-100	Newtoniano
Flujo Hiperconcentrado	40-70% en peso 20-47% en volumen	1.33-1.80	100-400	No Newtoniano
Flujo de Escombros	70-90% en peso 47-77.5% en volumen	1.80-2.30	>400	Viscoplastico

Tabla 2.2-1 Clasificación según Costa¹⁰.(Parte I)

¹⁰ *Geomorphic and Sedimentologic Differentiation of Water Floods, Hyperconcentrate Flows and Debris Flow*, John E. Costa, *Rheologic*, 1988.

Flujo	Mecanismo de soporte de los sedimentos	Viscosidad (poise)	Concentración de sedimentos	Flujo predominante
Avenida de Agua	Fuerzas electrostáticas, turbulencia	0.01-20	No uniforme	Turbulento
Flujo Hiperconcentrado	Empuje, esfuerzo dispersivo, turbulencia	20-200	No uniforme a uniforme	Turbulento a laminar
Flujo de Escombros	Cohesivo, empuje, esfuerzo dispersivo, soporte estructural	>>200	Uniforme	Laminar

Tabla 2.2-2 Clasificación según Costa (Parte II).

2.2.8 Clasificación de flujos de escombros según Coussot (1997)

El investigador francés Coussot (1997) clasifica los flujos de escombros utilizando como parámetros la concentración y la granulometría del material sólido. Ambas en porcentaje.

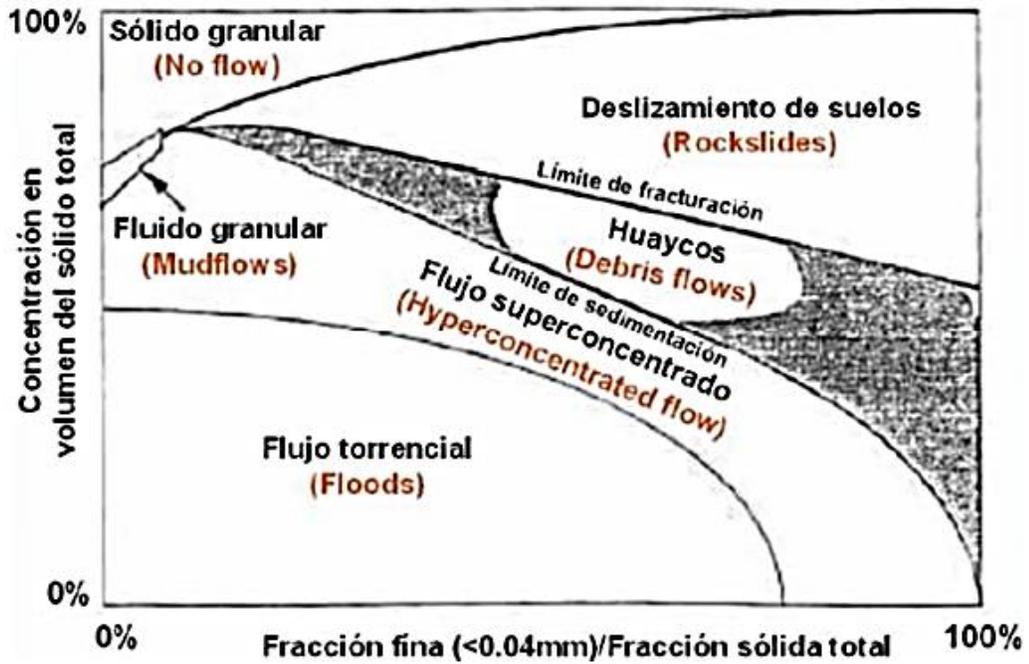


FIGURA 2-9 Clasificación reológica de los flujos según Coussot¹¹.

2.2.9 Clasificación de flujos de escombros según Suárez (2001)

Jaime Suárez Díaz (2001) muestra una clasificación en función del perfil característico de cada tipo de flujo. Los flujos de detritos ocurren generalmente en canales de gran pendiente y tiene una longitud de recorrido menor que los flujos hiperconcentrados y los flujos de lodo.

¹¹ Granular Flows and Numerical Modelling of Landslides, John E. Costa, 2001.

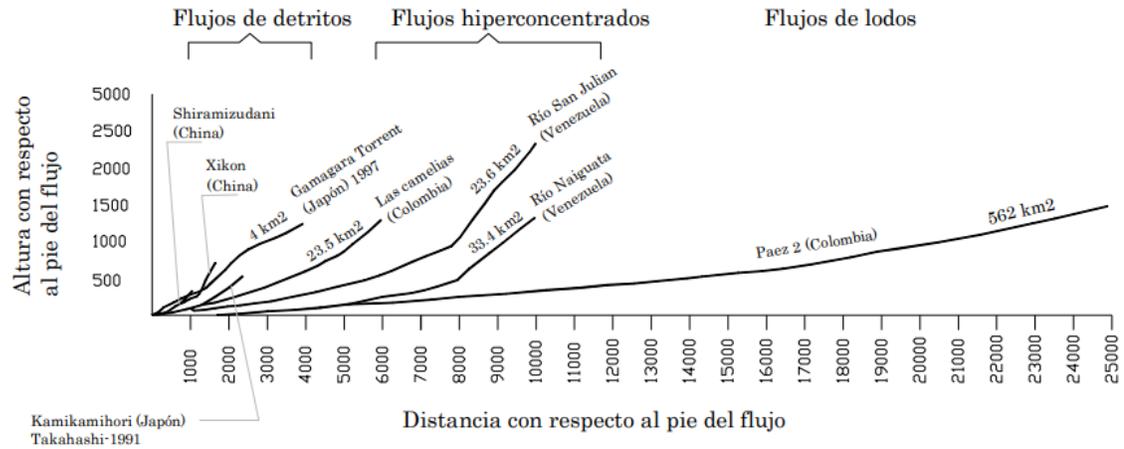


FIGURA 2-10 Clasificación de flujos según Jaime Suarez [Fuente: Deslizamiento: Análisis Geotécnico, Jaime Suarez, 2001].

Los flujos de lodo generalmente consisten de altas concentraciones de partículas finas (limos y arcillas). El fluido se comporta como un “slurry” homogéneo. De acuerdo a experimentos de Wan y Chien (1989), un fluido se convierte en un “slurry” homogéneo a una concentración de partículas finas de solamente de 90 Kg/m³. En el caso que el Índice de Plasticidad (IP) para matrices de sedimentos del flujo son mayores a 5%, se colocan dentro de la clasificación de mudflows. Hungr (2001).

El flujo hiperconcentrado está formado por una mezcla de partículas gruesas y agua. Se considera un flujo hiperconcentrado si la concentración volumétrica de sedimentos en el flujo varía de 20% a 60%.

En los flujos de detritos los sedimentos controlan totalmente el flujo y el componente agua es menos importante. El movimiento de los flujos de detritos se le relaciona generalmente con “flujo turbulento de granos”. El movimiento se

produce por transferencia de momentos al colisionar las partículas o bloques que se mueven. Los flujos son no-viscosos y son generalmente flujos turbulentos de dos fases. La fase líquida es un slurry consistente de agua y partículas finas y la fase sólida son las partículas gruesas.

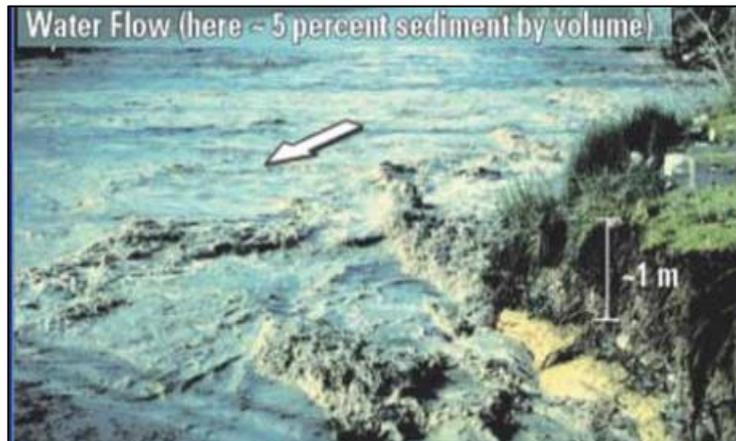


FIGURA 2-11 Flujo de agua. 5% de volumen de sedimentos [Fuente: USGS, 2005]



FIGURA 2-12 Flujo hiperconcentrado. 40% de volumen de sedimentos [Fuente: USGS, 2005]



FIGURA 2-13 Flujo de escombros. 65% de volumen de sedimentos [Fuente: USGS, 2005]

TABLA RESUMEN DE LAS CLASIFICACIONES DE FLUJO DE ESCOMBROS

Clasificación	Descripción	Tipos de flujos
Takahashi y Norem y Sandersen	Clasificación según el número de Reynolds (Re), el número de Bagnold (Ba) y la profundidad relativa (H/d).	• Flujos de desechos completamente desarrollados:
		• Flujos de escombros pedregosos.
		• Flujos viscosos de escombros.
		• Flujo turbio de escombros turbulentos.
Costa (1988)	Clasificación según la diferenciación reológica, geomorfológica y de sedimentación.	• Avenida de agua.
		• Flujo hiperconcentrado.
		• Flujo de escombros.
Cousot (1997)	Clasificación de flujos de escombros utilizando como parámetros la concentración y la granulometría del material sólido.	• Sólido granular.
		• Deslizamiento de suelo.
		• Fluido granular.
		• Flujo hiperconcentrado.
		• Flujo torrencial.
Suárez (2001)	Clasificación en función del perfil característico de cada tipo de flujo.	• Flujos de detritos.
		• Flujos hiperconcentrados.
		• Flujo de lodos.

Tabla 2.2-3 clasificación de flujo de escombros [Fuente: Elaboración propia].

2.3 CONCEPTOS IMPORTANTES DEL MECANISMO DE SOPORTE DE PARTÍCULA

- **Esfuerzo Dispersivo.**

Basado en el concepto de esfuerzo dispersivo por Bagnold (1954), quien, realizó experimentos con partículas cizallándose en un cilindro giratorio y observó que los esfuerzos de soporte de la partícula eran generados por el resultado de la colisión entre partículas.

El esfuerzo normal fue llamado esfuerzo dispersivo y se formuló la siguiente ecuación:

$$P = 0.42\lambda D_o^2 \left(\frac{dv}{dy}\right)^2 \cos \phi_i \quad (1)$$

Donde:

P : Esfuerzo dispersivo.

λ : Concentración lineal de granos.

D_o : Diametro de la particula.

$\frac{dv}{dy}$: Gradiente de velocidad.

ϕ_i : Angulo dinámico de fricción interna.

Al observar la ecuación anterior, se uede decir que el esfuerzo dispersivo en una particula de un flujo de escombros aumenta con el cuadrado del diametro y del

gradiente de velocidad. Desde que la gradiente de velocidad es grande cerca del lecho, existe una presión dispersiva grande, causando que las partículas se muevan para arriba, y además observar que las partículas gruesas suspendidas se mueven a una velocidad menor que la del resto del flujo, Castillo (2006) p: 41.

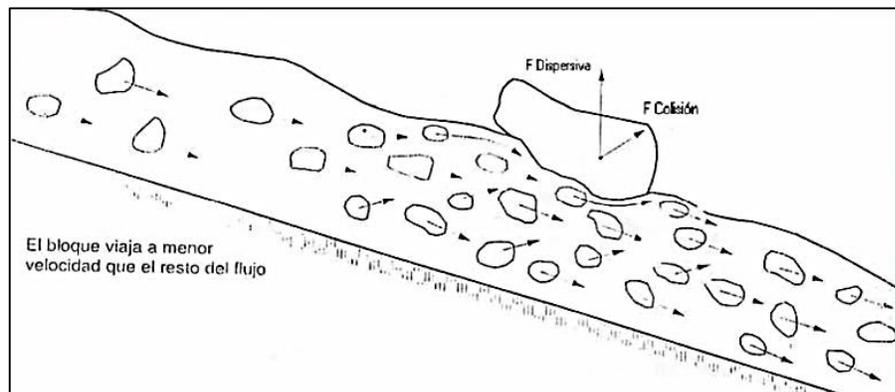


FIGURA 2-14 Esquema de mecanismos de presión dispersiva y fuerza de cohesión.

[Fuente: Jaime Suarez, "Control de erosión en zonas tropicales"].

- **Fuerza Matricial.**

"Se observa que, si una partícula suspendida en un flujo de lodo estacionario es empujada hacia abajo, tiende a hundirse un poco y quedarse en esa posición, sin retornar a la superficie o hundirse hasta el fondo". Johnson (1970).

Según Hampton (1975) existe una red de partículas de arcilla floculadas a todo lo largo del fluido. La floculación es la resultante de fuerzas atractivas netas entre dos partículas de arcilla.

La fuerza mínima requerida para romper esta red de partículas floculadas ha sido definida como la Fuerza matricial de Johnson. Fuerza Matricial (cont.): Rodine y Johnson (1976) realizaron un análisis de flotabilidad y obtuvieron:

$$h = \frac{3cf(\phi)}{4(\gamma_c - n\gamma_d)} \quad (2)$$

Donde:

C: es la cohesión γ_c es el peso unitario de la piedra en cuestión.

γ_d : es el peso unitario de los escombros.

$f(\Phi)$: es una función de Φ , el ángulo aparente de fricción. $f(\Phi)$ varía desde 6.1 para $\Phi=0^\circ$ a 62 para $\Phi=30^\circ$.

n: es la tasa del volumen del canto rodado sumergido.

La variable "h" en la ecuación es definida como el tamaño medio de las partículas grandes que pueden ser transportadas por la corriente.

2.4 PROPIEDADES DEL FLUJO DE ESCOMBROS

Así como la granulometría, existen más propiedades físicas que caracterizan a los flujos de escombros los cuales son importantes determinar como: la velocidad, pendiente, ángulo de deposición y el caudal de flujo.

2.4.1 Velocidad

La velocidad del flujo de escombros varía de 0.5 m/s a 20 m/s. La velocidad está relacionada con la geometría del canal, pendiente y tipo de flujo. Para el caso de flujos de lodo, Johnson y Rodine (1984) utilizan la sobreelevación en las curvas como parámetro para calcular la velocidad del flujo:

$$\bar{\omega} = (g\psi \cos \delta \tan \beta)^{1/2} \quad (3)$$

Dónde:

ω = velocidad promedio.

Ψ = Radio de la curva.

δ = Pendiente del canal.

β = Sobre inclinación del flujo en curva.

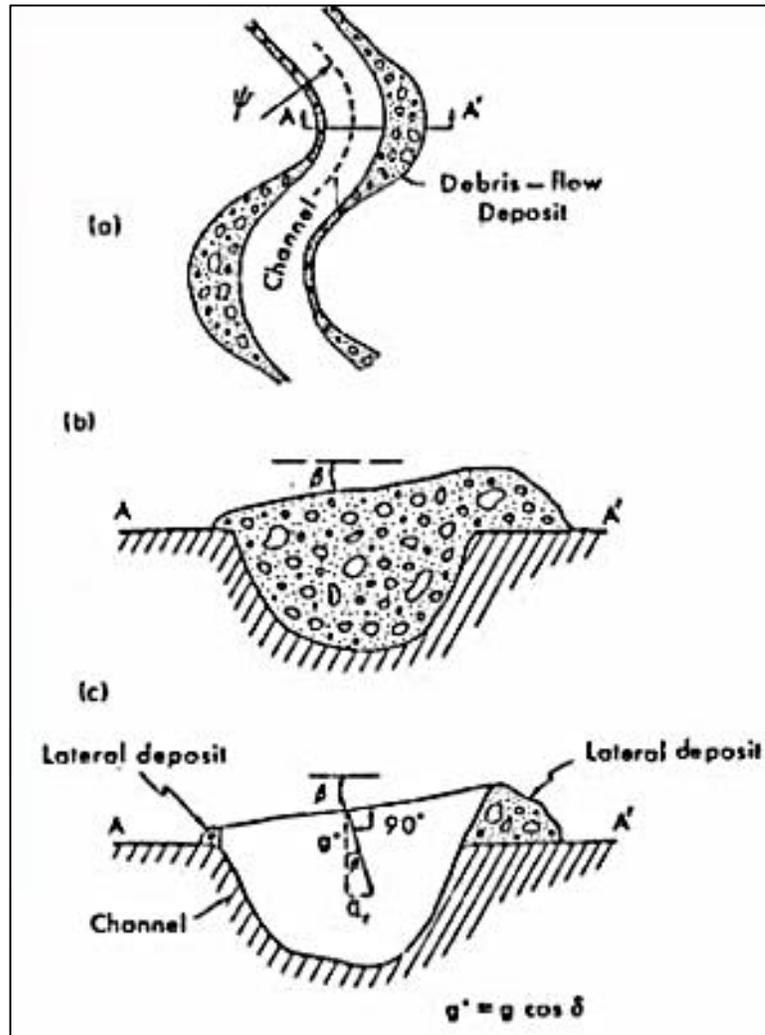


FIGURA 2-15 Diagrama para determinar la velocidad del flujo [Fuente: Johnson y Rodine, 1984].

2.4.2 Pendiente

Ocurren en pendientes pronunciadas, pero también tiene la habilidad de fluir en pendientes muy suaves. Pendientes observadas de 2% a 32%. Costa (1984). Por medio de un análisis de estabilidad simple para un ancho y longitud unitario completamente saturado, de altura h , con pendiente $\sin(\theta)$ y con ángulo de

fricción Φ , se obtiene el criterio de Iniciación del movimiento de flujos de escombros.

Según el criterio de Mohr-Coulomb, el esfuerzo de corte límite (τ_L) para un material de suelo no-cohesivo es:

$$\tau_L = \bar{\sigma} \tan \phi \quad (4)$$

De la mecánica de suelos:

$$\bar{\sigma} = \sigma - u_p \quad (5)$$

$$u_p = \gamma_w h \cos \theta \quad (6)$$

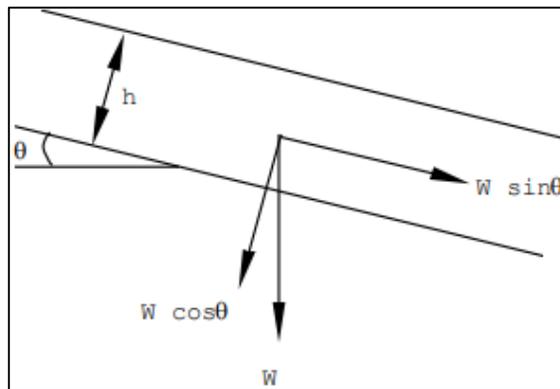


FIGURA 2-16 Diagrama para calcular esfuerzos cortantes y normales [Fuente: Mohr-Coulomb].

Del gráfico:

$$W = \gamma_{sat} h \quad (7)$$

$$\sigma = W \cos \theta \quad (8)$$

$$\tau = W \sin \theta \quad (9)$$

Para la condición de equilibrio limite, igualando $\tau_L = \tau$:

$$\tan \theta = \frac{\gamma_{sat} - \gamma_w}{\gamma_{sat}} \tan \phi \quad (11)$$

Criterio de Iniciación del Movimiento:

$$\tan \theta = \frac{C_v(\gamma_s - \gamma_w)}{C_v(\gamma_s - \gamma_w) + \gamma_w} \tan \phi \quad (12)$$

2.4.1 Angulo de deposición

Observaciones de campo indican que hay cierto ángulo de pendiente límite donde la oleada del flujo de escombros pierde su capacidad de viajar a velocidad uniforme y desacelera, empezando a depositarse. Como primera aproximación, se asigna un ángulo de 10° para el comienzo de una deposición.

De la literatura se sugiere asumir un rango de ángulos de deposición entre 10 y 14 grados para flujos abiertos o no confinados y de 8 a 12 grados para flujos canalizados o confinados.

2.4.2 Caudal de flujo de escombros

Para la estimación de los caudales máximos de los flujos de escombros existen 2 metodologías más usadas, la metodología usada por Japón (JICA, Japan International Cooperation Agency) y la metodología de O'Brien (2006).

Si el caudal total de un flujo hiperconcentrado puede ser expresado como la suma de la porción líquida y de la porción sólida, el factor de engrosamiento se representa como la relación entre el caudal total y el caudal líquido, o expresado en términos matemáticos:

$$Q_t = Q_s + Q_w$$

Donde:

Q_t (m^3/s) corresponde al caudal de flujo engrosado,

Q_w (m^3/s) es el caudal pico de agua clara, y

Q_s (m^3/s) es el caudal de sedimentos volumétrico

- **Obtención del caudal de flujo según Takahashi**

La primera expresión para la obtención de caudal de flujo hiperconcentrado es la propuesta realizada por JICA (Japan International Cooperation Agency), expresión utilizada para el dimensionamiento de presas empleadas para la contención de flujos de escombros, dado que en el diseño de este tipo de presas el aspecto más importante corresponde a la cantidad de sedimentos a retener en la presa.

Para un caudal de diseño de un periodo de retorno dado, se estima el volumen de sedimentos transportados por el alud torrencial (V_s), correspondiente a dicho periodo de retorno, la estimación de este volumen se realiza con base a la experiencia en Japón de tales eventos (Mizuyama e Ishikawa, 1988) citado por López (2005) como:

A partir de los desarrollos de Takahashi. Este establece que el volumen de lodo y escombros que es transportado por una crecienta es igual a:

$$V_s = V_a \left(\frac{C_d}{C^* - C_d} \right) \quad (13)$$

Donde:

V_s : Volumen de detritos en m^3

V_a : Volumen de agua en m^3

C_d : Densidad volumétrica del flujo de lodo y piedras

C^* : Densidad volumétrica de sedimentos del lecho

Y C_d se estima según la siguiente ecuación:

$$C_d = \frac{\rho \tan \theta}{(\sigma - \rho)(\tan \phi - \tan \theta)} \quad (14)$$

Donde:

ρ : Densidad del fluido (t/m^3)

σ : Densidad de lodos y piedras (t/m^3)

θ : Angulo del talud

Φ : Angulo de fricción

Basado en el criterio anterior, Takahashi estima el caudal máximo de escombros como una función del caudal líquido, y el caudal del material fino como una función del caudal líquido.

$$Q_s = \left(\frac{c^*}{c^* - c_d} \right) Q_w \quad (15)$$

$$Q_f = \left(\frac{\rho - 1}{\rho - \sigma} \right) Q_w \quad (16)$$

$$Q_t = Q_s + Q_f \quad (17)$$

Combinando todos los criterios anteriores se obtiene:

$$Q_t = \left[\left(1 + \frac{V_s}{V_a} \right) + \frac{\rho - 1}{\sigma - \rho} \right] Q_w \quad (18)$$

Donde:

V_s (m^3): es el volumen de detritos.

V_a (m^3): volumen del agua.

ρ (t/m^3): es la densidad del fluido de detritos.

σ (t/m^3): es la densidad del sedimento.

Q_w (m^3/s): es el caudal líquido.

- **Obtención del caudal de flujo según O'Brien (2006)**

Propuesto por O'Brien [J. D. O'Brien (2006)], el volumen total de una mezcla de agua-sedimento en un flujo de lodos puede determinarse mediante la amplificación del volumen de agua por un factor de engrosamiento (BF), este factor es representado simplemente como la relación de una unidad volumétrica de una mezcla de agua-sedimentos respecto a la porción volumétrica de agua.

Donde el hidrograma de flujo de detritos se estima a partir del hidrograma de flujo de agua multiplicado por un factor que es una función de la concentración volumétrica de sedimentos (C_v):

$$Q_t = BF * Q_w \quad (19)$$

$$BF = \frac{1}{1-C_v} \quad (20)$$

Donde:

Q_t : Caudal total de flujo de detritos (m^3/s)

Q_w : Caudal líquido (m^3/s)

BF : Factor de volumen (Bulking Factor)

C_v : Concentración volumétrica de detritos.

Donde BF es el factor de engrosamiento (Bulking factor). Según O'Brien para flujos de detritos el valor de C_v varía entre 0,20 y 0,45 y para flujos de lodos varía entre 0,45 y 0,55. Un BF de 2 corresponde a una concentración de sedimentos

por volumen de 50%, y una concentración de sedimentos de 7%, la cual corresponde a la carga transportada por arrastre y en suspensión de un cauce convencional, se tiene un BF de 1,075, indicando que el volumen de la creciente es un 1,75% mayor que el volumen transportado por una creciente de agua clara.

En la Figura 2-17 se muestra el aumento del factor de engrosamiento en función de concentraciones de sedimentos.

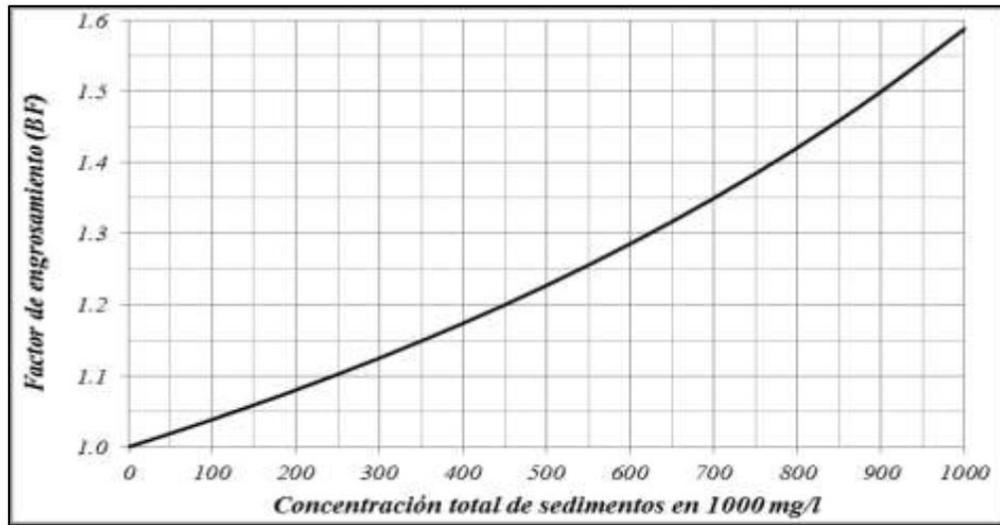


FIGURA 2-17 Concentración de sedimentos vs. Factores de engrosamiento¹².

La obtención de un hidrograma de flujo hiperconcentrado se estima a partir de la hidrógrafa de flujo de agua multiplicando por un factor que es una función de la concentración volumétrica de los sedimentos (C_v). Conociendo el caudal pico de la descarga y conociendo el volumen de sedimentos disponibles en la cuenca la

¹² Comparación de Criterios de Engrosamiento del Flujo para la Simulación de Avalanchas en Casos Colombianos de Estudio, Víctor Javier Niño Piña, Pág. 46, 2015.

concentración promedio para una hidrógrafa y la concentración de sedimentos para el caudal pico puede ser calculada. Una concentración de sedimentos típica para la descarga máxima de un flujo de lodos es de aproximadamente 45 a 55% por volumen dependiendo de la concentración de sedimentos finos en la matriz de fluido, la concentración promedio de la hidrógrafa de un flujo de lodos esta entre 25% y 35% para tormentas de corta duración y de 10% a 25% para tormentas de larga duración (O'Brien, 1997). La aplicación de esta ecuación de factor de engrosamiento depende únicamente de la concentración volumétrica de sedimentos y no considera sus propiedades.

Ubicación	Velocidad (m/s)	Pendiente (%)	Densidad (gr/cm ³)	Viscosidad dinámica (poise)	% arcilla	Profundidad (m)	Sólidos (% en peso)	Nº Reynold
Río Reventado, Costa Rica	2.9 - 10	4.6 - 17.4	1.13 - 1.98	--	1 - 10	8 - 12	20 - 79	--
Hunshui Gully, China	10 - 13	--	2 - 23	15 - 20	3.6 (<0.005mm)	3 - 5	80 - 85	40000
Bullock Creek, newzealand	2.5 - 5.0	10.5	1.95 - 2.13	2100 - 8100	4	1.0	77 - 84	28.57
Pine Creek, Mt. St. Helens	10 - 31.1	7 - 32	1.97-2.03	200 - 3200	--	0.13 - 1.5	--	200
Wrightwood Canyon Ca. (1941)	1.2 - 4.4	9 - 31	2.4	2100 - 6000	< 5	1.2	79 -85	23.8
Wrightwood Canyon Ca. (1969)	0.6 - 3.8	9 - 31	1.62 - 2.13	100 - 60000	--	1.0	59 -86	1.33
Mayflower Gulch, Colorado	2.5	27	2.59	30000	1.1 (<0.004mm)	1.5	91	3.2
Dragon Creek, Arizona	7	5.9	2	27800	--	5.8	80	29.2

Tabla 2.4-1 Propiedades físicas de los flujos de escombros observados. [Fuente: Arbind P. M., Nilamuthu R. (1991)].

2.5 CAUSAS DE LOS FLUJOS DE ESCOMBROS

Para la determinación de las causas que generan los flujos de escombros, deben cumplirse tres requisitos simultáneamente para movilizar un flujo de escombros; falla de la masa, el agua y la conversión de la energía potencial gravitatoria en energía cinética interna que se moverá como una deformación generalizada. Iverson (1997).

Según Norem y Sandersen (2012); existen dos formas de iniciar un flujo de escombros:

- Las partículas inician el movimiento cuando las fuerzas del agua debida exceden la resistencia a la erosión de la superficie. Se generará un flujo de desechos a medida que la erosión aumente la cantidad de masa, siendo el flujo de escombros más común.
- Iniciado por una diapositiva en el suelo. La masa logra movilidad mediante la liberación o absorción de agua, y en cierto estado de movilidad la masa se desarrolla en un flujo de escombros.

Hablando figurativamente, una avalancha de escombros puede transformarse en una ruina debido al aumento de agua. Además, una inundación puede transformarse en un escombros por arrastre de material. Iverson (2005).

Los deslizamientos o movimientos de masa no son iguales en todos los casos, y para poder evitarlos o mitigarlos es indispensable saber las causas y la forma como se originan. Estas son algunas de las formas más frecuentes:

2.5.1 Debido al agua

Cuando hay una erosión rápida del agua en un canal de drenaje de origen natural, la tensión de cizallamiento del agua excederá la resistencia al corte del suelo, por lo tanto, iniciará un flujo de escombros. Esto requiere que las tensiones de corte superen la suma de la fuerza de cohesión y la tensión normal de la capa de suelo. Generalmente, tales condiciones ocurren debido a inundaciones. El agua seguirá los canales de drenaje ya desarrollados o desarrollará nuevos canales. Nuevos canales de drenaje a menudo se desarrollan debido a la actividad humana, ya que se originan en las carreteras y caminos forestales. Estos canales de drenaje hechos por el hombre no tienen resistencia natural a la erosión y, por lo tanto, son altamente vulnerables, mientras que un canal de drenaje establecido normalmente tiene una base sólida. Por lo tanto, son sensibles a los cambios en las condiciones climáticas que pueden desplazar su estado natural de equilibrio.

2.5.2 Por aumento de la presión de poro

Cuando el agua se infiltra en el suelo, reduce su resistencia, aumentará la presión de poro y se puede iniciar un flujo de escombros. Este principio comienza debido al agua que es el factor crítico, debido a la estabilidad, que es la presión de poro, y no la erosión superficial del agua. La iniciación está asociada a una

permeabilidad variable. Para comprender mejor el efecto de la presión de poro es apropiado hacer suposiciones idealizadas con respecto a las capas del suelo:

- Una capa de sedimento homogénea con una permeabilidad dada que se superpone a una capa impermeable.
- Una capa permeable entre dos capas impermeables.
- Una capa permeable con una extensión limitada dentro de un sedimento homogéneo con una menor permeabilidad.

La estabilidad del primer caso anterior depende del nivel de agua subterránea. Con un nivel de agua subterránea bajo, la pendiente normalmente será estable hasta los 30 grados. Si el sedimento está saturado, falla cuando la pendiente supera el rango entre los 16 a 20 grados. La capa permeable de la segunda caja evitará una mayor presión de poro y así estabilizará la pendiente. Si la capa limitada del último caso tiene una cierta longitud, puede producirse una presión de poro significativa, desestabilizando la pendiente. El deslizamiento del suelo iniciado por una mayor presión de poro se convierte en desechos si encuentra material suelto saturado. La carga aplicada del deslizamiento del suelo reducirá la resistencia e iniciará el movimiento. La masa de falla puede obtener suministro de agua de arroyos cercanos. Además, la actividad humana puede alterar la estabilidad natural del suelo. El caso más común es el cambio en el sistema de drenaje, causado por una alcantarilla obstruida o caminos forestales, lo que lleva a una mayor presión de poro. El corte claro de las laderas remueve la fuerza

estabilizadora de la cubierta vegetal, especialmente las raíces de los árboles, y puede causar una mayor presión de poro. Norem y Sandersen (2012).

2.6 DINÁMICA DE FLUJO DE ESCOMBROS

Según los estudios realizados por Norem y Sandersen (2012), determinaron la existencia de varios factores que influyen en la dinámica de un flujo de escombros. Los factores más importantes que determinan la distancia de salida y la velocidad del flujo son:

- Erosión.
- Volumen.
- Tamaño de partícula.
- Presión de poro.
- Rugosidad.
- Reología.
- Arrastre.

La erosión en la zona de iniciación y transporte conduce a un aumento de volumen, lo que produce desvanecimientos más largos y velocidades más altas. El aumento del tamaño de partícula significa un aumento de la fricción, lo que da como resultado escapes cortos y velocidades más bajas. La alta presión de poro

implica una mayor movilidad, que generalmente ocurre en masas de sedimentos finos. La rugosidad de la trayectoria del flujo influye en las fuerzas de fricción. Es de importancia crucial estimar las propiedades físicas del movimiento del flujo de escombros para determinar el agotamiento y la velocidad.

La dinámica de los flujos de escombros se entiende menos que la movilización, por lo tanto, existen diferentes puntos de vista. Sin embargo, el enfoque más común es tratar el flujo como un fluido y aplicar leyes de dinámica de fluidos, a pesar de que la resistencia al flujo es mayor para los desechos que el agua pura. Además, la dinámica está influenciada por las fuerzas de los granos. La segunda ley de Newton, es decir, la conservación del momento es la relación básica de todos los modelos. Breien (2005). Según la segunda ley de Newton, el producto es proporcional a la suma de las fuerzas de aceleración y retardo. La fuerza de fricción funciona en dirección opuesta a la del flujo y es la fuerza de retardo. Si la fuerza de fricción es menor que la fuerza de gravedad, la masa comenzará a acelerarse. Si estas dos fuerzas son iguales, la velocidad de flujo es constante. La fricción ha alcanzado un umbral, y la velocidad representa la velocidad máxima, también llamada velocidad terminal.

Como la gravedad es la única fuerza de aceleración, existen diferentes términos de fricción que constituyen la fuerza de retardo, (ver Figura 2-18). Según Norem y Sandersen (2012), un enfoque común es dividir la fuerza de fricción en un componente que es independiente de la velocidad, y un componente que

aumenta a medida que el flujo gana velocidad. La fricción dependiente de la velocidad permite que el flujo alcance su velocidad terminal, mientras que la fricción Coulomb independiente de la velocidad permite que el flujo se detenga en un terreno inclinado. Esto se corresponde bien con las observaciones, donde los flujos de escombros parecen alcanzar la velocidad terminal en terrenos empinados y depositarse en terrenos inclinados.

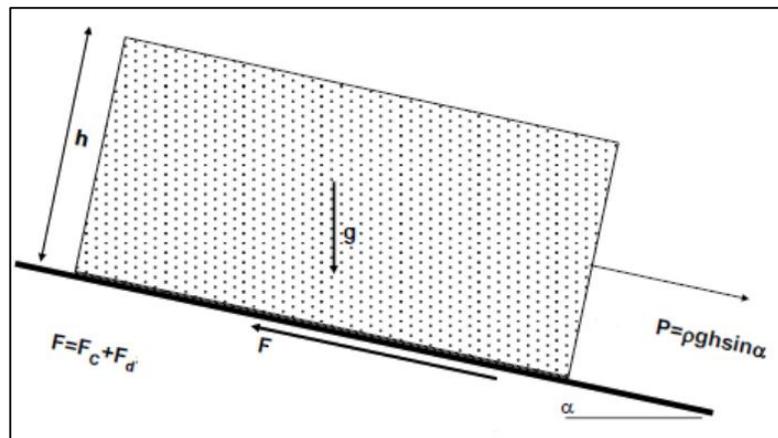


FIGURA 2-18 Ilustración de las fuerzas que actúan sobre un volumen que baja por una pendiente. P es la fuerza de aceleración, ρ la densidad de la masa, g la fuerza de la gravedad, h la altura, α el ángulo de la pendiente, F_c la fricción independiente de la velocidad y F_d la fricción dependiente de la velocidad¹³.

En cuanto a la fuerza de fricción, el esfuerzo cortante a lo largo de la base se divide en un componente dependiente de la velocidad y un componente independiente de la velocidad. El esfuerzo dependiente de la velocidad es descrito por propiedades viscosas de la masa de desechos. La viscosidad es la

¹³ Herramientas para el modelamiento de flujos hiperconcentrados, Ing. Leonardo Castillo, 2006.

resistencia de los líquidos a la deformación por esfuerzo cortante. La viscosidad depende del tamaño de partícula y el contenido de agua de la masa. Usualmente, un bajo contenido de agua y una pequeña cantidad de sedimentos conducen a una alta viscosidad, lo que significa baja velocidad y corto agotamiento.

El esfuerzo cortante tradicional de Mohr-Coulomb representa independiente de la velocidad (Iverson, 1997),

$$\tau = c + (\sigma - P_u) \tan \phi \quad (21)$$

Donde:

τ : La resistencia al corte.

σ : La tensión normal.

ϕ : El ángulo de fricción.

P_u : La presión de poro y c es la cohesión.

Por lo tanto, una forma común de describir el esfuerzo cortante es una extensión de la segunda ley básica de Newton, donde el término Mohr-Coulomb independiente de la velocidad se combina con un término dependiente de la velocidad representativo de los líquidos. Norem y Sandersen (2012). La ecuación se puede escribir como:

$$ma = \rho h \frac{dv}{dt} = P - (F_c + F_d) = \rho gh \sin \alpha - \left(C + p_e \tan \phi + k \frac{v}{h} \right) \quad (22)$$

Donde:

p_e : La tensión efectiva.

$\tan \alpha$: El ángulo de fricción.

k : La viscosidad.

v/h : El gradiente de velocidad promedio.

La cohesión es más importante para el flujo de escombros con alto contenido de arcilla, debido a la fuerza entre las partículas.

Los movimientos de flujo de escombros están altamente acoplados a la difusión de la presión del fluido poroso. El exceso de presión de poro del fluido podría generarse a partir del colapso de una estructura relativamente estable de material sin cohesión y suelto. La presión de poro excederá inmediatamente la presión hidrostática y reducirá la tensión efectiva. Al mantener una presión de poro elevada, la movilidad del flujo de escombros aumentará y se producirá una gran desviación.

De acuerdo con el trabajo realizado por Iverson (1997) la cola y el núcleo del flujo tienen altas presiones de poros, mientras que el frente rico en canto rodado tiene bajas presiones de poro. La masa de la cola tiene una mayor fricción que el núcleo. Esto conduce a una velocidad más baja de la cola, lo que aumenta la longitud del flujo de escombros durante su viaje.

Los términos de fricción dependen de la reología del flujo de escombros [Lied et al. (2014)]. Un modelo de reología proporciona una relación reológica entre el esfuerzo cortante y la tensión cortante del flujo de escombros. El agua es un fluido newtoniano, lo que significa que responde de forma inmediata y continua a cualquier tensión aplicada. La relación entre el esfuerzo cortante y la deformación cortante es lineal. Debido a que los flujos de escombros contienen ambos, fluidos y sólidos, no tendrá esta relación lineal. Esto se explica en los modelos de reología por Breien (2005). Según Iverson (1997), existen dos modelos distintos para describir el impulso del transporte; flujo de grano viscoplástico e inercial.

El tipo viscoplástico se basa en el hecho de que el flujo de desechos presenta tanto fluido viscoso como sólidos plásticos. La reología se describe con más detalle en las siguientes secciones.

La masa de un flujo de escombros se supone que es constante o permite la reducción y el aumento de la masa, debido al arrastre y la deposición. Masa adicional debería ralentizar el flujo, pero las observaciones sugieren que la velocidad y el agotamiento aumentan. Una explicación podría ser que la fuerza de fricción disminuye a medida que el material es arrastrado [Lied et al., (2014)]. De acuerdo con Norem y Sandersen (2012), la mayoría de los flujos de escombros son erosivos en la parte superior, causando un aumento de volumen y desagües más largos. La velocidad del flujo de escombros está entre 5-10 m/s, en casos extremos puede alcanzar una velocidad de 15 m/s. La velocidad del

terminal del flujo de escombros depende de la altura del flujo. Para un flujo pequeño, la altura del flujo es inferior a 1 metro, pero normalmente estará dentro de 1-2 metros.

2.7 MODELOS DINÁMICOS

Se desarrollan varios enfoques para modelar movimientos gravitacionales rápidos. Los enfoques son diferentes con respecto al alcance requerido de la evaluación, información disponible y resultados deseados. Una parte importante para todos los enfoques es la estimación del movimiento posterior al fallo. El aspecto principal es pronosticar o reproducir el flujo de escombros con la mayor precisión posible. Como el movimiento de un flujo de escombros es complejo, ocurre más de un fenómeno al mismo tiempo. Diferentes fenómenos también pueden surgir en diferentes ubicaciones de un evento dado. Además, estas variaciones dependen del tipo de material y de cómo el material corresponde a las fuerzas aplicadas durante el movimiento; diferentes procesos en influencia velocidad y agotamiento. No existe un modelo universal para calcular el agotamiento actualmente. Sin embargo, hay varios modelos que ofrecen un buen enfoque sistemático para evaluar la generación de un flujo de escombros y otros tipos de derrumbes según Quan (2012). La distancia de desviación se define comúnmente como el límite exterior de los depósitos con un cierto espesor. Los flujos de suspensión de agua y los sedimentos finos generalmente se excluyen. Norem y Sandersen (2012).

2.7.1 Métodos numéricos

La simulación numérica del flujo de escombros es un intento de modelar una situación de la vida real, para predecir el desarrollo de un flujo de escombros. Al ajustar variables al sistema, se puede investigar el comportamiento de un flujo de escombros. Los modelos son simplificaciones de la realidad, y el principal desafío es encontrar el mejor enfoque. Lied et al. (2014).

La ventaja de los métodos numéricos es la capacidad de modelar el movimiento del flujo de escombros en terrenos irregulares según Quan (2012). Con base en la fuerza motriz gravitacional y una ley constitutiva, regida por un modelo de reología que describe las propiedades de flujo, la distancia de salida y la velocidad se pueden estimar. Chen y Lee (2000). El enfoque utilizado más común para los métodos numéricos se basa en la mecánica de medios continuos. Las ecuaciones de conservación de masa, momento y energía se aplican para describir el movimiento dinámico, y un modelo reológico describe el comportamiento del material. Quan (2012). Los modelos continuos tienen en cuenta la deformación interna de la masa que fluye. Esto no es aplicable para otros enfoques numéricos, que comúnmente es un método de elementos discretos, también llamados modelos de discontinuidad, y modelos de masa concentrada. Kailey (2013).

Para visualizar la distribución de los valores dinámicos y el desarrollo de la altura y la dispersión del flujo de escombros, se necesita un modelo tridimensional. Esto requiere una resolución numérica suficiente. En algunos modelos, los valores

promedios de la profundidad de flujo se usan para simplificar los cálculos. Esto aborda que la mayoría de los flujos de escombros son flujos de detritos poco profundos, lo que significa que la profundidad es pequeña en relación con la longitud y el ancho del flujo. El sistema de ecuaciones de conservación constituye una correlación de la densidad y los tres componentes de velocidad. Las ecuaciones se normalizan tomando las ecuaciones sin dimensiones usando la expresión típica de velocidad, altura del flujo, longitud y tensión, un enfoque llamado escaleado. Lied et al. (2014). Cuando la segunda ley de Newton se aplica al movimiento del fluido, se forman las ecuaciones de Navier-Stokes, de ahí las ecuaciones de conservación de los fluidos. Al asumir que el esfuerzo del fluido es la suma de un término viscoso difusivo y un término de presión, las ecuaciones describen un flujo viscoso. Esto es similar a la ecuación de conservación de Norem y Sandersen (2012). El próximo enfoque es integrar las ecuaciones de conservación. Esto requiere suponer que el flujo de escombros es incompresible. Utilizando la mayoría de los flujos de desechos son superficiales, esto da un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales acopladas.

El conjunto bidimensional de ecuaciones son las ecuaciones de St-Venant, también llamadas ecuaciones de aguas someras, que se utilizan para describir varios tipos de flujo. Lied et al. (2014). Las ecuaciones de St-Venant se derivan de la integración en profundidad de las ecuaciones de Navier-Stokes (Breien, 2005). Hungr (1995) ha desarrollado soluciones eulerianas y lagrangianas para estas ecuaciones.

La teoría de Savage-Hutter se ha convertido en un enfoque clásico para el modelado de flujo de escombros, y es similar al enfoque del modelo continuo general descrito anteriormente. Savage y Hutter (1989). Asume que el material granular se puede describir como friccional, y se modela como un continuo de Coulomb. Las simplificaciones principales de las ecuaciones de conservación son las aguas poco profundas, el escaleado y el promedio de profundidad. Tres relaciones diferentes compuestas por características; como la longitud, la altura y la curvatura del radio del lecho escalan las ecuaciones. Begueria et al. (2009). Savage y Hutter (1989) reconocieron que las tensiones en una masa granular deformante dependen de la tensión y la resistencia al corte basal. Supusieron que las reologías basales e internas son friccionales.

La teoría de Savage-Hutter sugiere que las tensiones internas tienden a ser activas o pasivas a medida que el material diverge o converge, según la teoría clásica de la tierra de Rankine (1857). En Savage y Hutter (1991), el modelo original de Savage y Hutter (1989) se modificó para explicar la aceleración centrípeta, debido a la curvatura de la trayectoria. Esto influye en la magnitud de las tensiones internas y basales, y se introdujeron tensiones internas no hidrostáticas.

2.7.2 Clasificación de los modelos

Los modelos dinámicos de agotamiento aplicados a una metodología numérica difieren en varios aspectos que pueden clasificarse en los siguientes grupos según Quan (2012):

- Dimensión 1D o 2D de la solución.
- Marco de referencia euleriano o lagrangiano.
- Reología basal.

Como se mencionó, los modelos dinámicos usan la profundidad promedio para integrar ecuaciones de balance de masa y momento con respecto a la profundidad del flujo. Se supone que el esfuerzo aumenta linealmente con la profundidad por debajo de la superficie superior del flujo de escombros.

Normalmente se supone que la superficie superior está libre de tensiones, así como las tensiones de cizallamiento en la dirección de profundidad. La suposición de flujo superficial, combinada con el promedio de profundidad, elimina la dimensión de profundidad.

En un modelo bidimensional, se analiza la topografía tanto en el plano como en la sección transversal, mientras que los modelos unidimensionales solo dan cuenta del movimiento a través de una sección transversal de un único ancho predefinido por Quan (2012). Esta distinción tiene cierta inconsistencia en la terminología relacionada con la eliminación mediante el promedio de profundidad. Los modelos 2D y 3D simulan el movimiento en el terreno 2D y 3D, pero respectivamente, las ecuaciones gobernantes están en dimensión 1D y 2D.

McDougall et al. (2008). Todos los modelos en este proyecto se basan en las ecuaciones de dos dimensiones, simuladas en un terreno tridimensional.

El método Euleriano y Lagrangiano son dos formulaciones diferentes de marcos de referencia de solución. El método de Euler se usa comúnmente para describir la dinámica de los fluidos. Utiliza un sistema de referencia fijo, por división en un enrejado espacial fijo. Esto es análogo a ver pasar un flujo de escombros mientras se está detenido. La solución de las ecuaciones diferenciales parciales se calcula utilizando una cuadrícula computacional fija. Lied et al. (2014).

Otro enfoque común es el método de Lagrange. Divide el flujo en bloques deformables. En consecuencia, se describe el movimiento en cada bloque: así como, las interfaces entre los bloques. La diferencia entre Euleriano y Lagrangiano se ilustra en la Figura 2-19. Una variación del método de Lagrange es la hidrodinámica de partículas lisas (SPH), donde las coordenadas siguen el fluido. En lugar de aplicar límites finitos entre las partículas, se manchan a distancia espacial, (ver Figura 2-20). Esta mancha se explica por la función núcleo, que implica un tratamiento oculto de la interacción de partículas. La única forma de que cada volumen de partículas aumente es debido al arrastre. Lied et al. (2014). Euleriano y SPH, Lagrangiano sin malla, son los marcos de referencia aplicados en los modelos descritos.

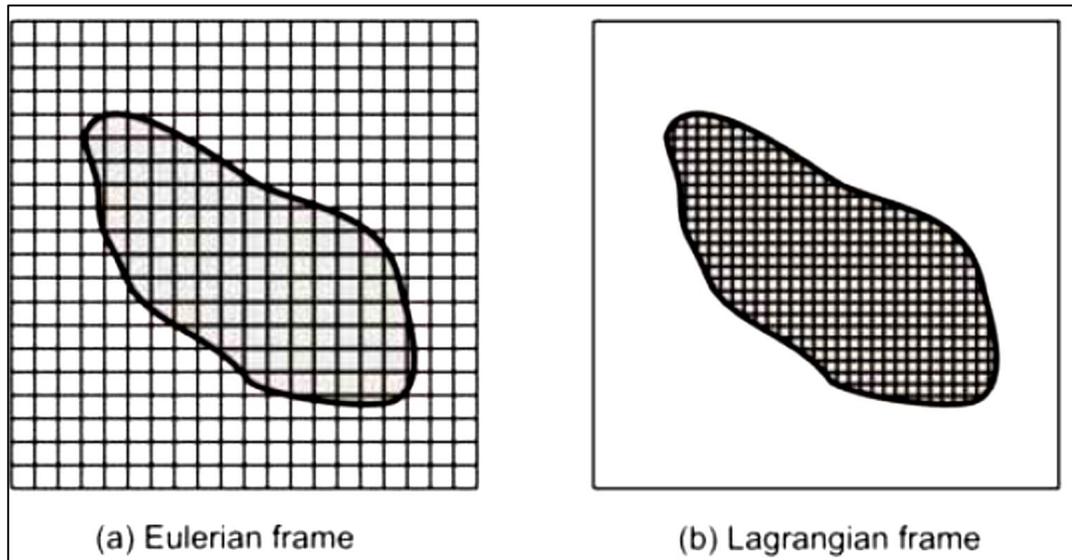


FIGURA 2-19 El marco de Euler se fija en el espacio, mientras que el marco de referencia Lagrangiano se mueve con el flujo [Fuente: McDougall, 2006].

La fuerza de resistencia dentro del flujo, y en la interfaz entre el flujo y el lecho, se expresa mediante la reología basal (Quan, 2012). Las ecuaciones gobernantes para la conservación de la masa y el momento no se pueden resolver sin ecuaciones constitutivas que definan la relación entre el movimiento del flujo y el estado de esfuerzo desconocido. Las ecuaciones constitutivas para el comportamiento del material describen la deformación dentro de un continuo debido a la tensión aplicada. Esto es lo que define el modelo de reología (Lied et al., 2014). En algunos modelos hay una opción de modelo de reología, mientras que en otros modelos se especifica (Quan, 2012).

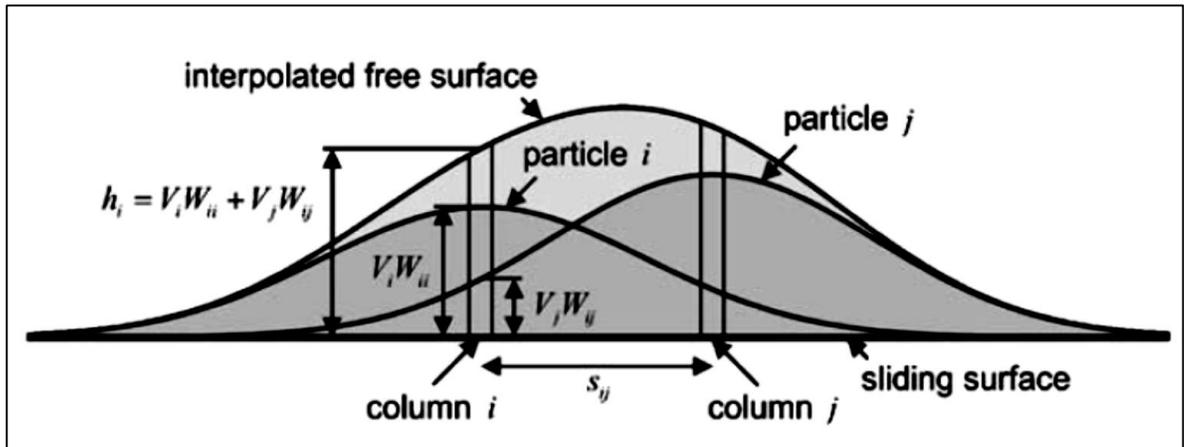


FIGURA 2-20 SPH puso en un marco de promedios de profundidad [Fuente: Hungr y McDougall, 2009].

Además, los modelos se clasifican según su esquema de tasas de arrastre. En los modelos que utilizan velocidades de arrastre basadas en el proceso, la cantidad de material arrastrado se calcula mediante algoritmos prescritos, teniendo en cuenta las propiedades del material. En otros casos, la cantidad de material arrastrado es definida por el usuario (Quan, 2012).

2.8 MODELO DAN3D (DYNAMIC ANALYSIS OF LANDSLIDES)

El DAN3D (Análisis dinámico de deslizamientos de tierra en tres dimensiones) es un programa basado en Windows que implementa el modelo numérico desarrollado por McDougall y Hungr (2005, 2006), para el análisis dinámico de deslizamientos de flujos rápidos, flujos de escombros y avalanchas. El DAN3D, aún como modelo de investigación, logra buenos resultados en la evaluación de diversos casos.

Según Mcdougall e Hungr (2004), un programa numérico completo para modelar los movimientos de masa del tipo flujo debe tener el conjunto de habilidades descritas a continuación:

- Admitir comportamiento dinámico de la masa involucrada en el movimiento.
- Considerar la erosión del material a lo largo de la trayectoria del movimiento.
- Permitir la variación de la reología del material, la cual puede variar a lo largo de la trayectoria del movimiento o dentro de la masa deslizada.
- Permitir grandes desplazamientos y la posibilidad de subdivisión de la trayectoria principal o disociación del flujo.
- Debe ser amigable y eficiente para facilitar retroalimentación inmediata del movimiento y extensivas calibraciones después de eventos reales.

El programa desarrollado DAN3D es una herramienta potente utilizada para el estudio de análisis de riesgo en áreas tras eventos de movimiento masivo.

2.8.1 Fluidos y Reologías Hipotéticos

Los deslizamientos de tierra son complejos, tanto en material como en movimiento. Es desafiante reunir evidencia directa sobre los aspectos internos de los deslizamientos de tierra, debido a la composición variable y las condiciones de campo peligrosas. Sin embargo, un experto en deslizamientos de tierra puede hacer predicciones significativas sobre el comportamiento de derrumbes evitando el comportamiento interno intratable y concentrándose en el comportamiento

externo. El término deslizamiento de tierra de tipo "flujo" implica un material fluido con una deformación basal e interna significativa a medida que fluye sobre una superficie basal resistente.

Por lo anterior, los flujos no pueden ser tratados por la cinemática del deslizamiento, sino como granos concentrados en un medio fluido (Hsü, 1975). En lugar de tratar de imitar la mezcla heterogénea de la reología real de deslizamientos de tierra, incluyendo lodo, troncos de árboles, cantos rodados y cualquier otra cosa que esté atrapada en el flujo a través de una simulación compleja, los modelos DAN usan fluidos hipotéticos (Figura 2-21).

Los fluidos hipotéticos son constructos teóricos, fluidos simples y homogéneos diseñados para comportarse externamente de manera similar a los eventos reales. El modelo reológico constitutivo y los parámetros asociados desempeñan un papel fundamental en la dinámica modelada (Hürlimann et al., 2008).

Los fluidos hipotéticos controlan solo la reología basal, y todos los eventos modelados actúan como una masa deformable que fluye sobre una delgada capa basal fluida. Las propiedades globales del fluido hipotético se aproximan a los comportamientos de la masa del prototipo.



(a) Paquetes de masa real heterogéneos complejos. (b) Parcelas de masa ideales homogéneas simples.

FIGURA 2-21 Los materiales de deslizamiento de tierra reales son complicados, por lo que se modelan como fluidos hipotéticos simples [Fuente: Hsü, 1975]

2.8.2 Descripción general del programa

DAN3D es un modelo bien conocido y de uso común para la evaluación de deslizamientos por Quan (2012). Fue desarrollado por Scott McDougall y Hungr como parte de su tesis doctoral en la Universidad de British Columbia en 2006. Una revisión de la literatura por parte del autor indica que DAN3D se aplica con mayor frecuencia a las avalanchas de roca que a los flujos de escombros.

Utiliza una solución de flujo lagrangiano bidimensional aplicada a la hidrodinámica de partículas suavizadas para calcular el descentramiento a lo largo de un modelo de elevación digital tridimensional prescrito por el usuario.

DAN3D es una herramienta adecuada para estimar el comportamiento de deslizamiento de tierra sobre la base de datos específicos sobre la geometría y las propiedades del material, suministrados por el usuario del programa. Los

resultados de los cálculos dependen completamente de los datos proporcionados por el usuario; por lo tanto, las personas que usan el programa para hacer estimaciones de desviación deben tener conocimientos previos y estar completamente familiarizados con los deslizamientos de tierra, el comportamiento del suelo, el material rocoso y reología. Las propiedades ingresadas en el programa siempre deben ser verificadas por análisis de antecedentes reales de deslizamientos de tierra similar al deslizamiento de tierra existente o potencial que se estudia.

Según Hungr (2009) DAN3D tiene las siguientes capacidades principales:

- Simula flujos complejos en superficies en 3D.
- Permite una distribución de los esfuerzos no-hidroestáticos y anisotrópicos;
- Simula la erosión del material.
- Permite la elección de diferentes modelos reológicos (incluidos en esta versión: fricción, Voellmy, Bingham, inelástico y Newtoniano).
- Procesa el modelado sin malla de elementos, eliminando los problemas relativos a la distorsión durante grandes desplazamientos.
- La capacidad de arrastrar material.

DAN3D ha sido desarrollado y ampliamente utilizado para el análisis del descentramiento de deslizamientos, específicamente para fines de riesgo práctico de deslizamiento y evaluación de riesgos. La base teórica del modelo es

un sistema promediado de profundidad gobernando ecuaciones derivadas de los principios de la mecánica de medios continuos.

Los algoritmos están diseñados para funcionar dentro del marco semi-empírico del enfoque de "fluido equivalente". El enfoque requiere la selección de la reología del material y la calibración de los parámetros de entrada a través del análisis posterior de los eventos reales.

Aunque es aproximado, facilita una operación simple y eficiente a la vez que toma en cuenta las características más importantes de derrumbes extremadamente rápidos. El modelo se ha verificado contra varios experimentos de laboratorio controlados con base física conocida. También se han llevado a cabo una gran cantidad de análisis retrospectivos de deslizamientos de tierra reales de varios tipos. Un ejemplo presentado. La simulación realizada en la microcuenca de la quebrada de Las lajas sobre el franco este de El Picacho de un evento ocasionado en 1982 por intensas lluvias que provocaron flujos de escombros de más de 200,000 m³.¹⁴

DAN3D confía en la entrada del usuario de la topografía y los parámetros reológicos y de comportamiento para ejecutar un análisis sobre un problema determinado.

¹⁴ *Simulación de Flujos de Escombros Utilizando el Modelo Numérico-Dinámico DAN3D sobre el Flanco Este de El Picacho, José Handal, Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas", 2009.*

2.8.3 Concepto de flujo equivalente

Los deslizamientos de tierra son fenómenos complejos que son mucho más difíciles de simular dinámicamente que los fluidos porque no se aplican las suposiciones estándar de tensiones internas isotrópicas e hidrostáticas y la homogeneidad del material. Al mismo tiempo, los diferentes materiales que pueden estar involucrados pueden tener reologías no newtonianas que están fuertemente influenciadas a través de interacciones complejas durante movimientos altamente inestables y no uniformes en terrenos de pendientes muy pronunciadas e irregulares.

Dada tal complejidad, cualquier relación constitutiva de material único solo puede ser válida dentro de un dominio estrecho de espacio y tiempo. Como resultado, el enfoque científico tradicional para el análisis, la formulación de una ley constitutiva sobre la base de los principios fundamentales y/o pruebas de laboratorio y su incorporación en un problema de valor inicial o límite, parece muy difícil de aplicar. Defensores para un enfoque basado en la medición, como Iverson (1997), Denlinger e Iverson (2001), han demostrado cierto éxito, pero hasta ahora solo en la simulación de experimentos controlados.

DAN3D usa un enfoque semi-empírico más simple basado en el concepto de "fluido equivalente", definido por Hungr (1995) y utilizado tácitamente durante mucho tiempo por muchos otros investigadores (por ejemplo, Sousa y Voight, 1991; O'Brien, 1993; Rickenmann y Koch, 1997). En este marco, el material de deslizamiento heterogéneo y complejo se modela como un material hipotético

gobernado por relaciones reológicas simples. Las reologías internas y basales pueden ser diferentes entre sí.

La idea de la separación de los mecanismos de fricción interna y basal tiene sus raíces en las soluciones integradas en profundidad de la dinámica de fluidos clásica, donde se pueden usar una variedad de relaciones viscosas o turbulentas para determinar las fuerzas de fricción basales de una lámina de fluido que fluye, mientras que la interna se supone que la distribución del esfuerzo es hidrostática. Una separación similar fue implementada por Savage y Hutter (1989) en lo que Pudasaini y Hutter (2007) llaman el modelo SH. En el modelo original SH, tanto la deformación interna como la resistencia al flujo basal son friccionales, pero con diferentes coeficientes de fricción. Esto es adecuado para modelar el flujo de arena en canales de laboratorio de base lisa, o de derrumbes naturales o avalanchas movilizadas por una capa basal débil y friccional. Hungr (1995) extendió el modelo SH reemplazando el término de fricción basal por un núcleo reológico abierto, permitiendo la fricción, resistencia viscosa o turbulenta que actúa sobre la base de un flujo interno de fricción. Esta extensión realizada por el profesor Hungr corresponde a la situación existente en muchos deslizamientos de tierra naturales, donde una masa relativamente rígida de material fluye sobre una capa basal mucho más móvil.

La diferencia entre las propiedades de la capa basal y la lámina que fluye principal puede deberse a diferencias en granulometría, porosidad y, especialmente, grado de saturación y presión de poro. Otro mecanismo importante es el arrastre

y la licuefacción del material saturado de la ruta del flujo, descrito por Hungr y Evans (2004).

El modelo DAN3D, supone que la reología interna es siempre friccional y se rige por un parámetro, el ángulo de fricción interno (Φ). Cuando Φ es igual a cero, el modelo se reduce a una solución estándar de dinámica de fluidos con distribución de tensión interna hidrostática. El modelo reológico basal y sus parámetros asociados generalmente son uno o dos, se seleccionan en base a un procedimiento de calibración empírica, en el que los deslizamientos de tierra reales de un tipo determinado se someten a prueba-espejo (back-análisis). Esta calibración empírica consiste en introducir al modelo parámetros y realizar análisis de prueba y error. Los resultados se juzgan en términos de su capacidad de reproducir el comportamiento externo masivo del evento prototipo, incluyendo la distancia y duración de viaje y la distribución espacial de velocidades y profundidades de flujo/depósito (siempre que haya estimaciones comparables disponibles de observaciones de campo).

Los parámetros calibrados se consideran aparentes, en lugar de las propiedades reales del material, y no pueden, en general, medirse en el laboratorio. Se requiere un amplio análisis posterior para crear una base de datos de parámetros de entrada que se pueda usar para la predicción de varios tipos de derrumbes. Sin embargo, este enfoque reduce la dependencia de las propiedades materiales derivadas del laboratorio y las relaciones constitutivas que pueden no ser válidas a gran escala.

Debido a que las reologías de fluidos equivalentes son simples y solo necesitan un número limitado de parámetros de control, el modelo es fácil de restringir. Tanto la velocidad como la distribución de depósitos se ven fuertemente afectadas por la reología elegida, el flujo de escombros se modela como un material hipotético. (ver Figura 2-22). Por ejemplo, un modelo de fricción produce velocidades relativamente altas y depósitos adelgazantes hacia adelante. Por el contrario, un modelo de fricción-turbulencia (Voellmy) predice velocidades más bajas y depósitos que sobresalen hacia adelante.

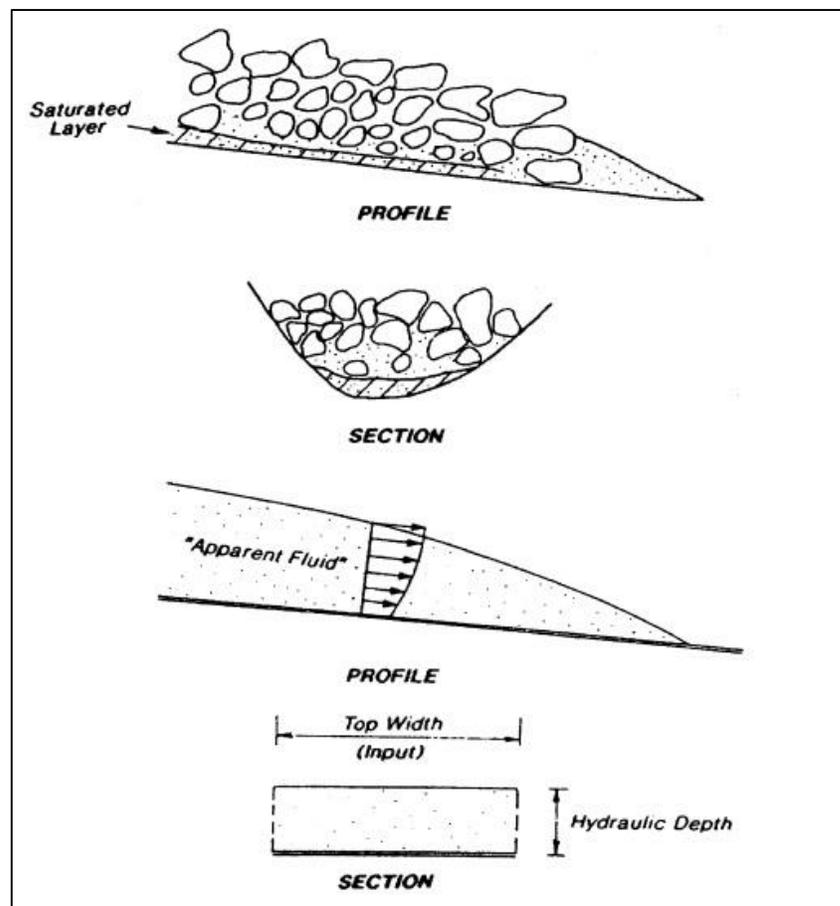


FIGURA 2-22 Ilustración del enfoque de fluido equivalente [Fuente: Hungr, 1995].

En conclusión, el principio de fluido equivalente supone que la masa en movimiento se comporta como un fluido, donde su reología no puede medirse desde el laboratorio o instrumentos in situ. Este principio se considera muy útil, ya que los resultados obtenidos pueden simular y predecir los parámetros de ruta (como la extensión, duración y distribución de intensidad de un flujo de escombros) dentro del área de impacto.

2.8.4 Requisitos del modelo

Para ejecutar una simulación en DAN3D, se requieren tres parámetros de entrada.

Un modelo de terreno digital (DTM) es necesario para describir el terreno del área de investigación. La superficie del suelo se describe con el material eliminado, de modo que la superficie de ruptura quede expuesta. Al restar el archivo de grosor de fuente del área de origen, antes de la diapositiva, se desarrolla el archivo de cuadrícula. El archivo de grosor de fuente representa la diferencia de elevación de la cuadrícula entre la superficie del terreno antes y después del evento. En el área de deposición, el grosor de la fuente debe ser cero. Un archivo de espesor de erosión especifica el arrastre. Los valores en el archivo corresponden a la profundidad de arrastre prescrita. Una rejilla cero significa que no hay arrastre. Se requieren parámetros de reología para los modelos particulares. La tasa de erosión es necesaria si se permite la erosión, Quan (2012).

Se ejecuta un análisis numérico sobre el problema en un momento definido por el usuario y los resultados calculados se trazan en tiempo real en la pantalla. Los resultados también pueden salir durante la ejecución en archivos de datos ASCII.

2.8.5 Teoría del modelo

Primeramente, se debe de observar la convención de las direcciones de los ejes que utiliza DAN3D y los estados de esfuerzos totales (que se consideran positivos en tales direcciones).

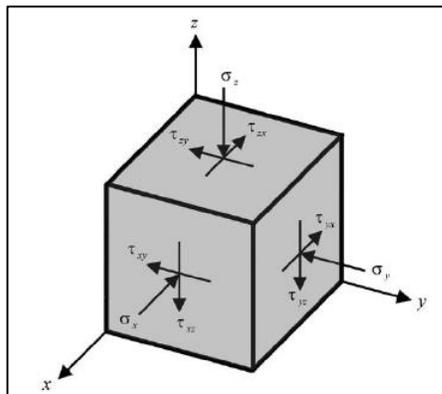


FIGURA 2-23 Estado de tensión total en un elemento de material dentro de un deslizamiento de tierra y convención de ejes de dirección [Fuente: Hungr y McDougall, 2009].

Según la Figura 2-23, los esfuerzos se consideran positivos en las direcciones que se muestran. El eje z está alineado con la dirección normal al lecho y el eje x está alineado con la dirección del movimiento del flujo.

También, un flujo de volumen a través de las fronteras basales explica el arrastre de material. Físicamente, el arrastre consiste en la socavación basal directa y el arado frontal, (ver la Figura 2-24). Además, un coeficiente de presión normaliza

la suposición aplicada del estrés de aumentar linealmente. Un parámetro prescrito por el usuario, E representa la profundidad normal de la cama por unidad de profundidad de flujo y por unidad de desplazamiento. La tasa de erosión se define según Hungr y McDougall (2009), como:

$$\frac{\partial b}{\partial t} = Ehu \quad (23)$$

En cada paso de tiempo, la cantidad de volumen arrastrado desde un punto a lo largo de la ruta de flujo se agrega al volumen de control más cercano. Una profundidad de erosión definida por el usuario dentro de una zona de erosión limita la cantidad de arrastre, y la tasa de erosión promedio se define como:

$$E_s = \frac{\ln\left(\frac{v_f}{v_o}\right)}{S} \quad (24)$$

Donde v_o y v_f es el volumen total de flujo de masa antes y después del arrastre y S es la longitud del camino de la zona de arrastre. Hungr y McDougall (2009).

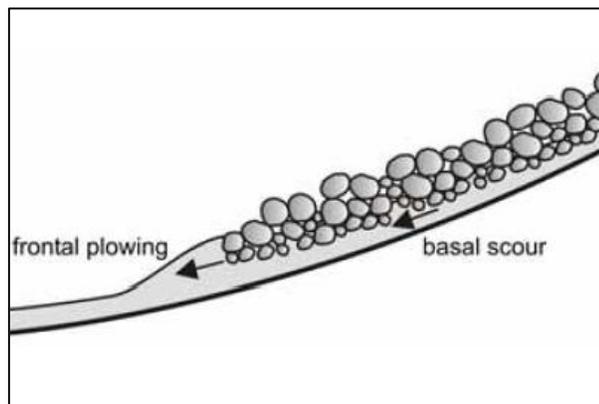


FIGURA 2-24 Arrastre del material del camino por arado y erosión en la base [Fuente: McDougall, 2006].

Las ecuaciones gobernantes se basan en la teoría de presión lateral de la tierra propuesta por Rankine, la cual considera que todos los esfuerzos se incrementan linealmente con la profundidad, por lo que es de mucha utilidad normalizar los esfuerzos utilizando coeficientes de presión, denotados por el símbolo k. por lo que los esfuerzos normales y cortantes en los ejes X y normalizados, quedarían de la siguiente manera: $\sigma_x = k_x \sigma_z, \tau_{yx} = k_{yx} \sigma_z; \sigma_y = k_y \sigma_z, \tau_{xy} = k_{xy} \sigma_z$

La única diferencia entre los coeficientes propuestos por Rankine para el área geotécnica y los empleados en el modelo DAN3D, es que en geotecnia se utilizan esfuerzos efectivos, mientras que la normalización utilizada en este modelo considera la presión de poros (esfuerzos totales).

El conjunto bidimensional de ecuaciones es:

$$\rho h \frac{Du_x}{Dt} = \rho h g_x + k_x \sigma_z \left(-\frac{\partial h}{\partial x} \right) + k_{yx} \sigma_z \left(-\frac{\partial h}{\partial y} \right) + \tau_{zx} - \rho u_x \frac{\partial b}{\partial t} \quad (25)$$

$$\rho h \frac{Du_y}{Dt} = \rho h g_y + k_y \sigma_z \left(-\frac{\partial h}{\partial y} \right) + k_{xy} \sigma_z \left(-\frac{\partial h}{\partial x} \right) \quad (26)$$

El símbolo D/D representa un operador diferencial lagrangiano. Los términos en el lado izquierdo de las ecuaciones (25) y (26) son aceleraciones locales de la columna de referencia (multiplicadas por la masa de la columna por unidad de área basal). El primer término en el lado derecho representa el componente de fuerza de gravedad. El segundo y el tercero son los "términos de presión", que representan las fuerzas desequilibradas que resultan del gradiente de profundidad dentro del fluido que fluye y que dependen de su estado pasivo o

activo. En la ecuación (25), que corresponde a la dirección x , aparecen dos términos adicionales debido a la orientación asumida del sistema de coordenadas de referencia paralelo a la dirección del movimiento. El cuarto término en el lado derecho de la ecuación (25) representa el esfuerzo cortante basal de resistencia al movimiento. El quinto término representa el flujo de momento debido al arrastre del material de camino.

Las ecuaciones se desarrollan asumiendo un material incompresible de densidad constante, sobre la base de que las variaciones de densidad deben ser pequeñas en comparación con los cambios en otras variables dinámicas.

2.8.6 Interpolación de superficie libre

DAN3D, tiene en cuenta la conservación del momento lateral y se basa en Hidrodinámica de Partículas Suavizadas (SPH, por sus siglas en inglés). El método se utilizó anteriormente para la dinámica de avalanchas por Laigle y Coussot (1997). Su implementación en DAN3D es sencillo. A cada columna de referencia se adjunta un volumen de control en forma de campana, descrito por un conjunto de funciones gaussianas. La superficie de flujo y sus inclinaciones en cualquier punto dado después de cada paso de tiempo se restablece al agregar el grosor y el gradiente de todos los volúmenes de control dentro de un radio de influencia (ver Figura 2-20). Los volúmenes de control permanecen constantes, asegurando la continuidad volumétrica, a menos que este sea intencionalmente agrandado por el arrastre. La interpolación de SPH no captura completamente los golpes, pero se suaviza choques menos intensivos.

2.8.7 Material de arrastre

El arrastre del material depende de la pendiente, la velocidad del flujo, la fuerza y la cantidad del material basal disponible para el arrastre. El arrastre puede ocurrir en el frente al "arar", o debajo del cuerpo de la masa que fluye como paso o erosión basal según Sovilla et al. (2006).

En algunos modelos, como el DAN, la tasa de erosión aumenta en proporción a la profundidad del flujo, lo que resulta en una distribución proporcional a la profundidad del material arrastrado y un crecimiento exponencial natural del deslizamiento de tierra con desplazamiento. La cantidad de erosión está limitada por una "profundidad de erosión" definida por el usuario y distribuida espacialmente. La velocidad de arrastre está dimensionada en DAN de modo que se alcanza la profundidad total de erosión en cualquier punto de la trayectoria dentro de la zona de arrastre especificada por el usuario, una vez que todo el volumen en movimiento actual del tobogán ha cruzado ese punto. Esta suposición enfatiza el arrastre escalonado y los mecanismos de erosión basal y descuida el arado. Esto es probablemente apropiado para tratar suelos saturados, donde la carga no drenada es el principal mecanismo de movilización. Sassa, (1985). DAN3D utiliza un enfoque empírico similar basado en un parámetro prescrito por el usuario, E (la velocidad de erosión), que representa la profundidad normal de la cama erosionada por unidad de profundidad de flujo y desplazamiento unitario o, de forma equivalente, la tasa de crecimiento exponencial natural dependiente del desplazamiento. McDougall y Hungr (2005).

Este método tiene una base física, ya que los cambios en las condiciones de esfuerzo que conducen a la falla dentro del material del camino se pueden relacionar con la profundidad del flujo.

Tanto en DAN como en DAN3D, la cantidad de material arrastrado desde puntos a lo largo de la ruta en cada paso de tiempo se agrega al volumen de control más cercano. La cantidad de arrastre está limitada por una profundidad de erosión definida por el usuario, especificada dentro de una zona de arrastre prescrita. Ninguno de los modelos modifica actualmente el camino como resultado de la erosión del material. La suposición de un crecimiento exponencial natural con desplazamiento se usa por su simplicidad y, eventualmente, puede servir como una línea de base para un complejo más complejo. Modelado de arrastre, incluido el desarrollo de relaciones constitutivas para tasas de crecimiento basadas en mecanismos de arrastre reales.

De forma similar al núcleo reológico basal abierto utilizado en DAN3D, el usuario podría seleccionar una relación de arrastre adecuada a partir de un menú de modelos propuestos. Dichos modelos podrían incorporar dependencia de otros factores, incluida la velocidad del flujo, el ángulo de la pendiente, la curvatura de la trayectoria, la rugosidad de la superficie o las características de resistencia y drenaje del material del camino local. Mientras tanto, se pueden asignar diferentes valores de E y profundidad de erosión a distintas zonas de arrastre para explicar empíricamente dichos factores.

2.9 MODELOS REOLÓGICOS UTILIZADOS EN EL DAN3D

El esfuerzo cortante basal, τ_{zx} , se opone al movimiento y, debido a la orientación del sistema de coordenadas de referencia elegida (Ver Figura 2-25), siempre es negativa. De acuerdo con el concepto de fluido equivalente, τ_{zx} se rige por una reología basal que puede ser diferente de la reología interna.

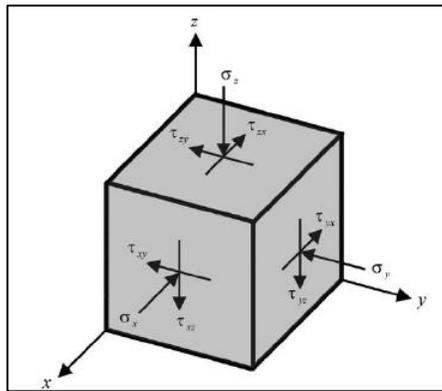


FIGURA 2-25 Estado de tensión total en un elemento de material dentro de un deslizamiento de tierra y convención de ejes de dirección [Fuente: Hungr y McDougall, 2009].

Para permitir la simulación de diferentes tipos de derrumbes rápidos que involucran diferentes materiales geológicos, se puede implementar una variedad de relaciones reológicas basales DAN3D, estas pueden ser:

- Reología de flujo Newtoniano-Laminar.
- Reología de flujo Plástico.
- Reología del modelo de resistencia de Bingham.
- Reología Friccional.
- Reología del modelo de resistencia de Voellmy.

El usuario puede cambiar la reología basal a lo largo de la ruta o dentro de la masa deslizante. Las ecuaciones para τ_{zx} que a continuación se presentan se derivan de ecuaciones de flujo uniformes correspondientes a cada reología dada, que resuelven el esfuerzo cortante basal en función de la profundidad de flujo normal, la densidad, la velocidad media del flujo y los parámetros reológicos.

- **Reología de flujo Newtoniano-Laminar**

Esta reología puede ser útil para el análisis aproximado de ciertos flujos totalmente licuados que involucran materiales granulares o arcillosos. La expresión de resistencia a cortante basal es la siguiente:

$$\tau_{zx} = -\frac{3\mu_d v_x}{h} \quad (27)$$

Donde:

μ_d : Viscosidad dinámica de un fluido newtoniano en estado laminar.

- **Reología de flujo Plástico**

A menudo se asume en los análisis de ingeniería geotécnica relacionados con el movimiento pseudoestático del suelo licuado, cuando se supone que la resistencia al cortante basal es igual a un límite elástico constante. La expresión de resistencia a cortante basal es la siguiente:

$$\tau_{zx} = -c \quad (28)$$

c : Esfuerzo constante de cedencia (en estado estacionario) no drenado.

- **Reología del modelo de resistencia de Bingham**

La reología de Bingham combina el comportamiento plástico y viscoso. El modelo se basa en un fluido Bingham, que se comporta como un material rígido por debajo de un límite elástico dado, y como material viscoso por encima de este límite. La resistencia de base se da en términos de:

$$\tau_{zx}^3 + 3 \left(\frac{\tau_y}{2} + \frac{\mu_B v_x}{h} \right) \tau_{zx}^2 - \frac{\tau_y^3}{2} = 0 \quad (29)$$

Donde:

τ_y : Límite elástico de Bingham,

μ_B : Viscosidad de Bingham.

- **Reología Friccional**

La resistencia a la fricción, también conocida como resistencia de Coulomb, considera que las fuerzas de corte resistentes en la base son independientes de la velocidad y dependen solamente del esfuerzo normal efectivo (σ'_z), el cual se define como la diferencia entre el esfuerzo total (σ_z) y la presión de poros u , (Hungry y Evans, 1996). El término de resistencia al cortante basal es el siguiente:

$$\tau_{zx} = - (\sigma_z - u) \tan \phi = \sigma'_z \tan \phi \quad (30)$$

Donde:

σ'_z : Esfuerzo normal efectivo en la base.

ϕ : El ángulo de fricción efectivo dinámico en la base.

u : Presión de poros en la base.

La presión de poros dentro de un deslizamiento de tierra en movimiento es extremadamente difícil de estimar, ya que está fuertemente acoplada dinámicamente al nivel cambiante del esfuerzo normal total en el material, mientras que al mismo tiempo está sujeto a la difusión dependiente del tiempo (Hungry y Mcdougall, 2009). En el análisis geotécnico de estabilidad de taludes, comúnmente se asume que la presión de poro está relacionada con la tensión total por una relación de presión de poros, $r_u = u/\sigma_z$, en cuyo caso:

$$\tau_{zx} = -\sigma_z(1 - r_u) \tan \phi \quad (31)$$

- **Reología del modelo de resistencia de Voellmy**

La reología de Voellmy combina modelos de fricción y turbulencias (Körner, 1976). Matemáticamente, esto se expresa como:

$$\tau_{zx} = -\left(\sigma_z f + \frac{\rho g \bar{v}_x^2}{\xi}\right) \quad (32)$$

Dónde:

f : Es el coeficiente de fricción,

ρ : Es la densidad del material,

g : Es la aceleración gravitacional,

v_x : Es la velocidad de flujo promediada en profundidad, y

ξ : Es el término de turbulencia.

Conceptualmente, ξ representa implícitamente el grosor de una capa no drenada o verificada por un deslizamiento de tierra, donde la resistencia de fricción

comienza baja y aumenta proporcionalmente a la velocidad al cuadrado. Bagnold (1954), Hungr (1995).

El primer término en el lado derecho representa cualquier componente de fricción de la resistencia. El segundo término fue originalmente introducido por Voellmy (1955) para explicar la influencia dependiente de la velocidad de la resistencia aerodinámica sobre las avalanchas de nieve. En el contexto de la dinámica de derrumbes y el enfoque de fluido equivalente, el segundo término no se incluye para explicar el arrastre de aire o la turbulencia solamente, sino más bien para explicar empíricamente todas las posibles fuentes de resistencia dependiente de la velocidad (adicional a los efectos de la curvatura del camino y la transferencia de momento durante el arrastre, que se contabilizan explícitamente en DAN3D). El modelo de Voellmy típicamente produce un engrosamiento distal del depósito y mejores simulaciones de la velocidad que la reología de fricción. Un defecto matemático de esta reología es el movimiento extendido irreal dentro del flujo después de que el evento principal llega a un descanso; es necesario que un practicante ejerza juicio para determinar cuándo se completa el movimiento.

La reología Voellmy ha sido utilizada con éxito por muchos investigadores para modelar varios tipos de movimientos de masa, incluyendo avalanchas de nieve, avalanchas de roca, deslizamientos de flujo, avalanchas de escombros y flujos de escombros.

2.10 TÉRMINOS DE PRESIÓN

Los términos de presión en las ecuaciones (25) y (26) dependen de suposiciones con respecto al estado de tensión tangencial en la lámina que fluye. En un fluido, por supuesto, estos son simplemente tensiones hidrostáticas, es decir, cortante cero y un esfuerzo hidrostático constante.

En las ecuaciones (25) y (26), esta condición daría como resultado que tanto k_{zx} como k_{zy} sean cero, mientras que $k_x = k_y = 1.0$. En una lámina de material de fricción que fluye y se deforma, por otro lado, los coeficientes k son funciones de la deformación longitudinal.

Por lo tanto, se puede afirmar que los esfuerzos internos se encuentran en función de las deformaciones por corte internas tangenciales y están limitados por estados activos y pasivos (Cepeda, 2007).

Savage y Hutter (1989) obtuvieron una fórmula para k_x y k_y , basada en la suposición de que el material está en el punto de falla por corte (criterio de falla de Terzaghi-Coulomb), controlado por un ángulo de fricción interno y un coeficiente de presión que proporciona fricción basal en la ladera que está dada por la relación de esfuerzo cortante en la base y esfuerzo normal total (“la pendiente de fricción”, k_{zx}). Esta fórmula es la siguiente:

$$k_{(min/max)} = 2 \left(\frac{1 \pm \sqrt{1 - \cos^2 \phi_i (1 + k_{zx}^2)}}{\cos^2 \phi_i} \right) - 1 \quad (33)$$

Donde:

$k_{(min/max)}$: Coeficiente de presión X o Y, (k_x y k_y)

ϕ_i : Angulo de fricción interna.

k_{zx} : Coeficiente de presión que proporciona fricción en la base de la ladera.

Los valores mínimo y máximo del coeficiente dependen de la sensación de corte interno. En la condición "activa", cuando la hoja que fluye se estira, se aplica el valor mínimo. El valor máximo corresponde a la condición "pasiva", cuando la hoja se está comprimiendo.

En DAN3D, los estados de tensión están determinados por la tensión tangencial. Al inicio del movimiento, k_x se toma como 1.0, correspondiente a una condición hidrostática "en reposo". A partir de ese momento, se mantiene un registro de la tensión en desarrollo en cada columna de referencia. La transición de la condición activa a pasiva ocurre al incrementar los coeficientes k a través de la multiplicación de incrementos de deformación por un coeficiente de rigidez, D :

$$k = k' + D\Delta\varepsilon \quad (34)$$

Donde:

k : Coeficiente de presión actualizado para cada paso de tiempo.

k' : Coeficiente de presión correspondiente al paso de tiempo anterior. Al inicio de la simulación este valor se asume de 1.0, asumiendo una condición hidrostática.

D : Coeficiente de rigidez adimensional.

$\Delta\varepsilon$: Incremento de deformación que ocurre durante cada paso de tiempo.

El valor predeterminado actual en DAN3D para el coeficiente de rigidez adimensional (D) es 200 para las condiciones activo y pasivo. Esto está dentro del rango de los coeficientes de rigidez adimensionales estimados por Hungr (1995), que se basaron en los valores medidos de la rigidez del suelo granular detrás de los muros de contención durante la deformación activa y pasiva (Hungr y Mcdougall, 2009). Los resultados muestran que DAN3D no es sensitivo al valor especificado de D, pero ciertos valores pequeños pueden ayudar sustancialmente a la estabilidad numérico.

2.11 METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

Para lograr que el software a utilizar, DAN3D (Dynamics Analysis of Landslides in Three Dimensions), brinde resultados confiables se debe de tener un amplio conocimiento de la zona. Conocer la topografía, características del suelo y propiedades hidrológicas actualizadas de la zona de estudio será de gran importancia para la obtención de resultados que podamos usar para realizar las proyecciones en el DAN3D.

Para la obtención de los parámetros de entrada para el análisis en DAN3D, se realiza la digitalización de curvas de nivel de la zona, ya que la Universidad de El Salvador cuenta con curvas a cada cinco metros en formato de imágenes georreferenciadas las cuales fueron compradas al CNR, asimismo se harán levantamientos topográficos donde sea necesario obtener información con mayor detalle y así completar la topografía actualizada de la zona.

Luego se determinarán las propiedades hidrológicas necesarias de las cuencas en estudio para realizar un estudio hidrológico de estas zonas a analizar y así obtener intensidades de lluvia, luego se procederá con un software de modelación en tres dimensiones, que sea de uso libre (por ejemplo, QGIS), a generar archivos de malla que el software DAN3D requiere para su simulación.

Tomando de base trabajos de graduación y también trabajos realizados por expertos tanto nacionales como extranjeros para recopilar las características del suelo (tipo de suelo, granulometría, tipo de roca, etc.), en caso de ser necesarios la realización de ensayos de los suelos se incluirán como parte en el análisis. Sin embargo, cuando la información obtenida no sea confiable, o sea muy limitada, procederemos a hacer estudios de campo en la zona.

Con toda la información necesaria recopilada para el análisis de la zona, se procede a introducir dicha información al software DAN3D y de esta manera obtener predicciones futuras de posibles deslizamientos. A partir de los resultados se determinarán posibles zonas de protección, para que futuros proyectos que se deseen desarrollar en la zona tomen medidas adecuadas de prevención y de esta forma evitar daños de infraestructura o pérdidas humanas, las cuales se presentarán en mapas.

CAPÍTULO III

RECOPIACIÓN DE DATOS DE ENTRADA

3.1 RESUMEN

En este capítulo se presentan los parámetros y aspectos generales que se deben considerar para realizar la caracterización de una cuenca hidrográfica; para esto, será necesario ubicar la zona de estudio, delimitar el área, utilizando un enfoque de cuenca, es decir delimitación a través de las curvas de nivel y construcción de parteaguas de cada cuenca a analizar, por lo que se realizará un análisis de la división política para cada una de las zonas de estudio, así mismo, la realización de mapas de uso y tipo de suelos de la zona de estudio y también establecer las características físicas y morfológicas de las cuencas en estudio y a su vez con los datos recolectados de las cuencas realizar un análisis hidrológico de la zona.

Para la determinación de las características geomorfológicas del área de estudio, es necesario determinar tres parámetros muy importantes, siendo la forma o superficie de la cuenca, el relieve y la red de drenaje, los cuales permiten conocer el comportamiento por medio de parámetros cualitativos y cuantitativos de las características físicas de la cuenca, que por medio del software Qgis y plantillas de Excel se realizará el cálculo para cada cuenca del área, perímetro, longitud

del cauce principal, pendientes, factor de forma, coeficiente de compacidad, relación de elongación, densidad de drenaje, etc., todos de utilidad para establecer la escorrentía superficial y el tiempo de concentración; basándose en estas características para determinar el caudal que transita por el cauce principal, con el correspondiente arrastre de sólidos en suspensión y de fondo, y analizar otros procesos dinámicos que se presenten.

3.2 CARACTERIZACIÓN EN EL ÁREA DE ESTUDIO

3.2.1 Ubicación de la Zona de Estudio

El área de estudio se localiza en la región central de la República de El Salvador, específicamente en el Área Metropolitana de San Salvador (AMSS) en donde se ubican las cuencas de estudio: cuenca del Rio San Antonio ubicada dentro del municipio de Nejapa y cuenca del Rio El Ángel ubicada en municipio de Apopa.



FIGURA 3-1 País de zona de estudio [Fuente: Elaboración propia basado en Google Earth].

En la Figura 3-2, se muestran los departamentos que abarcan el estudio de las cuencas. Solo una pequeña área del departamento de La Libertad participará en el estudio.



FIGURA 3-2 Macro-localización de las cuencas entre los departamentos de La Libertad y San Salvador.

En la Figura 3-3 se observa la ubicación de las dos cuencas a ser estudiadas en donde se puede apreciar que están entre la vertiente Nor-Este de el Volcán de San Salvador y la vertiente Sur-Oeste del cerro de Nejapa.

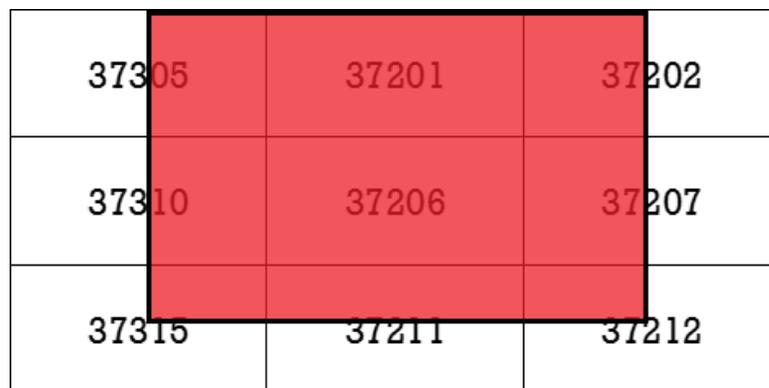


FIGURA 3-3 Localización a detalle de la zona de estudio.

3.2.2 Topografía de la Zona de Estudio

Para la realización del estudio hidrológico es necesario tomar en cuenta la topografía de la zona de estudio, para este fin, se solicitó información al Centro Nacional de Registro (CNR), ente que se encarga de garantizar los principios de publicidad, legalidad y seguridad jurídica de los registros de propiedad raíz e hipotecas, en donde proporcionaron cuadrantes georeferenciados (imagen fotogramétrica) de curvas a cada 5 metros. Esta información es de suma importancia para la obtención de datos más precisos para la modelación hidrológica y a su vez garantizar que los resultados sean confiables y más apegados a la realidad.

En la Figura 3-4 se muestran los cuadrantes que se utilizaron en la zona de estudio.

El diagrama muestra una cuadrícula de 3x3 cuadrantes. Los cuadrantes de la columna central y los cuadrantes adyacentes de la columna izquierda y derecha en las filas superior y media están sombreados en rojo. Los números de los cuadrantes son: 37305, 37201, 37202 en la fila superior; 37310, 37206, 37207 en la fila media; y 37315, 37211, 37212 en la fila inferior.

37305	37201	37202
37310	37206	37207
37315	37211	37212

FIGURA 3-4 Representación de los cuadrantes utilizados y demarcación de zona de estudio
[Fuente: Elaboración propia].

La modelación topografía se desarrolló con un software de uso libre Qgis donde fue posible su desarrollo. Se abre el software Qgis y se carga una capa raster

(cuadrante de la imagen fotogramétrica proporcionadas por el CNR). La Figura 3-5 muestra el Cuadrante 37201 (1 de los 9 cuadrantes), tomadas por fotogrametría en noviembre de 1972 por el Instituto Geografico Nacional.

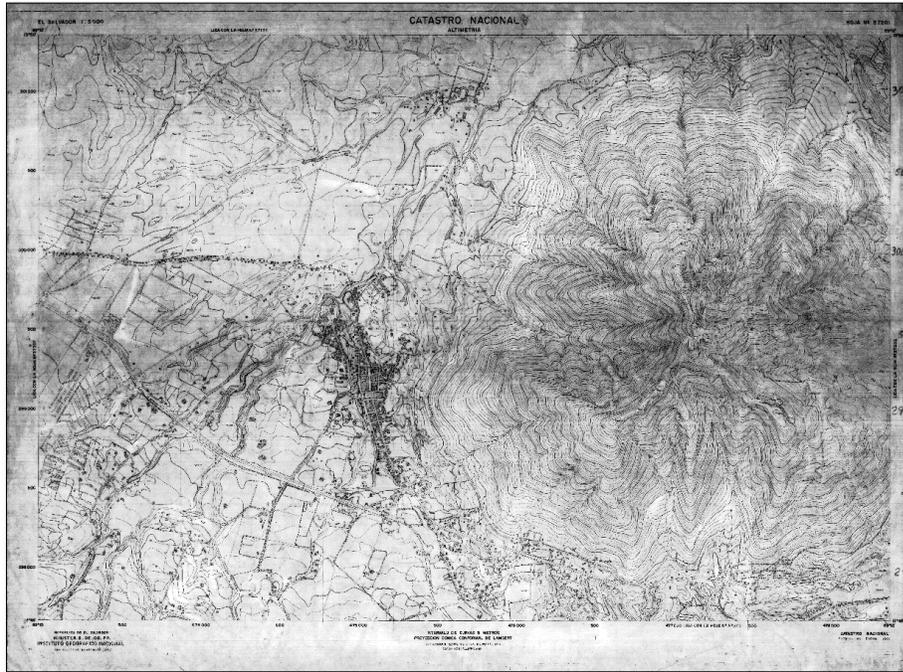


FIGURA 3-5 Cuadrante 37201 proporcionado por el CNR, se muestra el cerro de Nejapa [Fuente: Fotogrametría proporcionada por el CNR].

Una vez cargado el cuadrante en el software Qgis, se procede a la creación de una capa shape para poder digitalizar las curvas con su respectiva elevación. En la figura 3-6 se muestra la creación de shape con una etiqueta de “elevación” donde se le asigna el valor a todas las curvas según la topografía.

En la figura 3-7 se puede visualizar la tabla de atributos de las curvas de nivel en donde por toda el area de estudio se digitalizaron un total de 2,108 curvas.

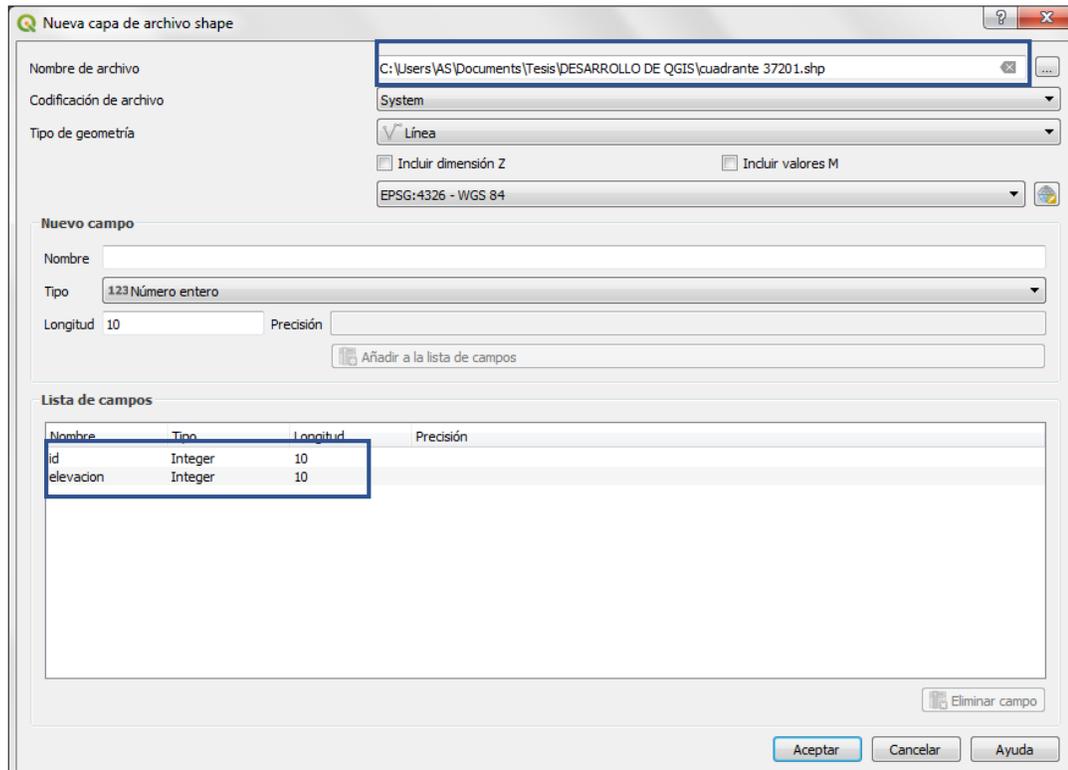
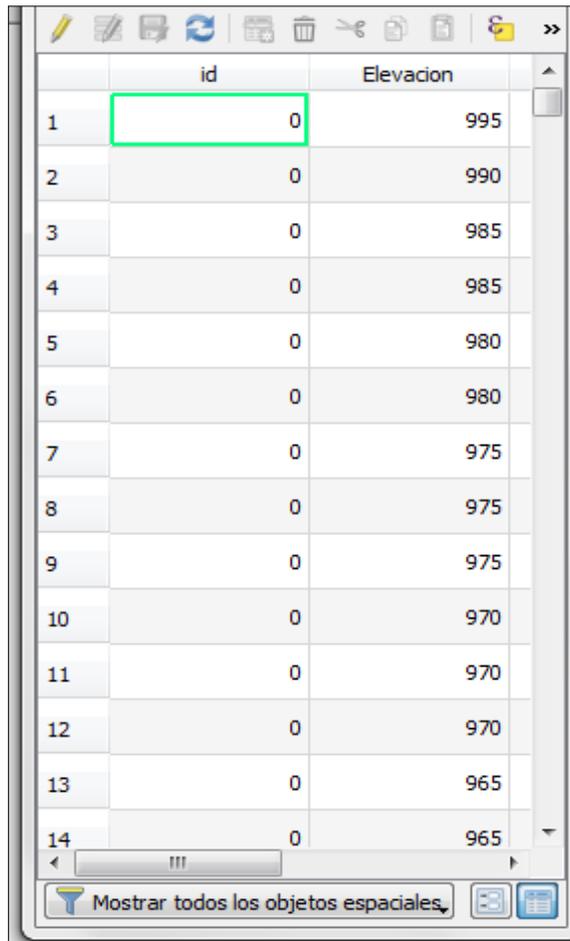


FIGURA 3-6 Creación de capa shape con etiqueta de elevación [Fuente: Elaboración propia en software Qgis].



	id	Elevacion
1	0	995
2	0	990
3	0	985
4	0	985
5	0	980
6	0	980
7	0	975
8	0	975
9	0	975
10	0	970
11	0	970
12	0	970
13	0	965
14	0	965

FIGURA 3-7 Valores de elevación de las curvas de nivel [Fuente: Elaboración propia en software Qgis].

En la figura 3-8 se demuestra la digitalización de todas las curvas de nivel de el cuadrante 37201.

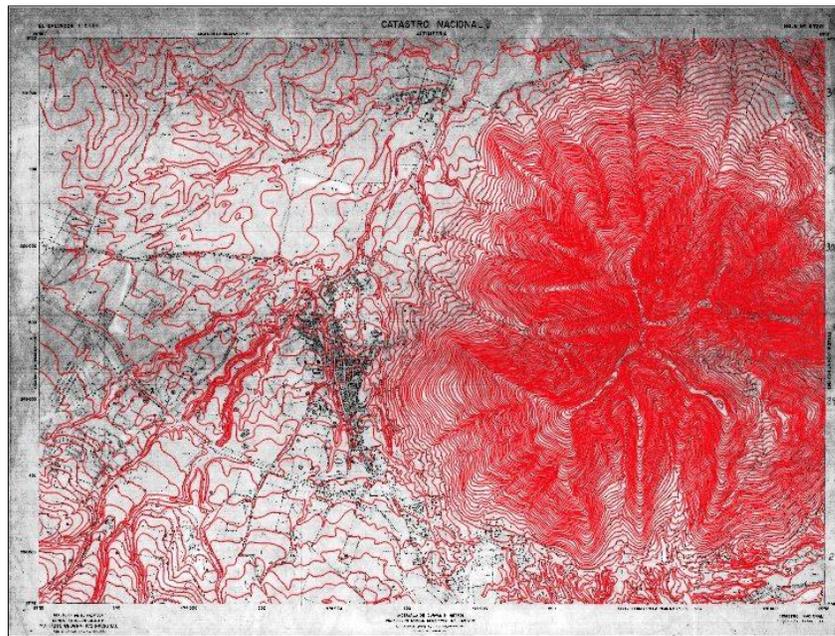
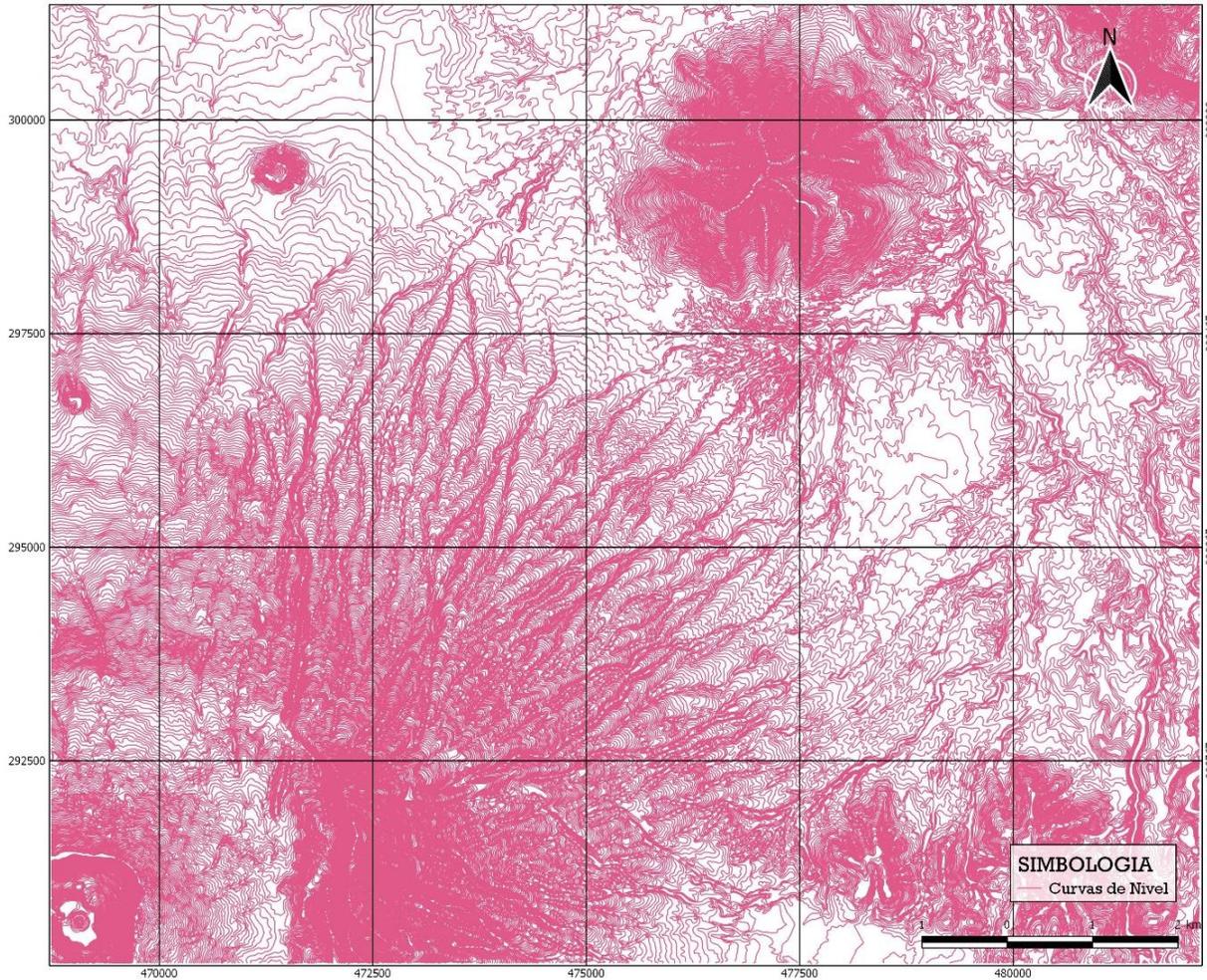


FIGURA 3-8 Digitalización de curvas de nivel del Cuadrante 37201 a cada 5 metros utilizando Qgis

[Fuente: Elaboración propia con los datos proporcionados por el CNR-UES].

Se realizará, a criterio visual, la delimitación del Parteaguas del área de estudio, siguiendo la tendencia de las mayores elevaciones mostradas por las curvas de nivel, de las dos cuencas en estudio, las cuales forman parte del análisis hidrológico. En el Mapa 1 se muestran las curvas de nivel a cada 5 metros del área de estudio.

CURVAS DE NIVEL DE LA ZONA DE ESTUDIO



REGIÓN:
ZONA NORTE DEL ÁREA METROPOLITANA
DE SAN SALVADOR.

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

TRABAJO DE GRADUACIÓN:
"MODELACIÓN DE FLUJOS DE ESCOMBROS
EN QUEBRADAS SUSCEPTIBLES DEL
SECTOR NORTE DEL AMSS"

INTEGRANTES:
CRUZ CÁRCAMO, JAVIER STANLEY
MORENO FERRUFINO, JOSÉ NEFTALÍ
SEGOVIA ÁLFARO, TATIANA ELIZABETH

DOCENTES ASESORES:
ING. EDWIN SANTIAGO ESCOBAR RIVAS
(DOCENTE DIRECTOR)
ING. MSc. INGRID ALTAGRACIA ÁLFARO
LÓPEZ (ASESOR EXTERNO)

MAPA:
1

MAPA 1 Digitalización de las curvas de nivel del área de estudio [Fuente: Elaboración propia con los datos proporcionadas por el CNR-UES].

Para continuar con el desarrollo de la topografía, es necesario hacer una interpolación con las curvas digitalizadas, así como se muestra en la figura 3-9, se escoge la capa de la zona de estudio y la etiqueta de elevación para realizar el modelo de elevación digital DEM.

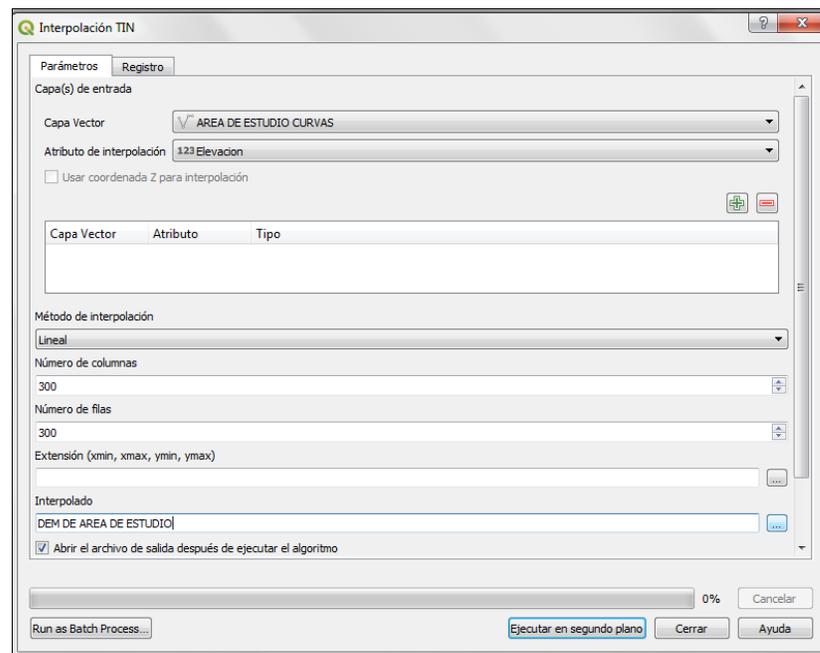
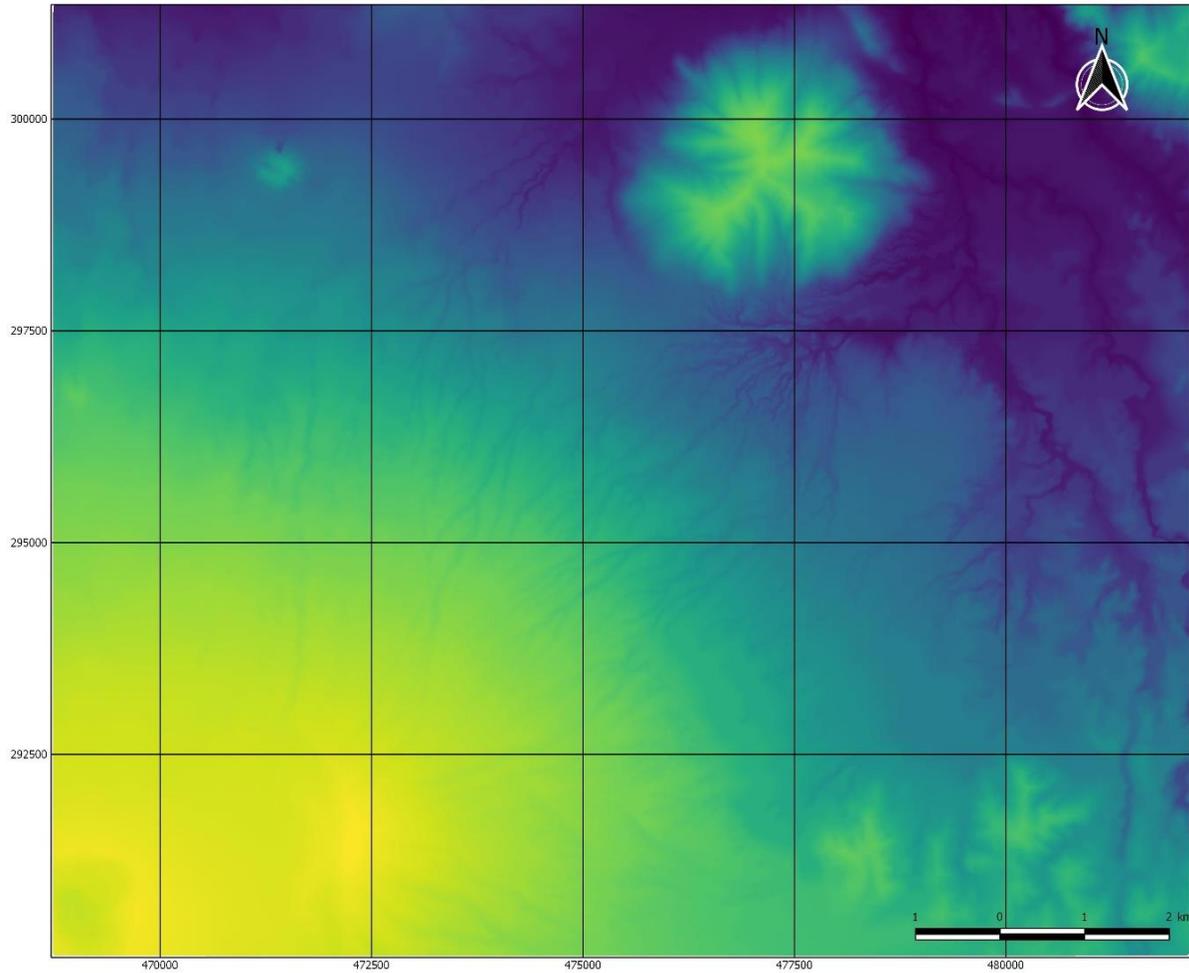


FIGURA 3-9 Interpolación para obtención del DEM de la zona de estudio [Fuente: Elaboración propia en software Qgis].

En el modelo de elevación digital se puede apreciar la diferencia de elevaciones que muestra el DEM (Mapa 2).

MODELO DE ELVACIÓN DIGITAL



REGION:
ZONA NORTE DEL AREA METROPOLITANA
DE SAN SALVADOR.



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA



TRABAJO DE GRADUACIÓN:
"MODELACIÓN DE FLUJOS DE ESCOMBROS
EN QUEBRADAS SUSCEPTIBLES DEL
SECTOR NORTE DEL AMSS"

INTEGRANTES:
CRUZ CÁRCAMO, JAVIER STANLEY
MORENO FERRUFINO, JOSÉ NEFTALÍ
SEGOVIA ÁLFARO, TATIANA ELIZABETH

DOCENTES ASESORES:
ING. EDWIN SANTIAGO ESCOBAR RIVAS
(DOCENTE DIRECTOR)
ING. MSc. INGRID ALTAGRACIA ÁLFARO
LÓPEZ (ASESOR EXTERNO)

MAPA:
2

MAPA 2 Modelo de elevación digital (DEM) realizado en el software Qgis del área de estudio [Fuente: Elaboración propia con curvas de nivel a cada 5 m en software Qgis].

Este modelo DEM es necesario para poder visualizar los relieves de toda la zona de estudio. En la figura 3-10 se muestra que se selecciona el raster “DEM de la zona de estudio” para hacer el análisis. El comando para realizar los relieves en el software Qgis se llama “mapa de sombras (hillshade)”.

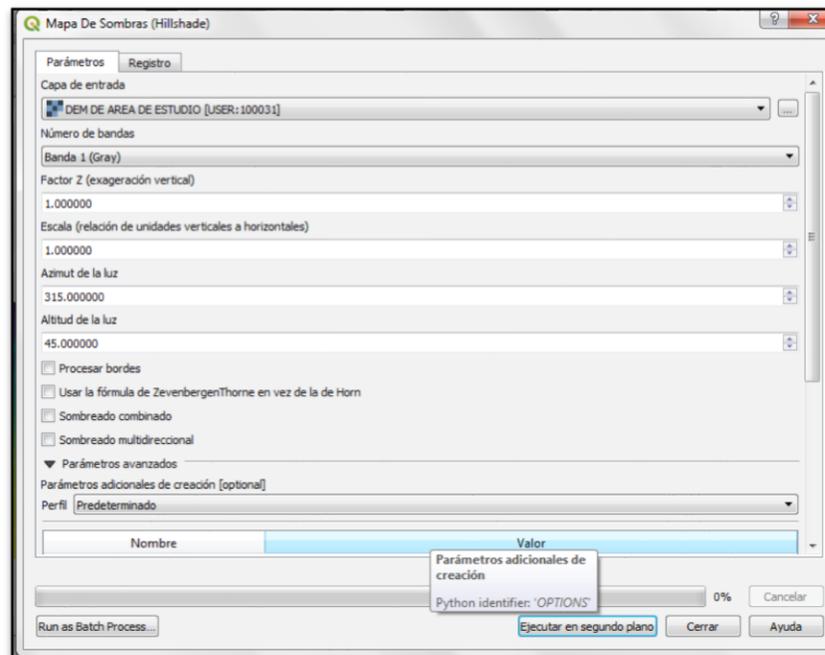
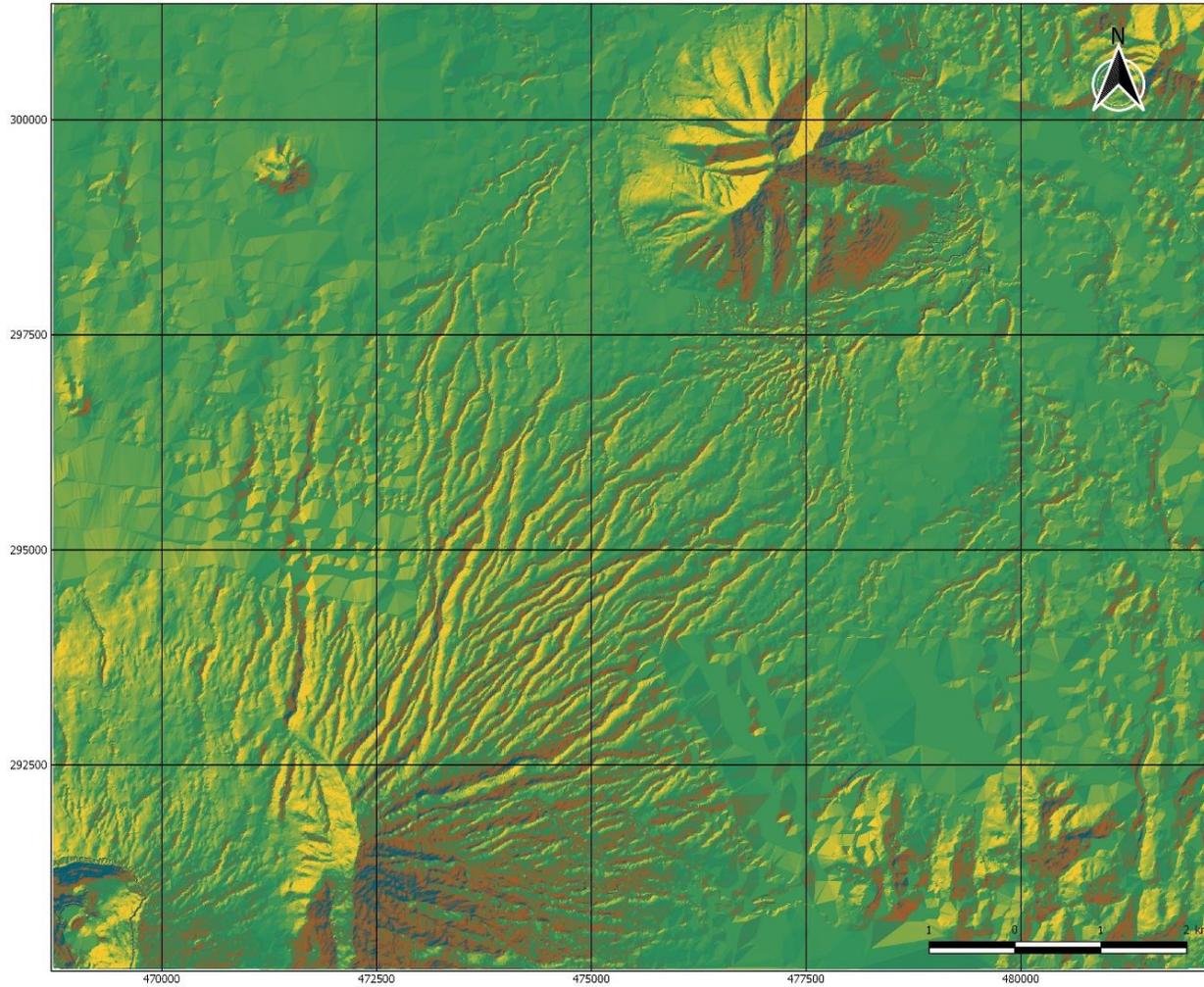


FIGURA 3-10 Análisis del mapa de sombras del área de estudio en Qgis

[Fuente: Elaboración propia en software Qgis].

En el Mapa 3 se muestra el area de estudio en el cual se puede apreciar los relieves que se muestran con las curvas de nivel a cada 5 metros.

HIPSOMETRÍA DE LA ZONA DE ESTUDIO



REGION:
ZONA NORTE DEL AREA METROPOLITANA
DE SAN SALVADOR.



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA



TRABAJO DE GRADUACIÓN:
"MODELACIÓN DE FLUJOS DE ESCOMBROS
EN QUEBRADAS SUSCEPTIBLES DEL
SECTOR NORTE DEL AMSS"

INTEGRANTES:
CRUZ CÁRCAMO, JAVIER STANLEY
MORENO FERRUFINO, JOSÉ NEFTALÍ
SEGOVIA ÁLFARO, TATIANA ELIZABETH

DOCENTES ASESORES:
ING. EDWIN SANTIAGO ESCOBAR RIVAS
(DOCENTE DIRECTOR)
ING. MSc. INGRID ALTAGRACIA ÁLFARO
LÓPEZ (ASESOR EXTERNO)

MAPA:
3

MAPA 3 Hipsometría de la zona de estudio de la zona norte del AMSS [Fuente: Elaboración propia con curvas de nivel a cada 5 m en software Qgis].

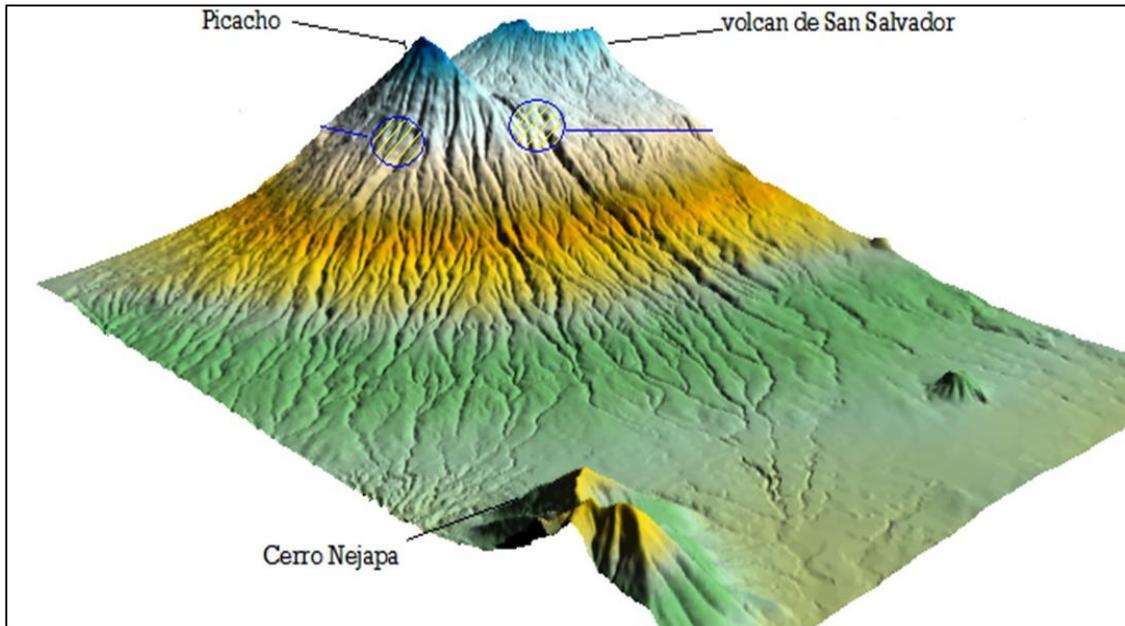


FIGURA 3-11 Modelación de área de estudio en 3D [Fuente: Elaboración propia con curvas de nivel a cada 5 m en software QGIS].

Se puede apreciar el modelo topográfico de la zona de estudio en 3D en la figura 3-11.

3.2.3 Delimitación de Cuencas del Área de Estudio

El parteaguas es una línea imaginaria que delimita una cuenca hidrográfica, la cual marca el límite entre una cuenca en estudio y las cuencas vecinas. El agua precipitada a cada lado de la divisoria desemboca en ríos o afluentes diferentes.

El parteaguas de las dos cuencas se hizo en el software Qgis gracias a la digitalización de las curvas de nivel y teniendo en cuenta que la línea del parteaguas sigue los puntos de las mayores elevaciones topográficas que delimitan cada cuenca. Cabe resaltar que la precisión en la delimitación del

parteaguas de las cuencas puede variar según el detalle de las curvas de nivel y su escala.

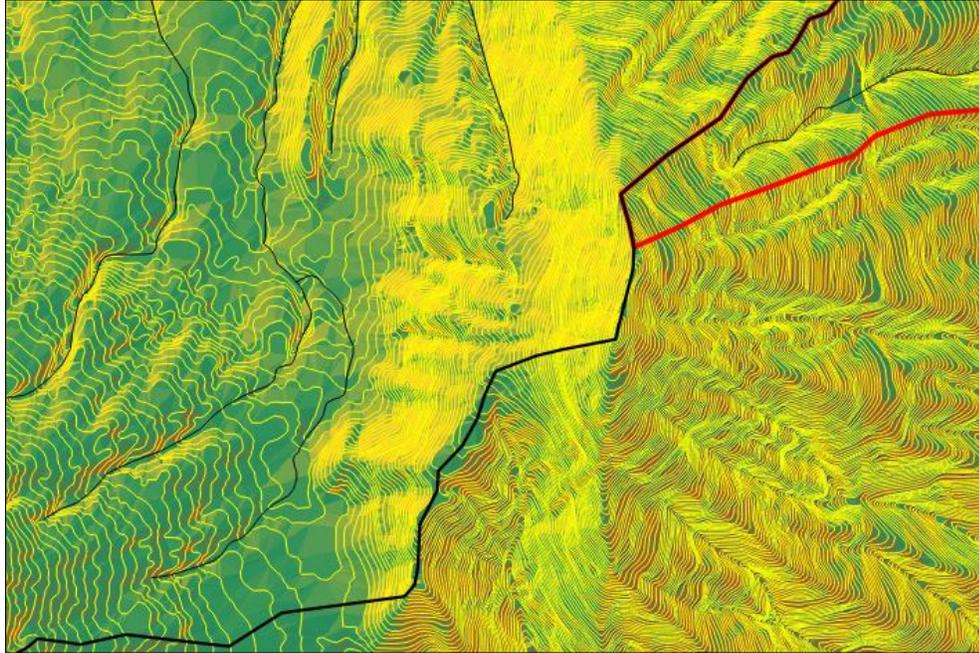
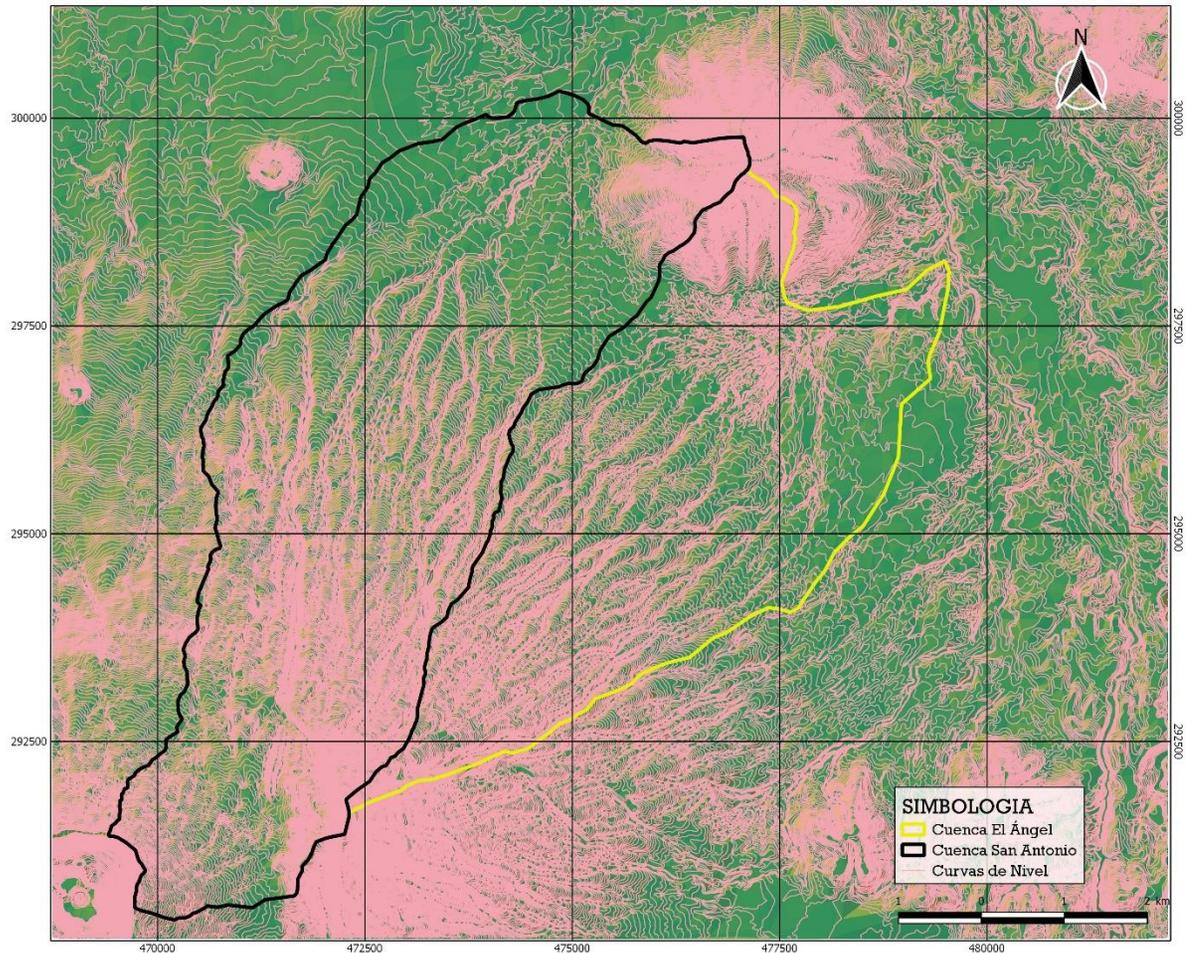


FIGURA 3-12 Ejemplo del trazo del parteaguas en Qgis [Fuente: Elaboración propia con curvas de nivel a cada 5 m en software Qgis].

Se puede observar en el Mapa 4 el parteaguas de las dos cuencas que se digitalizaron en Qgis.

CUENCAS DE LA ZONA DE ESTUDIO



REGION:
ZONA NORTE DEL AREA METROPOLITANA
DE SAN SALVADOR.

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

TRABAJO DE GRADUACIÓN:
"MODELACIÓN DE FLUJOS DE ESCOMBROS
EN QUEBRADAS SUSCEPTIBLES DEL
SECTOR NORTE DEL AMSS"

INTEGRANTES:
CRUZ CÁRCAMO, JAVIER STANLEY
MORENO FERRUFINO, JOSÉ NEFTALÍ
SEGOVIA ÁLFARO, TATIANA ELIZABETH

DOCENTES ASESORES:
ING. EDWIN SANTIAGO ESCOBAR RIVAS
(DOCENTE DIRECTOR)
ING. MSc. INGRID ALTAGRACIA ÁLFARO
LÓPEZ (ASESOR EXTERNO)

MAPA:

4

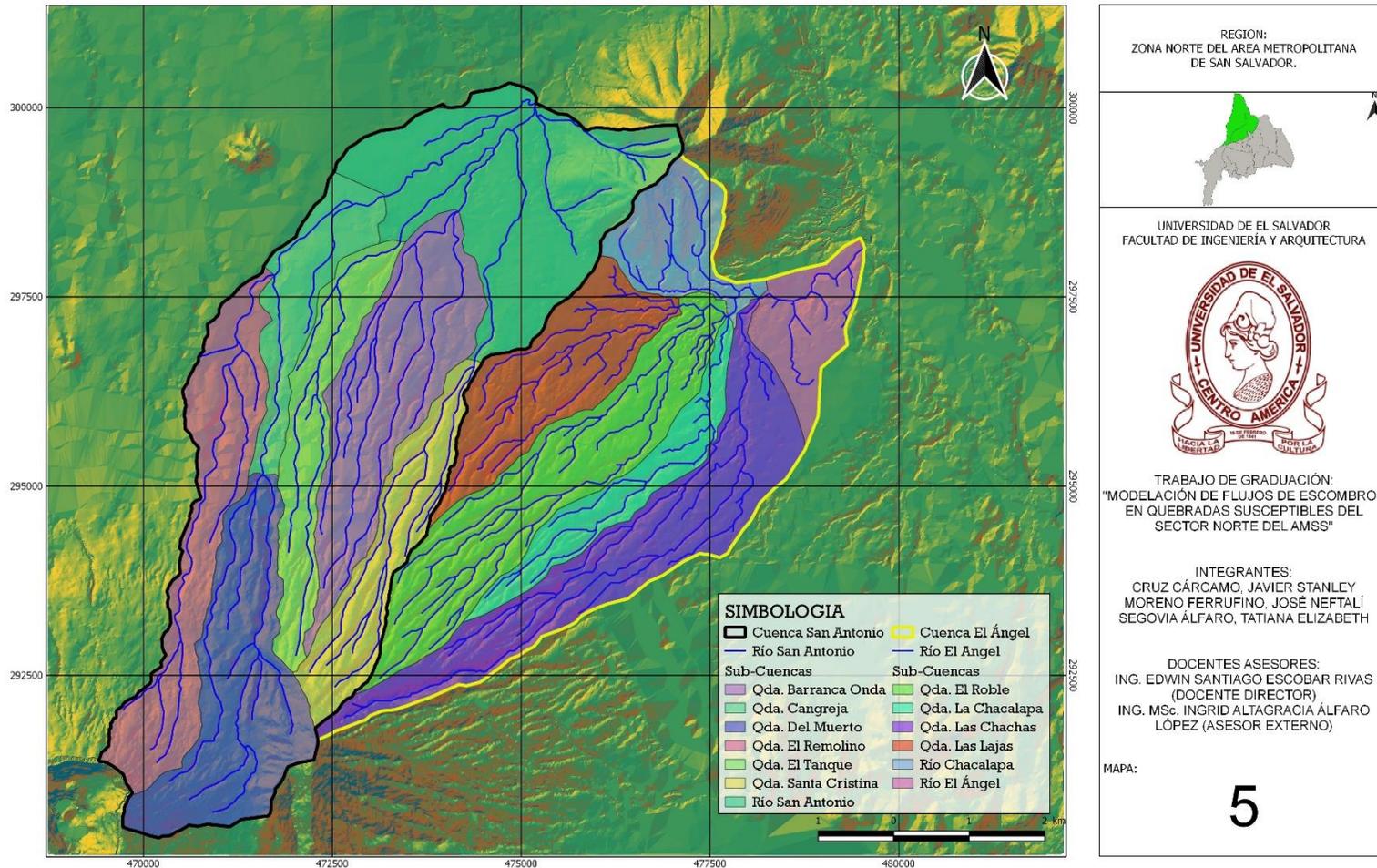
MAPA 4 Delimitación de cuencas [Fuente: Elaboración propia con curvas de nivel a cada 5 m en software QGIS].

Teniendo el parteaguas de las cuencas de estudio, se delimito el parteaguas de las subcuencas de cada una de las cuencas basándose en la topografía presente en ellas. El parteaguas de las subcuencas se realizó en el software Qgis. En la Tabla 3.2-1 se tiene el nombre y áreas de las subcuencas. Hay 7 subcuencas para el rio San Antonio y 6 subcuencas para el rio El Ángel.

CUENCA SAN ANTONIO			
Sub-cuencas	Perímetro (km)	Área(km²)	Porcentaje
Quebrada El Molino	16.65	4.68	14.26%
Quebrada El Tanque	13.16	3.18	9.69%
Quebrada Del Muerto	13.35	5.72	17.43%
Q. De Santa Cristina	11.68	3.19	9.72%
Q. Barranca Onda	12.99	5.28	16.09%
Quebrada Cangreja	10.13	2.54	7.74%
Rio San Antonio	14.78	8.23	25.08%
Total		32.82	100.00%
CUENCA EL ÁNGEL			
Sub-cuencas	Perímetro (km)	Área(km²)	Porcentaje
Quebrada Las Lajas	10.95	4.02	17.57%
Quebrada El Nance	19.11	6.30	27.42%
Quebrada La Chacalapa	11.6	2.31	10.07%
Quebrada El Roble	15.6	6.06	26.42%
Rio Chacalapa	7.77	2.25	9.81%
Rio El Ángel	7	2	8.72%
Total		22.94	100.00%

Tabla 3.2-1 Nombre de las sub-cuencas de estudio [Fuente: Elaboración propia].

SUB-CUENCAS DE LA ZONA EN ESTUDIO



MAPA 5 Sub-cuencas de las cuencas en estudio [Fuente: Elaboración propia en software QGIS].

3.2.4 División Política-Administrativa

Los Municipios de Apopa y Nejapa, pertenecen al distrito de Tonacatepeque y al Departamento de San Salvador y forma parte del área geográfica y administrativa del AMSS (Área Metropolitana de San Salvador).

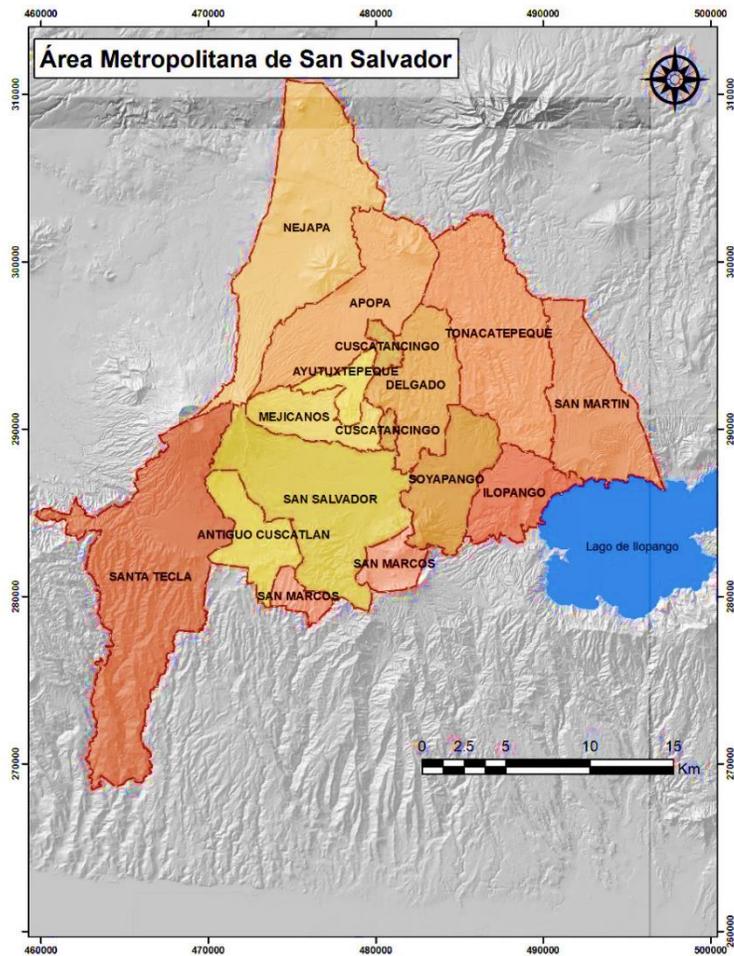


FIGURA 3-13 Área Metropolitana de San salvador [Fuente: Geoportal OPAMSS].

Un aspecto relevante de estos Municipios está dado por su posición geográfica, que es la pertenencia al AMSS. Un territorio integrado por 14 municipios, pero

que es considerado una sola unidad urbanística y que posee su propia unidad de planificación. También, este territorio alberga la principal infraestructura y oferta de servicios: educativos, financieros, logísticos, de salud, de desarrollo empresarial y para el comercio; lo que constituye una ventaja comparativa que no poseen otros municipios.

- **NEJAPA**

Está limitado por los siguientes municipios: al norte, por Quezaltepeque (departamento de La Libertad) y Aguilares; al este, por Guazapa y Apopa; al sur, por San Salvador y Nueva San Salvador (departamento de La Libertad); y al oeste, por Quezaltepeque (departamento de La Libertad). Se encuentra entre las coordenadas geográficas: 13° 55' 09" LN (extremo septentrional) y 13° 44' 23" LN (extremo meridional); 89° 10' 47" LWG (extremo oriental) y 89° 16' 50" LWG (extremo occidental)

Su área es de 83.4 kilómetros cuadrados, lo que representa el 9.4 por ciento del área total del departamento; se encuentra a 18 kilómetros al norte de la ciudad capital, posee 8 cantones y un área urbana. La cabecera municipal está situada a 450 msnm.

- **DIVISIÓN ADMINISTRATIVA**

En términos administrativos, el territorio municipal de Nejapa se encuentra dividido de la siguiente forma: el área rural está conformada por 8 cantones: Aldea Las Mercedes, Bonete. Camotepeque, Conacaste, El Salitre, Galera Quemada, San Jerónimo Los Planes y Tutultepeque. Mientras que el área urbana está

compuesta por 4 barrios principales: El Calvario, Concepción, San Antonio y El Rosario. Y además cuenta con 38 caseríos, tal como se presenta en el Figura 3-14.

División Administrativa del Municipio de Nejapa, Departamento de San Salvador, El Salvador.

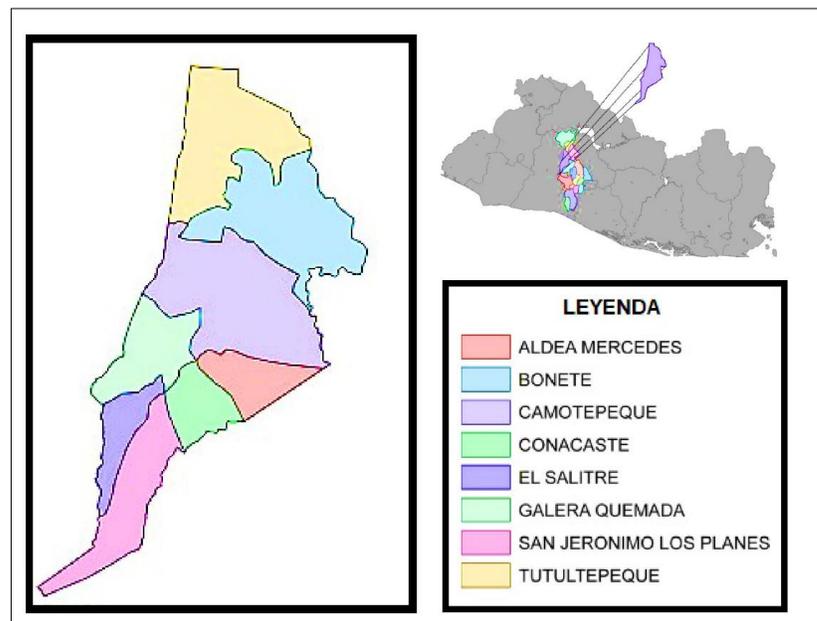


FIGURA 3-14 División administrativa del municipio de Nejapa [Fuente: GIS-SACDEL 2012].

DIVISIÓN ADMINISTRATIVA DEL MUNICIPIO DE NEJAPA	
Zona urbana	
Barrios Casco Urbano	1.El Calvario 2.Concepción 3.San Antonio 4.El Rosario
Zona rural	
Cantones	1.Aldea Las Mercedes 2.Bonete 3.Camotepeque 4.Conacaste 5.El Salitre 6.Galera Quemada 7.San Jerónimo Los Planes 8.Tutultepeque

Tabla 3.2-2 División administrativa del municipio de Nejapa [Fuente: PNUD, 2009, Estado del Desarrollo Humano en los Municipio de El Salvador].

RECURSOS NATURALES

a) Climatología

En la mayor parte del municipio, el clima es cálido, presentando una temperatura agradable en el sector sur; pertenece al tipo de tierra caliente y tierra templada. El monto pluvial anual en Nejapa oscila entre 1,800 y 2,000 milímetros.

b) Recursos hídricos

Riegan el municipio los ríos: San Antonio y Acelhuate; las quebradas: Los Limones, La Calera, Honda, El Rasaría, Los Chinitos, El Coyol, Las Garzas, El Puerto, Los Amates, Las Conchas, Majada y Agua Tibia.

c) Suelo

Los tipos de suelo que predominan en el municipio son: i) Andosoles y Regosoles, los cuales comprenden áreas onduladas y alomadas; ii) Regosoles, Latosoles Arcillo Rojizos y Andosoles, los cuales comprenden áreas de lomas y montañas del cinturón volcánico; iii) Latosoles Arcillo Rojizos y Litosoles, los cuales comprenden áreas alomadas diseccionadas y de pedregosidad variable; iv) Litosoles y Regosoles, los cuales comprenden áreas de lomas y montañas muy accidentadas.

d) Orografía

El relieve del municipio comprende los cerros: Redondo o Tutultepeque, Ojo de Agua, Nejapa, La Tabla, El Jute y Picudo; la loma El Cerrito y el volcán San Salvador o Quezaltepec.

• APOPA

Está limitado por los siguientes municipios: al norte, por Nejapa y Guazapa; al este, por Tonacatepeque, Ciudad Delgado y Cuscatancingo; al sur, por Ayutuxtepeque y Mejicanos; al oeste, por Nejapa. Se encuentra ubicado entre las coordenadas geográficas siguientes: " 13°51' 05" LN (extremo septentrional) y 13°45' 10" LN (extremo meridional); 89° 09' 00" LWG (extremo oriental) y 89° 15' 10" LWG (extremo occidental). Cuenta con una extensión territorial es de 51.84 km² y se encuentra en la zona geográfica central del país, a una altitud de 500 msnm.

Según el registro de octubre de 2,015, se estima que el Municipio de Apopa posee 131,286 habitantes y una densidad poblacional de 2,472 habitantes por km², posicionándose en el puesto 10° de 262 en el ranking de los municipios de mayor a menor población en el país.

DIVISIÓN ADMINISTRATIVA

En términos administrativos, el territorio municipal de Apopa se encuentra dividido de la siguiente forma: el área rural está conformada por 8 cantones y 41 caseríos, los cantones son: El Ángel, Guadalupe, Joya Galana, Joya Grande, Las Delicias, San Nicolás, Suchinango y Tres Ceibas. Mientras que el área urbana está compuesta por 4 barrios principales: San Sebastián, El Tránsito, El Perdido y El Calvario.

En la actualidad, a estos barrios se añaden numerosas y muy pobladas colonias y urbanizaciones por Ej.: Popotlán, Valle del Sol, Las Flores, La Chintúc, El Tikal entre otras. (Alcaldía Municipal de Apopa, 2011).

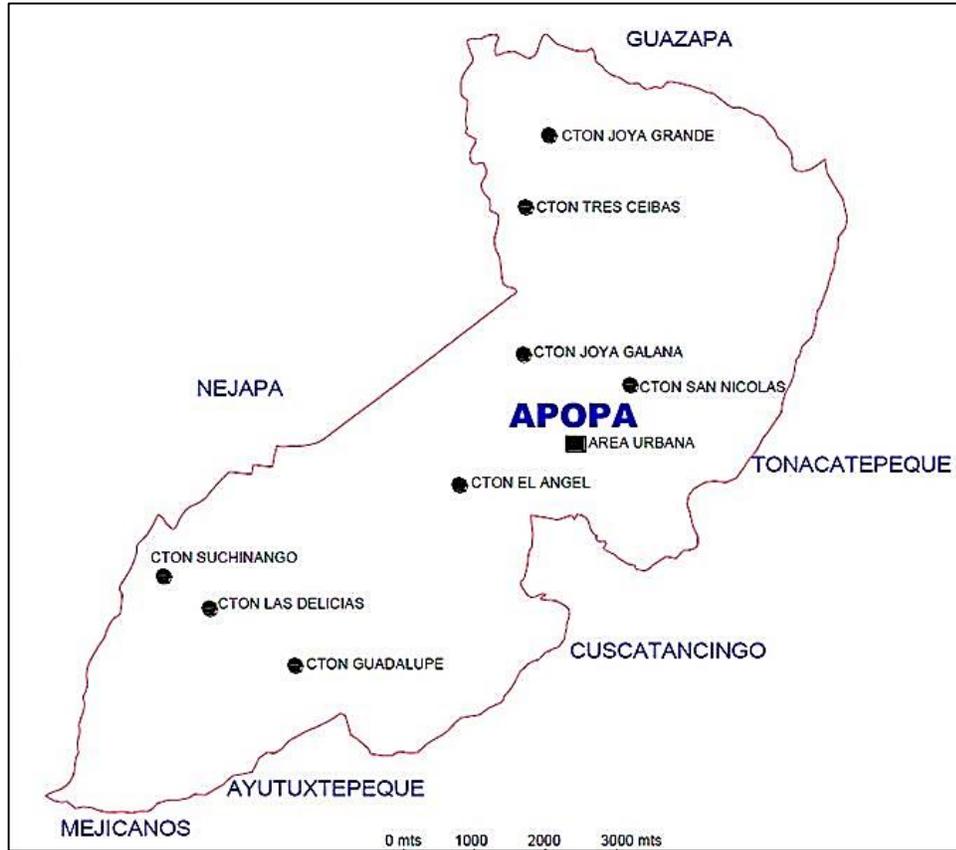


FIGURA 3-15 División administrativa del municipio de Apopa [Fuente: Alcaldía Municipal de Apopa, 2011].

DIVISIÓN ADMINISTRATIVA DE APOPA	
Zona urbana	
Barrios Casco Urbano	<ol style="list-style-type: none"> 1. San Sebastián 2. El Tránsito 3. El Perdido 4. El Calvario.
Zona rural	
Cantones	<ol style="list-style-type: none"> 1. El Ángel 2. Guadalupe 3. Joya Galana 4. Joya Grande 5. Las Delicias 6. San Nicolás 7. Suchinango 8. Tres Ceibas.

Tabla 3.2-3: División administrativa del municipio de Apopa [Fuente: Alcaldía Municipal de Apopa, 2011]

RECURSOS NATURALES

a) Climatología

El Municipio de Apopa posee un clima cálido, pertenece al tipo de tierra caliente y tierra templada. Las temperaturas promedio oscilan entre una mínima de 18° C y una máxima de 35° C. El monto pluvial anual oscila entre 1,800y 2,000 milímetros; en un clima que se divide en dos estaciones: invierno y verano.

b) Recursos hídricos

Riegan el Municipio los ríos: Las Cañas, Acelhuate, Tomayate, El Ángel y Guaycume (FISDL, 2012). Tres de estos ríos: Las Cañas, Tomayate y Acelhuate presentan altos niveles de contaminación, pues en ellos desembocan gran parte de las aguas negras del AMSS. Por otro lado, Apopa posee la fortaleza de ser parte de la zona de recarga acuífera que de sur a norte se forma desde el Volcán de San Salvador y Volcán de Apopa y Nejapa, convirtiéndose en una de las más importantes zonas de almacenamiento de agua.

c) Suelo

Los diferentes tipos de suelos que se encuentran son: i) Andosoles y Regosoles, en terrenos ondulados, a alomados, ii) Regosoles, Latosoles Arcillo Rojizos y Andosoles, en terrenos alomados, a montañosos accidentados, iii) Regosoles y Latosoles, con tobas consolidadas en terrenos ondulados, a fuertemente alomados, iv) Latosoles Arcillo Rojizos y Litosoles, en terrenos pedregosos superficiales, de ondulados, a montañosos muy accidentados. FISDL (2012).

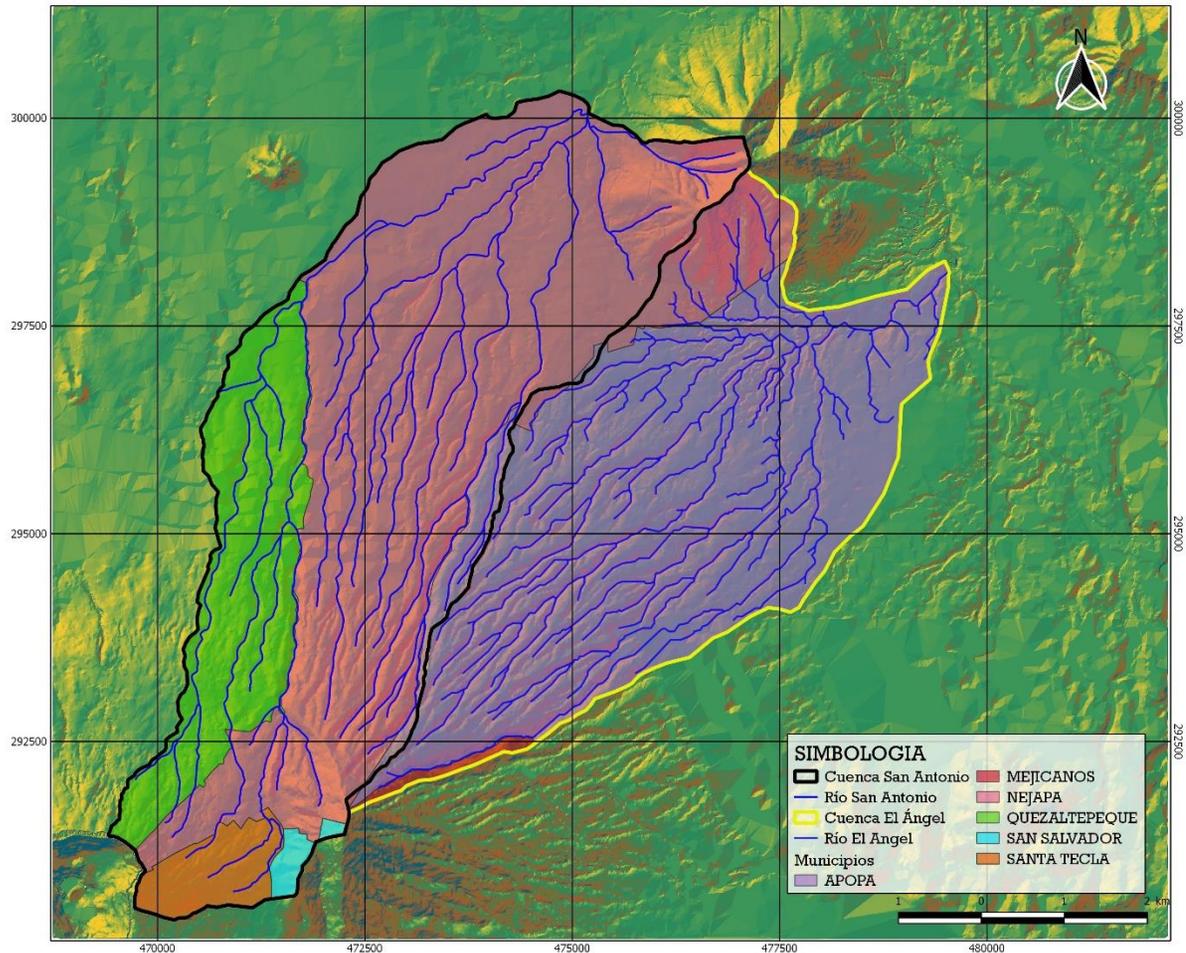
Los tipos de suelos que existen en el Municipio; son suelos jóvenes y poco evolucionados. De corteza delgada, una parte de ellos está conformada por materia basáltica, lavas y materiales piroclásticos, especialmente en la parte sur, que representa un escenario de alta peligrosidad geológica, por una eventual erupción volcánica, así como por deslizamientos o inundaciones en las partes bajas de la cuenca.

3.2.5 División política-administrativa del área de estudio

Las dos cuencas a analizar (Río El Ángel y el Río San Antonio) forman parte de la cuenca del río Acelhuate. Están ubicada entre las coordenadas 469,000 – 480,000 de longitud Este y 289,000 – 301,000 de latitud Norte, referenciadas a la proyección Cónica Conformal de Lambert, Datum Norteamericano de 1,927. Administrativamente, esta ubicada entre los departamentos de San Salvador y La Libertad, entre la Hoja Cartografica 2357 II SW-San Salvador y la Hoja Cartografica 2357 III SE-Nueva San Salvador de la cartografía nacional.

El mapa 6 muestra con detalles los municipios de las cuencas. La tabla 3.2-4 y tabla 3.2-5 muestran la distribución política-administrativa de las cuencas, donde esta detallada tanto municipal como departamentalmente.

DIVISION POLÍTICA ADMINISTRATIVA DE LA ZONA EN ESTUDIO



SIMBOLOGIA

Cuenca San Antonio	MEJICANOS
Río San Antonio	NEJAPA
Cuenca El Ángel	QUEZALTEPEQUE
Río El Ángel	SAN SALVADOR
Municipios	SANTA TECLÁ
APOPA	

REGION:
ZONA NORTE DEL AREA METROPOLITANA
DE SAN SALVADOR.

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

TRABAJO DE GRADUACIÓN:
"MODELACIÓN DE FLUJOS DE ESCOMBROS
EN QUEBRADAS SUSCEPTIBLES DEL
SECTOR NORTE DEL AMSS"

INTEGRANTES:
CRUZ CÁRCAMO, JAVIER STANLEY
MORENO FERRUFINO, JOSÉ NEFTALÍ
SEGOVIA ÁLFARO, TATIANA ELIZABETH

DOCENTES ASESORES:
ING. EDWIN SANTIAGO ESCOBAR RIVAS
(DOCENTE DIRECTOR)
ING. MSc. INGRID ALTAGRACIA ÁLFARO
LÓPEZ (ASESOR EXTERNO)

MAPA:

6

MAPA 6 División política-administrativa del área de estudio [Fuente: Elaboración propia en software Qgis].

Áreas municipales en zona de estudio de cuenca San Antonio						
Departamento	Municipio	Zona	Área (km ²)	Área (%)	Área depa.	Área depa. (%)
San Salvador	San Salvador	AMSS	0.34	1.04%	24.69	75.21%
	Mejicanos	AMSS	0.00	0.00%		
	Apopa	AMSS	1.06	3.23%		
	Nejapa	AMSS	23.29	70.94%		
La Libertad	Santa Tecla	AMSS	1.44	4.39%	8.14	24.79%
	Quezaltepeque	central	6.70	20.41%		
Total			32.83	100.00%	32.83	100.00%

Tabla 3.2-4 Municipios en cuenca San Antonio [Fuente: Elaboración propia].

Áreas municipales en zona de estudio de cuenca El Ángel						
Departamento	Municipio	Zona	Área (km ²)	Área (%)	Área depa.	Área depa. (%)
San Salvador	Mejicanos	AMSS	0.29	1.26%	22.94	100.00%
	Apopa	AMSS	20.53	89.49%		
	Nejapa	AMSS	2.12	9.24%		
Total			22.94	100.00%	22.94	100.00%

Tabla 3.2-5 Municipios en cuenca El Ángel [Fuente: Elaboración propia].

La Tabla 3.2-6 muestra los ríos y quebradas que se encuentran dentro de cada subcuenca, sin embargo, cabe resaltar que podrían existir vaguadas o quebradas de invierno que no se ven reflejadas en las tablas, por la escala de los planos:

Cuenca San Antonio		Cuenca El Ángel	
Rio:		Rios:	
<ul style="list-style-type: none"> • San Antonio 		<ul style="list-style-type: none"> • El Ángel • Chacalapa 	
Quebradas:		Quebradas:	
1. El Remolino.	11. El Paterno.	1. Las Lajas.	9. Seca.
2. La Mecasala.	12. El Mora.	2. El Roble.	10. Crucitas.
3. Los Pocitos.	13. Agua Zarca.	3. Chacalapa.	11. Jocoton.
4. El Tanque.	14. El Guayabo.	4. El Nance.	12. Las chachas.
5. Cangrejera O El Sitio.	15. Las Lajas.	5. El Laurel.	13. Las peñas.
6. Santa Cristina.	16. Barranca Honda.	6. El Talpetate.	14. El paterno.
7. La Quebradona.	17. Maestro.	7. El izcanal.	15. Puente oscuro.
8. Del Muerto.	18. El Zapote.	8. La periquera.	16. El salamo.
9. Los Planes.	19. San Antonio.		17. Mijango.
10. El Aguaton.	20. El Terraplen.		18. Suchinango.
	21. Los Avalos.		

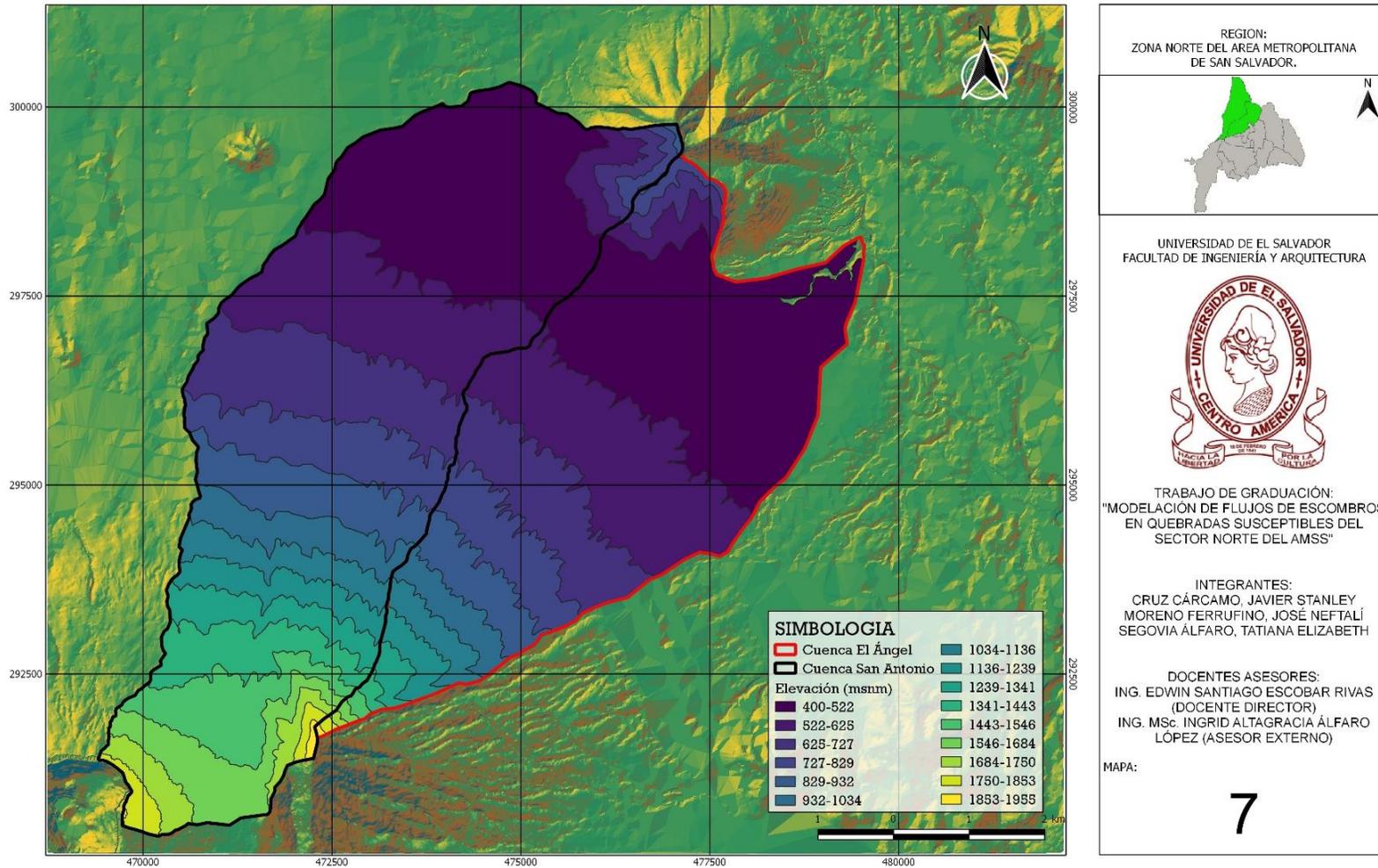
Tabla 3.2-6 Quebradas en el área de estudio [Fuente: Elaboración propia].

3.2.6 Hipsometría de las Cuencas en Estudio

Una vez teniendo la topografía y su parteaguas, de igual forma es importante la realización de un mapa hipsométrico, para conocer sus relieves, además de los rangos de elevaciones, los cuales se calculan en el software Qgis.

En el Mapa 7, se presenta el mapa hipsométrico de las cuencas San Antonio y El Ángel, este muestra una presentación de la distribución de elevaciones con respecto al nivel del mar.

HIPSOMETRÍA DE LAS CUENCAS EN ESTUDIO



REGION:
ZONA NORTE DEL AREA METROPOLITANA
DE SAN SALVADOR.

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

TRABAJO DE GRADUACIÓN:
"MODELACIÓN DE FLUJOS DE ESCOMBROS
EN QUEBRADAS SUSCEPTIBLES DEL
SECTOR NORTE DEL AMSS"

INTEGRANTES:
CRUZ CÁRCAMO, JAVIER STANLEY
MORENO FERRUFINO, JOSÉ NEFTALÍ
SEGOVIA ÁLFARO, TATIANA ELIZABETH

DOCENTES ASESORES:
ING. EDWIN SANTIAGO ESCOBAR RIVAS
(DOCENTE DIRECTOR)
ING. MSc. INGRID ALTAGRACIA ÁLFARO
LÓPEZ (ASESOR EXTERNO)

MAPA:
7

MAPA 7 Mapa hipsométrico de las cuencas [Fuente: Elaboración propia en software Qgis].

3.2.7 Geología

Los elementos estratigráficos predominantes en el área de estudio pertenecen a la *Formación San Salvador* compuesta por productos extrusivos del Volcán de San Salvador, tales como: corrientes de lava, cúpulas de lava, tobas, pómez, escoria y cenizas volcánicas. Frecuentemente se encuentran suelos enterrados de coloraciones oscuras¹⁵.

En segundo lugar, están los de la *Formación Bálsamo* con abundancia de aglomerados con intercalaciones de tobas volcánicas bien consolidadas o endurecidas y corrientes de lava basáltica-andesítica. Pueden presentarse suelos rojizos enterrados de textura arcillosa hasta de 20 metros de profundidad. Se encuentran, además, rocas extrusivas con pocas intercalaciones de tobas volcánicas y aglomerados.

En la Tabla 3.2-7 de cronoestratigrafía muestra la descripción de cada era, periodo y época que se están presentes en las cuencas de estudio.

¹⁵ *Escenario de Riesgo: Amenazas por inundación Cuenca alta del río Acelhuate, MARN, Pág. 22, 2012.*

Aprox. años	TABLA ERA CENOZOICA	
65.000.000	TERCIARIO: Diversificación de aves y mamíferos. Predominio de los mamíferos. Surge una nueva escala evolutiva: Primates, Antropoides, Homínidos y Homo	PALEOCENO: Glaciación, enfriamiento global del planeta. Las angiospermas comienzan a dominar el hábitat. Tras la desaparición de los dinosaurios las aves y mamíferos dominan la tierra.
56.500.000		EOCENO: Primeros mamíferos adaptados al mar. Nacen los primates.
35.400.000		OLIGOCENO: Praderas, bosques y sabanas. Aparición de los herbívoros y diversificación de los mamíferos.
23.300.000		MIOCENO: Aparecen los antropoides.
5.200.000		PLIOCENO: Nacen los homínidos, antepasados directos del Homo sapiens.
2.500.000	EÓN AURIM NACE EL HOMO HABILIS La evolución basada en la inteligencia y en las cualidades espirituales	
2.000.000-1.600.000	CUATERNARIO: Evolución del género Homo hasta el H. Sapiens Sapiens.	PLEISTOCENO: Glaciaciones. Evolución del Homo Habilis. Comienza la evolución cultural. Nacimiento del Homo sapiens sapiens.
10.000		HOLOCENO: Época postglacial. Civilización

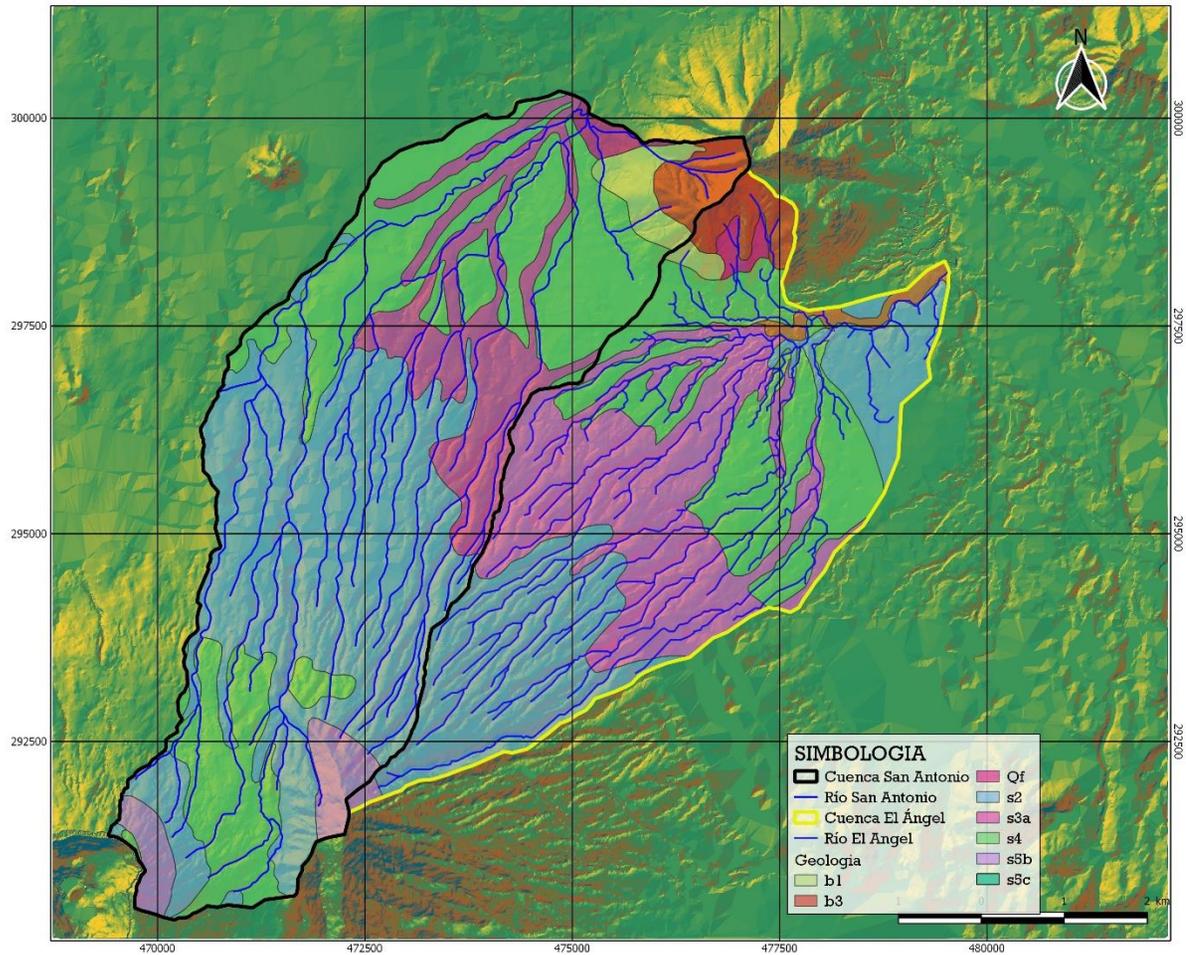
Tabla 3.2-7 Cronoestratigrafía. [Fuente: Comisión Internacional de Estratigrafía v2015/01]

La litología encontrada en la zona de estudio (Tabla 3.2-8), donde se tienen las características de las rocas que constituyen la formación San Salvador y Bálsamo es la siguiente:

Formación	Litología	Cód. Mapa
Bálsamo	Efusivas Básicas-Intermedias.	b3
	Epiclásticas Volcánicas y Piroplastitas; Localmente Efusivas Básicas-Intermedias Intercaladas.	b1
Cuscatlán	Piroplásticas Acidas, Epiplásticas Volcánicas.	c1
San Salvador	Deposito Sedimentario del Cuaternario.	Qf
	Conos de Acumulación (Escorias, Tobas de Lapilli, Ciner).	s5b
	Efusivas Básicas-Intermedias, Piroclastitas Subordinadas.	s2
	Tierra Blanca.	s4
	Ceniza Volcánica y Tobas De La Pilli.	s5c
	Piroclastitas Acidas, Epiclásticas Volcánicas (Tobas Café).	sa3

Tabla 3.2-8 Información geológica presente en las cuencas [Fuente: Elaboración propia].

GEOLOGÍA DE LA ZONA EN ESTUDIO



REGION:
ZONA NORTE DEL AREA METROPOLITANA
DE SAN SALVADOR.

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

TRABAJO DE GRADUACIÓN:
"MODELACIÓN DE FLUJOS DE ESCOMBROS
EN QUEBRADAS SUSCEPTIBLES DEL
SECTOR NORTE DEL AMSS"

INTEGRANTES:
CRUZ CÁRCAMO, JAVIER STANLEY
MORENO FERRUFINO, JOSÉ NEFTALÍ
SEGOVIA ÁLFARO, TATIANA ELIZABETH

DOCENTES ASESORES:
ING. EDWIN SANTIAGO ESCOBAR RIVAS
(DOCENTE DIRECTOR)
ING. MSc. INGRID ALTAGRACIA ÁLFARO
LÓPEZ (ASESOR EXTERNO)

MAPA:

8

MAPA 8 Geología de la zona de estudio [Fuente: Elaboración propia en software Qgis].

3.2.8 Tipo De Suelos

Existen diversos sistemas de clasificación de suelos. La acción conjunta de los factores que condicionan la formación y evolución del suelo conduce al desarrollo de diferentes perfiles o tipos de suelos. La clasificación de los mismos puede basarse en diferentes criterios. Entre otros, podemos mencionar:

Características intrínsecas del suelo, dependientes de los procesos genéticos que los desarrollan; propiedades del suelo como permeabilidad, salinidad, composición y que se relacionan estrechamente con los factores de formación, según su aptitud para diferentes usos, fundamentalmente agrícolas.

Los tipos presentes en la zona de interés son los siguientes:

Andisoles: suelos originados de cenizas volcánicas, de distintas épocas y en distintas partes del país, tienen por lo general un horizonte superficial entre 20 y 40 centímetros de espesor, textura franca y estructura granular.

Por la coloración de sus materiales, son conocidos como “Tierra Blanca”. Tienen una densidad relativa menor de 0.85 gramos/cm³.

Entre las propiedades más características de estos suelos destaca su densidad aparente baja, su permeabilidad y porosidad muy elevada, y su estructura típica en agregados finos de tamaño limo. El suelo es pegajoso al tacto cuando está húmedo y pulverulento en seco. Por último, son suelos fácilmente erosionables

por lo que son necesarias prácticas continuas de conservación para el mantenimiento de su capacidad productiva.

Latosoles arcillo-rojizo: suelos arcillosos bien desarrollados con estructura en forma de bloques con un color generalmente rojo, aunque, dependiendo del grado de oxidación y de la presencia de minerales de hierro de distintos tipos, algunas veces se encuentran amarillentos o cafés. La textura superficial es franco arcilloso y el subsuelo arcilloso. La fertilidad puede ser alta en terrenos protegidos por su cobertura vegetal pudiéndose utilizar maquinaria agrícola cuando la pendiente es moderada. Son suelos aptos para casi todos los cultivos.

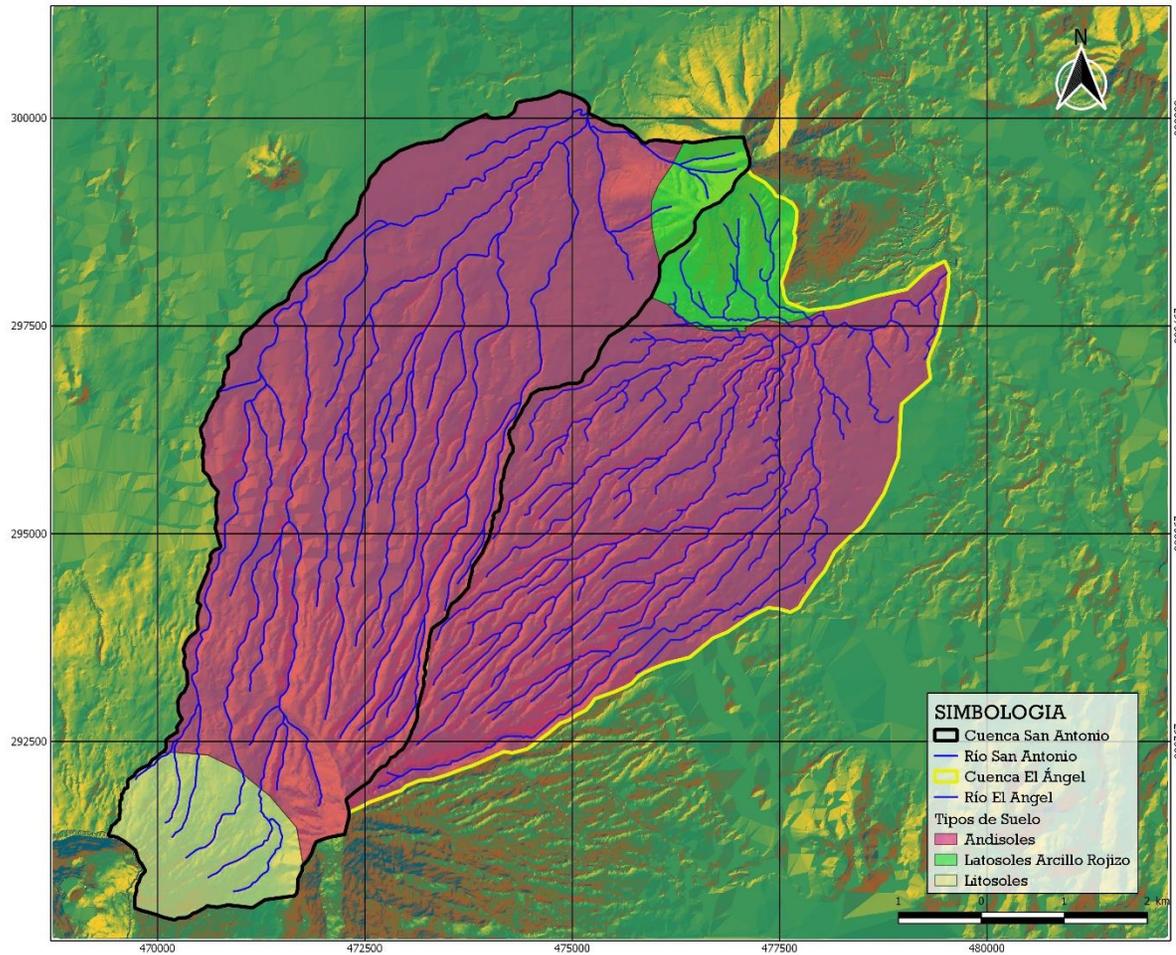
Litosoles: suelos de muy poca profundidad sobre roca pura. La mayoría son suelos cuyos horizontes superficiales han sido truncados a causa de una severa erosión laminar o sea que la erosión ocurre en láminas y no en forma de cárcavas. Son suelos arcillosos como los latosoles, pero muy superficiales. Este tipo de suelo es el que más requiere de medidas de conservación. Los cultivos se adecuan en áreas de menor pendiente siempre que se adopten medidas de conservación, en las zonas de pendientes altas se adecuan los forestales y pastizales. Se considera un suelo estable pero pobre en nutrientes que mejora mucho con la incorporación de materia orgánica, nitrógeno y humus a los cultivos.

El Mapa 9 muestra la clasificación del tipo de suelo para las cuencas de los ríos San Antonio y El Ángel. La tabla 3.2-9 muestra la distribución de áreas del tipo de suelo dentro de las cuencas.

CUENCA EL ANGEL		
Tipo de suelo	Área (km²)	Porcentaje
Latosoles Arcillo Rojizo.	2.25	9.80%
Andisoles	20.70	90.20%
Total	22.94	100%
CUENCA SAN ANTONIO		
Tipo de suelo	Área (km²)	Porcentaje
Latosoles Arcillo Rojizo	0.97	2.98%
Andisoles	28.14	86.74%
Litosoles	3.33	10.28%
Total	32.44	100%

Tabla 3.2-9 Distribución de la clasificación pedológica del área de estudio [Fuente: Elaboración propia].

TIPOS DE SUELOS EN LA ZONA EN ESTUDIO



REGION:
ZONA NORTE DEL AREA METROPOLITANA
DE SAN SALVADOR.

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

TRABAJO DE GRADUACIÓN:
"MODELACIÓN DE FLUJOS DE ESCOMBROS
EN QUEBRADAS SUSCEPTIBLES DEL
SECTOR NORTE DEL AMSS"

INTEGRANTES:
CRUZ CÁRCAMO, JAVIER STANLEY
MORENO FERRUFINO, JOSÉ NEFTALÍ
SEGOVIA ÁLFARO, TATIANA ELIZABETH

DOCENTES ASESORES:
ING. EDWIN SANTIAGO ESCOBAR RIVAS
(DOCENTE DIRECTOR)
ING. MSc. INGRID ALTAGRACIA ÁLFARO
LÓPEZ (ASESOR EXTERNO)

MAPA:

9

MAPA 9 Tipos de Suelos [Fuente: Elaboración propia en software QGIS].

3.2.9 Uso de Suelos

Para el presente estudio se tiene la cobertura de usos de suelos que hay en las cuencas del Río San Antonio y El ángel. La cobertura de suelos se extrajo del mapa creado por el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG). También se consideró las zonas urbanas en el mapa de usos de suelo creada y proporcionada por la OPAMSS ya que cuenta con una red actualizada donde hay zonas de posible urbanización o ya están urbanizadas.

En la Tabla 3.2-10 se describen las categorías encontradas en la zona de estudio y en la Tabla 3.2-11 se describe el porcentaje de áreas que corresponde a cada uso de suelos en cada una de las cuencas de estudio.

Tipo de suelo	Descripción
Suelo Urbano	Se asigna suelo urbano cuando las estructuras urbanas y redes de transporte ocupan más del 80% de la superficie total.
Suelo Urbanizable	La mayor parte de la tierra está cubierta por estructuras, edificaciones, carreteras y superficies asociadas a la vegetación y suelo desnudo, que ocupan superficies discontinuas pero significativas. Entre 30 al 80 % de la superficie total debe ser impermeable.
Bosques Siempre Verdes	Especies forestales que no botan las hojas en la época seca. Están ubicados en las proximidades del cráter del Volcán de San Salvador y las laderas de El Picacho.
Café	pueden ser calificado como bosques estratificados o sea que tiene varios niveles de cobertura vegetal.
Granos Básicos	Maíz, maicillo, frijol principalmente.
Caña De Azúcar	esta vegetación se cultiva en la zona oeste del cerro de Nejapa.

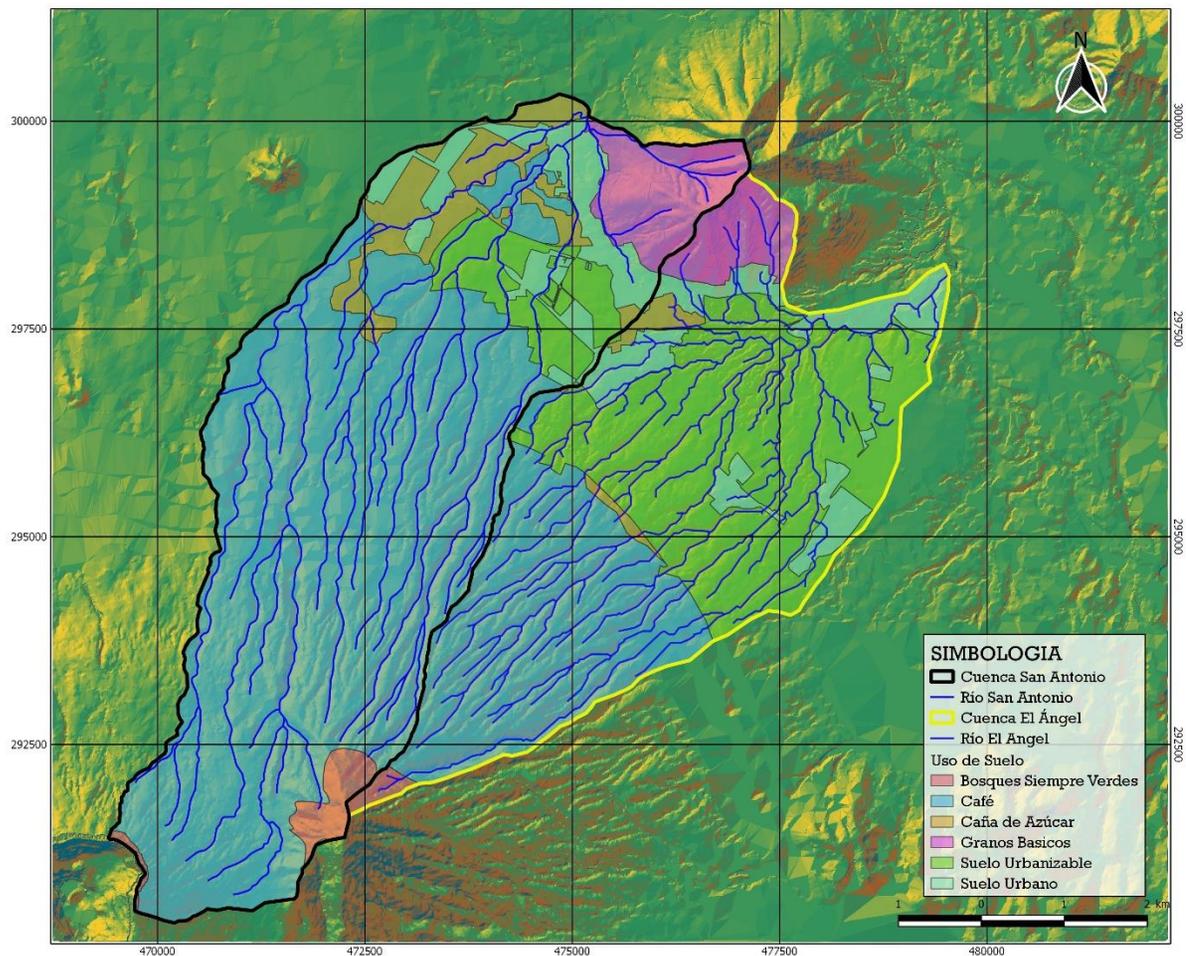
Tabla 3.2-10 Descripción de las categorías de usos de suelos. [Fuente: Escenario de riesgo, Amenazas por inundación Cuenca alta del río Acelhuate, MARN, 2012].

Uso del suelo	CUENCA EL ÁNGEL		CUENCA SAN ANTONIO	
	Área (km ²)	Porcentaje	Área (km ²)	Porcentaje
Suelo Urbano	2.62	11.43%	2.27	7.01%
Suelo Urbanizable	10.40	45.31%	2.02	6.23%
Bosques Siempre Verdes	0.21	0.90%	0.71	2.20%
Café	8.04	35.05%	23.18	71.48%
Granos Básicos	1.27	5.53%	2.03	6.25%
Caña de Azúcar	0.41	1.79%	2.22	6.84%
Total	22.94	100.00%	32.44	100.00%

Tabla 3.2-11 Uso de suelos [Fuente: Elaboración propia, basada en información de OPAMSS].

En el Mapa 10 se puede observar la distribución de usos de suelos y la extensión del área utilizada para tejido urbano.

USOS DE SUELOS EN LA ZONA EN ESTUDIO



SIMBOLOGÍA

- Cuenca San Antonio
- Río San Antonio
- Cuenca El Ángel
- Río El Ángel

Uso de Suelo

- Bosques Siempre Verdes
- Café
- Caña de Azúcar
- Granos Básicos
- Suelo Urbanizable
- Suelo Urbano

REGION:
ZONA NORTE DEL AREA METROPOLITANA
DE SAN SALVADOR.

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

TRABAJO DE GRADUACIÓN:
"MODELACIÓN DE FLUJOS DE ESCOMBROS
EN QUEBRADAS SUSCEPTIBLES DEL
SECTOR NORTE DEL AMSS"

INTEGRANTES:
CRUZ CÁRCAMO, JAVIER STANLEY
MORENO FERRUFINO, JOSÉ NEFTALÍ
SEGOVIA ÁLFARO, TATIANA ELIZABETH

DOCENTES ASESORES:
ING. EDWIN SANTIAGO ESCOBAR RIVAS
(DOCENTE DIRECTOR)
ING. MSc. INGRID ALTAGRACIA ÁLFARO
LÓPEZ (ASESOR EXTERNO)

MAPA:
10

MAPA 10 Uso de Suelos [Fuente: Elaboración propia en software Qgis con datos proporcionados por la OPAMSS].

3.2.10 Características Morfométrica de las Cuencas de Estudio.

a) Morfometría de Cuencas Hidrográficas

Las características físicas de una cuenca tienen una relación estrecha con el comportamiento de los caudales que transitan por ella. Los parámetros Morfométricos de una cuenca integran un conjunto de estimaciones realizadas, en la mayoría de los casos, al iniciar un estudio hidrológico, con fines de aprovechamiento o control. Gaspari (2012).

El análisis morfométrico es el estudio de un conjunto de variables lineales, de superficie, de relieve y drenaje; que permite conocer las características físicas de una cuenca, lo cual permite realizar comparaciones entre varias cuencas, así como ayudar a la interpretación de la funcionalidad hidrológica y en la definición de las estrategias para la formulación de su manejo. La morfometría de cuencas es el primer paso para determinar el comportamiento hidrológico de la misma ante eventos climatológicos.

El análisis de las características morfológicas y funcionales de las cuencas El Ángel y San Antonio, se basa en establecer y analizar los parámetros morfométricos de forma, de relieve y relativos a la red drenaje hidrográfica, mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) con el software Qgis y hojas de cálculo.

b) Parámetros Asociados a la Forma de la Cuenca

La forma de la cuenca es un aspecto importante en las características del hidrograma de descarga para una corriente, particularmente en los eventos de avenidas máximas. La forma de la cuenca condiciona la velocidad del escurrimiento superficial.

La medición de los factores de forma de una cuenca se realiza por medio de una metodología que permite cubrir dos objetivos:

1. Permite comparar la forma de la cuenca con figuras geométricas conocidas.
2. Permite comparar los resultados de las mediciones, los cuales son adimensionales, con los obtenidos en otras cuencas en las que se puede tener mayor información histórica de su comportamiento hidrológico.

Los parámetros geométricos o características morfológicas generales de las subcuencas hidrográficas en estudio a determinar son:

- Área de la cuenca.
- Perímetro de la cuenca.
- Longitud del cauce principal
- Pendiente media de la cuenca y del cauce principal
- Desnivel promedio de la cuenca (Diferencia entre cota mínima y máxima)
- Cotas máximas y mínimas de la cuenca y del cauce.

- **Área de la cuenca (Ac)**

Está definida como la proyección horizontal de toda la superficie de drenaje de un sistema de escorrentía dirigido de forma directa o indirectamente a un mismo cauce natural. Corresponde a la superficie delimitada por la divisoria de aguas de la zona de estudio; este parámetro se expresa normalmente en km^2 .

- **Perímetro de la cuenca (Pc)**

Es la longitud sobre un plano horizontal, que recorre el Parteaguas. Este parámetro se mide en unidades de longitud y se expresa normalmente en metros o kilómetros.

- **Longitud del cauce principal (Lc)**

El río o cauce principal suele ser definido como el curso con mayor caudal de agua (medio o máximo) o bien con mayor longitud o mayor área de drenaje. Normalmente su longitud en planta se expresa en metros o kilómetros.

- **Ancho de la cuenca (B)**

Se define como la relación entre el área y la longitud axial de la cuenca.

c) Cálculo de las Características Físicas y Morfométricas de las cuencas en estudio

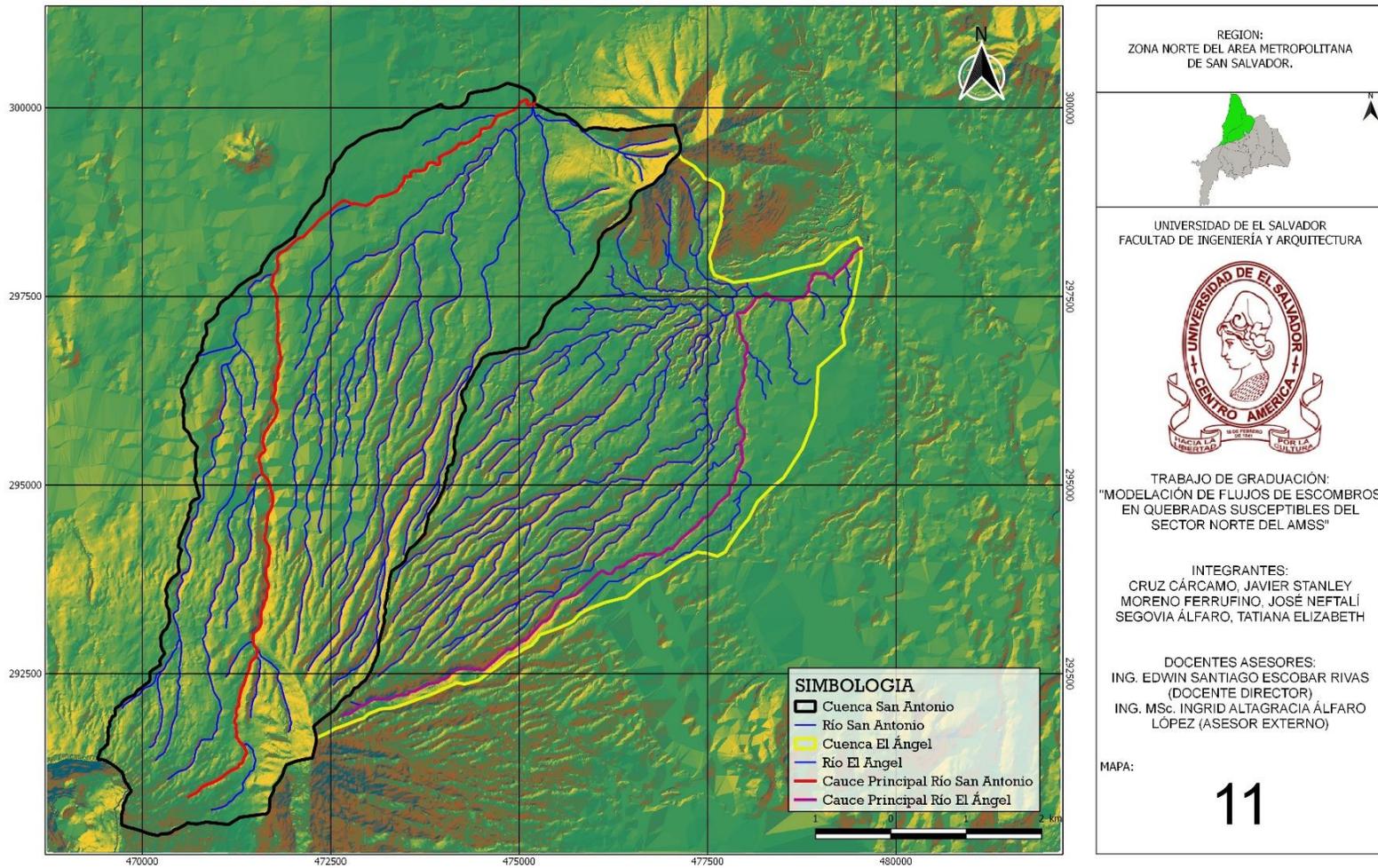
Los resultados morfométricos obtenidos en el análisis con Qgis se pueden observar en la siguiente Tabla 3.2-12 para cada una de las subcuencas en estudio:

Parámetro	Símbolo	Cuenca San Antonio	Cuenca El Ángel
		Valor	Valor
Área (km ²)	Ac	32.830	22.940
Perímetro (km)	Pc	29.540	24.840
Cota máxima (msnm)	Cmax	1,955.000	1,930.000
Cota mínima (msnm)	Cmin	420.000	400.000
Longitud del cauce principal (km)	Lc	12.612	11.190
Longitud máxima (km)	La	11.000	9.730
Altitud mayor del cauce (msnm)	Amc	1,637.512	1,599.100
Altitud menor del cauce (msnm)	Amec	420.000	400.000
Desnivel (m)	DA	1,217.512	1,199.100

Tabla 3.2-12 Parámetros morfométricos generales de las cuencas. [Fuente: Elaboración propia].

En el mapa 11 se aprecia el cauce principal de las dos cuencas.

CAUCE PRINCIPAL DE LAS CUENCAS EN ESTUDIO



MAPA 11 Cauce principal de cuencas de estudio [Fuente: Elaboración propia en software Qgis].

3.2.11 Parámetros Asociados al Desempeño Hidrológico de la Cuenca

- **Factor de Forma de Horton (Kf)**

Fue definido por Horton, como el cociente entre la superficie de la cuenca y el cuadrado de su longitud axial (Una cuenca con un factor de forma bajo esta menos sujeta a crecidas que una de misma área y mayor factor de forma):

$$k_f = \frac{A_c}{L_a^2}$$

Donde:

k_f : Factor adimensional de forma de Horton.

L_a : Longitud axial de la cuenca.

A_c : El área de la cuenca.

Intenta medir que tan alargada puede ser la cuenca. Una cuenca con un factor de forma bajo, esta menos sujeta a crecidas que una de la misma área y mayor factor de forma. Principalmente, los factores geológicos son los encargados de moldear la fisiografía de una región y la forma que tienen las cuencas hidrográficas. Un valor de Kf superior a la unidad proporciona el grado de achatamiento de ella o de un río principal corto y por consecuencia con tendencia a concentrar el escurrimiento de una lluvia intensa formando fácilmente grandes crecidas. (Horton R. E., 1932).

La longitud axial se define como la distancia entre el punto más bajo de la cuenca (Punto de Interés) y una perpendicular que pasa por el punto más alto de la cuenca, ver Mapa 12:

Para las cuencas en estudio el valor de L_a se calculó con la ayuda del software Qgis:

Cuenca del río El Ángel:

$$L_a = 9.73 \text{ km}$$

$$k_f = \frac{22.94}{(9.73)^2}$$

$$k_f = 0.24$$

Cuenca del río San Antonio:

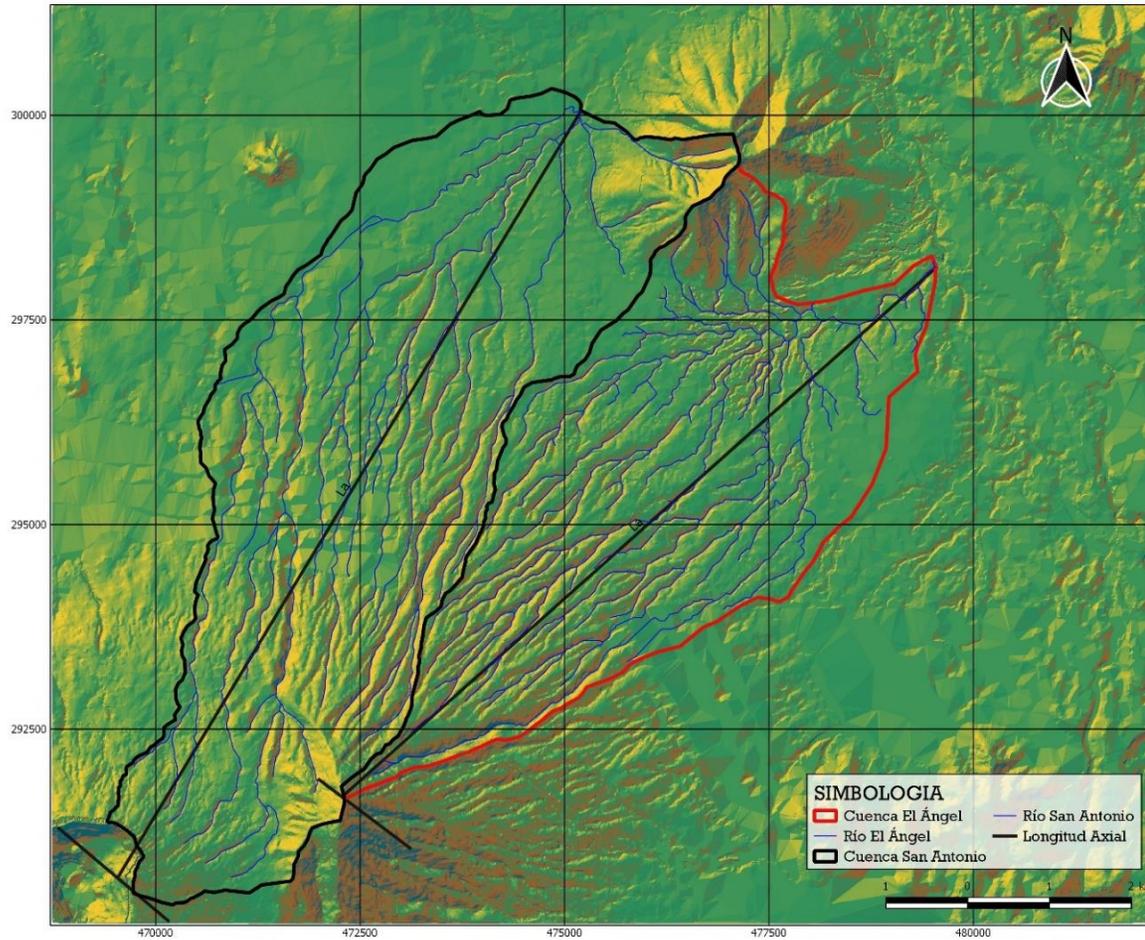
$$L_a = 11.00 \text{ km}$$

$$k_f = \frac{32.83}{(11.00)^2}$$

$$k_f = 0.27$$

Debido a los valores del factor de forma obtenidos mediante la fórmula de Horton (1932), se pueden considerar a las cuencas como alargadas.

LONGITUD AXIAL DE LAS CUENCAS EN ESTUDIO



REGION:
ZONA NORTE DEL AREA METROPOLITANA
DE SAN SALVADOR.

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

TRABAJO DE GRADUACIÓN:
"MODELACIÓN DE FLUJOS DE ESCOMBROS
EN QUEBRADAS SUSCEPTIBLES DEL
SECTOR NORTE DEL AMSS"

INTEGRANTES:
CRUZ CÁRCAMO, JAVIER STANLEY
MORENO FERRUFINO, JOSÉ NEFTALÍ
SEGOVIA ÁLFARO, TATIANA ELIZABETH

DOCENTES ASESORES:
ING. EDWIN SANTIAGO ESCOBAR RIVAS
(DOCENTE DIRECTOR)
ING. MSc. INGRID ALTAGRACIA ÁLFARO
LÓPEZ (ASESOR EXTERNO)

MAPA:
12

MAPA 12 Representación de longitud axial [Fuente: Elaboración propia en software Qgis].

- **Índice de Gravelius o Coeficiente de Compacidad**

La relación entre el área (A_c) y el perímetro (P_c), tiene notoria influencia en la respuesta hidrográfica de una cuenca. El índice más usualmente admitido para representar esta característica es el Coeficiente de Compacidad de Gravelius o simplemente Índice de Compacidad, que queda definido por la relación entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de un círculo de igual área, es decir:

$$K_c = \frac{P}{P_c} \rightarrow P_c = 2\pi r \rightarrow A_c = A_{cir} = \pi r^2 \rightarrow r = \sqrt{\frac{A_c}{\pi}} \rightarrow K_c = \frac{P}{2\pi \sqrt{\frac{A_c}{\pi}}}$$

$$K_c = 0.282 \frac{P}{\sqrt{A_c}}$$

Dónde:

P_c : Perímetro de la cuenca en km.

A_c : Área de la cuenca en km².

Cuanto más irregular y alargada sea la cuenca mayor será su coeficiente de compacidad una cuenca circular o redonda tiene un coeficiente de compacidad mínimo de 1, en la medida que este número sea próximo a la unidad, mayor tendencia a las crecidas tendrá la cuenca.

Para las cuencas en estudio se tiene:

Cuenca del río El Ángel:

$$K_c = \frac{0.282(24.84)}{\sqrt{22.94}}$$

$$K_c = 1.46$$

Cuenca del río San Antonio:

$$K_c = \frac{0.282(29.54)}{\sqrt{32.83}}$$

$$K_c = 1.44$$

Se han establecido tres categorías para la clasificación de acuerdo con este parámetro:

Forma de la cuenca de acuerdo al Índice de Compacidad

Clase de forma	Índice de compacidad	Forma de la cuenca
Clase I	1.0 a 1.25	Casi redonda a oval-redonda
Clase II	1.26 a 1.50	Oval-redonda a oval-oblonga
Clase III	1.51 ó más de 2	Oval-oblonga a rectangular-oblonga

Tabla 3.2-13 Categorías que definen la forma de la cuenca según el valor de K_c ¹⁶.

Del análisis la Tabla 3.2-13 se establece que las cuencas en estudio son de Clase II y presentan una forma oval - redonda a oval - oblonga, que presupone que es poco susceptible a las crecidas, cuyas aguas escurren en general por un solo curso principal.

¹⁶ Caracterización y clasificación de la red hidrográfica de la cuenca del río Bobo, departamento de Nariño, Colombia, Victoria Benavides Mora, 2009.

- **Relación de Elongación (Re)**

Se define como la razón entre el diámetro de un círculo con la misma área de la cuenca y la longitud del cauce principal de la misma (Sala y Gay, 1981). Cuanto más se acerque esta relación al valor de 1, más se aproxima la forma de la cuenca a un círculo. Mientras mayor sea el valor hallado en esta relación, menos elongada será la cuenca.

$$R_e = \frac{D}{l}$$

$$R_e = \frac{1.128\sqrt{A_c}}{L_c}$$

Donde:

A_c : Área de la Cuenca.

L_c : Longitud del cauce principal.

Se determina para cada cuenca el cálculo de la relación de elongación;

Cuenca del río El Ángel:

$$R_e = \frac{1.128\sqrt{22.94}}{11.19}$$

$$R_e = 0.48$$

Cuenca del río San Antonio:

$$R_e = \frac{1.128\sqrt{32.83}}{12.61}$$

$$R_e = 0.51$$

En estudios realizados por diversos autores, se estimó que, para un gran número de cuencas, los valores de R_e entre 0.5 y 0.8 correspondían a relieves pronunciados. Los valores de R_e obtenidos para las cuencas del El Ángel y San Antonio se aproximan a esta afirmación y concuerdan con el relieve de la zona en la que se encuentran ambas cuencas.

- **Relación de Circularidad (R_c)**

Este parámetro relaciona el área de la cuenca con el área de un círculo de igual perímetro. Se expresa con la siguiente fórmula:

$$R_c = \frac{4\pi A_c}{P_c^2}$$

Donde:

A_c : Área de la cuenca.

P_c : Perímetro de la cuenca.

Para las cuencas en estudio se tiene:

Cuenca del río El Ángel:

$$R_c = \frac{4\pi(22.94)}{(24.84)^2}$$

$$R_c = 0.47$$

Cuenca del río San Antonio:

$$R_c = \frac{4\pi(32.83)}{(29.54)^2}$$

$$R_c = 0.47$$

Considerando el valor máximo de 1, para una cuenca circular, el valor de 0.47 coincide con la forma elongada o alargada, para ambas cuencas.

3.2.12 Morfometría Asociada al Relieve

A mayor pendiente, corresponderá una menor duración de concentración de las aguas de escorrentía en la red de drenaje y afluentes del cauce principal, (Navarrete, 2004). Algunos parámetros:

- **Pendiente Media del Cauce Principal (S)**

Este parámetro nos permite apreciar el potencial que tiene un río para erosionar el lecho y las laderas por donde se conduce las aguas que discurren de manera permanente, inclusive durante la estación seca de la región. Ahora bien, la pendiente del cauce principal representa un valor medio, ya que cada tramo tiene su propia pendiente.

De acuerdo con el criterio de Taylor y Schwarz, se considera que el río puede estar formado por tramos de igual longitud o bien por tramos de longitud variable. Para el cálculo de la pendiente media del cauce principal de la cuenca en estudio se usará el criterio de Taylor y Schwarz para una serie de tramos iguales, el cual se determina con la siguiente expresión:

$$S = \left(\frac{n}{\frac{1}{\sqrt{S_1}} + \frac{1}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{S_n}}} \right)^2$$

Donde:

S=pendiente media del cauce principal.

n=número de tramos de igual longitud.

S_n =pendiente del tramo n.

Queda evidencia que la pendiente media del cauce principal se aproximara más a la real mientras mayor sea el número de tramos utilizados a lo largo del cauce.

Cuenca del río El Ángel:

Tramo	Progresiva (m)	Longitud (m)	Cota (m)	Desnivel (m)	Si (%)	1/Si ^{1/2}
1	0	500	400			
2	500	500	410	10	2%	7.071
3	1000	500	412	2	0%	15.811
4	1500	500	416	4	1%	11.180
5	2000	500	440	24	5%	4.564
6	2500	500	450	10	2%	7.071
7	3000	500	465	15	3%	5.774
8	3500	500	475	10	2%	7.071
9	4000	500	490	15	3%	5.774
10	4500	500	500	10	2%	7.071
11	5000	500	520	20	4%	5.000
12	5500	500	550	30	6%	4.082
13	6000	500	575	25	5%	4.472
14	6500	500	600	25	5%	4.472
15	7000	500	640	40	8%	3.536
16	7500	500	690	50	10%	3.162
17	8000	500	760	70	14%	2.673
18	8500	500	825	65	13%	2.774
19	9000	500	955	130	26%	1.961
20	9500	500	1060	105	21%	2.182
21	10000	500	1140	80	16%	2.500
22	10500	500	1250	110	22%	2.132
23	11000	500	1450	200	40%	1.581
Sumatoria						111.915

Tabla 3.2-14 Valores utilizados para el cálculo de la pendiente media del cauce principal de la cuenca del río El Ángel [Fuente: Elaboración propia].

$$S = \left(\frac{23}{111.915} \right)^2$$

$$S = 0.0422 \text{ m/m} = 4.22\%$$

Cuenca del río San Antonio:

Tramo	Progresiva (m)	Longitud (m)	Cota (m)	Desnivel (m)	Si (%)	1/Si ^{1/2}
1	0	500	420			
2	500	500	430	10	2%	7.071
3	1000	500	435	5	1%	10.000
4	1500	500	445	10	2%	7.071
5	2000	500	455	10	2%	7.071
6	2500	500	470	15	3%	5.774
7	3000	500	486.72	16.72	3%	5.468
8	3500	500	510.1	23.38	5%	4.624
9	4000	500	531.34	21.24	4%	4.852
10	4500	500	550	18.66	4%	5.176
11	5000	500	580	30	6%	4.082
12	5500	500	612.1	32.1	6%	3.947
13	6000	500	660	47.9	10%	3.231
14	6500	500	700	40	8%	3.536
15	7000	500	753.03	53.03	11%	3.071
16	7500	500	819.91	66.88	13%	2.734
17	8000	500	893.18	73.27	15%	2.612
18	8500	500	978.94	85.76	17%	2.415
19	9000	500	1111.26	132.32	26%	1.944
20	9500	500	1235	123.74	25%	2.010
21	10000	500	1370	135	27%	1.925
22	10500	500	1440	70	14%	2.673
23	11000	500	1490	50	10%	3.162
24	11500	500	1524	34	7%	3.835
25	12000	500	1570	46	9%	3.297
26	12500	500	1638.43	68.43	14%	2.703
Sumatoria						104.283

Tabla 3.2-15 Valores utilizados para el cálculo de la pendiente media del cauce principal de la cuenca del río San Antonio [Fuente: Elaboración propia].

$$S = \left(\frac{26}{104.283} \right)^2$$

$$S = 0.0622 \text{ m/m} = 6.22\%$$

- **Pendiente Media de la Cuenca (\bar{S})**

El gradiente de pendiente de una cuenca tiene importancia dado que, indirectamente, a través de la velocidad del escurrimiento, influye en el tiempo de concentración. Por ello, puede resultar de interés, en lugar de representar todo el relieve mediante una curva o un rectángulo, definirlo por un valor determinado o un índice que sintetice la pendiente de la cuenca.

El más completo de los métodos para encontrar la pendiente media que puede ser usado para la obtención de los valores representativos de las pendientes de los terrenos de una cuenca es el Criterio de Alvord, el cual se puede calcular con la siguiente expresión:

$$\bar{S} = \frac{DL_L}{A_c}$$

Donde:

\bar{S} : Pendiente media de la cuenca.

D: Diferencia de elevación entre curvas de nivel en km.

L_L : Longitud total de todas las curvas de nivel comprendidas dentro de la cuenca en km.

A_c : Área de la cuenca en km².

Para el cálculo de la pendiente se utilizará para D el valor de 0.005 km, debido a

que las curvas de nivel son a cada 5 metros. Para las cuencas en estudio se tiene:

Cuenca del río El Ángel:

$$\bar{S} = \frac{0.005 * 1249.238}{22.94}$$

$$\bar{S} = 0.2723 \text{ m/m} = 27.23\%$$

Cuenca del río San Antonio:

$$\bar{S} = \frac{0.005 * 1809.67}{32.83}$$

$$\bar{S} = 0.2756 \text{ m/m} = 27.56\%$$

- **Elevación Media de la Cuenca (H_m)**

La elevación media de la cuenca influye en el régimen hidrológico, determina las formas de las precipitaciones que alimentan el ciclo hidrológico de la cuenca, cuyo efecto de distribución varía aún más en cuencas de mayor área, es decir la lluvia no se distribuye uniformemente.

Existen diversos métodos para calcular la elevación media de una cuenca, para el caso en estudio se utilizará el método de la red de puntos. Este método consiste en la creación de una cuadrícula dentro de la cuenca en estudio, de tal modo que existan al menos 125 puntos dentro de la cuenca. La elevación media es la media aritmética de las elevaciones de las intersecciones.

Cuenca del río El Ángel:

Las elevaciones de la red de puntos se obtuvieron a partir del software Qgis, donde solo se consideraron 142 puntos para el río El Ángel.

N°	Elevación	N°	Elevación	N°	Elevación	N°	Elevación
1	1358.71	38	675.81	75	621.56	112	510.00
2	1018.56	39	722.55	76	650.00	113	526.66
3	1093.00	40	750.00	77	732.94	114	540.96
4	1169.47	41	801.38	78	586.73	115	562.98
5	1260.00	42	821.70	79	481.19	116	439.27
6	1200.18	43	861.38	80	480.00	117	466.74
7	845.77	44	515.37	81	476.31	118	480.00
8	880.92	45	526.33	82	493.59	119	480.96
9	961.00	46	572.25	83	510.16	120	495.00
10	1010.76	47	590.00	84	524.59	121	503.12
11	1109.49	48	620.31	85	549.82	122	515.00
12	1164.14	49	657.61	86	550.33	123	525.00
13	626.27	50	676.43	87	576.69	124	432.43
14	671.71	51	714.56	88	605.01	125	474.02
15	689.21	52	742.07	89	629.35	126	475.36
16	765.56	53	747.51	90	731.48	127	485.47
17	807.88	54	495.00	91	637.75	128	498.56
18	843.41	55	502.72	92	537.87	129	502.05
19	887.18	56	507.79	93	480.00	130	509.83
20	948.65	57	542.81	94	455.99	131	435.00
21	1009.96	58	551.20	95	472.66	132	428.34
22	1050.65	59	610.30	96	476.46	133	471.97
23	565.00	60	625.00	97	495.00	134	481.17
24	612.46	61	633.43	98	524.13	135	487.93
25	625.00	62	651.59	99	530.00	136	494.28
26	686.16	63	683.35	100	532.10	137	500.00
27	711.09	64	700.00	101	562.26	138	405.25
28	737.38	65	511.71	102	570.00	139	450.00
29	758.81	66	490.00	103	744.68	140	475.00
30	842.91	67	490.00	104	589.65	141	415.00
31	904.14	68	487.25	105	508.79	142	430.00

32	958.92	69	498.44	106	465.00		14897.37
33	983.71	70	520.37	107	440.00		
34	553.92	71	548.00	108	453.35		
35	580.58	72	579.87	109	475.00		
36	621.27	73	583.79	110	475.00		
37	650.00	74	590.00	111	496.55		
Suma	32163.84		22797.87		20121.98		

Tabla 3.2-16 Puntos y elevaciones por el método de la red de puntos del río El Ángel [Fuente: Elaboración propia].

$$H_m = \frac{32163.84 + 22797.87 + 20121.98 + 14897.37}{142}$$

$$H_m = 633.67 \text{ msnm}$$

Cuenca del río San Antonio:

Las elevaciones de la red de puntos se obtuvieron a partir del software Qgis, donde solo se consideraron 150 puntos para el río San Antonio.

N°	Elevación	N°	Elevación	N°	Elevación	N°	Elevación
1	752.35	39	989.56	77	536.22	115	741.89
2	1332.49	40	531.56	78	707.71	116	660
3	1447.17	41	626.4	79	695.47	117	577.64
4	871.32	42	790.72	80	710	118	510.22
5	447.55	43	1563.17	81	448.49	119	1584.96
6	736.23	44	721.35	82	440.89	120	565
7	935.87	45	789.85	83	1450	121	450.54
8	585	46	747.32	84	1157.02	122	984.8
9	905	47	1562.01	85	515.6	123	951.62
10	830	48	1704.37	86	703.6	124	551.22
11	574.7	49	559.36	87	1245.53	125	1836.52
12	523.57	50	607.88	88	582.43	126	1257.33
13	450	51	621.08	89	610.13	127	639.98
14	717.02	52	478.4	90	572.84	128	1458.71
15	1098.85	53	460.57	91	1123.62	129	527.69

16	832.36	54	559.47	92	694.34	130	791.68
17	520	55	477.32	93	759.88	131	1171.99
18	569.47	56	486.07	94	695	132	653.61
19	1149.84	57	476.16	95	1717.37	133	1212.38
20	769.37	58	611.9	96	949.52	134	705.28
21	1481.33	59	750	97	723.14	135	521.85
22	505.31	60	956.17	98	768.11	136	462.42
23	1645.9	61	811.72	99	1498.87	137	865
24	1573.5	62	555.29	100	503.43	138	1463.56
25	1614.76	63	521.85	101	575	139	938.2
26	980	64	631.49	102	435	140	1565.51
27	506.26	65	524.95	103	481.29	141	784.79
28	1493.17	66	759.9	104	1596.65	142	817.95
29	473.62	67	1574.88	105	905	143	1455.51
30	1179.01	68	470	106	1523.64	144	1600.87
31	1455.96	69	555	107	536.58	145	1580.9
32	497.31	70	611.92	108	871.49	146	485.4
33	1852.05	71	1471.42	109	625	147	1489.69
34	1181.15	72	609.79	110	1288.8	148	1562.49
35	627.13	73	479.89	111	476.8	149	1576.02
36	1334.56	74	499.4	112	1564	150	618.72
37	575.01	75	736.38	113	560.66		35621.94
38	832.21	76	457.76	114	865		
Suma	35856.4		28342.33		32114.12		

Tabla 3.2-17 Puntos y elevaciones por el método de la red de puntos del río San Antonio [Fuente:

Elaboración propia].

$$H_m = \frac{35856.4 + 28342.33 + 32114.12 + 35621.94}{150}$$

$$H_m = 879.57 \text{ msnm}$$

- **Análisis Hipsométrico**

Con el propósito de comparar la cuenca con otros sistemas hidrográficos se empleó el criterio propuesto por Campos (1999) que considera la relación entre las alturas parciales y la altura total, así como las áreas parciales entre curvas de nivel y el área total. En base al análisis hipsométrico, podremos determinar el ciclo erosivo y la etapa evolutiva en que se encuentra la cuenca.

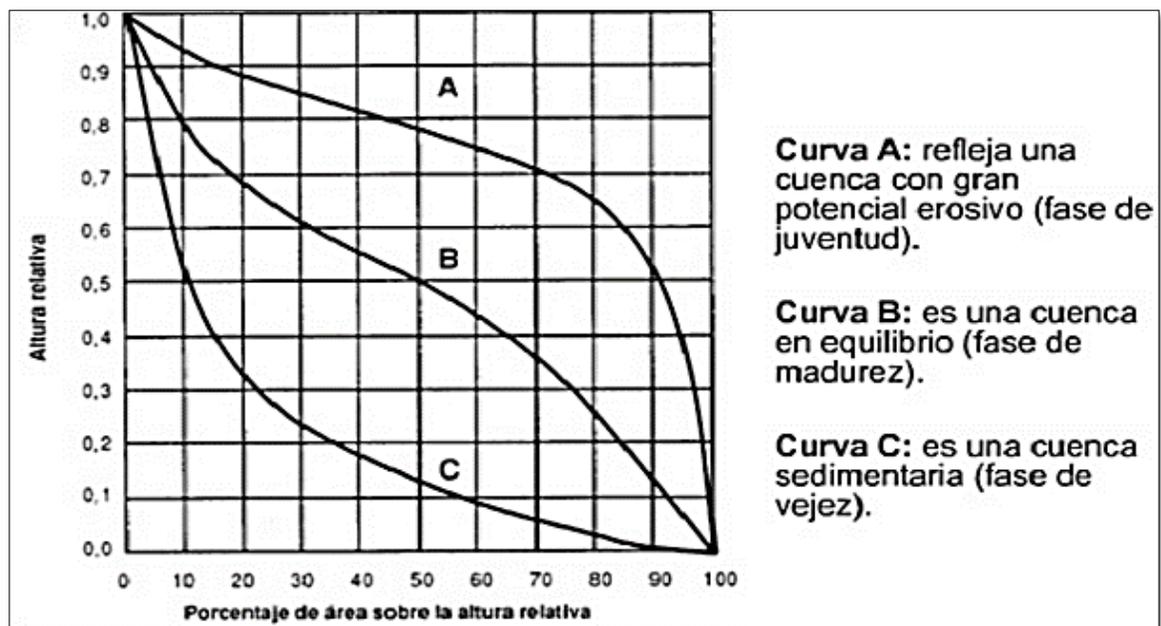


FIGURA 3-16 Modelo de curvas hipsométricas del ciclo de erosión. [Fuente: Senciales y Ferre, 1999].

Del estudio hipsométrico (Figura 3-16) existen tres estados de las cuencas, fase de desequilibrio o fase juvenil en donde puede apreciarse altos índices de erosión y movimiento de tierras, fase de equilibrio o etapa de madurez donde la cuenca entra en una etapa de estabilización respecto a los procesos erosivos, y fase de

monandok o vejez donde la mayor parte de su área es de pendientes consideradas como llanas o suaves.

Cuenca del río El Ángel:

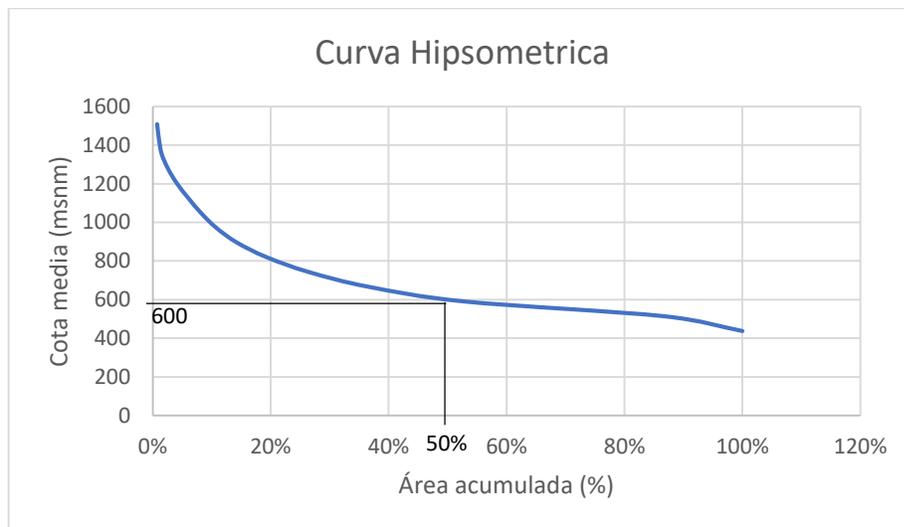


Grafico 3-1 Curva hipsométrica del río El ángel [Fuente: Elaboración propia].

Cuenca del río San Antonio

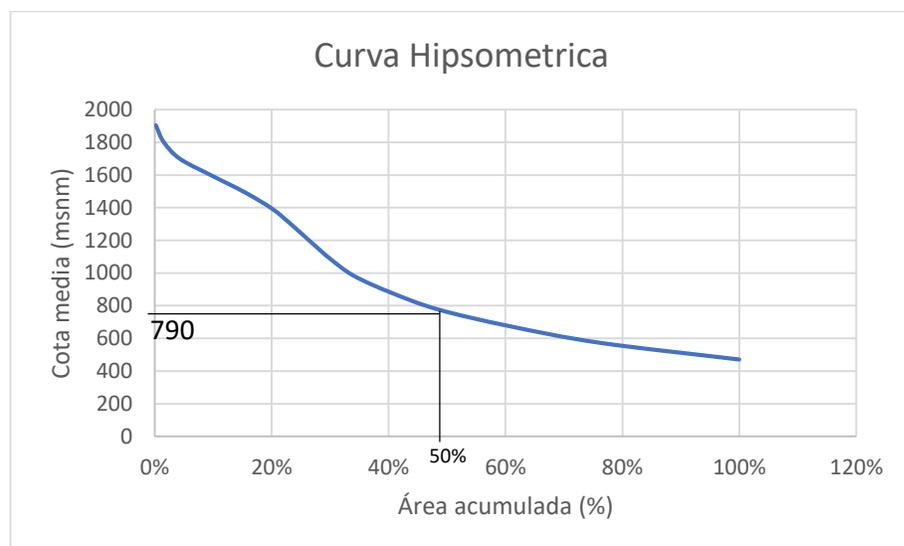


Grafico 3-2 Curva hipsométrica del río San Antonio [Fuente: Elaboración propia].

En base a los resultados obtenidos en las curvas hipsométricas (Gráficos 3-1 y 3-2) de las cuencas de estudio, se pueden apreciar las fases o los ciclos de erosión según las edades de los ríos, para el caso de la sub-cuenca del río El Ángel este se encuentra en la fase de monandok o vejez donde la mayor parte de su área es de pendientes llanas o suaves por lo que se considera una cuenca sedimentaria; caso contrario a la sub-cuenca del río San Antonio el cual se encuentra en la fase de equilibrio o etapa de madurez donde la sub-cuenca entra en una etapa de estabilización respecto a los procesos erosivos, por lo que se considera una cuenca en equilibrio.

También en los Gráficos 3-1 y 3-2, al trazar una perpendicular al eje horizontal donde la abscisa marcar el 50% del área acumulada y cortar con una línea horizontal al eje de las ordenadas, se puede encontrar el valor de la altura media de la cuenca. Para el caso de la cuenca El Ángel se tiene una altura media de 600 msnm y para la cuenca San Antonio una altura media de 790 msnm.

- **Histograma de Frecuencias Altimétricas**

Es la representación de la superficie, en km^2 o en porcentaje, comprendida entre dos cotas, siendo la marca de clase el promedio de las alturas. La representación de varios niveles da lugar al histograma, que puede ser obtenido de los mismos datos de la curva hipsométrica. Realmente la curva hipsométrica y el histograma contienen la misma información, pero con una representación diferente, dando una idea probabilística de la variación de la altura en la cuenca.

Cuenca del río El Ángel:

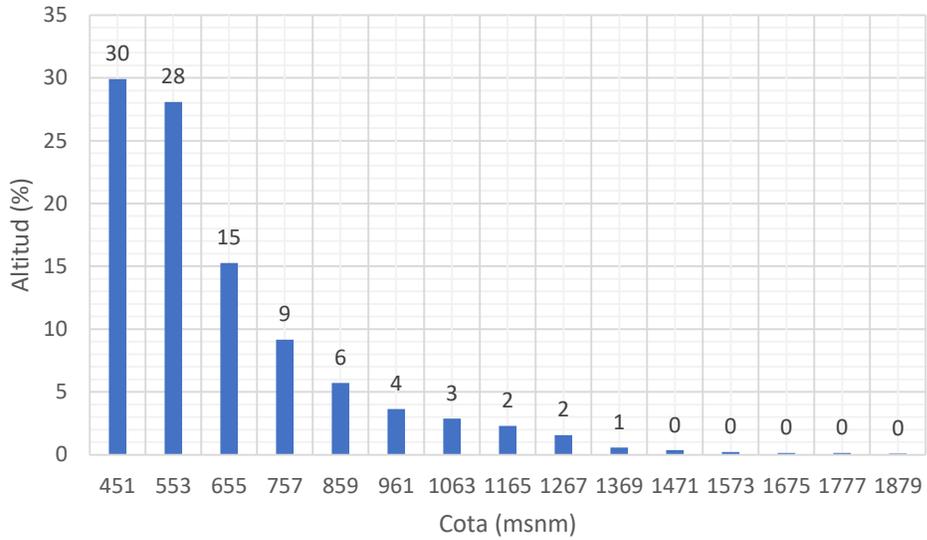


Gráfico 3-3 Histograma de frecuencias Altimétricas del río El ángel [Fuente: Elaboración propia].

Cuenca del río San Antonio

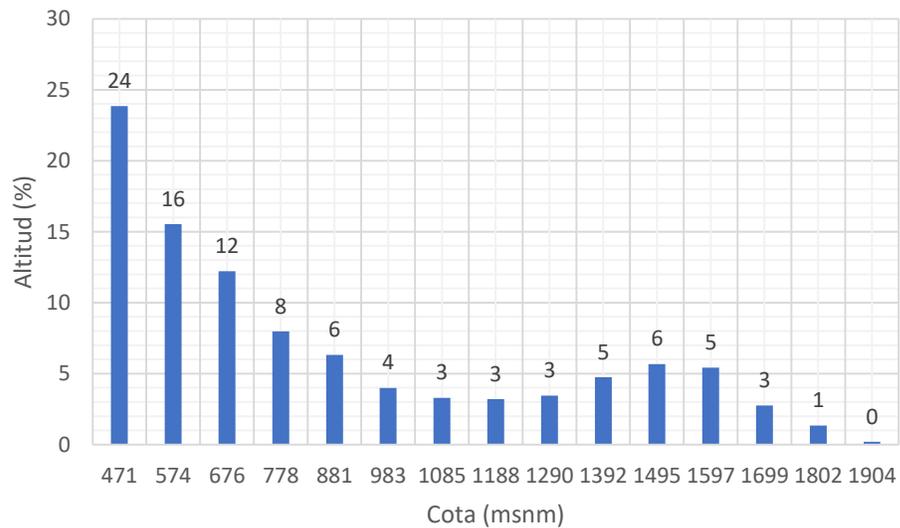


Gráfico 3-4 Histograma de frecuencias Altimétricas del río San Antonio [Fuente: Elaboración propia].

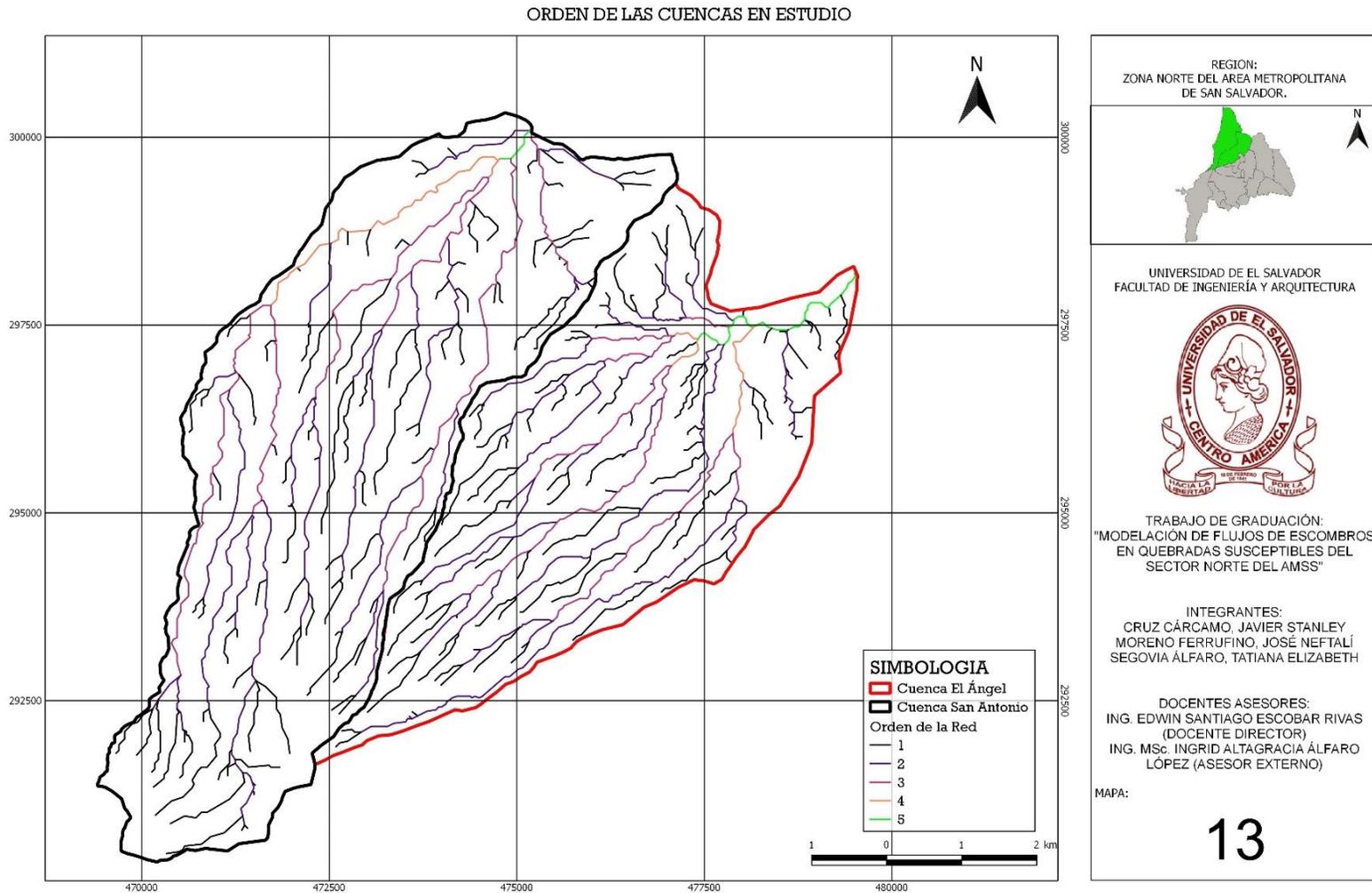
3.2.13 Morfometría de la Red de Drenaje

- **Orden de los cauces**

El orden de las corrientes es una clasificación que proporciona el grado de bifurcación dentro de la cuenca. Existen varios métodos para realizar tal clasificación. En este caso se optó por el método de Horton, el cual se fundamenta en los siguientes criterios:

Se consideran corrientes de primer orden, aquellas corrientes fuertes, portadoras de aguas de nacimientos y que no tienen afluentes. Cuando dos corrientes de orden 1 se unen, resulta una corriente de orden dos. De manera general, cuando dos corrientes de orden i se unen, resulta una corriente de orden $i+1$. Cuando una corriente se une con otra de orden mayor, resulta una corriente que conserva el mayor orden.

Debido a que el orden de la cuenca refleja el grado de ramificación o bifurcación dentro de una cuenca. Entre más corrientes tributarias tenga una cuenca, es decir, entre mayor es el grado de bifurcación de su sistema de drenaje, más rápida será su repuesta a la precipitación. En la siguiente imagen se puede apreciar el orden de las cuencas en estudio.



MAPA 13 Orden de las cuencas en estudio [Fuente: Elaboración propia en software Qgis].

Las cuencas hidrográficas son clasificadas en base a la categoría resultante de su río principal, para las cuencas en estudio su río principal es de categoría cinco, entonces las cuencas serán nominadas de orden 5, esto según el método de Horton.

- **Densidad de Drenajes (D_d)**

Este parámetro es considerado uno de los más importantes para el análisis morfológico, ya que describe el estado erosivo de la cuenca. Se define como la relación entre la suma de la longitud total de los cauces de todos los órdenes y el área de la cuenca (Strahler A., 1964):

$$D_d = \frac{L_s}{A_c}$$

Donde:

D_d : Densidad de drenaje expresada en km de río por km².

L_s : Longitud total de los cauces de todas las ordenes en km.

A_c : Área de la cuenca en km².

$$D_d = \frac{L_s}{A_c}$$

Para las cuencas en estudio:

Cuenca del río El Ángel:

$$D_d = \frac{103.71}{22.94}$$

$$D_d = 4.52 \text{ km/km}^2$$

Cuenca del río San Antonio:

$$D_d = \frac{98.84}{32.83}$$

$$D_d = 3.01 \text{ km/km}^2$$

Algunos autores indican que, para valores de D menores de 10 como es el caso para ambas cuencas, existe una baja densidad de drenaje y una textura gruesa, lo que suele darse en zonas de gran masividad litológica y espesa cobertura vegetal.

- **Densidad de Corrientes (Ds)**

La densidad de corrientes de una cuenca nos permite conocer su el grado de bifurcación, este parámetro se expresa como la relación entre el número de corrientes totales entre el área de drenaje de la cuenca. Es decir:

$$D_s = \frac{N_s}{A_c}$$

Donde:

D_s =Densidad de corrientes en corrientes/km².

N_s =Número de corrientes perennes o intermitentes.

A_c =Área de la cuenca en km².

Para las cuencas en estudio:

Cuenca del río El Ángel:

$$D_s = \frac{138}{22.94}$$

$$D_s = 6.02 \text{ corrientes/km}^2$$

Cuenca del río San Antonio:

$$D_s = \frac{64}{32.83}$$

$$D_s = 1.95 \text{ corrientes/km}^2$$

- **Sinuosidad de Corrientes (S_c)**

Este parámetro representa cuanto el cauce principal se asemeja a una línea recta. Este se define como la relación entre la longitud del cauce principal, y la distancia en línea recta del valle del cauce principal. Cuando el valor de la sinuosidad es igual a 1, el cauce es una línea recta, mientras que se consideran como meandros cuando su sinuosidad es mayor a 1.5.

$$S_c = \frac{L_c}{L_t}$$

Donde:

S_c =Sinuosidad del río.

L_c =Longitud del cauce principal.

L_t =Longitud del valle del cauce en planta.

Determinado el cauce principal de una red de drenaje, el conocimiento de su sinuosidad puede revelar una serie de hechos tanto históricos como presentes de la fuerza de la acción lineal a lo largo de un cauce.

La mayor sinuosidad suele ser frecuente en causas de poca pendiente, frente a una baja sinuosidad representativa de un cauce de mayor pendiente y, por ello, con mayor fuerza erosiva.

El cálculo de la sinuosidad es propuesto por Schumm 1963, quien la define como “el desarrollo de meandros existentes en el cauce principal de un río”

Schumm (1963) propuso cinco tipos de canales, a los cuales se le asignó un índice de sinuosidad ver Tabla 3.2-18:

Tipo de canal	Índice de sinuosidad
Canal rectilíneo	1-1.2
Canal transicional	1.2-1.5
Canal regular	1.5-1.7
Canal irregular	1.7-2.1
Canal tortuoso	>2.1

Tabla 3.2-18 Índices de Sinuosidad. [Fuente: Schumm, 1963].

Se determina el índice de sinuosidad para cada una de las cuencas en estudio:

Cuenca del río El Ángel:

$$S_c = \frac{11.19}{9.73}$$

$$S_c = 1.15$$

Cuenca del río San Antonio:

$$S_c = \frac{12.61}{11.02}$$

$$S_c = 1.14$$

Los resultados indican que el índice de sinuosidad para ambas cuencas según la tabla 3.2-18, es de tipo canal rectilíneo ya que se encuentra en el rango de 1 a 1.2, los cuales se caracterizan por llevar carga de todo tipo, siendo frecuente el ensanchamiento e incisión del cauce.

- **Tiempo de concentración (t_c)**

Tiempo que tarda en llegar una gota de agua de lluvia desde el extremo hidráulicamente más alejado de la cuenca a la sección de salida, calculándose mediante la fórmula de Kirpich:

$$t_c = 0.000325 \left(\frac{L_c^{0.77}}{S_{cp}^{0.385}} \right)$$

Donde:

t_c = Tiempo de concentración (h).

S_{cp} = Pendiente del cauce principal (m/m).

L_c = Longitud del cauce principal(km).

Las cuencas más ensanchadas poseen mayor susceptibilidad a generar crecidas, ya que el tiempo de recorrido del agua a través de la cuenca es mucho más corto que en cuencas alargadas, en otras palabras, las cuencas ensanchadas tendrían menor tiempo de concentración y por ende mayor rapidez para la concentración de los flujos de aguas superficiales, generando mayor violencia en sus crecidas.

Generalmente una densidad de drenaje alta se asocia con "materiales impermeables a nivel superficial, vegetación dispersa y relieves montañoso, además de ello indica que la cuenca posee suficiente drenaje para cuando se presentan las tormentas.

La caracterización morfológica de la cuenca permitió identificar la influencia del relieve y morfología sobre su respuesta en un evento aislado al caracterizar el tiempo de concentración (t_c), siendo éste de corta duración.

Para las cuencas en estudio se tiene:

Cuenca del río El Ángel:

$$t_c = 0.000325 \left(\frac{11190^{0.77}}{0.0422^{0.385}} \right)$$

$$t_c = 1.44 \text{ horas} = 86.47 \text{ minutos}$$

Cuenca del río San Antonio:

$$t_c = 0.000325 \left(\frac{12610^{0.77}}{0.0622^{0.385}} \right)$$

$$t_c = 1.36 \text{ horas} = 81.65 \text{ minutos}$$

3.2.14 Resumen de las Características Físicas y de Comparación de las Cuencas en Estudio

Características físicas y de comparación cuencas		
	Río el Ángel	Río San Antonio
Área (km ²)	22.94	32.83
Perímetro (km)	24.84	29.54
Elevación máxima (msnm)	1930	1955
Elevación mínima (msnm)	400	420
Longitud del cauce principal (km)	11.19	12.61
Elevación máxima del cauce principal (msnm)	1599.1	1637.512
Elevación mínima del cauce principal (msnm)	400	420
Longitud total de corrientes (km)	103.71	98.84
Relación de elongación	0.48	0.51
Relación de circularidad	0.47	0.47
Densidad de drenajes (km/km ²)	4.52	3.01
Densidad de corrientes (corrientes/km ²)	6.02	1.95
Pendiente media del cauce principal (%)	4.22	6.22
Pendiente media de la cuenca (%)	27.23	27.56
Elevación media de la cuenca (msnm)	633.67	876.09
Coefficiente de compacidad de Gravelius	1.46	1.44
Factor de forma	0.242	0.27
Sinuosidad de corrientes	1.14	1.15
Tiempo de concentración (horas)	1.44	1.36

Tabla 3.2-19 Resumen de las características físicas y de comparación de la cuenca del río El Ángel y río San Antonio [Fuente: Elaboración propia].

CAPITULO IV

ANÁLISIS HIDROLÓGICO DE LA ZONA DE ESTUDIO

4.1 RESUMEN

El presente estudio hidrológico realizado para la cuenca del río San Antonio y la cuenca del río El Ángel, tiene como objetivo determinar el caudal pico de escorrentía que puede tener lugar en cada una de ellas y por medio de los resultados obtenidos, hacer posteriormente el análisis de los flujos, considerando el transporte de sólidos en suspensión.

Para el caso se utilizará el método del Número de Curva (Ven Te Chow, 1984), el cual fue desarrollado por el Servicio de Conservación de Recursos Naturales de EE.UU. (Natural Resources Conservation Service-NRCS), originalmente llamado Servicio de Conservación de Suelos (Soil Conservation Service-SCS) para calcular la precipitación efectiva como una función de la precipitación acumulada, la cobertura del suelo, el uso del suelo y las condiciones de humedad. La metodología del Número de Curva (CN), es la más empleada para transformar la precipitación total en precipitación efectiva y surgió de la observación del fenómeno hidrológico en distintos tipos de suelo en varios estados y para distintas condiciones de humedad antecedente.

Para cada una de las cuencas en estudio se determinó el número de curva, basado en las tablas de la SCS para así obtener un valor de CN en la condición de suelo de cada una de ellas, también se analizó el tránsito de avenidas por el método de Muskingum para el cual fue necesario determinar cada una de las pendientes (S) de los tramos haciendo uso de la ecuación de Taylor y Schwartz y así obtener la constante K de almacenamiento.

Por medio de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) y los Periodos de Retorno (T) se determinaron los Hietogramas para cada cuenca. De las estaciones meteorológicas más cercanas se trazaron los polígonos de Thiessen, para la determinación de la intensidad de precipitación en la zona, y con todos los datos calculados se procedió a realizar una modelación hidrológica utilizando el modelo HEC-HMS para cada cuenca, en donde como resultado se obtuvo el caudal e hidrograma de la crecida, los cuales proporcionarán valiosa información que, entre otros, servirá para un adecuado diseño y dimensionamiento de obras civiles.

4.2 MÉTODO DEL NÚMERO DE CURVA

Es un modelo empírico desarrollado por el Servicio de Conservación de Recursos Naturales de EE.UU. (Natural Resources Conservation Service-NRCS), originalmente llamado Servicio de Conservación de Suelos (Soil Conservation Service-SCS), en el que se determina un umbral de escorrentía (P_0) a través de un número hidrológico o número de curva (CN) agregado de la cuenca.

El Numero de Curva toma un valor de 0 a 100 según sea su capacidad de generar escorrentía superficial, valores cercanos a 0 representan condiciones de permeabilidad muy alta, mientras que valores cercanos a 100 representan condiciones de impermeabilidad, es decir un mayor índice de escorrentía.

El Número de Curva (Curve Number) depende de las siguientes propiedades generadoras de escorrentía de la cuenca:

1. Tipo hidrológico de suelo;
2. Uso de la tierra y tratamiento; y
3. Condición previa de humedad.

El método fue desarrollado a partir de registros de precipitación y escorrentía en 24 horas, por lo que no considera explícitamente la variación temporal de la escorrentía.

El método del Número de Curva del SCS es una técnica desarrollada por el SCS para estimar la infiltración. Considera todas las pérdidas netas menos la evaporación real.

Matemáticamente, la ecuación parte de lo siguiente:

$$Q = \frac{(I - 0.2S)^2}{I + 0.8S} \quad (4.1)$$

Donde:

Q = escorrentía (mm)

I = cantidad de precipitación (mm)

S es la diferencia máxima potencial entre la lluvia caída y la escorrentía generada:

$$S = \left(\frac{25,400}{CN} - 254 \right) \quad (4.2)$$

CN = número de curva.

Respecto al tipo de suelo hay que clasificarlo en uno de los cuatro grupos hidrológicos existentes. Estos grupos van desde A hasta D, representando el grupo A un potencial de escurrimiento mínimo y el D un potencial de escurrimiento alto. Para asignar a un suelo un grupo determinado hay que considerar su composición, su textura y la profundidad del nivel freático.

La información necesaria para obtener el Número de Curva es la siguiente:

Grupo hidrológico del suelo	Infiltración	Características	Textura
A	Rápida	Alta capacidad de infiltración >76 mm/h	Arenosa
			Arenosa-limosa
B	Moderada	Capacidad de infiltración 76-38 mm/h	Franca
			Franco-arcillosa-arenosa
			Franco-limosa
C	Lenta	Capacidad de infiltración 36-13 mm/h	Franco-arcillosa
			Franco-arcillo-limosa
			Arcillo-arenosa
D	Muy Lenta	Capacidad de infiltración <13	Arcillosa

Tabla 4.2-1: Grupos hidrológicos del suelo [Fuente: SCS, 1964 en Bradbury et al., 2000].

El método del Número de Curva utiliza como dato de entrada la precipitación, cantidad de lluvia (I) en la zona, asumiendo por tanto que en una misma cuenca diferentes lluvias provocarán diferentes escorrentías. Lo más conveniente será considerar para la estimación de la precipitación que genere mayor escorrentía, de ahí que se deba utilizar el tiempo de concentración (Tc) como punto de entrada en las curvas IDF (Intensidad-Duración-Frecuencia) de la zona de estudio. Conocida la precipitación, y la escorrentía generada puede obtenerse de forma gráfica (Gráfico 4-1) o mediante la expresión matemática indicada en ecuación

4.1

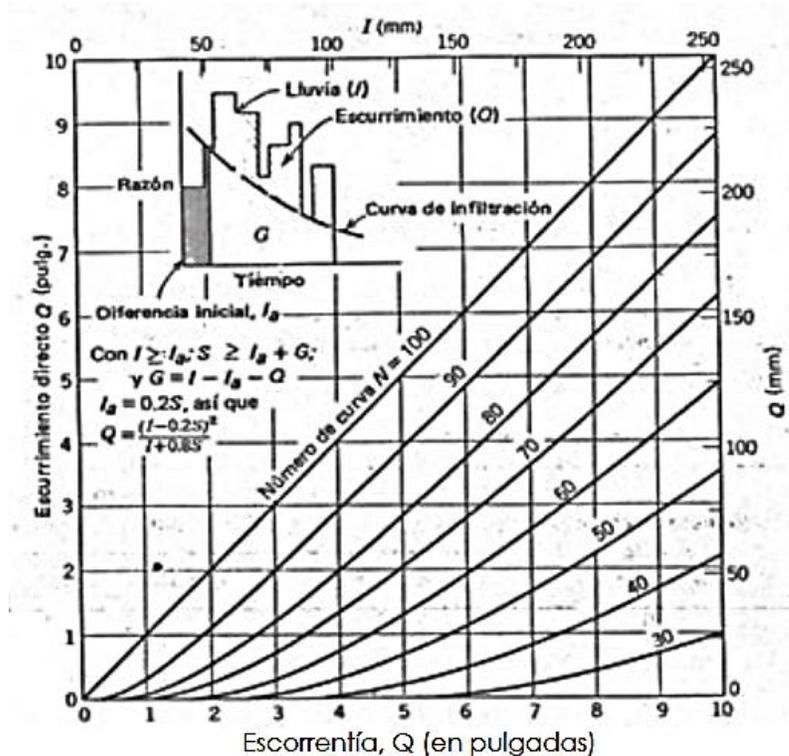


Gráfico 4-1 Valores de Q (en mm o pulgadas) en función de la cantidad de precipitación (en mm o pulgadas) y el N° de curva N característico de la zona. [Fuente: SCS, 1964 en Bradbury et al., 2000]

El valor del Número de Curva (CN) de entrada en la ecuación o en el gráfico, se obtiene mediante tablas; considerando lo siguiente:

- 1) Uso de la tierra,
- 2) Medidas de conservación empleadas en el cultivo,
- 3) Estado de compactación del terreno en relación a su uso,
- 4) Capacidad de infiltración del suelo en atención a su textura,
- 5) Condición previa de humedad del suelo.

Para este caso en particular, se ha considerado la Tabla 4.2-3 de la siguiente manera:

Numero de curva de escorrentía para usos selectos de tierra agrícola, suburbana y urbana (Condiciones antecedentes de humedad II, la=0.2S)					
Descripción del uso de la tierra		Grupo hidrológico del suelo			
		A	B	C	D
Tierra cultivada:					
Sin tratamiento de conservación (Granos básicos)		72	81	88	91
Con tratamiento de conservación (caña de azúcar)		62	71	78	81
Bosques:					
Troncos delgados, cubierta pobre, sin hiervas		45	66	77	83
Cubierta buena (café)		25	55	70	77
Residencial:					
Tamaño promedio del lote	%prom. Impermeable				
1/8 de acre o menos (suelo urbano)	65	77	85	90	92
1/4 de acre (suelo urbanizable)	38	61	75	83	87

Tabla 4.2-3 Valor de CN para las condiciones de humedad del suelo, en base a las ocupaciones de suelo adaptadas al país [Fuente: SCS, 1964 en Bradbury et al., 2000:].

Es importante aclarar que el dato obtenido en las tablas es el correspondiente a la condición II. Para el caso de una situación diferente al momento de producirse una nueva lluvia, por lo que se deberá modificar el CN obtenido, mediante la siguiente expresión:

$$CN_{III} = \frac{23 \times CN}{(10 + 0.13CN)} \quad (4.3)$$

Y de esta manera se obtiene el CN ponderado para la subcuenca que se desea determinar:

$$CN_{ponderado} = \frac{Area * CN_{III}}{Area} \quad (4.4)$$

Donde el área tiene como unidades kilómetros cuadrados.

El método del CN posibilita la estimación de la escorrentía en una cuenca hidrográfica para una tormenta dada, normalmente se utiliza la de mayor intensidad, aplicando diferentes parámetros relativos al uso y características hidrológicas del suelo.

4.2.1 Cálculo de las Áreas mediante Qgis para la Determinación de CN por medio del Método de Ven Te Chow

QGIS es un Sistema de Información Geográfica (SIG) de Código Abierto, lo cual lo hace ideal para fines didácticos y estudiantiles, que corre sobre Linux, Unix, Mac OSX, Windows y Android, soportando numerosos formatos y funcionalidades de datos vector, datos ráster y bases de datos.

A continuación, se presenta el proceso utilizado para determinar el cálculo del área de los usos de suelo, dato necesario para determinar el CN ponderado de cada una de las subcuencas que conforman las cuencas en estudio, es el siguiente.

1. Es necesario realizar un Vector (Shapefile) para el cálculo del CN, seleccionando en la barra de herramientas la opción capa, crear capa, nueva capa de archivo Shapefile, como se muestra en la Figura 4-1.

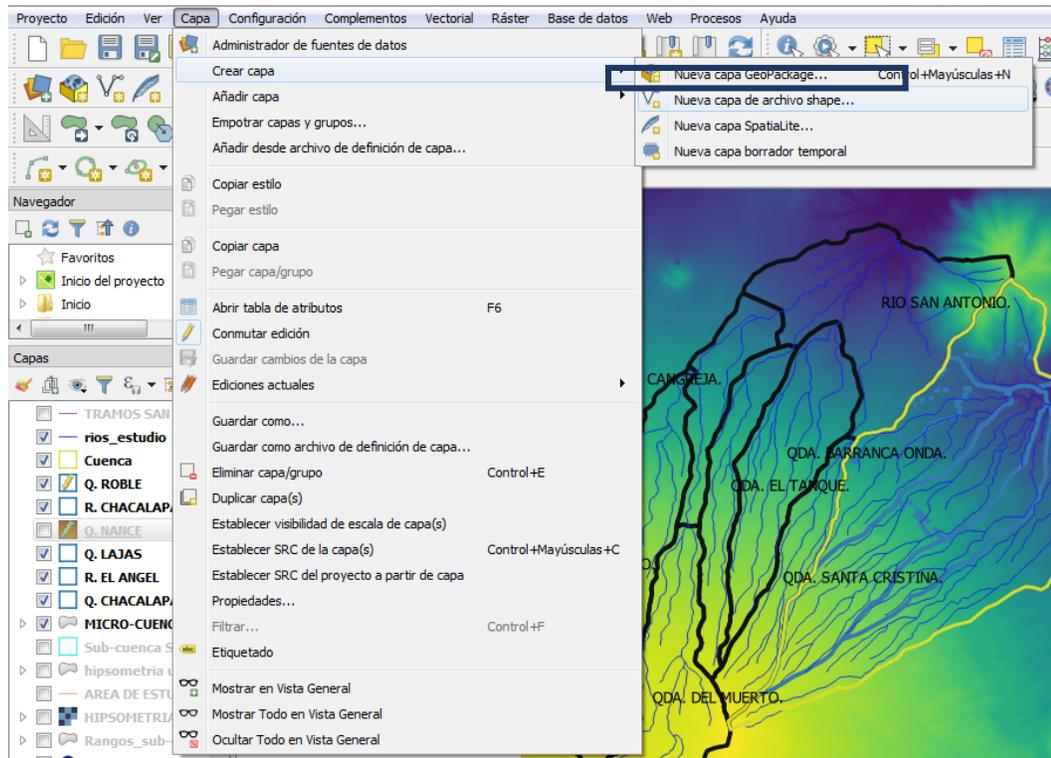


FIGURA 4-1 Creación de una nueva capa de archivo shape, en Qgis

[Fuente: Elaboración propia en software Qgis].

2. Una vez seleccionada la opción, se debe guardar el archivo, para este caso con el nombre de “CN de subcuenca San Antonio”.

Posteriormente se debe seleccionar en tipo de geometría con la opción “polígono” y crear una lista de campos para la tabla de atributos, en donde se almacenará la información, tal y como se muestra en la Figura 4-2.

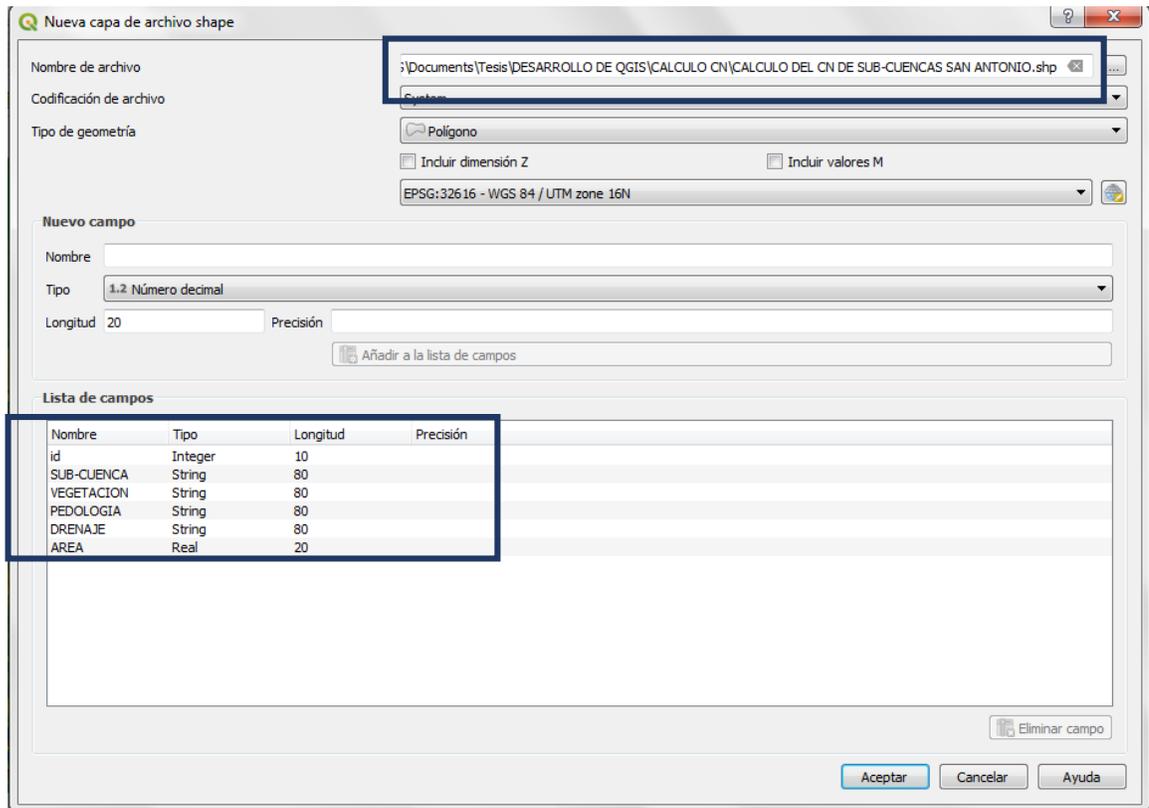


FIGURA 4-2 Determinación del tipo de geometría y creación de tabla de atributos

[Fuente: Elaboración propia en software Qgis].

3. Se deben de sobreponer los mapas de vegetación (uso de suelos) y pedología (tipo de suelo), como se observa en la Figura 4-3. Una vez superpuestos se procede a sacar las áreas comunes, para poder determinar el cálculo del CN, según el resultado obtenido de las áreas.

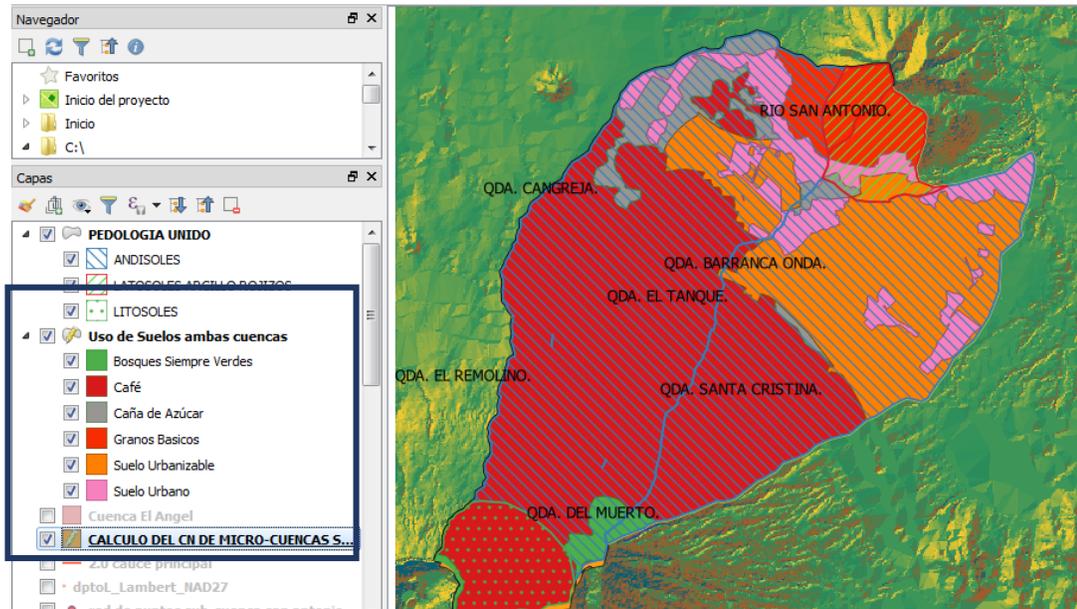


FIGURA 4-3 Traslapo de mapa pedológico y de vegetación [Elaboración propia en software Qgis]

4. Como se puede observar, el área en amarillo corresponde a la vegetación de café, con pedología de litosoles, de la subcuenca “QDA. DEL MUERTO”, perteneciente a la cuenca del río San Antonio.

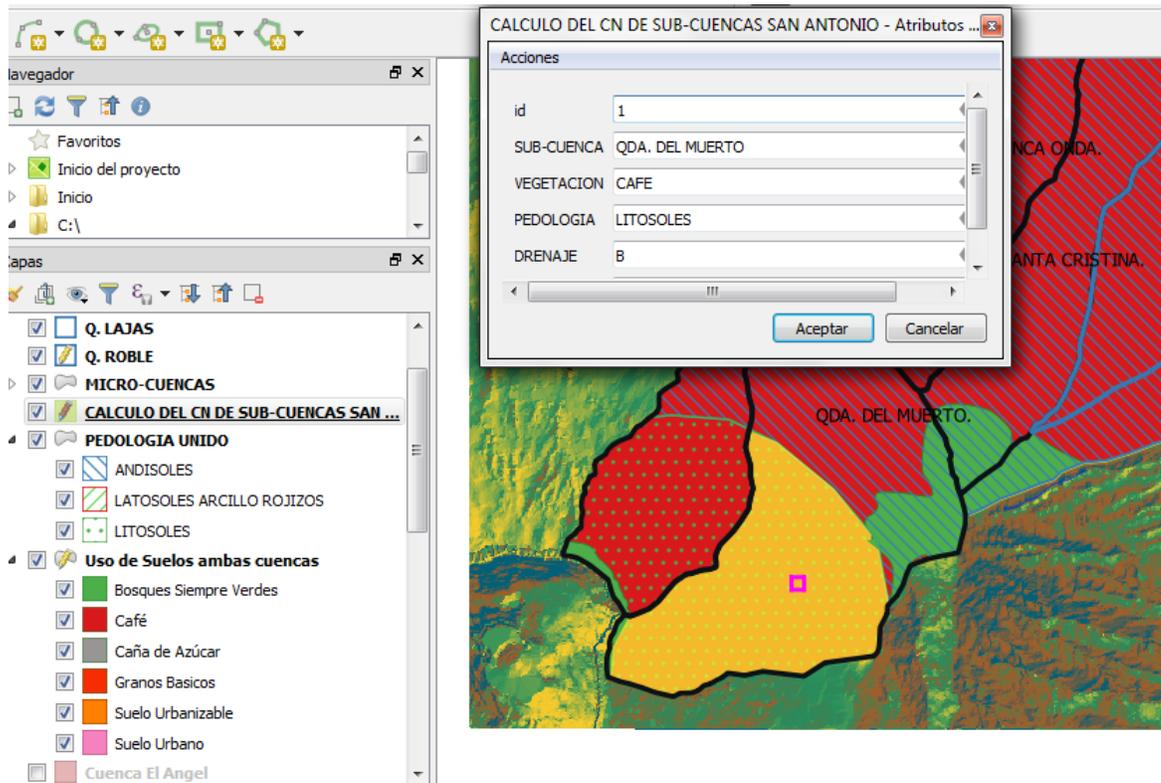


FIGURA 4-4 Detalle de atributos para la determinación de áreas según uso y tipo de suelo

[Fuente: Elaboración propia en software Qgis].

5. En la Figura 4-5, se muestra la tabla de atributos del shapefile de la cuenca San Antonio, y se procede al cálculo del área en km².

	M_cuencas	VEGETACIÓN	PEDOLOGIA	DRENAJE	AREA
1	QDA. DEL MUERTO	BOSQUES	LITOSOLES	B	4500.92
2	QDA. DEL MUERTO	BOSQUES	ANDISOLES	A	400470.36
3	QDA. EL REMOLINO	BOSQUES	LITOSOLES	B	53149.98
4	QDA. DEL MUERTO	BOSQUES	LITOSOLES	B	22171.96
5	QDA. SANTA CRISTINA	BOSQUES	ANDISOLES	A	221390.47
6	QDA. EL TANQUE	CAFE	ANDISOLES	A	2935205.21
7	QDA. BARRANCA ONDA	CAFE	ANDISOLES	A	4722613.95
8	RIO SAN ANTONIO	CAFE	ANDISOLES	A	137891.99
9	RIO SAN ANTONIO	CAFE	ANDISOLES	A	605598.26
10	QDA. DEL MUERTO	CAFE	LITOSOLES	B	1998011.50
11	QDA. DEL MUERO	CAFE	ANDISOLES	A	17656.69
12	QDA. EL REMOLINO	CAFE	LITOSOLES	B	1207598.93
13	QDA. EL REMOLINO	CAFE	ANDISOLES	A	3514267.18
14	QDA. SANTA CRISTINA	CAFE	ANDISOLES	A	2890486.31
15	QDA. SAN ANTONIO	CAFE	ANDISOLES	A	1640673.16

FIGURA 4-5 Detalle de tabla de atributos para cada subcuenca perteneciente a la cuenca San Antonio con el área respectiva según su uso y tipo de suelo [Fuente: Elaboración propia en software Qgis].

4.2.2 Determinación Del CN

Haciendo uso de los mapas de vegetación (uso de suelos) y pedología (tipo de suelo), se determinó el área correspondiente para cada una de las quebradas y ríos dentro de las cuencas en estudio y con el uso de la Tabla 4.2-3, se determinó el CN, según el grupo hidrológico del suelo y con las ecuaciones 4.3 y 4.4 se procede al desarrollo del cálculo para el “CN ponderado” de cada subcuenca.

Para el caso de La Quebrada Chacalapa, que pertenece a la cuenca del Río El Ángel, se encuentran tres usos de suelo y dos tipos de suelo, el drenaje establecido para el caso del suelo urbano, pertenece al grupo D, ya que genera una mayor escorrentía, con esta información y con el uso de la tabla 4.2-3, se obtiene un valor de CN de 92. En el caso del café y la caña de azúcar, ambos usos de suelo cuentan con un drenaje que pertenece al grupo A, el cual indica que genera menor escorrentía, realizando el mismo procedimiento para el uso de suelo y el grupo se obtiene el valor de CN, según la Tabla 4.2-3, para el café un valor de CN de 25 y para la caña de azúcar un CN de 62, determinado los valores de CN para cada uso de suelo para la subcuenca en análisis se procede al cálculo del valor del CN-III.

Suelo urbano con un área de 0.169 kms², CN= 92 (Ver Tabla 4.2-3)

$$CN_{III} = \frac{23 \times 92}{(10 + 0.13 \times 92)}$$

$$CN_{III} = 96.36$$

Al desarrollarse para cada una de las ocupaciones de suelo y multiplicar las áreas con cada uno de los CNIII calculados se obtienen los siguientes datos:

QUEBRADA CHACALAPA							
Ocupación del suelo	Tipo de suelo	Código	Grupo hidrológico	Área (km ²)	CN	CN_III	Área*CN_III
Suelo Urbano	Área Urbana	Urb	D	0.169	92.00	96.36	16.25
Café	Andisoles	An	A	0.935	25.00	43.40	40.58
Caña de Azúcar	Andisoles	An	A	1.203	62.00	78.96	94.99
				2.307			151.82

Tabla 4.2-4 Determinación de CNIII de Qda. Chacalapa de la cuenca El Ángel

Fuente: Elaboración propia].

Con los datos obtenidos, en la Tabla 4.2-4, se procede al cálculo del CN ponderado por medio de la ecuación 4.2-4 siguiente:

$$CN_{ponderado} = \frac{151.82}{2.307}$$

$$CN_{ponderado} = 65.81$$

De esta manera se obtienen los valores de CN ponderado para cada una de las subcuencas pertenecientes a las cuencas del Rio el Ángel y Rio San Antonio, como se muestra en las Tablas 4.2-5, 4.2-6 4.2-7 y 4.2-8:

Los suelos predominantes en la cuenca del Rio El Ángel son Andisoles (75.4 %) y Latosoles (18.6 %), además de las áreas de suelo urbano (6%).

CUENCA EL ÁNGEL								
Quebrada Chacalapa								
Ocupación del Suelo	Tipo de Suelo	Código	Grupo Hidrológico	Área (km ²)	CN	CNIII	Área*CNIII	CNIIIPonderado
Suelo Urbano	Área Urbana	Urb	D	0.169	92.00	96.36	16.25	65.81
Café	Andisoles	An	A	0.935	25.00	43.40	40.58	
Caña de Azúcar	Andisoles	An	A	1.203	62.00	78.96	94.99	
				2.307			151.82	
Quebrada El Roble								
Ocupación del Suelo	Tipo de Suelo	Código	Grupo Hidrológico	Área (km ²)	CN	CNIII	Área*CNIII	CNIIIPonderado
Suelo Urbano	Área Urbana	Urb	D	0.708	92.00	96.36	68.23	57.49
Café	Andisoles	An	A	4.009	25.00	43.40	173.98	
Caña de Azúcar	Andisoles	An	A	1.350	62.00	78.96	106.62	
				6.068			348.84	
Quebrada El Nance								
Ocupación del Suelo	Tipo de Suelo	Código	Grupo Hidrológico	Área (km ²)	CN	CNIII	Área*CNIII	CNIIIPonderado
Suelo Urbano	Área Urbana	Urb	D	0.534	92.00	96.36	51.49	59.16
Caña de Azúcar	Andisoles	An	A	1.866	62.00	78.96	147.36	
Bosques Siempre Verdes	Andisoles	An	A	0.206	45.00	65.30	13.47	
Café	Andisoles	An	A	3.684	25.00	43.40	159.88	
				6.291			372.20	

Tabla 4.2-5 CNIII ponderado para las subcuencas del Río El Ángel (PARTE I). [Fuente: Elaboración

propia].

Quebrada Las Lajas								
Ocupación del Suelo	Tipo de Suelo	Cód.	Grupo Hidrológico	Área (km ²)	CN	CNIII	Área*CNIII	CNIII Pon.
Suelo Urbano	Área Urbana	Urb	D	1.066	92.00	96.36	102.75	69.70
Caña de Azúcar	Latosoles Arcillo Rojizo	Lar	C	0.098	78.00	89.08	8.76	
Bosques Siempre Verdes	Andisoles	An	A	0.405	45.00	65.30	26.42	
Café	Andisoles	An	A	1.442	25.00	43.40	62.59	
Caña de Azúcar	Andisoles	An	A	1.016	62.00	78.96	80.19	
				4.027			280.71	
Río Chacalapa								
Ocupación del Suelo	Tipo de Suelo	Cód.	Grupo Hidrológico	Área (km ²)	CN	CNIII	Área*CNIII	CNIII Pon.
Suelo Urbano	Área Urbana	Urb	D	0.906	92.00	96.36	87.29	94.42
Caña de Azúcar	Latosoles Arcillo Rojizo	Lar	C	0.012	78.00	89.08	1.04	
Granos Básicos	Latosoles Arcillo Rojizo	Lar	C	1.268	88.00	94.40	119.71	
Caña de Azúcar	Andisoles	An	A	0.011	62.00	78.96	0.87	
Bosques Siempre Verdes	Andisoles	An	A	0.051	45.00	65.30	3.35	
				2.248			212.26	
Río El Ángel								
Ocupación del Suelo	Tipo de Suelo	Cód.	Grupo Hidrológico	Área (km ²)	CN	CNIII	Área*CNIII	CNIII Pon.
Suelo Urbano	Área Urbana	Urb	B	0.880	92.00	96.36	84.78	84.35
Caña de Azúcar	Andisoles	An	A	0.793	62.00	78.96	62.59	
Bosques Siempre Verdes	Andisoles	An	A	0.330	45.00	65.30	21.57	
				2.003			168.94	

Tabla 4.2-6 CNIII ponderado para las subcuencas del Río El Ángel (PARTE II). [Fuente: Elaboración propia].

CUENCA SAN ANTONIO								
QDA. EL REMOLINO								
Ocupación del Suelo	Tipo de Suelo	Código	Grupo Hidrológico	Área (km ²)	CN	CNIII	Área*CNIII	CNIII Ponderado
Bosques	Litsoles	Lit	B	0.05315	66	81.70	4.34	53.73
Café	Litsoles	Lit	B	1.208	66	81.70	98.66	
Café	Andisoles	An	A	3.414	25	43.40	148.17	
				4.68			251.17	
QDA. DEL MUERTO								
Ocupación del Suelo	Tipo de Suelo	Código	Grupo Hidrológico	Área (km ²)	CN	CNIII	Área*CNIII	CNIII Ponderado
Bosques	Andisoles	An	A	0.590	45	65.30	38.53	57.38
Bosques	Litsoles	Lit	B	0.169	66	81.70	13.82	
Café	Litsoles	Lit	B	1.998	55	73.76	147.38	
Café	Andisoles	An	A	2.967	25	43.40	128.76	
				5.72			328.48	
QDA. SANTA CRISTINA								
Ocupación del Suelo	Tipo de Suelo	Código	Grupo Hidrológico	Área (km ²)	CN	CNIII	Área*CNIII	CNIII Ponderado
Bosques	Andisoles	An	A	0.221	45	65.30	14.46	45.73
Suelo urbanizable	Andisoles	An	A	0.074	61	78.25	5.79	
Café	Andisoles	An	A	2.890	25	43.40	125.44	
				3.19			145.68	
QDA. CANGREJA								
Ocupación del Suelo	Tipo de Suelo	Código	Grupo Hidrológico	Área (km ²)	CN	CNIII	Área*CNIII	CNIII Ponderado
Suelo urbano	Andisoles	An	A	0.185	77	88.51	16.37	53.46
Café	Andisoles	An	A	1.869	25	43.40	81.12	
Caña de azúcar	Andisoles	An	A	0.484	62	78.96	38.18	
				2.54			135.68	

Tabla 4.2-7 CNIII ponderado para cada una de las subcuencas del Río San Antonio (PARTE I)

[Fuente: Elaboración propia].

QDA. EL TANQUE								
Ocupación del Suelo	Tipo de Suelo	Cód.	Grupo Hidrológico	Área (km ²)	CN	CNIII	Á*CNIII	CIINPonderado
Suelo urbanizable	Andisoles	An	A	0.126	61	78.25	9.86	46.06
Caña de azúcar	Andisoles	An	A	0.115	62	78.96	9.05	
Café	Andisoles	An	A	2.935	25	43.40	127.38	
				3.18			146.29	
QDA. BARRANCA ONDA								
Ocupación del Suelo	Tipo de Suelo	Código	Grupo Hidrológico	Área (km ²)	CN	CNIII	Área*CNI II	CNIIPonderado
Café	Andisoles	An	A	4.703	25	43.40	204.08	47.25
Suelo urbano	Andisoles	An	A	0.02618	77	88.51	2.32	
Suelo urbanizable	Andisoles	An	A	0.551	61	78.25	43.08	
				5.28			249.47	
RIO SAN ANTONIO								
Ocupación del Suelo	Tipo de Suelo	Código	Grupo Hidrológico	Área (km ²)	CN	CNIII	Área*CNI II	CNIIPonderado
Café	Andisoles	An	A	0.963	25	43.40	41.81	80.10
Suelo urbano	Andisoles	An	A	2.135	77	88.51	189.00	
Suelo urbanizable	Andisoles	An	A	1.373	61	78.25	107.43	
Caña de azúcar	Andisoles	An	A	1.588	62	78.96	125.35	
Granos básicos	Latosoles arcilloso rojizos	Lar	C	1.122	88	94.40	105.95	
Granos básicos	Andisoles	An	A	1.044	72	85.54	89.26	
				8.23			658.81	

Tabla 4.2-8 CNIII ponderado para cada una de las subcuencas del Rio San Antonio (PARTE II)

[Fuente: Elaboración propia].

Los suelos predominantes en la cuenca del rio San Antonio son Andisoles (86.1 %), Litosoles (10.5%) y Latosoles (3.4 %).

TABLA RESUMEN DE VALOR DE CN DE LAS CUENCAS DE ESTUDIO

CUENCA EL ÁNGEL								
Sub-Cuencas	Área (Km ²)	Longitud Cauce Principal (Km)	Pendiente Cauce	Tiempo De Concentración (Min)	Tiempo De Retardo (Min)	CNIII	S	la
Quebrada Las Lajas	4.023	4.357	0.049	39.616	23.770	69.704	110.399	22.080
Quebrada El Nance	6.301	9.294	0.078	59.262	35.557	59.162	175.327	35.065
Quebrada La Chacalapa	2.307	5.908	0.050	49.392	29.635	65.814	131.939	26.388
Quebrada El Roble	6.057	7.644	0.075	51.658	30.995	57.492	187.804	37.561
Río Chacalapa	2.247	2.727	0.026	35.289	21.173	94.422	15.005	3.001
Río El Ángel	2.001	2.818	0.012	48.127	28.876	84.350	47.128	9.426
Total	22.94							

CUENCA SAN ANTONIO								
Sub-cuencas	Área (km ²)	Longitud cauce principal (km)	Pendiente cauce	Tiempo de concentración (min)	Tiempo de retardo (min)	CNIII	S	la
Quebrada El Remolino	4.684	7.396	0.110	43.474	26.084	53.726	218.768	43.754
Quebrada Del Muerto	5.723	5.171	0.126	31.322	18.793	57.384	188.632	37.726
Quebrada Santa Cristina	3.190	5.015	0.127	30.499	18.299	45.728	301.460	60.292
Quebrada Cangreja	2.539	4.811	0.058	39.943	23.966	53.460	221.122	44.224
Quebrada El Tanque	3.184	6.284	0.123	36.734	22.040	46.062	297.427	59.485
Quebrada Barranca Onda	5.276	5.732	0.091	38.433	23.060	47.254	283.517	56.703
Río San Antonio	8.23	2.782	0.021	38.738	23.243	80.10	63.123	12.625

Tabla 4.2-9 Determinación del número de curva CN para las cuencas en estudio

[Fuente: Elaboración propia].

4.3 TRÁNSITO DE AVENIDAS POR CAUCES

El método de Muskingum está basado en el efecto de laminación por almacenamiento de una crecida y es muy utilizado para el cálculo de los efectos de tránsito y laminación de un hidrograma a lo largo de un cauce, proponiendo una metodología objetiva para la obtención de sus parámetros.

En este caso se utilizará el método iterativo para la solución del tránsito por cauces, los requerimientos de información consisten en disponer de los hidrogramas de entrada y salida en el tramo considerado, pues el método se basa en el hidrograma unitario instantáneo.

4.3.1 Método del Cálculo para los Parámetros del Método de Muskingum

El parámetro K tiene unidades de tiempo y su valor es aproximadamente igual al tiempo de viaje del pico de la avenida a lo largo del tramo:

$$k = \frac{L}{v} \quad (4.5)$$

Donde L es la longitud del tramo y v es la velocidad promedio de pico de la avenida. v puede estimarse asumiendo los valores de coeficiente de rugosidad (N) y radio hidráulico (R) según las condiciones que se adapten a las cuencas en análisis, utilizando la ecuación siguiente:

$$v = \frac{R^{2/3}}{N} x \sqrt{S} \quad (4.6)$$

“K” es una constante llamada parámetro de almacenamiento, y x es un factor de peso que expresa la influencia relativa de las entradas y las salidas del almacenamiento del tramo.

El parámetro “X” puede oscilar entre 0.0 y 0.5. Si $x= 0.0$, el volumen de almacenamiento en el tramo sólo es una función de salida O, lo que significa que no existe un almacenamiento en cuña y el tramo se comporta como un vaso. Si $x =0.5$, las entradas y las salidas tienen la misma importancia y no habría ningún abatimiento en el pico.

En términos muy generales se puede decir que x se aproxima a cero en cauces muy caudalosos y de pendiente muy pequeña, y a 0.5 en caso contrario. Cuando no se tengan todos los datos es recomendable tomar $x =0.2$ como valor medio.

4.3.2 Cálculo de Pendientes para cada tramo de las Cuencas en Estudio

Para la determinación del tránsito de avenidas, primero se debe calcular las pendientes de cada tramo del cauce, para eso se hará uso del software Qgis y por medio de él se realizará el cálculo de las pendientes.

1. Es necesario crear un archivo vector (shapefile) y seleccionar los tramos necesarios para el análisis. Estos tramos de interés son los que conectan con cada una de las subcuencas (Figura 4-6), una vez determinado los valores de pendientes de tramos, constante de

almacenamiento K, se procede a analizar los datos obtenidos en el software HEC-HMS.

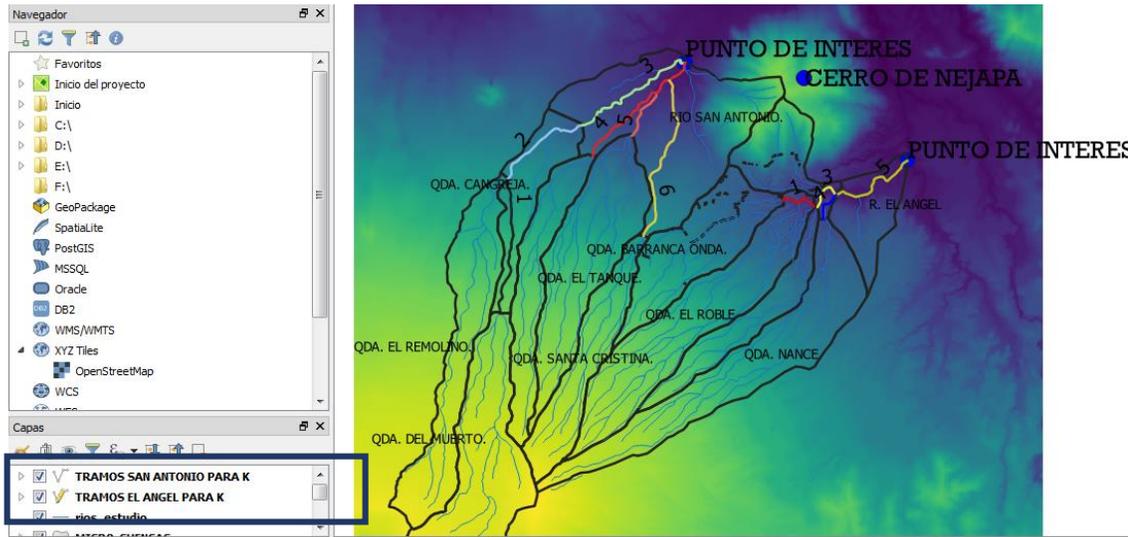


FIGURA 4-6 Tramos de la cuenca El Ángel para la determinación de la constante de almacenamiento K
[Fuente: Elaboración propia en software Qgis].

2. Una vez seleccionados los tramos se procede a calcular la longitud de cada uno, incluyendo su pendiente. En la Figura 4-7 se muestra el perfil longitudinal del tramo 4, de la cuenca del río el Ángel.

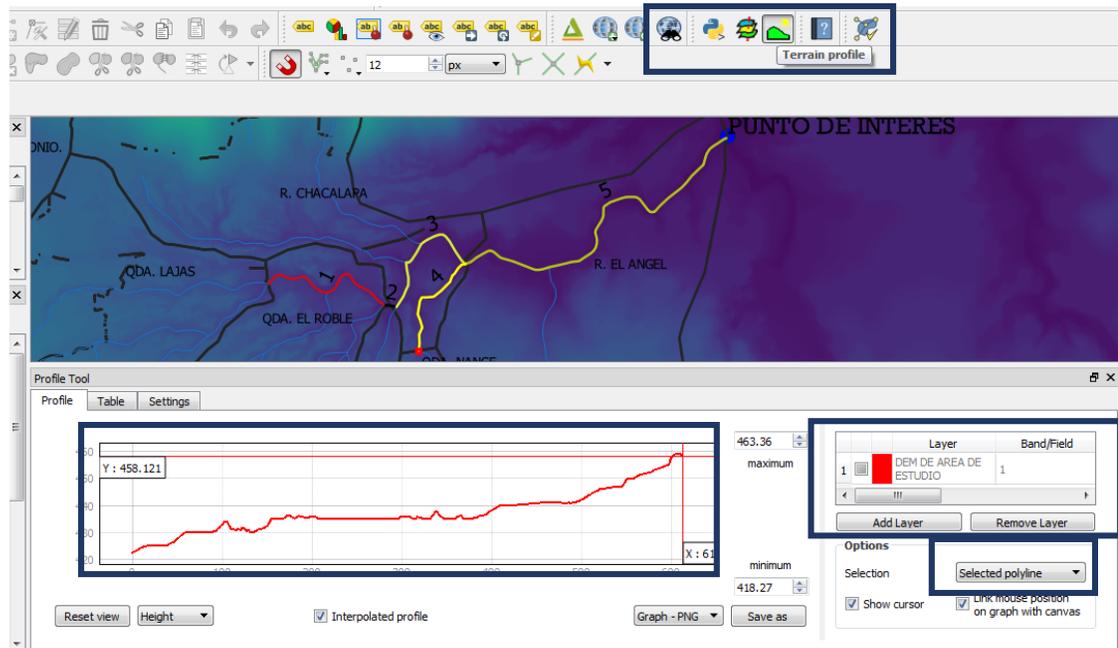


FIGURA 4-7 Perfil longitudinal del tramo 4 correspondiente a la cuenca El Ángel

[Fuente: Elaboración propia en software Qgis]

Para generar el perfil se debe seleccionar al comando “terrain profile” ubicado en la barra de herramientas y posteriormente añadir el archivo DEM (DEM de área en estudio) a la capa (layer), que se generó por medio de las curvas de nivel, después se debe seleccionar la poligonal del tramo. Una vez realizado este procedimiento, el software muestra el grafico generado con los datos de longitud y elevaciones del tramo seleccionado.

3. Con la ayuda del gráfico se deben extraer las elevaciones del perfil longitudinal, para el cálculo de la pendiente que se hará por medio del método de Taylor y Schwartz.

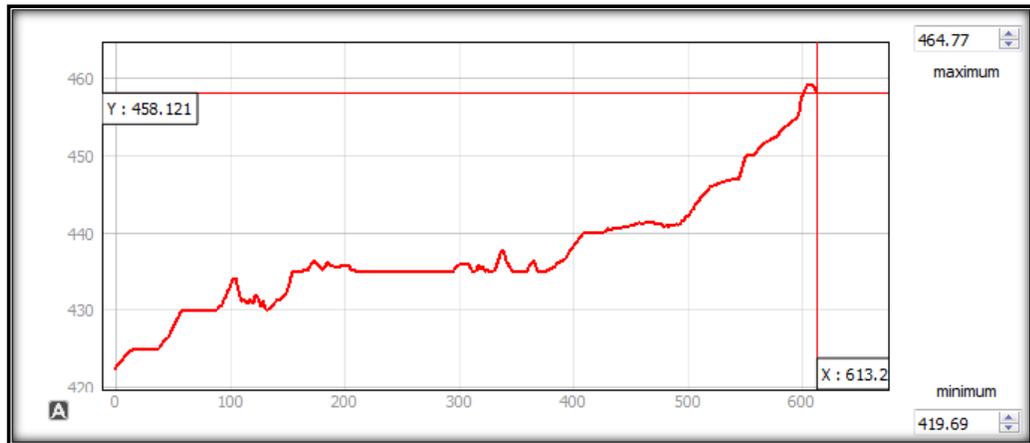


FIGURA 4-8 Perfil del tramo 4 correspondiente a la cuenca El Ángel

[Fuente: Elaboración propia en software Qgis].

Ecuación de Taylor y Schwartz

Para la aplicación de la ecuación de Taylor y Schwartz, se debe considerar que le Rio o quebrada se divide en N tramos de igual longitud, cada uno de ellos con pendiente uniforme.

$$S = \left[\frac{n}{\frac{1}{\sqrt{s_1}} + \frac{1}{\sqrt{s_2}} + \frac{1}{\sqrt{s_3}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{s_n}}} \right] \quad (4.7)$$

Donde:

N = número de tramos iguales, en los que se subdivide el perfil

S_1, S_2, \dots, S_n = pendiente de cada tramo, según $S = \frac{H}{L}$

S = pendiente media del tramo

Por ejemplo:

Para el tramo 4 que pertenece a la cuenca del Rio El Ángel y con los datos obtenidos del perfil longitudinal se tiene (ver Tabla 4.3-1):

Longitud del tramo; 613.2 m, N= 6, L= 102. 2

T 4			
Desnivel (ΔH)		S	1/S^{1/2}
458.12	444.84	0.1299413	2.77412745
444.84	439.59	0.0513699	4.41210456
439.59	436	0.0351272	5.33553808
436	435	0.0097847	10.1094016
435	432.9	0.0205479	6.97614985
432.9	422	0.1066536	3.06204944
		Σ	32.6693709

Tabla 4.3-1 Desniveles del Tramo 4 correspondiente a la cuenca El Ángel para la determinación de la pendiente media [Fuente: Elaboración propia].

Haciendo uso de la ecuación 4.7, obtenemos el valor de la pendiente media para el Tramo 4 perteneciente a la cuenca del Rio El Ángel:

$$S = \left[\frac{6}{32.6694} \right]$$

$$S = 0.03373$$

Se realiza el mismo procedimiento para todos los tramos de cada cuenca, y así determinar la pendiente media para cada tramo perteneciente a las cuencas de estudio, teniendo como resultado las siguientes tablas (ver Tabla 4.3-2 y 4.3-3):

Cuenca del Río El Ángel:

Pendiente de los Tramos de la Cuenca del Río El Ángel		
Tramo	Long (m)	S
T1	782.42	0.154
T2	71.31	0.021
T3	715.86	0.027
T4	613.2	0.034
T5	1878.48	0.0167

Tabla 4.3-2 Pendientes de los tramos correspondiente a la cuenca El Ángel [Fuente: Elaboración propia].

Cuenca del Río San Antonio:

Pendiente de los Tramos de la Cuenca del Río San Antonio		
Tramo	Long (m)	S
T1	2794.72	0.061
T2	2015.59	0.077
T3	2768.92	0.068
T4	2788.25	0.047
T5	1061.57	0.107
T6	3409.57	0.036

Tabla 4.3-3 Pendientes de los tramos correspondiente a la cuenca San Antonio

[Fuente: Elaboración propia].

Con los datos de pendiente obtenidos de la ecuación de Taylor y Schwartz; se procede a determinar para cada tramo la velocidad promedio pico por medio de la ecuación 4.6 y así determinar la constante k de almacenamiento por medio de la ecuación 4.7.

Determinado del valor de la velocidad promedio para el tramo 4 de la cuenca del Rio El Ángel haciendo uso de la ecuación 4.6, y asumiendo los valores de R = 0.15 y N = 0.035 se obtiene:

$$v = \frac{0.15^{2/3}}{0.035} \times \sqrt{50.03373}$$

$$v = 1.481 \text{ m/s}$$

Con el valor de la velocidad promedio pico se procede a determinar el valor de la constante K usando la ecuación 4.6 y para la determinación del valor de x para este caso que no se cuenta con todos los datos se tomara el valor de x= 0.2 en cada tramo.

$$k = \frac{613.2}{1.481} \times \frac{1}{3600}$$

$$k = 0.11, \quad x = 0.2$$

Realizando el mismo procedimiento para cada uno de los tramos que pertenecen a cada una de las cuencas en estudio se obtiene para cada una de ellas el siguiente resultado ver Tabla 4.3-4:

Valores de k Cuenca El Ángel							
Tramo	Long (m)	N	R	S	V (m/s)	K	X
T1	782.42	0.035	0.15	0.154	3.164	0.07	0.2
T2	715.86	0.035	0.15	0.027	1.328	0.15	0.2
T3	715.86	0.035	0.15	0.027	1.328	0.15	0.2
T4	1878.48	0.035	0.15	0.017	1.043	0.5	0.2
T5	1878.48	0.035	0.15	0.017	1.043	0.5	0.2
Valores de k Cuenca San Antonio							
Tramo	Long (m)	N	R	S	Vel (m/s)	K	X
T1	2794.72	0.035	0.15	0.061	1.986	0.39	0.2
T2	2015.59	0.035	0.15	0.077	2.232	0.25	0.2
T3	2768.92	0.035	0.15	0.068	2.111	0.36	0.2
T4	2788.25	0.035	0.15	0.047	1.754	0.44	0.2
T5	1061.57	0.035	0.15	0.107	2.633	0.11	0.2
T6	3409.57	0.035	0.15	0.036	1.526	0.62	0.2

Tabla 4.3-4 Determinación de los valores de K para cada cuenca en estudio [Fuente: Elaboración propia].

4.4 PRECIPITACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

Con el propósito de determinar las tormentas de diseño para diferentes periodos de retorno y debido a que no se cuentan con datos de tormentas, se realizó un análisis estadístico por medio del Método de Bloques Alternos, utilizando las Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (Curvas I-D-F) de las estaciones meteorológicas con influencia en la zona de estudio, proporcionadas por el

Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) de El Salvador. Con este método se logró obtener los hietogramas de diseño de las cuencas San Antonio y el Ángel en el cual se consideró un periodo de retorno de 50 años y así proceder con la modelación hidrológica.

Debido al método utilizado, sin importar la duración total de la lluvia, entre los primeros 10 a 20 minutos desde que inicia, se presentan las máximas cantidades de precipitación. Esto no afectará a la modelación porque el desarrollo del método de bloques alternos reordena las columnas de precipitación dejando las de más altas precipitación en la zona media.

4.4.1 Curvas I-D-F a utilizar

Las Curvas I-D-F (Intensidad-Duración-Frecuencia) son relaciones matemáticas, generalmente empíricas, entre la intensidad de una precipitación, su duración y la frecuencia con la que se observa. La frecuencia con la que se observa una determinada intensidad de lluvia se suele considerar como el periodo de retorno.

Para la modelación hidrológica se cuenta con Curvas I-D-F de las siguientes estaciones climatológicas:

Estación	Índice	Latitud	Longitud	Elevación (msnm)
El Boquerón	L-18	13° 44.1'	89° 16.9'	1800
Santa Tecla	L-8	13° 41.2'	89° 17.3'	965
Observatorio	S-5	13° 42.1'	89° 12.3'	700
Aeropuerto de Ilopango	S-10	13° 41.9'	89° 7.1'	615
San Salvador ITIC	S-4	13° 43.3'	89° 12.4'	710
Ingenio San Francisco Aguilares	C-8	13° 57.7'	89° 10.1'	285

Tabla 4.4-1 Estaciones pluviométricas cercanas a la zona de estudio [Fuente: MARN].

Previo a realizar los hietogramas de diseño, se debe seleccionar las estaciones que tienen influencia en el área de estudio. Para este fin, se utilizó el Método de los Polígonos de Thiessen en el software Qgis, como se muestra en la Figura 4-9:

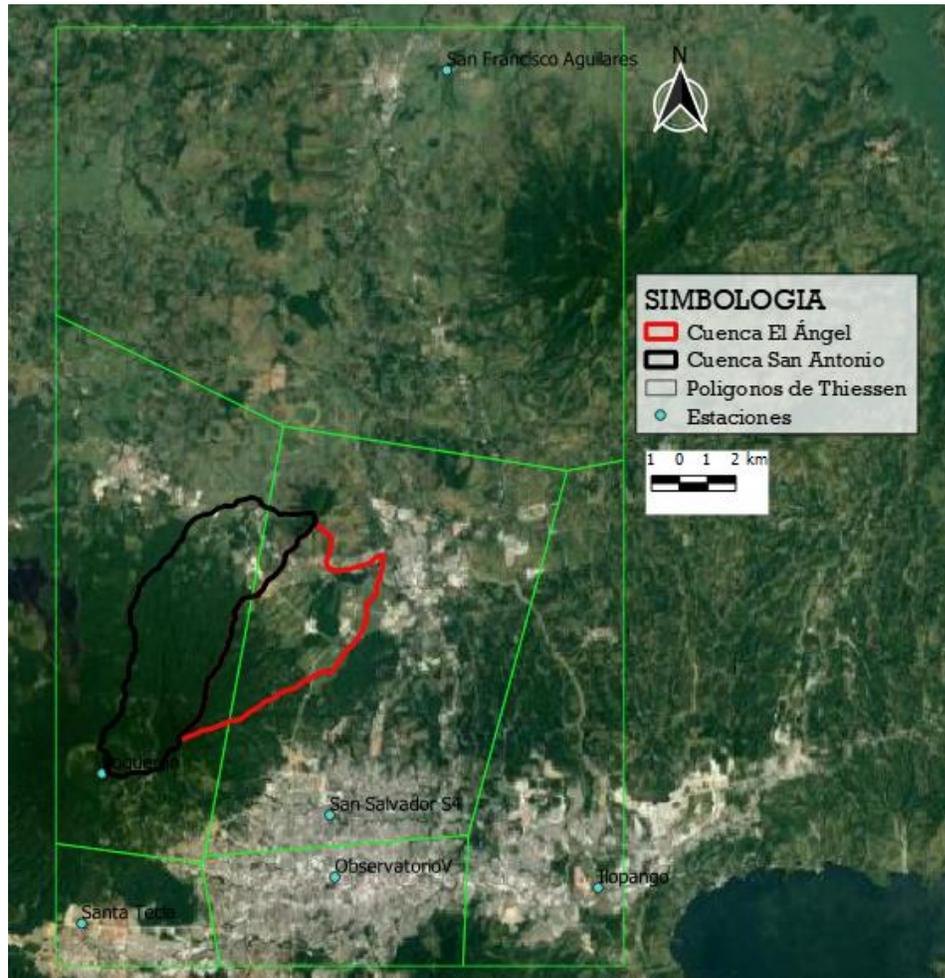


FIGURA 4-9 Polígonos de Thiessen en la zona de estudio [Fuente: Elaboración propia en software QGIS con datos proporcionados por el MARN]

Estación	Área Cuenca El Ángel (Km ²)	Área Cuenca San Antonio (Km ²)
El Boquerón	3.71	29.77
San Salvador ITIC	19.23	3.06

Tabla 4.4-2 Áreas de influencia de cada estación sobre cada cuenca en estudio [Fuente: Elaboración propia en software QGIS con datos proporcionados por el MARN].

En la Figura 4-9 se puede apreciar que las estaciones que tienen influencia en la zona de estudio son las Estación El Boquerón (L-18) y Estación San Salvador ITIC (S-4), cuyas Curvas I-D-F son las siguientes:

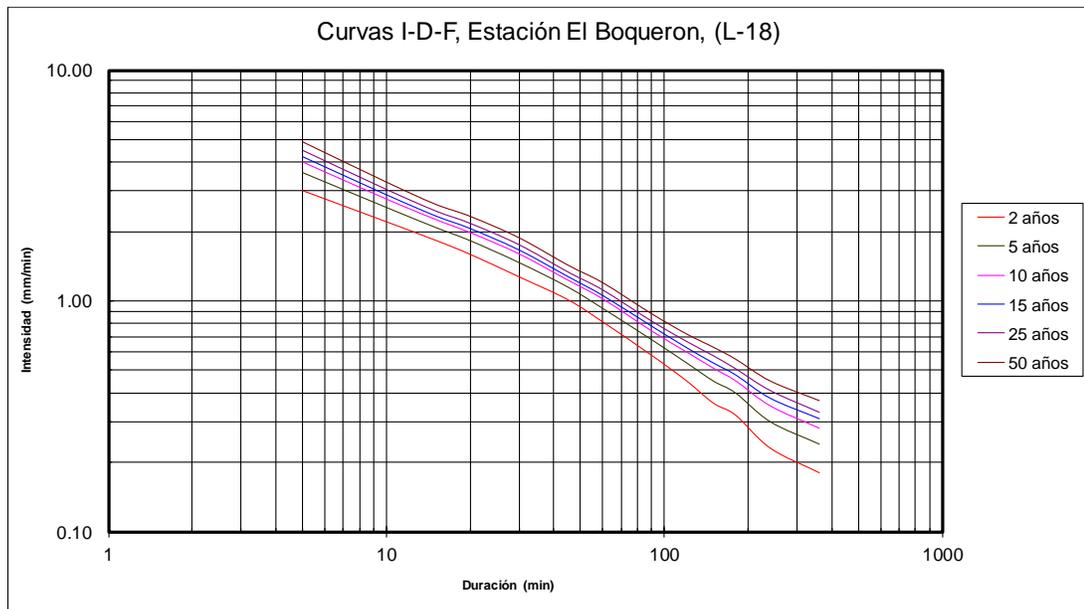


Gráfico 4-2 Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia de la Estación El Boquerón [Fuente: MARN].

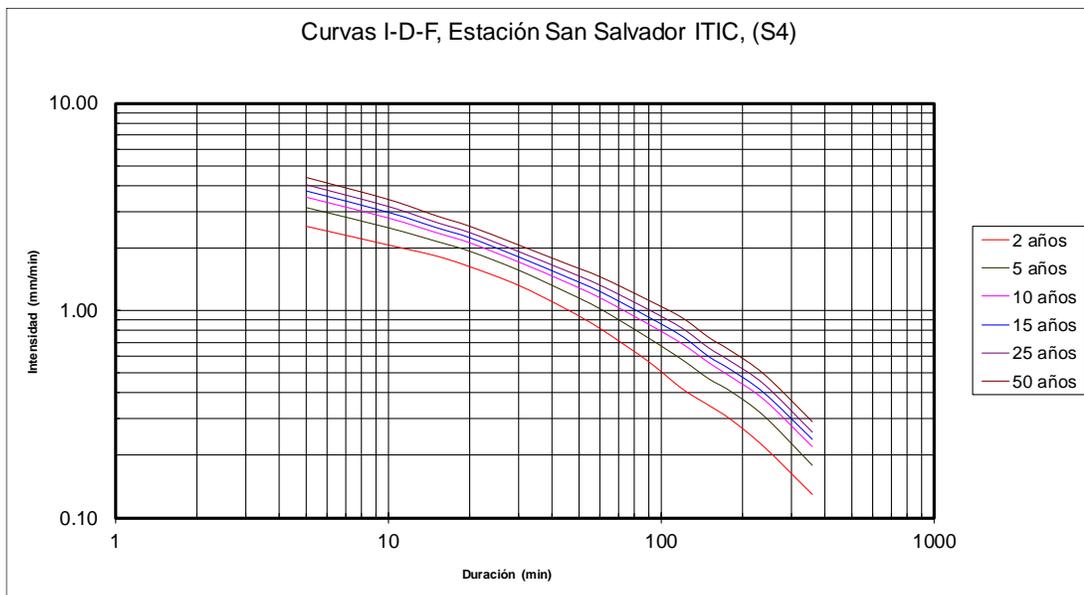


Gráfico 4-3 Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia de la Estación San Salvador ITIC [Fuente: MARN].

Una vez determinada las Curvas I-D-F a utilizar, se procede con el Método de los Bloques Alternos para obtener los hietogramas de diseño.

4.4.2 Método de los Bloques Alternos

En ocasiones no es suficiente con saber que, por ejemplo, en las 2 horas más lluviosas con un periodo de retorno de 50 años, la precipitación máxima es de 42 mm. Si no que se necesita conocer la evolución de esa precipitación de 42 mm en las 2 horas de lluvia. Para conocer esa evolución de la precipitación, se utilizará el método de bloques alternos.

El método de bloques alternos permite determinar un hietograma de diseño en base a una Curva I-D-F. El hietograma producido por este método especifica una altura de precipitación que ocurre en una serie “ n ” de intervalos sucesivos de duración “ t ” sobre una duración de tiempo “ T ”, de tal manera que $T = nt$.

El procedimiento para aplicar el método es el siguiente:

1. Seleccionar el tiempo de duración de la tormenta.
2. Dividir el tiempo de duración de la tormenta en intervalos de tiempo “ t ”.
3. Seleccionar el periodo de retorno del cual se obtendrá el hietograma.
4. Obtener de la Curva I-D-F, del periodo de retorno seleccionado en 3, los valores de precipitación para cada intervalo t , $2t$, $3t$... hasta la duración total de la tormenta.

5. Calcular la profundidad de precipitación caída en cada intervalo, multiplicando la intensidad por la duración del intervalo.
6. Restar los valores de precipitación sucesivos calculados en numeral 5.
7. Reordenar los valores de tal manera que la precipitación de mayor valor este en medio de la serie. A su derecha se coloca la segunda mayor precipitación registrada. A la izquierda, se coloca la tercera mayor y así sucesivamente hasta terminar con todos los valores.

Debido a que no se cuenta para esta investigación con datos de tormentas reales, se tomara como duración de la tormenta al tiempo de concentración de cada cuenca a utilizar.

Obtención de Hietogramas de Diseño

Antes de la obtención de los hietogramas, y debido a que influyen en el área de estudio dos estaciones, se deben conocer las intensidades ponderadas de cada duración y periodo de retorno. Estas intensidades se determinarán por el método de los polígonos de Thiessen. Se define la duración de la tormenta:

Para Cuenca del río El Ángel:

$$T_c = T = 86.47 \text{ minutos}$$

Para la Cuenca del río San Antonio:

$$T_c = T = 81.65 \text{ minutos}$$

Debido a que los tiempos de duración de las tormentas para cada cuenca no son números exactos, se divide el tiempo de duración de la tormenta en intervalos de 5 minutos para así tener una distribución más uniforme y completa de la tormenta.

Se describe el procedimiento para la obtención de las intensidades para cada intervalo de tiempo y periodo de retorno igual a 50 años para la estación El Boquerón.

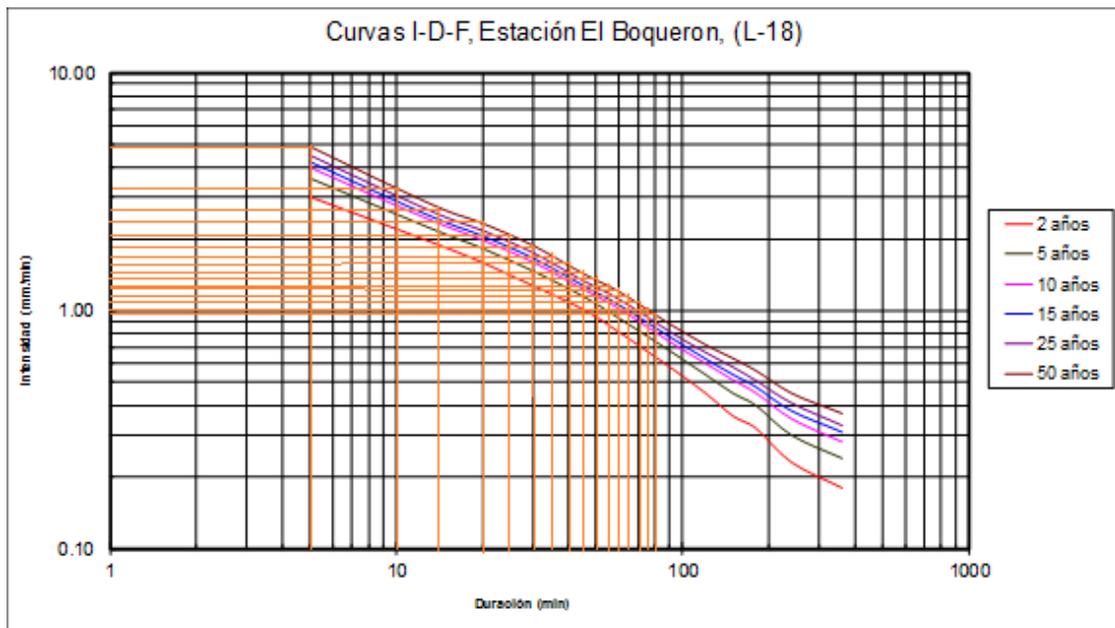


Gráfico 4-4 Determinación de las intensidades para cada duración y un periodo de retorno de 50 años de la Estación El Boquerón [Fuente: Elaboración propia con datos proporcionados por el MARN]

Se debe realizar el mismo procedimiento para cada estación y con los datos recolectados se obtienen las siguientes tablas resumen:

Para Cuenca del río El Ángel:

Se tiene la siguiente tabla 4.4-3 con los datos del grafico de la estación boquerón.

TR=50 Años- Estación Boquerón			
t (min)	I (mm/min)	Área (km²)	I*Área
5	4.9	3.710115	18.18
10	3.28		12.17
15	2.63		9.76
20	2.33		8.64
25	2.1		7.79
30	1.88		6.98
35	1.65		6.12
40	1.52		5.64
45	1.43		5.31
50	1.33		4.93
55	1.27		4.71
60	1.2		4.45
65	1.15		4.27
70	1.1		4.08
75	1.03		3.82
80	0.99		3.67
85	0.95	3.52	

Tabla 4.4-3 Intensidades y las áreas de influencia de la estación El Boquerón para el periodo de retorno de 50 años de la cuenca del río El Ángel [Fuente: Elaboración propia con datos proporcionados por el MARN].

Se tiene la siguiente Tabla (ver Tabla 4.4-4) con los datos del grafico de la estación San Salvador ITIC.

Tr=50 años-Estación San Salvador ITIC			
t (min)	I (mm/min)	Área (km²)	I*Área
5	4.38	19.2355	84.25
10	3.43		65.98
15	2.86		55.01
20	2.54		48.86
25	2.33		44.82
30	2.07		39.82
35	1.98		38.09
40	1.79		34.43
45	1.68		32.32
50	1.6		30.78
55	1.52		29.24
60	1.45		27.89
65	1.37		26.35
70	1.3		25.01
75	1.28		24.62
80	1.21		23.27
85	1.15	22.12	

Tabla 4.4-4 Intensidades y las áreas de influencia de la estación San Salvador ITIC para un periodo de retorno de 50 años de la cuenca del río El Ángel [Fuente: Elaboración propia con datos proporcionados por el MARN].

Para la Cuenca del río San Antonio:

Se tiene la siguiente Tabla (ver Tabla 4.4-5) con los datos del grafico de la estación boquerón.

Tr=50 años-Estación Boquerón			
t (min)	I (mm/min)	Área (km²)	I*Área
5	4.9	29.776	145.9
10	3.28		97.67
15	2.63		78.31
20	2.33		69.38
25	2.1		62.53
30	1.88		55.98
35	1.65		49.13
40	1.52		45.26
45	1.43		42.58
50	1.33		39.6
55	1.27		37.82
60	1.2		35.73
65	1.15		34.24
70	1.1		32.75
75	1.03		30.67
80	0.99		29.48

Tabla 4.4-5 Intensidades y las áreas de influencia de la estación El Boquerón para un periodo de retorno de 50 años de la cuenca del río San Antonio [Fuente: Elaboración propia con datos proporcionados por el

MARN].

Se tiene la siguiente tabla 4.4-6 con los datos del grafico de la estación San Salvador ITIC.

Tr=50 años-Estación San Salvador ITIC			
t (min)	I (mm/min)	Área (km²)	I*Área
5	4.38	3.06608	13.43
10	3.43		10.52
15	2.86		8.77
20	2.54		7.79
25	2.33		7.14
30	2.07		6.35
35	1.98		6.07
40	1.79		5.49
45	1.68		5.15
50	1.6		4.91
55	1.52		4.66
60	1.45		4.45
65	1.37		4.2
70	1.3		3.99
75	1.28		3.92
80	1.21		3.71

Tabla 4.4-6 Intensidades y las áreas de influencia de la estación San Salvador ITIC para un periodo de retorno de 50 años de la cuenca del río San Antonio [Fuente: Elaboración propia con datos proporcionados por el MARN].

Una vez obtenidas las intensidades por cada intervalo de tiempo, se multiplican por el área de influencia de cada estación para así obtener la intensidad ponderada para cada cuenca e intervalo de tiempo.

Por ejemplo, para la cuenca del río El Ángel, estación El Boquerón, periodo de retorno de 50 años y una duración de 5 minutos, se tiene una intensidad de 4.9 mm/min (ver Tabla 4.4-5) y para la misma cuenca e igual periodo de retorno y duración, pero en la estación San Salvador ITIC se tiene una intensidad de 4.38 mm/min (ver Tabla 4.4-6). Luego, cada intensidad se multiplica por su respectiva área de influencia (Ver Tabla 4.4-5) y se obtiene la intensidad ponderada de la cuenca se hace lo siguiente:

$$I_{ponderada} = \frac{I_{EBoqueron}A_{EBoqueron} + I_{ESanSalvadorITIC}A_{ESanSalvadorITIC}}{A_c}$$

$$I_{ponderada} = \frac{4.9 * 3.71 + 4.38 * 19.23}{24.94}$$

$$I_{ponderada} = 4.46 \text{ mm/min}$$

Se efectúa el mismo cálculo para cada par de valores de precipitación encontrados y luego se multiplica este dato por el intervalo de tiempo en que cae esta intensidad. Para la intensidad de 2.63 mm/min encontrada anteriormente, que correspondía al intervalo de tiempo de 5 minutos se tiene la siguiente precipitación:

$$P = (4.46 \text{ mm/min}) * 5 \text{ min} = 22.32 \text{ mm}$$

Se realiza el mismo cálculo para cada intensidad ponderada encontrada y luego se encuentra la altura de precipitación de cada columna del hietograma de la siguiente manera:

$$\Delta P = P_2 - P_1 = 34.07 \text{ mm} - 22.32 \text{ mm}$$

$$\Delta P = 11.74 \text{ mm}$$

Es necesario reordenar los valores de tal manera que, la precipitación de mayor valor este en el centro de la serie, y a la derecha se coloca la segunda mayor precipitación registrada y a la izquierda, se coloca la tercera mayor y así sucesivamente hasta terminar de distribuir todos los valores.

Lo anterior se resume en las siguientes tablas (ver Tabla 4.4-7 y 4.4-8):

Para Cuenca del río El Ángel:

Tr =50 años			
t (min)	I (mm/min)	P (mm)	ΔP (mm)
5	4.47	22.33	22.33
10	3.41	34.07	11.74
15	2.82	42.35	8.29
20	2.51	50.13	7.78
25	2.29	57.33	7.2
30	2.04	61.19	3.86
35	1.93	67.45	6.26
40	1.75	69.87	2.42
45	1.64	73.8	3.93
50	1.56	77.84	4.04
55	1.48	81.4	3.56
60	1.41	84.6	3.2
65	1.33	86.76	2.16
70	1.27	88.76	2
75	1.24	92.99	4.23
80	1.17	93.98	0.99
85	1.12	95.02	1.05

Tabla 4.4-7 Alturas de precipitación para un periodo de retorno de 50 años de la cuenca del río El Ángel

[Fuente: Elaboración propia con datos proporcionados por el MARN].

Para Cuenca del río San Antonio:

Tr=50 años			
t (min)	I (mm/min)	P (mm)	ΔP (mm)
5	4.85	24.26	24.26
10	3.29	32.94	8.68
15	2.65	39.77	6.83
20	2.35	47	7.22
25	2.12	53.04	6.05
30	1.9	56.94	3.9
35	1.68	58.83	1.9
40	1.55	61.81	2.98
45	1.45	65.4	3.59
50	1.36	67.76	2.36
55	1.29	71.14	3.37
60	1.22	73.41	2.27
65	1.17	76.09	2.68
70	1.12	78.31	2.22
75	1.05	79.01	0.69
80	1.01	80.85	1.84

Tabla 4.4-8 Alturas de precipitación para un periodo de retorno de 50 años de la cuenca del río San

Antonio [Fuente: Elaboración propia con datos proporcionados por el MARN].

Finalmente se tienen los hietogramas de diseño para cada cuenca por el método de Bloques Alternos:

Para Cuenca del río El Ángel:

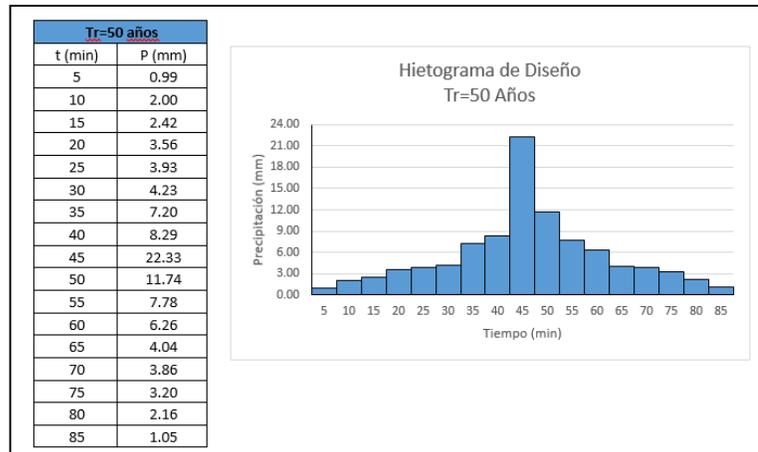


FIGURA 4-10 Hietograma de diseño para un periodo de retorno de 50 años de la cuenca del río El Ángel

[Fuente: Elaboración propia con datos proporcionados por el MARN].

Para Cuenca del río San Antonio

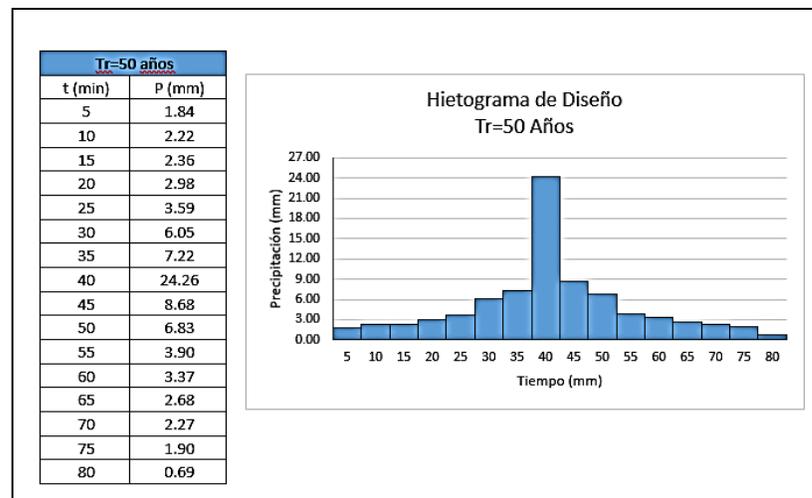


FIGURA 4-11 Hietogramas de diseño para un periodo de retorno de 50 años de la cuenca del río San

Antonio [Fuente: Elaboración propia con datos proporcionados por el MARN].

4.5 MODELO DE LA CUENCA SAN ANTONIO EN EL HEC-HMS

Debido a que la modelación es la misma para cada cuenca, solo se presenta la modelación de la cuenca del río San Antonio. Al final se presentaran los resultados para ambas cuencas.

En la siguiente figura (Figura 4-12) se crea un nuevo proyecto y se guarda con el nombre “C_SAN ANTONIO” que corresponde a la cuenca del rio San Antonio.

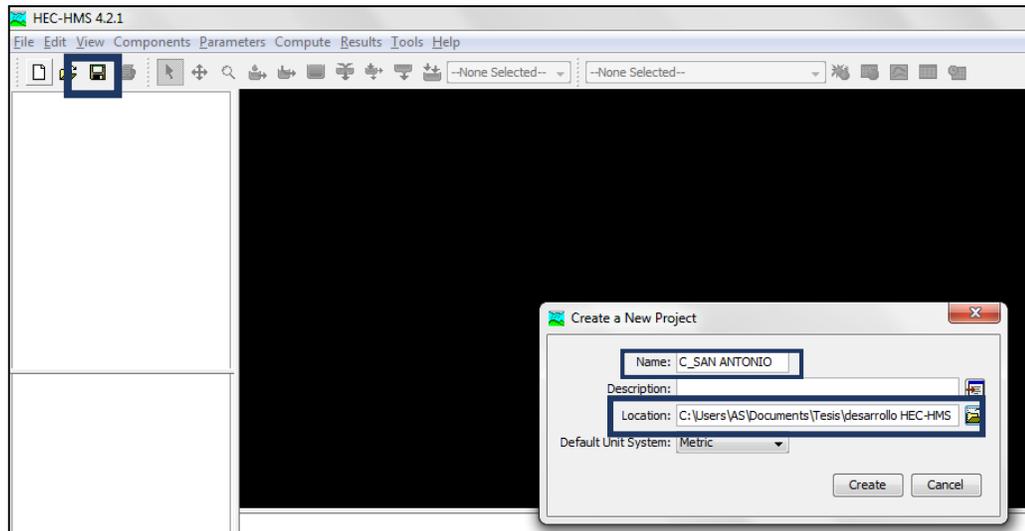


FIGURA 4-12 Creación del proyecto “C_SAN ANTONIO”

[Fuente: Elaboración propia en software HEC-HMS].

Después se debe crear una carpeta que contendrá un modelo de la cuenca, es decir la representación de las subcuencas y ríos. En la pestaña “Components” de la barra de herramientas, se selecciona la opción “Basin Model Manager” como se muestra (Figura 4-13).

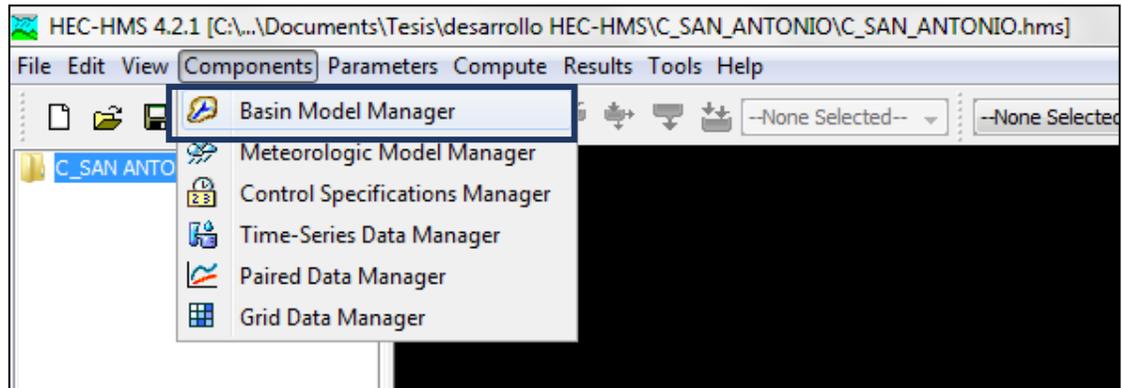


FIGURA 4-13 Comando de la representación del modelo de la cuenca

[Fuente: Elaboración propia en software HEC-HMS].

En la ventana desplegada de Basin Model Manager se selecciona “New” para crear el modelo de la cuenca con el nombre de “San Antonio “(Figura 4-14).

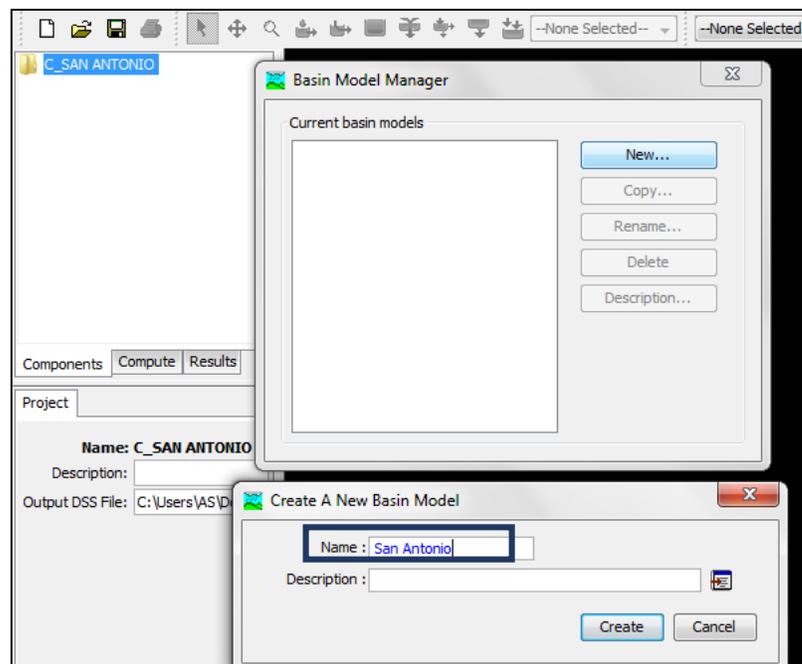


FIGURA 4-14 Creación de nuevo modelo con el nombre de cuenca "San Antonio"

[Fuente: Elaboración propia en software HEC-HMS].

Una vez creado el modelo se debe añadir los shape de las sub-cuencas y rios de la cuenca San Antonio que fueron elaboradas anteriormente en el software Qgis. En comando “View” (ubicado en la barra de herramientas) y después clic en “Background Maps” como se muestra en la (ver Figura 4-15).

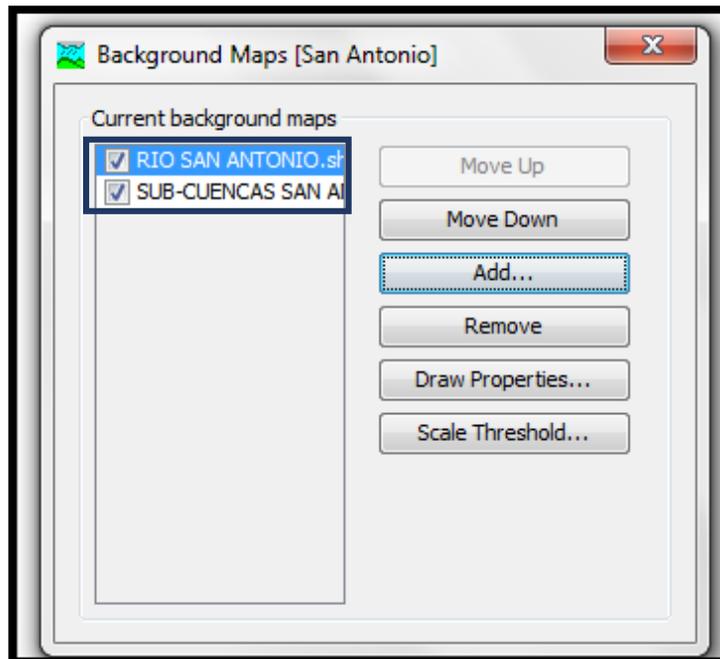


FIGURA 4-15 Shape de ríos y sub-cuencas elaborados en Qgis añadidos al HEC-HMS [Fuente: Elaboración propia en software HEC-HMS].

En la siguiente imagen (Figura 4-16) se muestra el modelo de la cuenca del río San Antonio, que sirve como representación y guía para el modelado hidrológico.

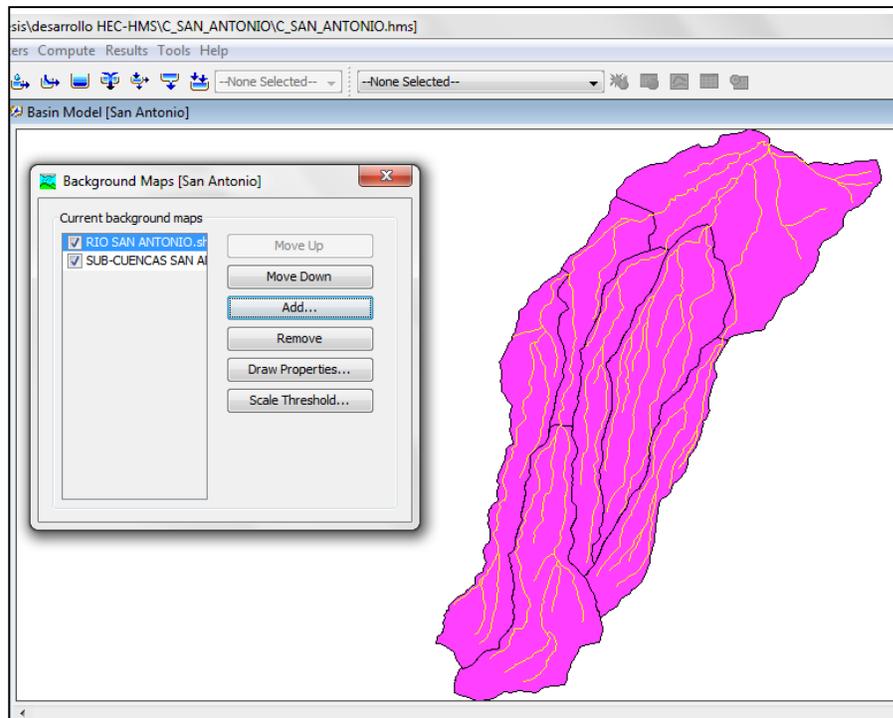
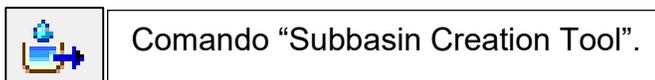


FIGURA 4-16 Representación del modelo de la cuenca San Antonio

[Fuente: Elaboración propia en software HEC-HMS].

Se procede a la creación de subcuencas del Rio San Antonio (Figura 4-17) en el HEC-HMS con el comando “Subbasin Creation Tool” para poder ingresar los datos de cada una de las subcuencas.



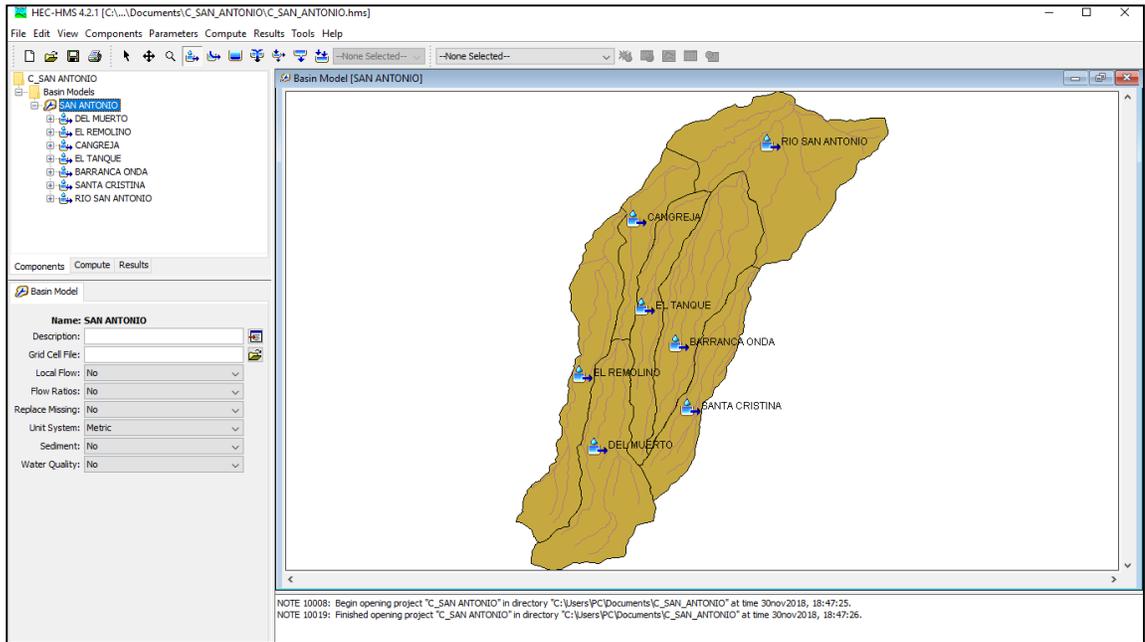


FIGURA 4-17 Creación de sub-cuencas del Rio San Antonio en HEC-HMS

[Fuente: Elaboración propia en software HEC-HMS].

Se crean los tramos de ríos que son los que conectarán subcuencas entre ellos hasta llegar al punto de interés. La creación de estos tramos se hace mediante el comando “Reach Creation Tool” y es aquí donde se utilizará el método de Muskingum.



comando “Reach Creation Tool”

En la Figura 4-18 se muestran un total de 6 tramos de ríos de la cuenca San Antonio.

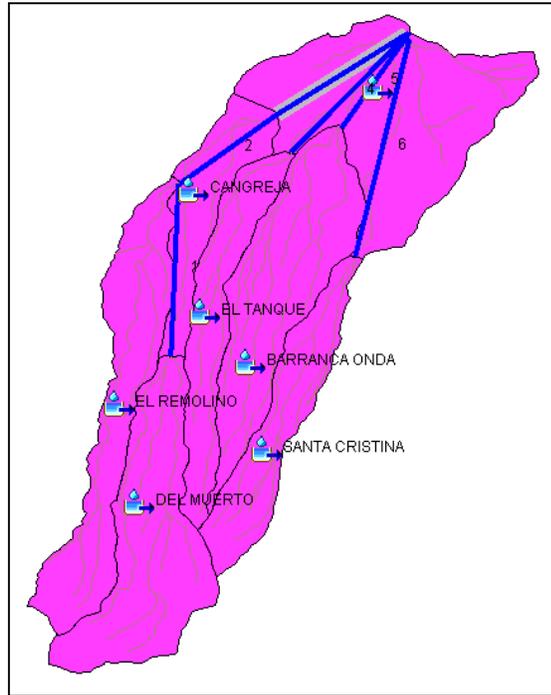


FIGURA 4-18 Tramos de ríos para el método de Muskingum en cuenca San Antonio

[Fuente: Elaboración propia en software HEC-HMS].

Por consiguiente, con el comando “Junction Creation Tool” se conectan las subcuencas con los tramos de ríos entre subcuencas (considerados por Muskingum). Estos conectores se ubicaron en el efluente de cada subcuenca como representación y punto de conexión, así como se muestran en la Figura 4-18.

El comando "Sink Creation Tool" sirve como punto de interés de toda la cuenca del rio San Antonio donde en este símbolo estarán registrados los resultados una vez simulado el análisis en el HEC-HMS.

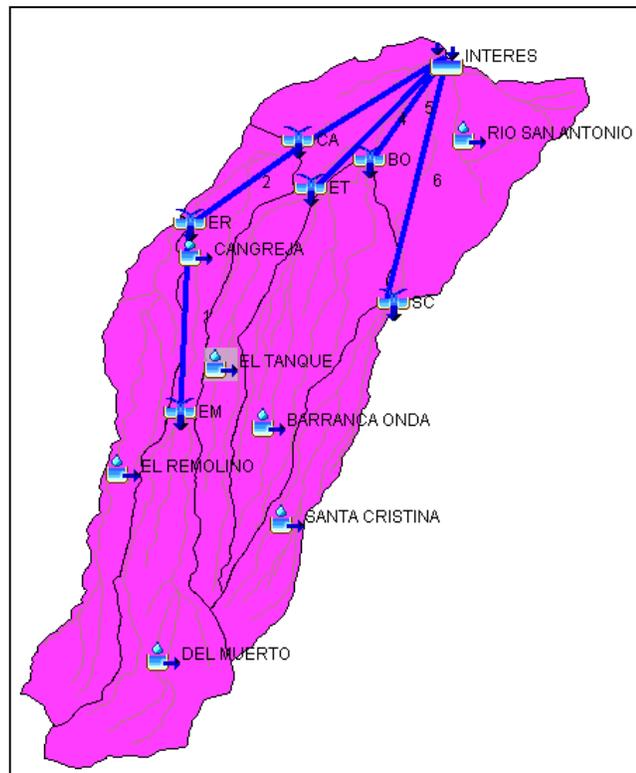


FIGURA 4-19 Conectores de subcuencas y efluente del Rio San Antonio

[Fuente: Elaboración propia en software HEC-HMS].

Aparentemente en la Figura 4-19 algunos elementos están conectados, pero esto no es así. Como se observa en la Figura 4-20 no están conectados estos elementos y deben estar conectados para no tener ningún error cuando se haga la simulación.

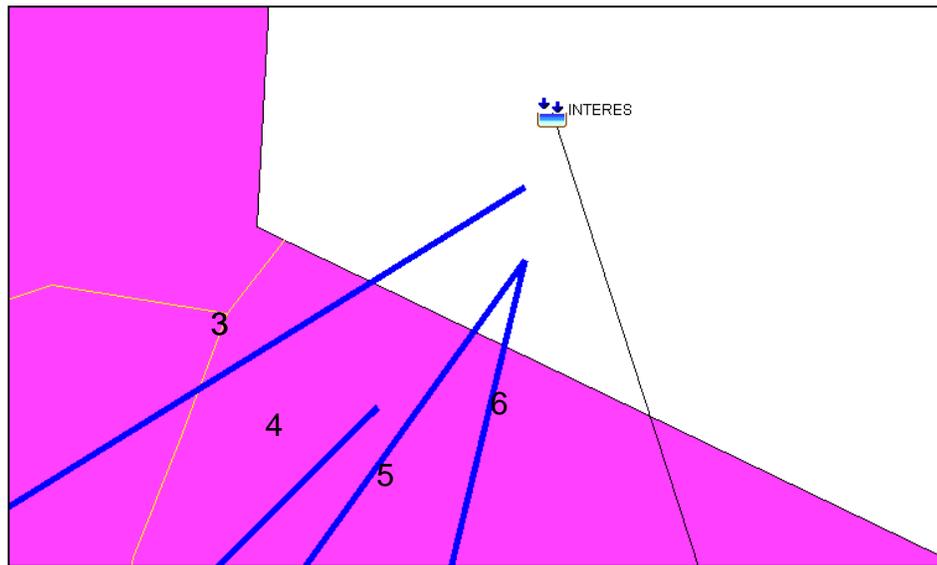


FIGURA 4-20 Tramos de río desconectados con el punto de interés de la cuenca San Antonio en software HEC-HMS [Fuente: Elaboración propia en software HEC-HMS].

En el panel izquierdo del software HEC-HMS tenemos los elementos para el análisis hidrológico. En la Figura 4-21 se muestra como conectar los elementos. Por ejemplo, se selecciona el tramo 3 después, se busca a Reach y Downstream (aguas abajo) se conecta con el elemento de INTERES.

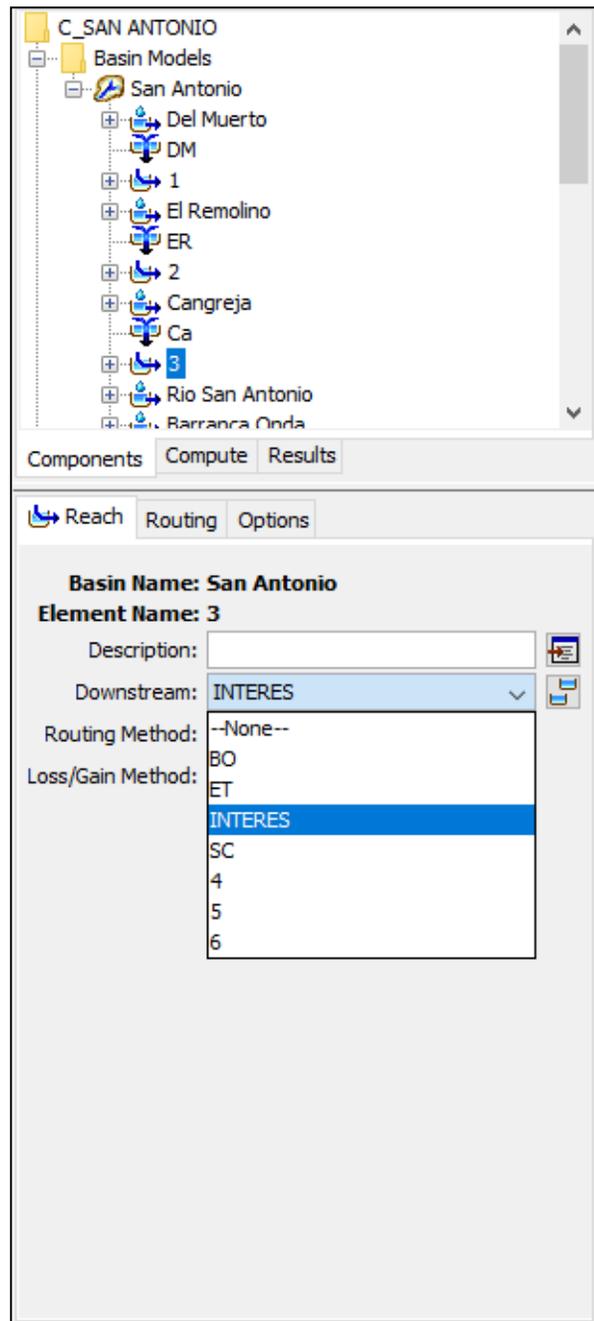


FIGURA 4-21 Ejemplo del panel para la unión de elementos en el HEC-HMS

[Fuente: Elaboración propia en software HEC-HMS].

En la Figura 4-22 se puede apreciar la ramificación de los elementos que utilizará el software HEC-HMS, cabe mencionar que se tienen que ingresar los datos en cada uno de los diferentes elementos y estos datos se encuentran en la Tabla 4.3-4.

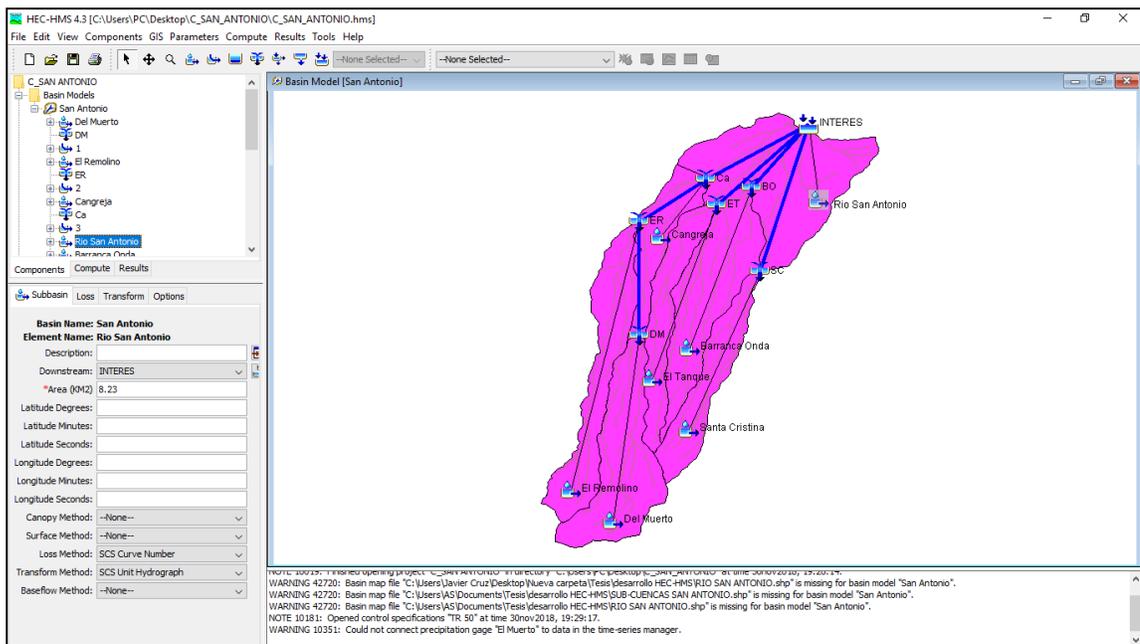


FIGURA 4-22 Ramificación del modelo de la cuenca San Antonio

[Fuente: Elaboración propia en software HEC-HMS].

4.6 INTRODUCCIÓN DE DATOS AL SOFTWARE HEC-HMS

4.6.1 Introducción de información a Subcuencas

La información de la sección 4.2 y 4.3 ha sido obtenida del software Qgis donde se han analizado las cuencas del área de estudio. Posteriormente se tienen que ingresar estos datos en el software HEC-HMS para desarrollar la simulación hidrológica.

En la Figura 4-23 se muestra el panel de la subcuenca “El Remolino” en la pestaña de “subbasin” se utilizará el método del número de curva.

The screenshot displays the 'Subbasin' configuration window in HEC-HMS. The window has tabs for 'Subbasin', 'Loss', 'Transform', and 'Options'. The 'Subbasin' tab is active, showing the following fields:

- Basin Name:** San Antonio
- Element Name:** El Remolino
- Description:** (empty text box)
- Downstream:** ER
- *Area (KM2):** 4.684
- Latitude Degrees:** (empty text box)
- Latitude Minutes:** (empty text box)
- Latitude Seconds:** (empty text box)
- Longitude Degrees:** (empty text box)
- Longitude Minutes:** (empty text box)
- Longitude Seconds:** (empty text box)
- Canopy Method:** --None--
- Surface Method:** --None--
- Loss Method:** SCS Curve Number
- Transform Method:** SCS Unit Hydrograph
- Baseflow Method:** --None--

Red boxes highlight the 'Downstream' and '*Area (KM2)' fields, and another red box highlights the 'Loss Method' and 'Transform Method' dropdown menus.

FIGURA 4-23 Introducción de datos de subcuenca "El Remolino"

[Fuente: Elaboración propia en el software HEC-HMS].

En la Figura 4-24 en la pestaña “Loss” se ingresa el valor del numero de curva y la infiltración calculado en el Qgis.

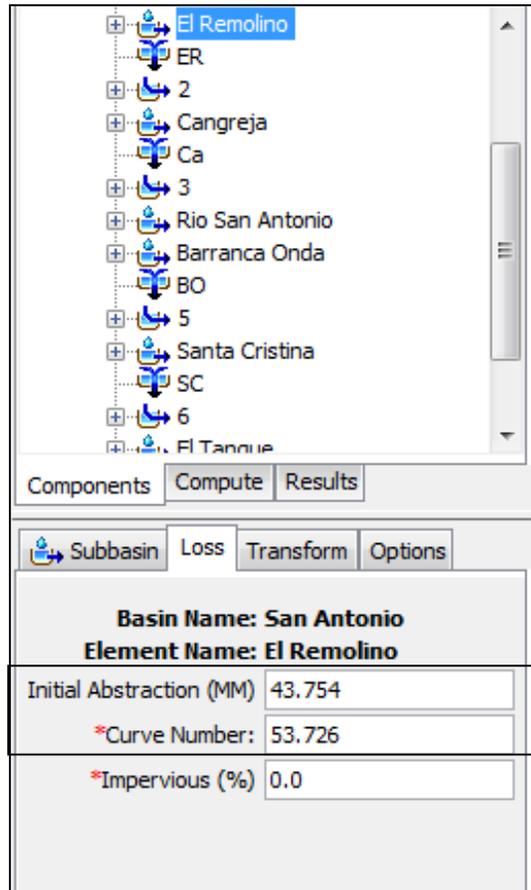


FIGURA 4-24 Datos de CN en subcuenca “El Remolino”

[Fuente: Elaboración propia en software HEC-HMS].

En Figura 4-25 se muestra el tiempo de retardo de la subcuenca El Remolino perteneciente a la cuenca San Antonio.

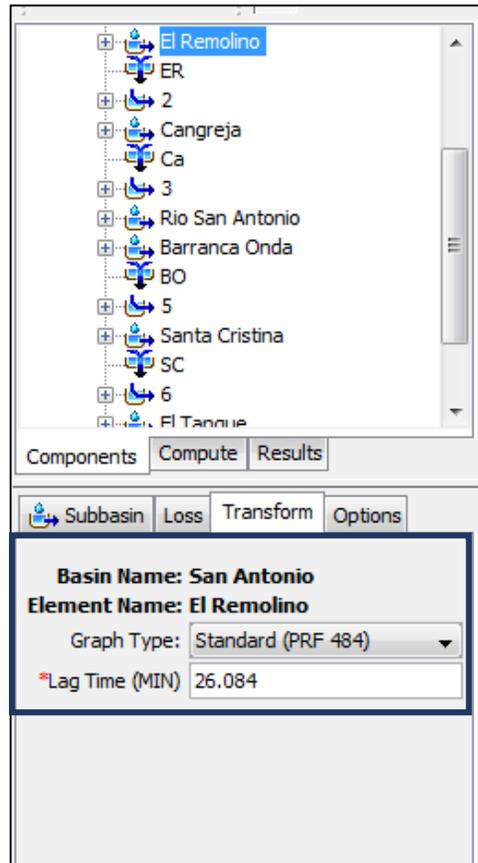


FIGURA 4-25 Tiempo de retraso en subcuenca "El remolino"

[Fuente: Elaboración propia en software HEC-HMS].

4.6.2 Introducción de información a tramos del Río (Método Muskingum)

Se debe establecer el método a utilizar para los tramos del río. En el estudio actual es el método de Muskingum, así como se observa en la Figura 4-26. Los valores de los tramos de ríos de la Tabla 4.3-4 de la cuenca se observa en la Figura 4-27.

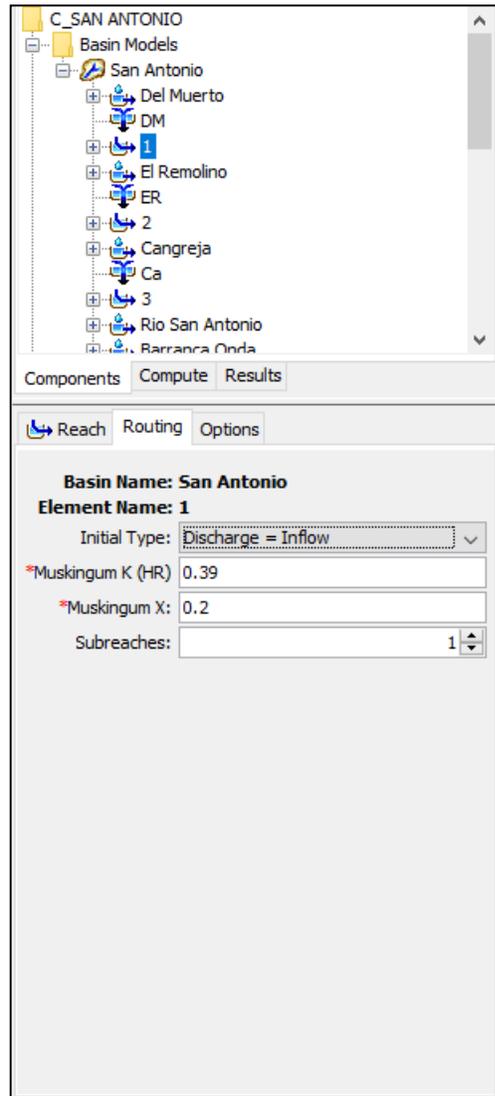


FIGURA 4-27 Valores del tramo un de "X" y "K" [Fuente: Elaboración propia en software HEC-HMS].

4.6.3 Precipitación en software HEC-HMS

Para la precipitación a utilizar en el programa, se utilizará en el método de bloques alternos descrito en la Sección 4.3, donde este método hace un hietograma de diseño a partir de las curvas I-D-F de las estaciones cercanas al área de estudio. Es de suma importancia saber que este hietograma se hizo de

forma académica, pero en la realidad es necesario utilizar hietogramas a partir de datos de precipitación de tormentas reales.

En la pestaña “Components” en la barra de herramientas del HEC-HMS y después a “Time-Series Data Manager” y se crea una carpeta para los hietogramas. La serie de tiempo será la misma para cada una de las subcuencas del rio San Antonio (Figura 4-28).

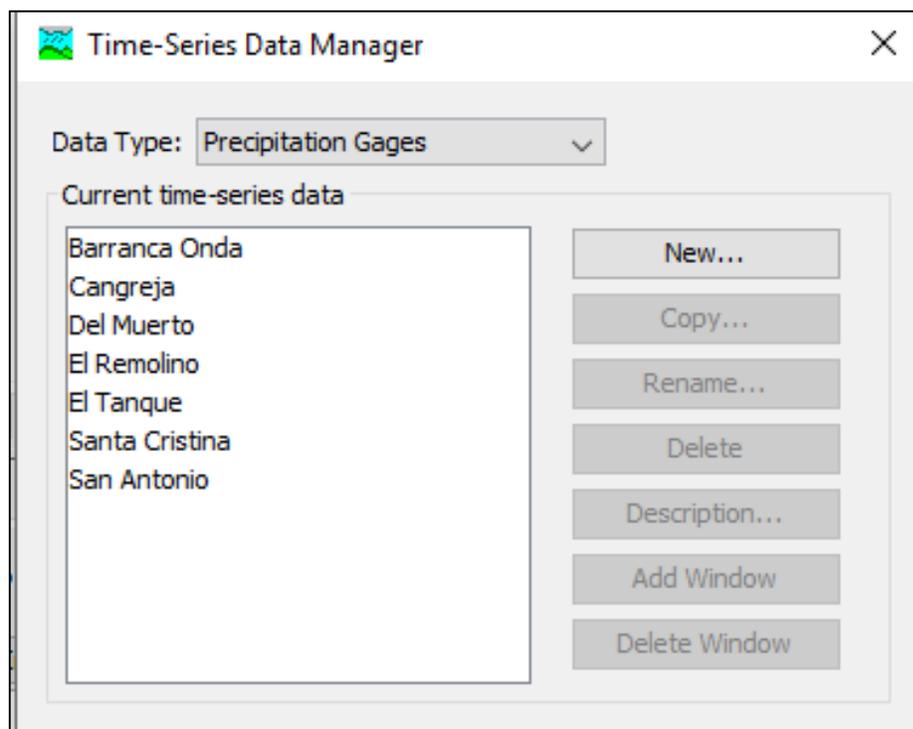


FIGURA 4-28 Carpeta de precipitación de cada subcuencas del rio San Antonio

[Fuente: Elaboración propia en software HEC-HMS].

Una vez teniendo la carpeta de precipitación por cada subcuencas, seleccionar cada una de las subcuencas dando clic en la pestaña “Time-Series Gage” y el

intervalo de tiempo de los hidrogramas serán de 5 min. La Figura 4-29 muestra el ejemplo de la subcuenca Del Muerto.

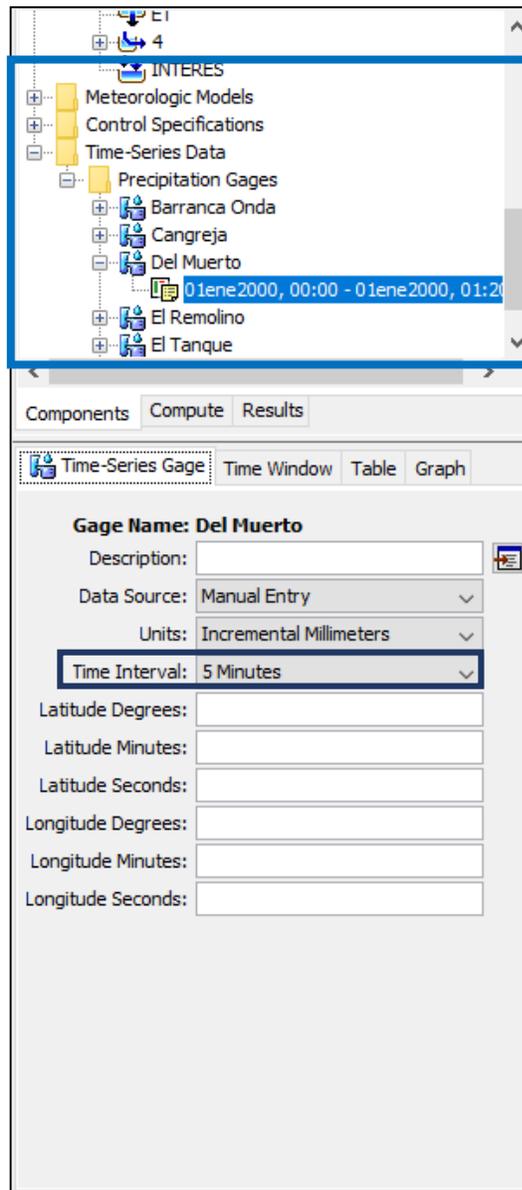


FIGURA 4-29 Carpeta de precipitación de subcuencas
[Fuente: Elaboración propia en software HEC-HMS].

Después en la siguiente pestaña “Time Window” se asigna un tiempo de inicio y final que, para la cuenca San Antonio, se tiene un tiempo de concentración de 80 min aproximadamente y al convertirlas a horas tiene una hora con 20 min de duración. La Figura 4-30 muestra el ejemplo de la subcuenca Del Muerto.

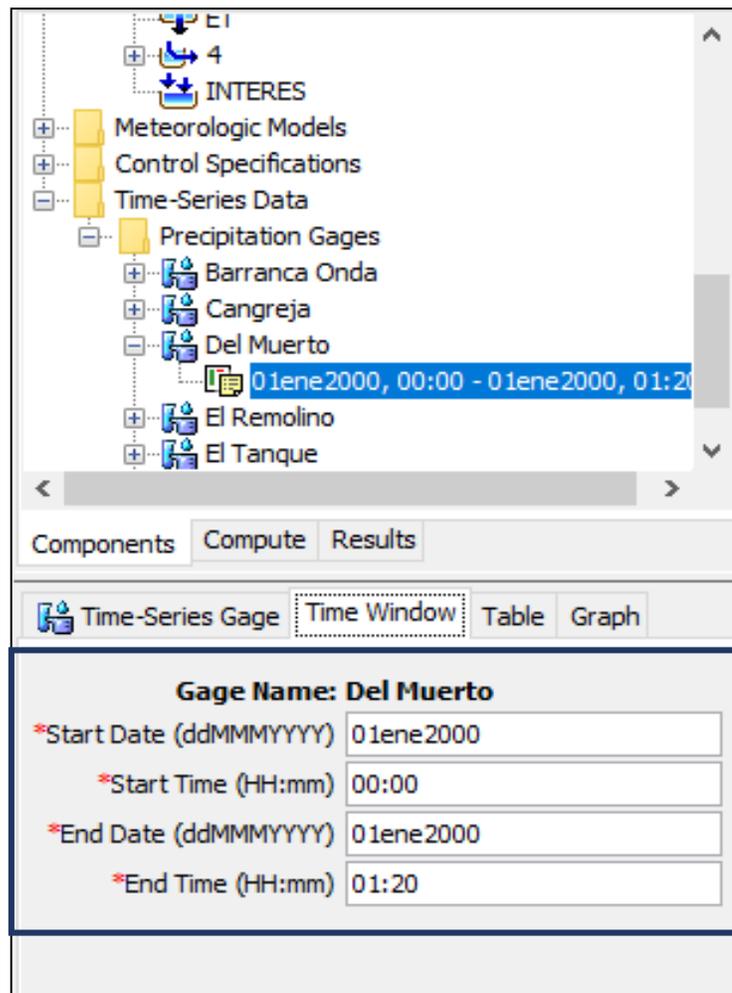


FIGURA 4-30 Duración de la tormenta [Fuente: Elaboración propia en software HEC-HMS].

En la Figura 4-31, en la pestaña “Table” se introducen los datos del hietograma de diseño a cada 5 min que se tienen en la Tabla 4.4-5. Y por último en la Figura

4-32, se tiene el grafico que representa el hietograma de diseño que usara el HEC-HMS para su análisis hidrológico.

Time (ddMMYYYY, HH:mm)	Precipitation (MM)
01ene2000, 00:00	
01ene2000, 00:05	1.84
01ene2000, 00:10	2.22
01ene2000, 00:15	2.36
01ene2000, 00:20	2.98
01ene2000, 00:25	3.59
01ene2000, 00:30	6.05
01ene2000, 00:35	7.22
01ene2000, 00:40	24.26
01ene2000, 00:45	8.68
01ene2000, 00:50	6.83
01ene2000, 00:55	3.90
01ene2000, 01:00	3.37
01ene2000, 01:05	2.68
01ene2000, 01:10	2.27
01ene2000, 01:15	1.90
01ene2000, 01:20	0.69

FIGURA 4-31 Datos de intervalo de tiempo (min) vs. precipitación (mm) de cuenca San Antonio de

FIGURA 4-11 [Fuente: Elaboración propia en software HEC-HMS].

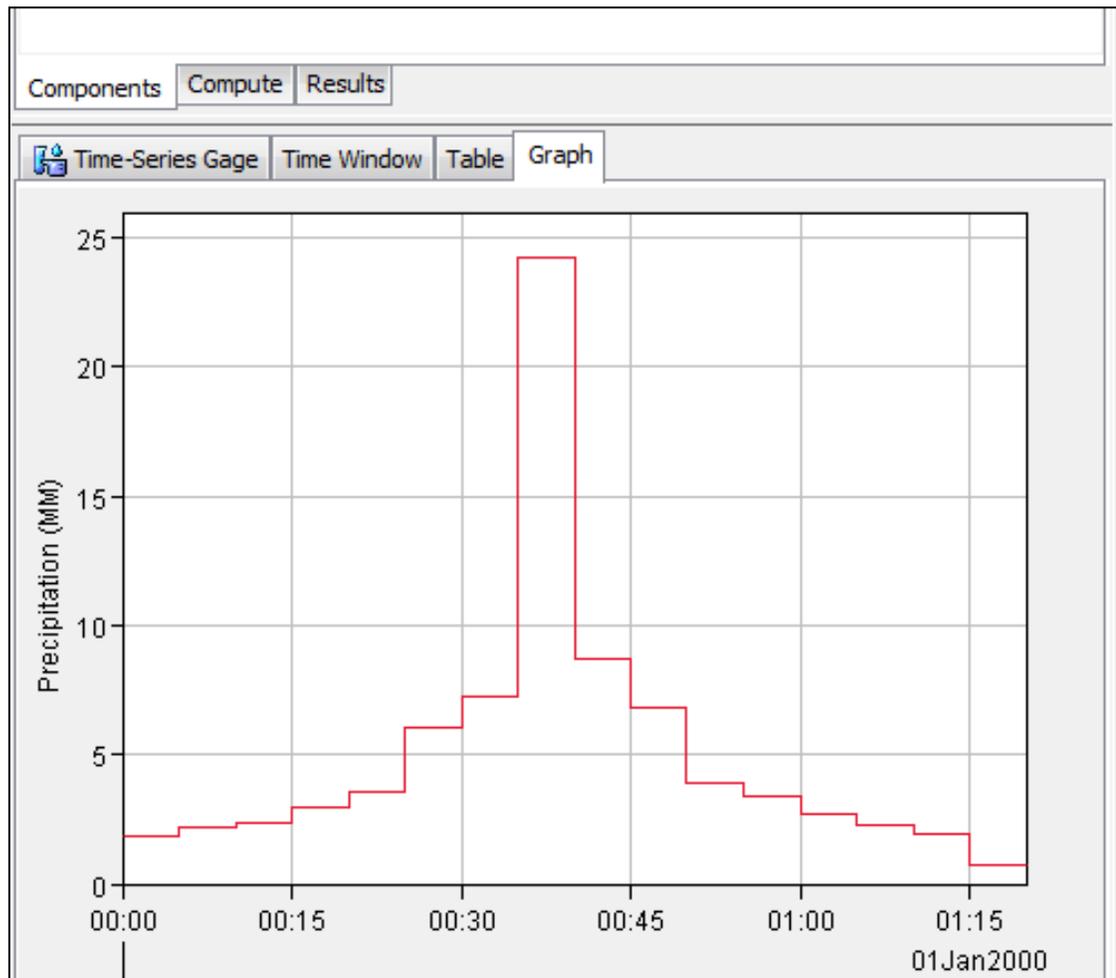


FIGURA 4-32 Hietograma de diseño de cuenca San Antonio en HEC-HMS

[Fuente: Elaboración propia en software HEC-HMS].

Se debe crear una carpeta de la especificación de control de la cuenca San Antonio. Estas especificaciones definen el tiempo de duración de cada simulación así como la duración de cada intervalo. En "Components" y después en "Control

specifications Manager” y lo creamos con el nombre “TR 50” (periodo de retorno de 50 años) que ayuda a controlar las simulación en el HEC-HMS.

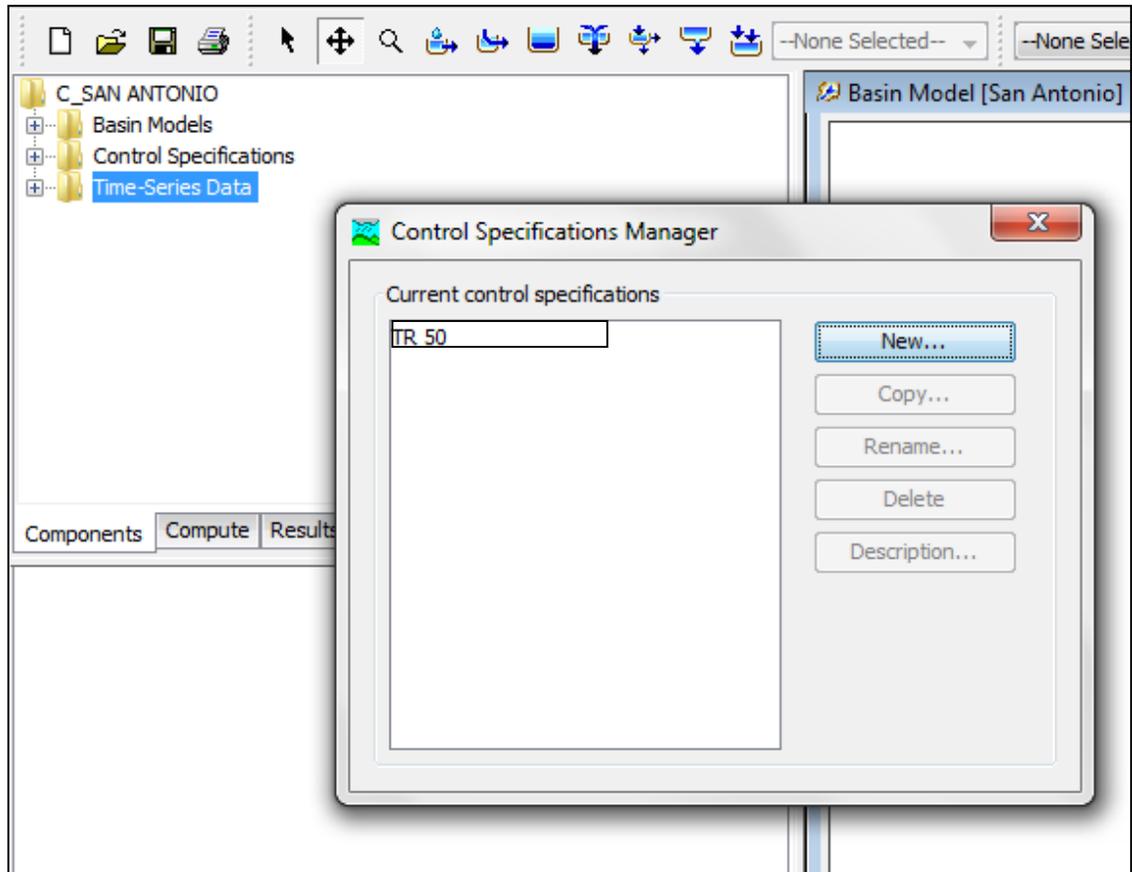


FIGURA 4-33 Especificación de control de cuenca San Antonio

[Fuente: Elaboración propia en software HEC-HMS].

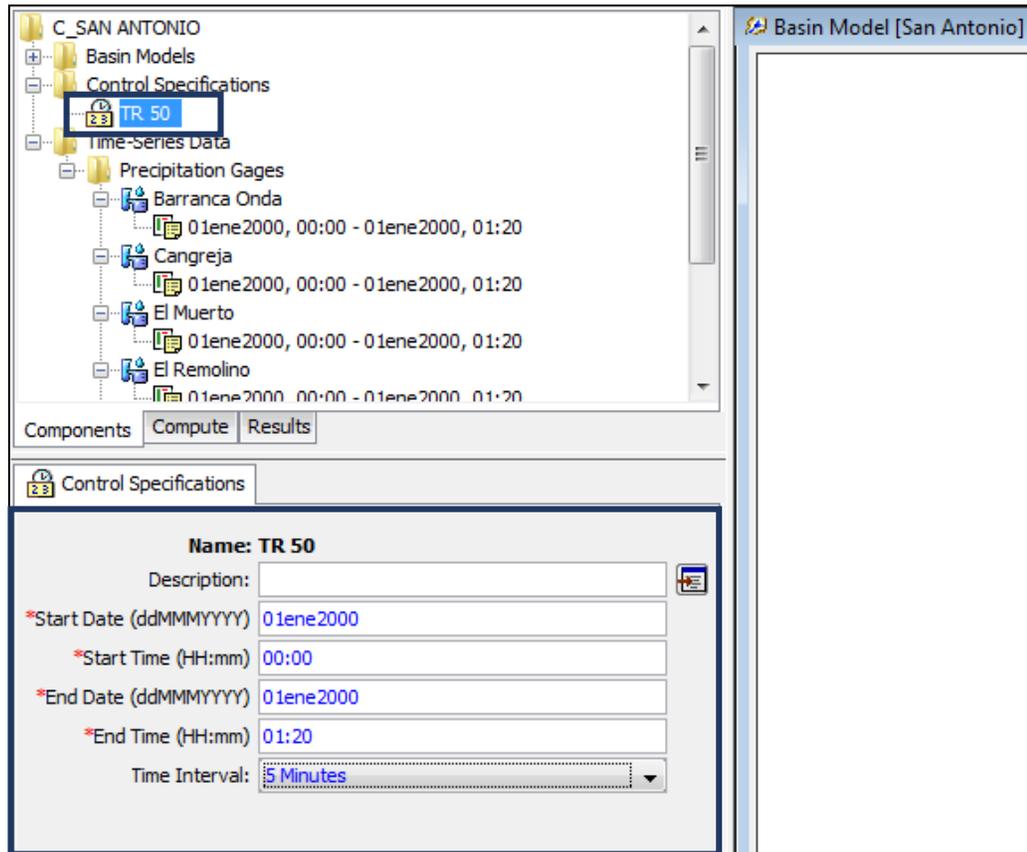


FIGURA 4-34 Información de control HEC-HMS [Fuente: Elaboración propia en software HEC-HMS].

En la Figura 4-34 se observa la información de control para el análisis hidrológico. En la Figura 4-35 se muestra como se crea el modelo meteorológico que sirve para el cálculo de la precipitación requerida en una subcuenca. En “Components” y después en “Meteorologic Model” y se le asigna el nombre de “Precipitación”.

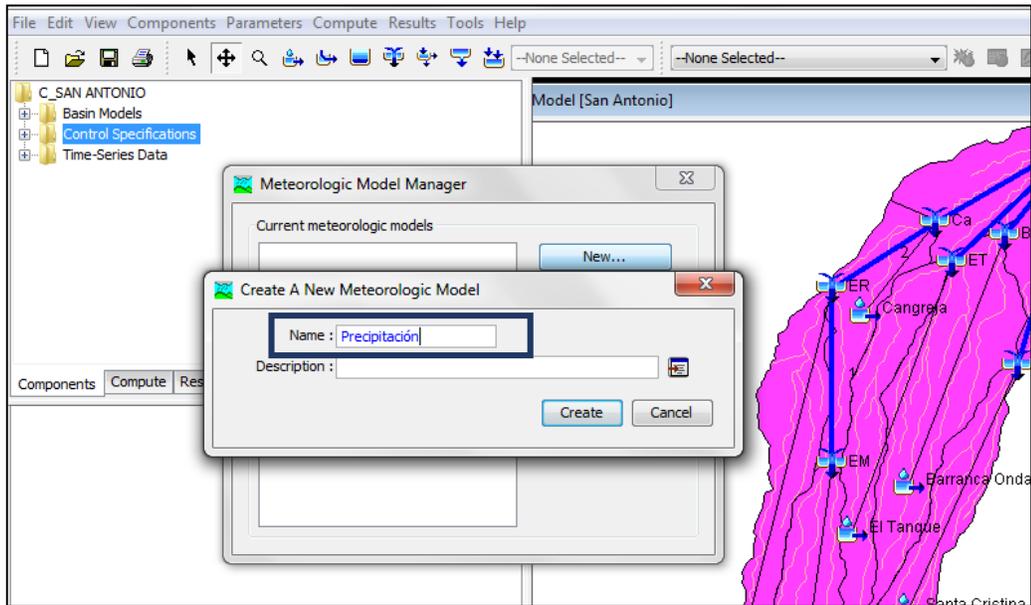


FIGURA 4-35 Creación del modelo meteorológico [Fuente: elaboración propia en software HEC-HMS].

En la Figura 4-36 se muestra el modelo de precipitación para ser incluido en las cuencas de estudio.

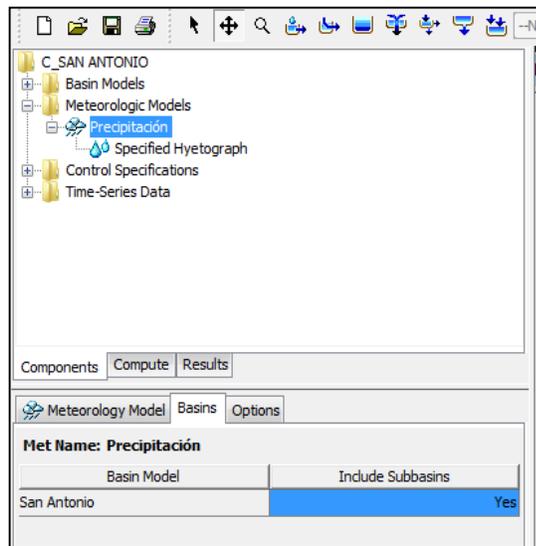


FIGURA 4-36 Inclusión de cuencas al modelo meteorológico [Fuente: Elaboración propia en software HEC-HMS].

Una vez creado el modelo meteorológico, se selecciona “Specified Hyetograph” para asociar cada una de las subcuencas con los hietogramas de diseño.

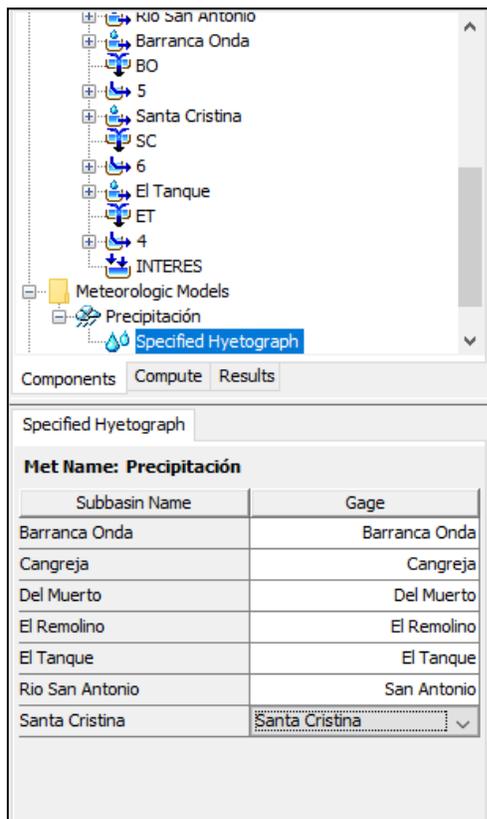


FIGURA 4-37 Hietograma en el modelo meteorológico

[Fuente: Elaboración propia en software HEC-HMS].

4.6.4 Simulación de Estudio Hidrologico en HEC-HMS

Introducidos los datos de entrada al modelo, se procede a correr la simulación, pero primero se debe de crear: Seleccionar en la barra de herramientas la pestaña “Compute”> “Créate Compute”> “Simulation Run”, se le asigna un nombre, en este caso “50 años”, luego en “Next”. Aparecerán una serie de

ventanas en donde se deben asignar los datos de entrada (Cuenca, modelo meteorológico y especificar la serie de tiempo) así como se muestra en la Figura 4-38.

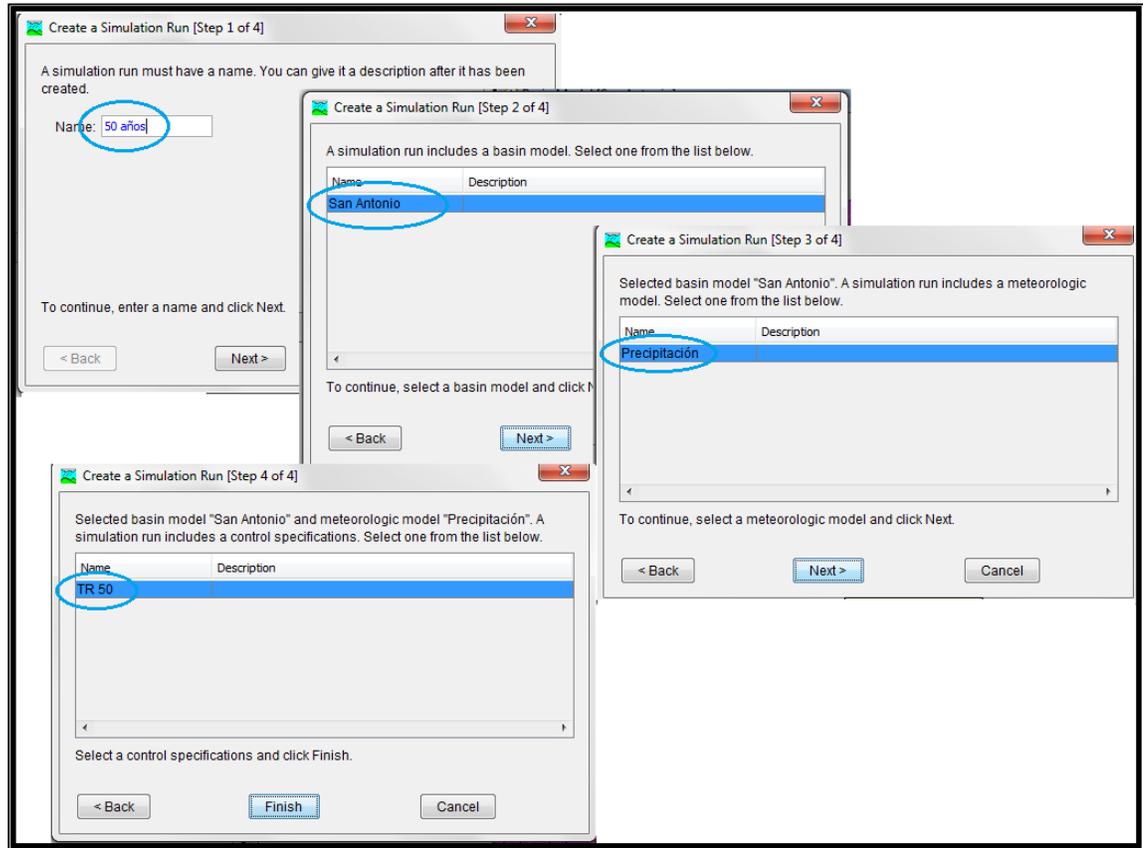


FIGURA 4-38 Creación de la simulación de la cuenca San Antonio

[Fuente: Elaboración propia en software HEC-HMS].

En la Figura 4-39 en el comando “compute current run” es donde corre el análisis hidrológico el software HEC-HMS.

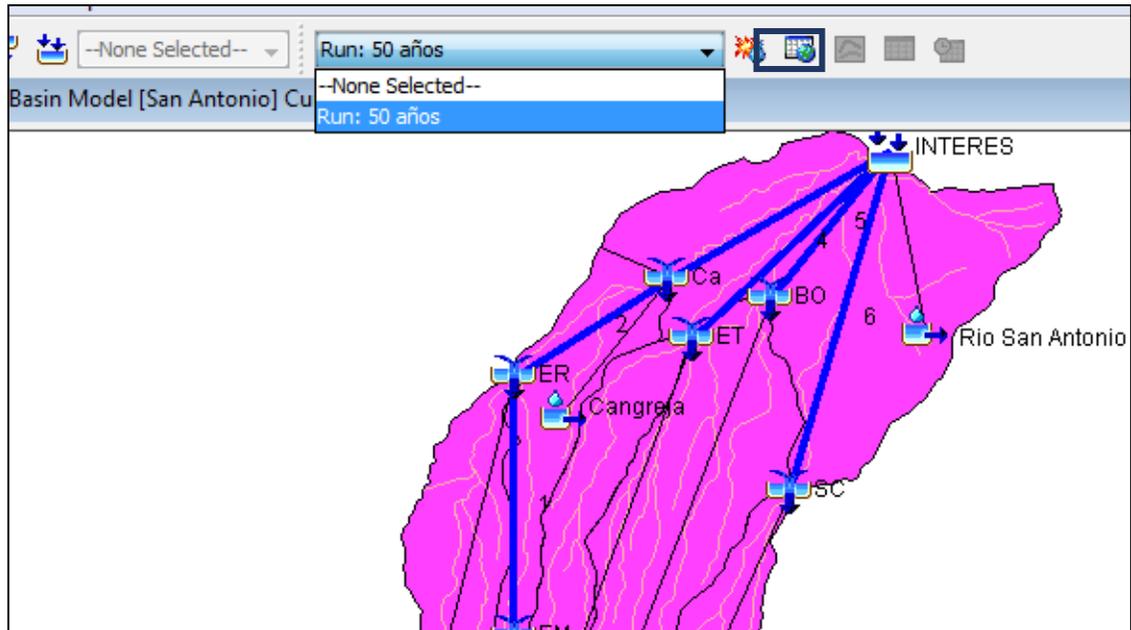


FIGURA 4-39 Simulación del análisis hidrológico [Fuente: Elaboración propia en software HEC-HMS].

En la Figura 4-40 se muestra que se ha completado la simulación y que no se encontró ningún error mientras se estaba corriendo la simulación.

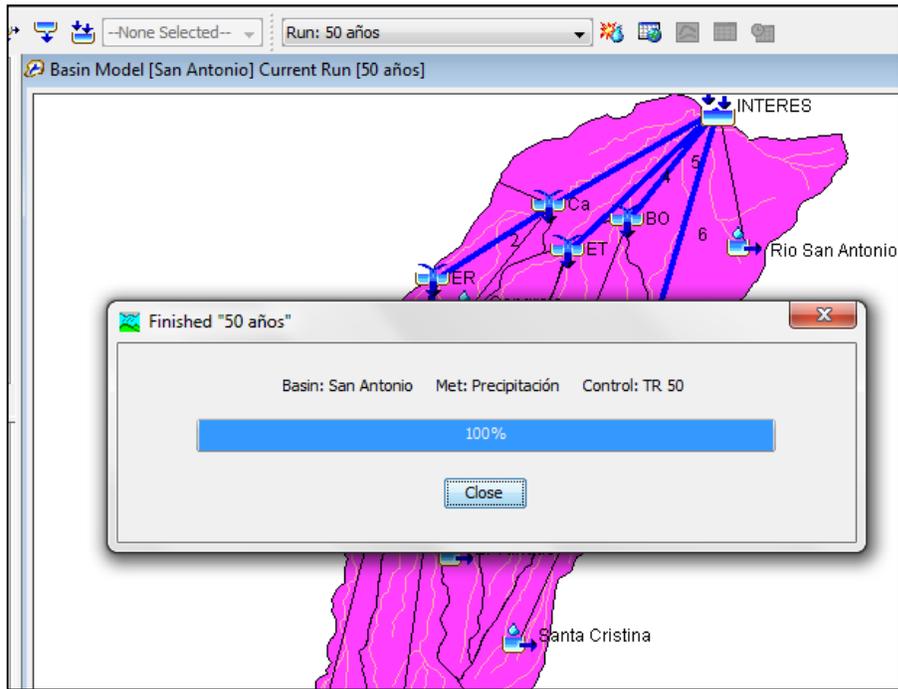


FIGURA 4-40 Continuación del análisis hidrológico [Fuente: Elaboración propia en software HEC-HMS].

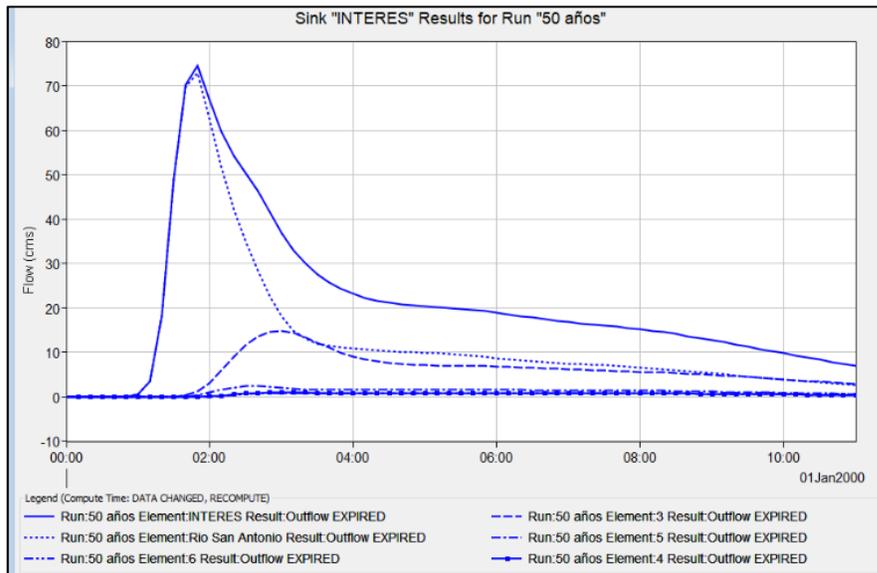


FIGURA 4-41 Hidrograma generado por el HEC-HMS para la cuenca del río San Antonio [Fuente: Elaboración propia en software HEC-HMS].



FIGURA 4-42 Resultados del estudio hidrológico de la cuenca San Antonio
 [Fuente: Elaboración propia en software HEC-HMS].

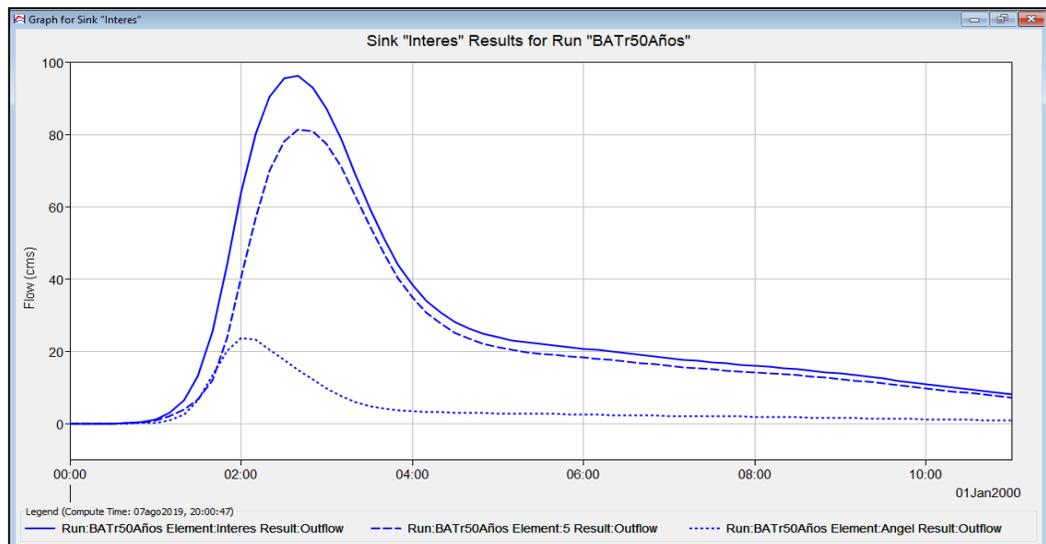


FIGURA 4-43 Hidrograma generado por el HEC-HMS para la cuenca del río El Ángel
 [Fuente: Elaboración propia en software HEC-HMS].

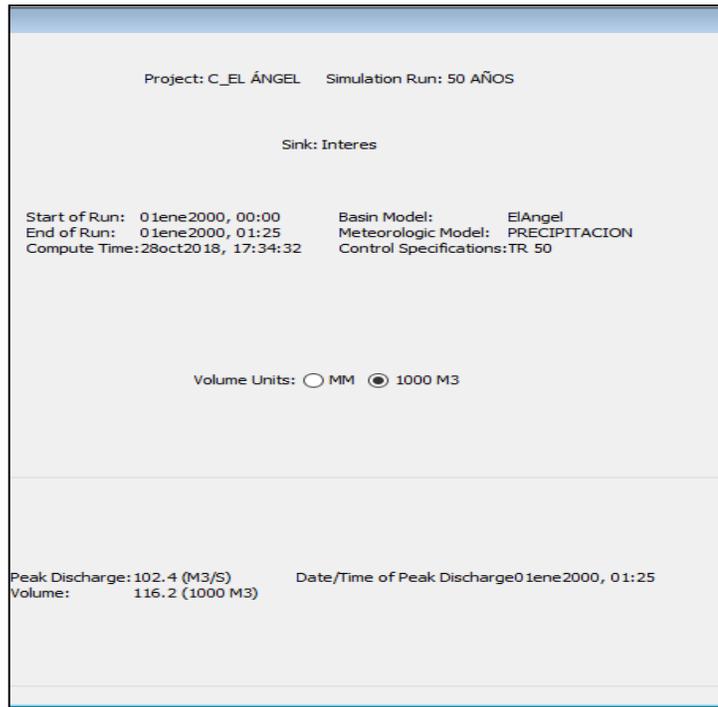


FIGURA 4-44 Resultados del estudio hidrológico de la cuenca El Ángel

[Fuente: Elaboración propia en software HEC-HMS].

En la Figura 4-43 y 4-44 se puede observar un resumen de los resultados del estudio hidrológico realizado en la cuenca San Antonio y El Ángel respectivamente, donde estos resultados pertenecen al efluente de toda la cuenca.

Caudal Pico del punto de interés de la cuenca San Antonio= 106.3 (m³/s).

Caudal Pico del punto de interés de la cuenca El Ángel= 102.4 (m³/s).

CAPÍTULO V

MODELACIÓN DE FLUJOS DE ESCOMBROS EN DAN3D

5.1 RESUMEN

El presente capítulo describe los criterios utilizados (paso a paso) del procedimiento para la realización de modelaciones de flujos de escombros, utilizando el software DAN3D, que fueron determinados para distintos volúmenes, en las subcuencas de los ríos San Antonio y El Ángel, pertenecientes a la cuenca del río Acelhuate.

Para ello, el software DAN3D requiere de archivos de malla (grid files) que son la topografía del área en estudio (path topography) para cada una de las cuencas, creada a partir del DEM (Modelo Digital de Elevación) generado de las curvas de nivel de cada una de las cuencas en estudio y del programa Surfer 8.0, escogido por ser una versión compatible con la versión del software DAN3D, para la generación de la malla, el otro archivo de malla es el de la masa deslizante (source depth), que se crea a partir del archivo de topografía en donde, se delimita la zona de inicio del flujo para cada uno de los volúmenes a modelar; en este caso porque no se cuenta con reportes o registros de flujos o deslizamientos en la zona de estudio, se tomarán para el análisis los volúmenes que podrían

ocurrir en esta zona según el documento Riesgo Volcánico en la Región de San Salvador, que para las cuencas analizadas los volúmenes que podría ocurrir son de: 100,000 m³, 300,000 m³, 500,000 m³, 1,000,000 m³ y 2,000,000 m³ pero no se analizarán los volúmenes mayores a 500,000 m³ por su baja probabilidad de ocurrencia y se agrega un flujo con volumen de 50,000 m³; teniendo los archivos de malla ya creados, se debe elegir el tipo de material, y para este caso se utilizará la reología de Voellmy.

El uso de las reologías de fricción y Voellmy están bien fundamentados para ser utilizados para la modelación este tipo de fenómenos; la reología Voellmy logra mejores resultados que la reología de fricción al reconocer el área involucrada por la propagación y el inicio de la deposición, mientras que la reología de fricción replica mejor las altas velocidades de flujo sugeridas para algunos de los casos modelados. El ángulo de fricción interna se mantiene constante ($\phi = 35^\circ$) para todos los modelos, además se establecen los parámetros del coeficiente de fricción y turbulencia que son determinantes para el análisis; los parámetros se seleccionan por prueba y error y se ajustan en intervalos fijos.

En la reología de Voellmy, el coeficiente de fricción se selecciona primero para alcanzar el extremo más alejado apropiado de la deposición; luego, se ajusta el coeficiente turbulento que controla el límite final más próximo de la deposición, la velocidad del flujo y la trayectoria de propagación general.

Debido a la escasez de datos, una descripción completa de la evolución de los eventos suele ser difícil de lograr. Varios factores son críticos para el modelado

y podrían haber influido en la propagación y la distribución final del depósito. La reconstrucción adecuada de la topografía previa al deslizamiento en la fuente y en el área de deposición es uno de los principales elementos de incertidumbre junto con los volúmenes exactos involucrados durante la propagación.

El modelo DAN 3D se ha aplicado extensivamente a una serie de historiales de casos calibrados a nivel internacional y nacional, y los parámetros calculados de nuevo se pueden usar para comparar (Hungry y Evans 1996; McDougall 2006). En este sentido, los resultados de la modelación pueden utilizarse como un indicador de la propagación de un flujo de escombros en las zonas y así establecer medidas de protección según la mancha o superficie de afectación generada.

5.2 GENERACIÓN DE ARCHIVOS MALLA

5.2.1 Archivo de la Topografía del área en estudio (Path Topography), para cada una de las cuencas

Para la elaboración de este archivo, se debe obtener primero un Modelo Digital de Elevación (DEM) a partir de curvas de nivel como se muestra en la sección 3.2.2 de este documento, el cual está definido como la topografía de la superficie de deslizamiento sobre la cual el flujo de escombros fluye.

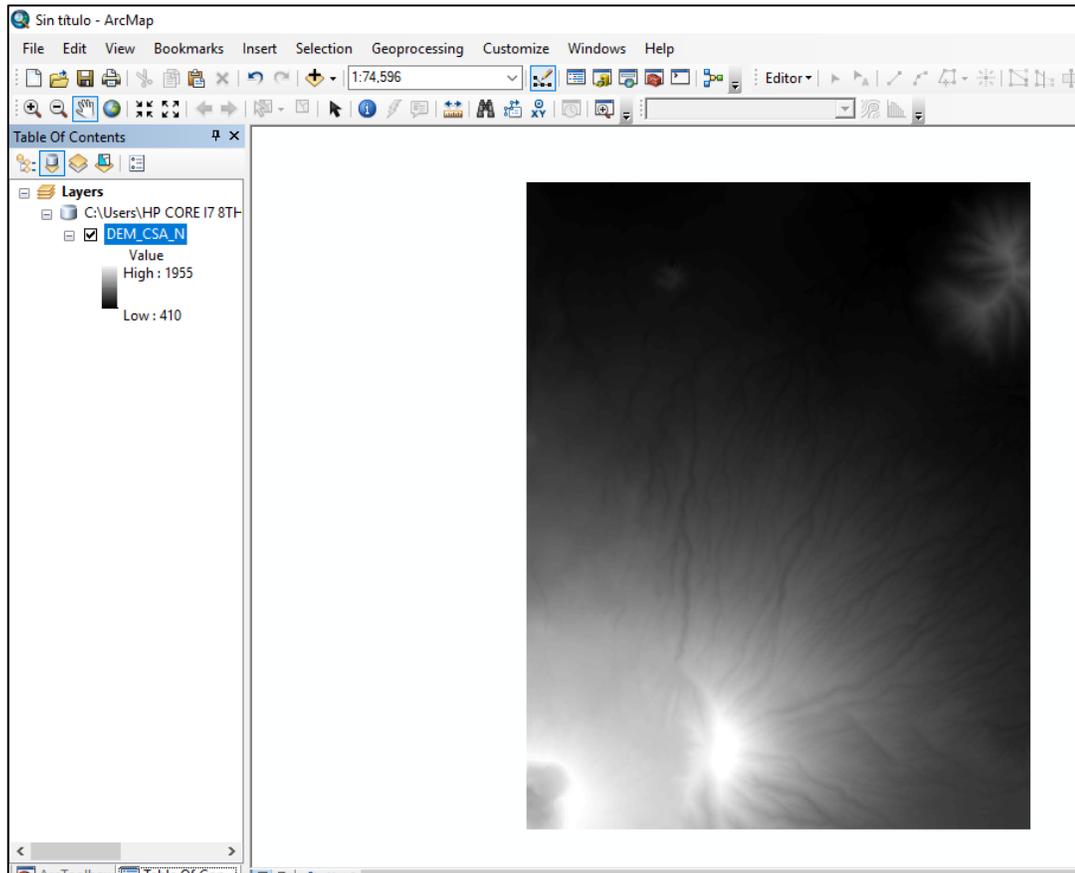


FIGURA 5-1 Modelo Digital de Elevación elaborado con curvas de nivel a cada 5 metros. [Fuente: Elaboración propia en software ArcGIS]

Una vez obtenido el DEM (Figura 5-1), se debe verificar que el número de filas y columnas, según la separación de nodos utilizadas (Cell Size), no sea mayor a 1,000; esto debido a las limitantes que tiene la versión Beta del DAN3D.

Para conocer este dato, se debe seleccionar el DEM luego clic derecho en Properties (Propiedades), en la pestaña Source (Recurso) y se muestra en Columns and Rows (Columnas y Filas). En la Figura 5-2, se indica este dato para la cuenca en estudio.

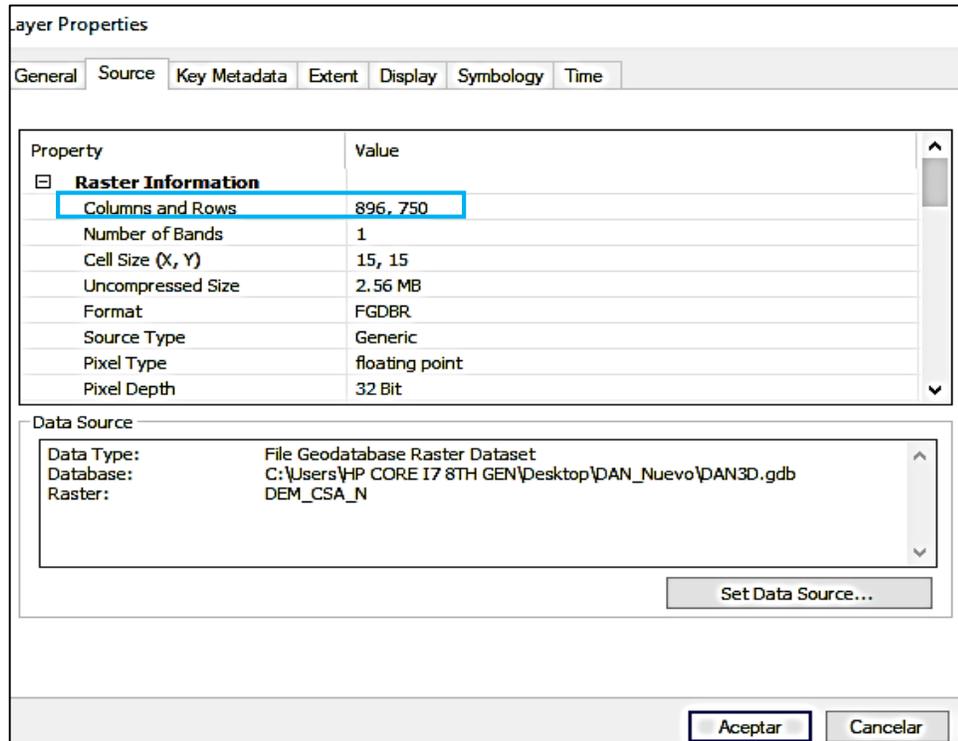


FIGURA 5-2 Lectura de las filas y columnas en ArcGIS y verificación de que estas no superen el valor de 1000. [Fuente: Elaboración propia en software ArcGIS].

Es importante mencionar que la separación de celdas (Cell Size) debe ser lo más cercano a la separación de curvas de nivel como el área lo permita. En este caso, se utiliza el valor de 15 debido a que con el valor de 10 se obtiene 1,344x1,125 para las columnas y filas, respectivamente. Este valor excede el límite que permite la versión utilizada del software DAN3D, por esa razón se utilizó una separación de 15.

Una vez realizado lo anterior, se deben de seguir una serie de pasos en los softwares ArcGIS y Surfer 8.0 para obtener el archivo de la topografía del área en estudio (Path Topography), como se muestra a continuación:

1. Se debe obtener una muestra (Sample) del DEM en el software ArcGIS, que, básicamente, es obtener las coordenadas y elevación de cada punto formado por la intersección de filas y columnas generadas, según la separación de celdas que tenga el DEM. Para generar este Sample, se abre la caja de herramientas (ArcToolbox) y se busca Herramientas de análisis espacial > Extracción > Muestra (Spatial Analyst Tools > Extraction > Sample). Se escoge el DEM a utilizar y se selecciona el lugar en donde se guardará dicha muestra (Figura 5-3).

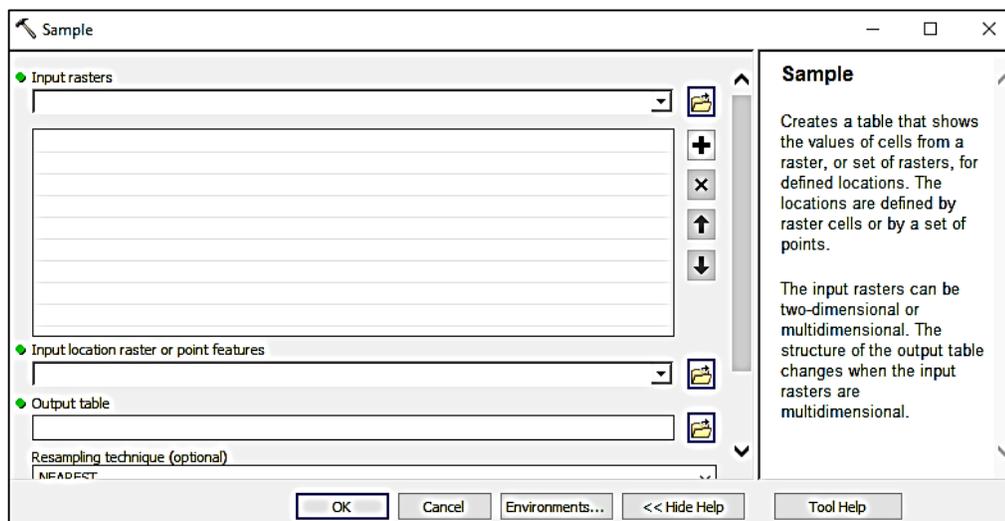


FIGURA 5-3 Generación de un Sample en ArcGIS [Fuente: Elaboración propia en software ArcGIS].

En la Figura 5-4, se muestra el resultado obtenido al generar una muestra (Sample), donde se tiene la información de las coordenadas del DEM de cada una de las celdas.

The screenshot displays the ArcGIS interface. On the left, the 'Table Of Contents' shows a layer named 'DEM_CSA_N' with a value range from 410 to 1955. The main window shows a 'Table' window with the following data:

Rowid	DEM_CSA_N	X	Y	DEM_CSA_N_1
1	457	469000.205969	300991.163257	457.313904
2	457	469015.205969	300991.163257	457.811768
3	458	469030.205969	300991.163257	458.178986
4	458	469045.205969	300991.163257	458.546204
5	458	469060.205969	300991.163257	458.894806
6	458	469075.205969	300991.163257	458.843262
7	458	469090.205969	300991.163257	458.373291
8	457	469105.205969	300991.163257	457.740417
9	457	469120.205969	300991.163257	457.320465
10	457	469135.205969	300991.163257	457.230499
11	456	469150.205969	300991.163257	456.655151
12	455	469165.205969	300991.163257	455.96405
13	455	469180.205969	300991.163257	455.094574
14	454	469195.205969	300991.163257	454.372498
15	453	469210.205969	300991.163257	453.01355
16	451	469225.205969	300991.163257	451.458496
17	449	469240.205969	300991.163257	449.7789
18	446	469255.205969	300991.163257	446.422974
19	443	469270.205969	300991.163257	443.092346
20	440	469285.205969	300991.163257	440
21	440	469300.205969	300991.163257	440
22	440	469315.205969	300991.163257	440
23	440	469330.205969	300991.163257	440
24	440	469345.205969	300991.163257	440
25	440	469360.205969	300991.163257	440
26	439	469375.205969	300991.163257	439.713623

FIGURA 5-4 Tabla de valores generada al efectuar un Sample sobre un DEM en ArcGIS

[Fuente: Elaboración propia en software ArcGIS].

2. Como siguiente paso, se debe exportar el Sample generado en el paso 1 a un archivo *.txt, para luego proceder al software Surfer 8.0. esto se logra haciendo clic derecho, luego en Datos>Exportar (Data>Export) sobre el Sample y se procede a escoger la ubicación donde se guardará y el tipo de archivo (Figura 5-5). En la figura 5-6, se muestra la tabla de valores en Surfer 8.0.

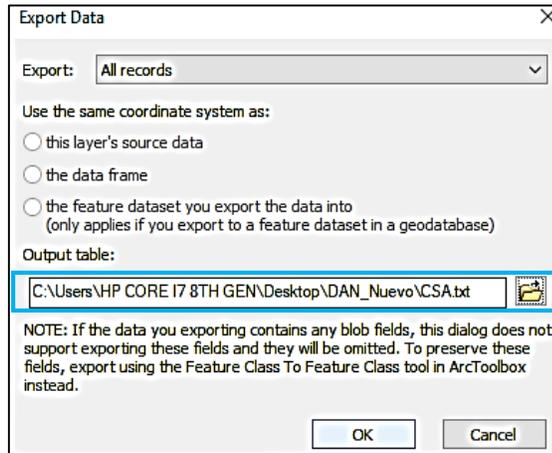


FIGURA 5-5 Exportación de un Sample a archivo tipo texto [Fuente: Elaboración propia en software ArcGIS].

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Rowid	DEM	CSA	X	Y	DEM	CSA	
2		457	469000.21	300991.16	457.31390			
3		457	469015.21	300991.16	457.81177			
4		458	469030.21	300991.16	458.17899			
5		458	469045.21	300991.16	458.54620			
6		458	469060.21	300991.16	458.89481			
7		458	469075.21	300991.16	458.84326			
8		458	469090.21	300991.16	458.37329			
9		457	469105.21	300991.16	457.74042			
10		457	469120.21	300991.16	457.32047			
11		457	469135.21	300991.16	457.23050			
12		456	469150.21	300991.16	456.65515			
13		455	469165.21	300991.16	455.96405			
14		455	469180.21	300991.16	455.09457			
15		454	469195.21	300991.16	454.37250			
16		453	469210.21	300991.16	453.01355			
17		451	469225.21	300991.16	451.45850			
18		449	469240.21	300991.16	449.77890			
19		446	469255.21	300991.16	446.42297			
20		443	469270.21	300991.16	443.09235			
21		440	469285.21	300991.16	440			
22		440	469300.21	300991.16	440			
23		440	469315.21	300991.16	440			
24		440	469330.21	300991.16	440			
25		440	469345.21	300991.16	440			
26		440	469360.21	300991.16	440			
27		439	469375.21	300991.16	439.71362			
28		439	469390.21	300991.16	439.32040			
29		439	469405.21	300991.16	439.31345			
30		439	469420.21	300991.16	439.48724			
31		439	469435.21	300991.16	439.69537			
32		439	469450.21	300991.16	439.98517			
33		440	469465.21	300991.16	440			
34		440	469480.21	300991.16	440.26196			
35		440	469495.21	300991.16	440.52405			

FIGURA 5-6 Tabla de valores generados con el Sample hecho en ArcGIS [Fuente: Elaboración propia en software Surfer].

3. Se debe modificar y exportar la tabla tipo *.txt en un formato de archivo tipo XYZ DATA (.dat). para este fin, se deben de borrar las dos primeras columnas y la primera fila de la tabla que para el propósito que se busca no son necesarios. Una vez realizado lo anterior, se obtiene una tabla con valores de coordenadas y su elevación. La primera columna (Columna A) es la longitud que estará representado sobre el eje X, la segunda columna (Columna B) es la latitud que estará representada por el eje Y la tercera columna (Columna C) es la elevación. Luego, se debe exportar a archivo con formato *.dat, como se muestra en la figura 5-7.

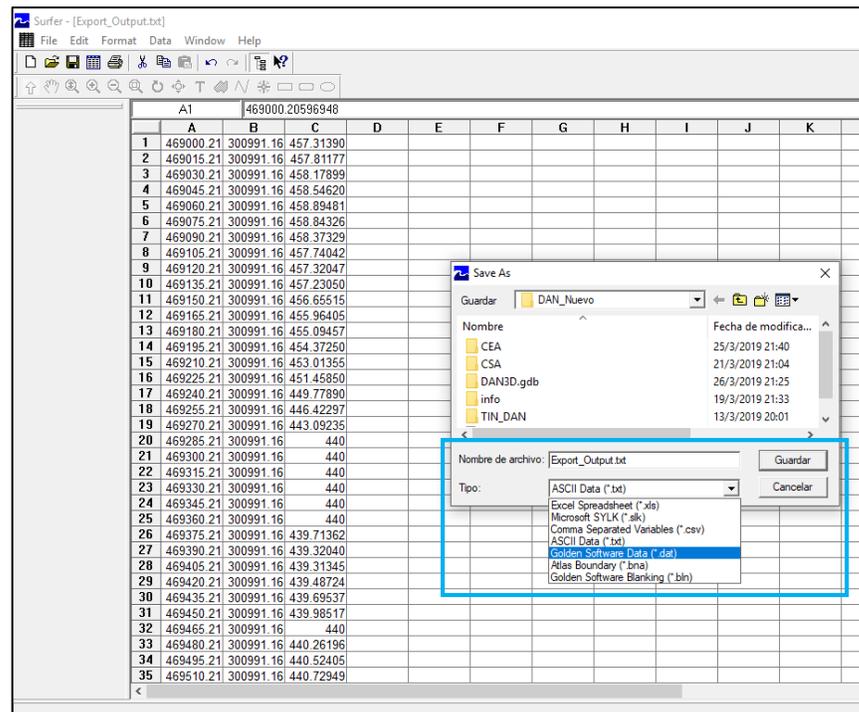


FIGURA 5-7 Exportación de un Sample tipo *.txt a archivo con formato *.dat

[Fuente: Elaboración propia en software Surfer].

4. Para que el archivo pueda ser leído por el software DAN3D, el punto más abajo y a la izquierda con coordenadas 469,000 y 290,206 (según la proyección Cónica de Lambert), debe coincidir con el valor de (0,0) como se muestra en la figura 5-8. Para lograr esto, se debe reducir todos los valores de los nodos generados anteriormente.

Para la Longitud, en Surfer 8.0, en la pestaña Malla>Trasformar (GRID>Transform) aparecerá un cuadro de dialogo y se digita la siguiente ecuación: $D = A - 469,000$. De igual manera para la Latitud se digita la siguiente ecuación: $E = B - 290,206$. Lo anterior está representado en las figuras 5-9.

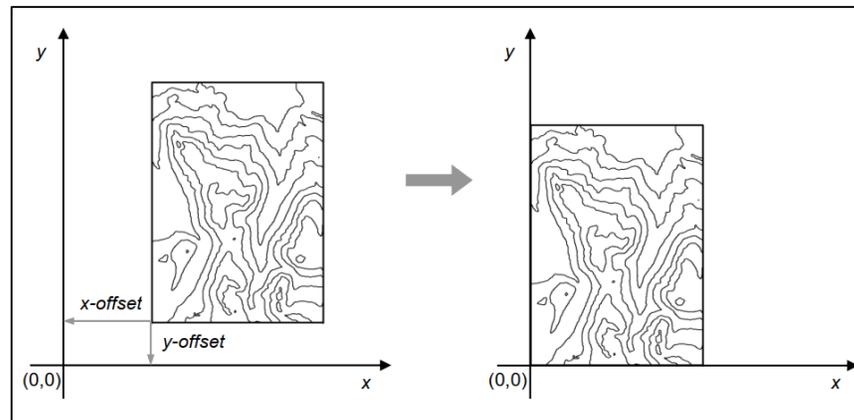


FIGURA 5-8 Representación del origen de coordenadas que debe tener el archivo de topografía.

[Fuente: Manual del software DAN3D, O. Hungr, 2010].

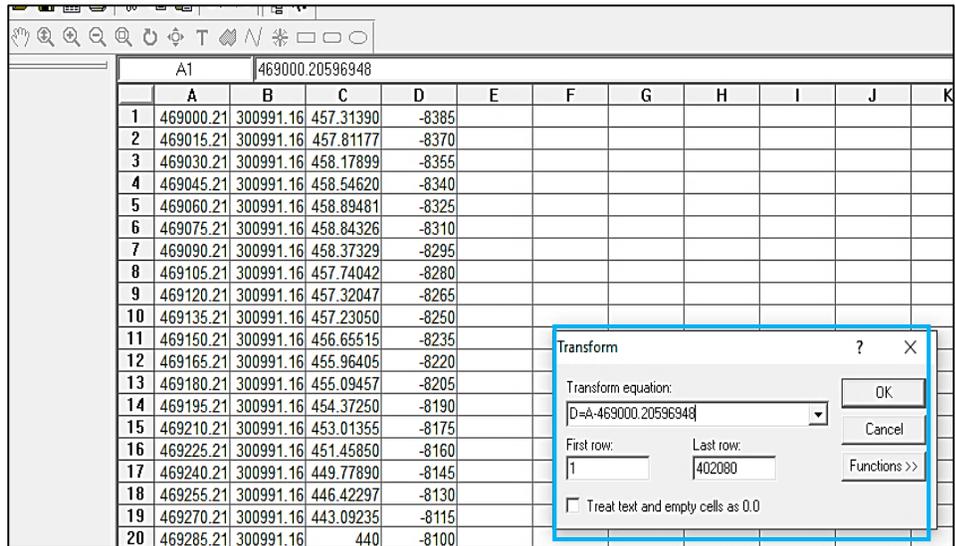


FIGURA 5-9 Cambiando el origen de coordenadas para las direcciones X e Y

[Fuente: Elaboración propia en software Surfer].

- Se deben de cortar las columnas D y E y pegar en las columnas A y B para no perder la nomenclatura anteriormente utilizada.

	A	B	C	D	E	F
1	0	10785	457.31390			
2	15	10785	457.81177			
3	30	10785	458.17899			
4	45	10785	458.54620			
5	60	10785	458.89481			
6	75	10785	458.84326			
7	90	10785	458.37329			
8	105	10785	457.74042			
9	120	10785	457.32047			
10	135	10785	457.23050			
11	150	10785	456.65515			
12	165	10785	455.96405			
13	180	10785	455.09457			
14	195	10785	454.37250			
15	210	10785	453.01355			
16	225	10785	451.45850			
17	240	10785	449.77890			
18	255	10785	446.42297			
19	270	10785	443.09235			
20	285	10785	440			
21	300	10785	440			
22	315	10785	440			
23	330	10785	440			
24	345	10785	440			
25	360	10785	440			
26	375	10785	439.71362			

FIGURA 5-10 Tabla finalizada y lista para ser interpolada en un archivo tipo *.grd

[Fuente: Elaboración propia en software Surfer].

A continuación, se tienen que interpolar estos datos en Surfer 8.0 para generar el mapa de topografía. Para este fin, Surfer 8.0 tiene diversos métodos de interpolación que pueden ser utilizados y que a continuación se explican brevemente¹⁷:

- **Distancia Inversa Ponderada (Inverse Distance to a Power, IDW):** este método utiliza la suposición de que la influencia que ejerce el valor observado disminuye a medida que aumenta la distancia entre el punto “Real” y el punto o nodo estimado. Asigna un peso al punto del dato conocido a través de un ponderador que controla la velocidad a la que se pierde información conforme aumenta la distancia de un punto conocido a un nodo de la cuadrícula. Normalmente, este método funciona como interpolador exacto, pero cuando una observación en particular coincide con un nodo, la distancia entre el nodo y el dato es cero, y por tanto el peso dado tiene valor de uno y los demás puntos son asignados a valores de peso cero, esto ocasiona error en la estimación.
- **Kriging:** el interpolador Kriging supone que la distancia entre los puntos de muestra refleja una correlación espacial que puede utilizarse para explicar la variación en la superficie. La herramienta Kriging ajusta una función matemática a una cantidad específica de puntos o a todos los puntos dentro de un radio específico para determinar el valor de salida

¹⁷ *Análisis de Reducción Área de Lluvias Intensas en El Salvador*, V. Mancuso. R. Valencia, UES, Pág. 49, 2017.

para cada ubicación. Sin embargo, con el método Kriging, las ponderaciones están basadas no solo en la distancia entre los puntos medidos y la ubicación de la predicción, sino también en la disposición espacial general de los puntos medidos. Para utilizar la disposición espacial en las ponderaciones, la correlación espacial debe estar cuantificada.

- **Curvatura Mínima (Minimum Curvature):** se usa de manera amplia en las ciencias geológicas. La malla interpolada que se genera es análoga a una placa delgada linealmente elástica que pasa por cada valor de dato con un mínimo de dobleces abruptos. El método intenta generar una superficie más continua y curvada mientras respeta de manera posible los datos; sin embargo, no siempre se logra respetar los datos en su totalidad por ser un interpolador aproximado.
- **Método Modificado de Shepard (Modified Shepard's Method):** utiliza el algoritmo matemático de mínimos cuadrados para la asignación de pesos a los datos sobre la malla. Esencialmente es muy similar al método Inverso de la Distancia, utilizando la inversa de la distancia entre los nodos y los puntos cercanos, pero el uso de algoritmos de mínimos cuadrados disminuye el efecto "Ojos de buey". El método puede ser exacto o aproximado dependiendo de si se aplica el parámetro de suavizado.

- **Vecino Natural (Natural Neighbor):** El algoritmo utilizado por este método halla el subconjunto de datos más cercano a un nodo y aplica ponderaciones sobre éstas basándose en áreas proporcionales para interpolar un valor (Sibson, 1981). Su propiedad básica es que utiliza sólo un subconjunto de datos que circundan a un punto de consulta y asegura que las alturas interpoladas estarán dentro del rango de las muestras utilizadas.
- **Vecino Más Cercano (Nearest Neighbor):** Esta técnica simplemente asigna el dato más cercano para cada nodo que se calcula. Es útil para datos homogéneamente espaciados, pero deben ser convertidos en una malla del programa computacional. En casos donde los puntos están cerca de los nodos con pocos datos faltantes este método es efectivo para el relleno de los espacios vacíos en los datos. En otras palabras, es muy útil para el relleno de datos faltantes.
- **Regresión Polinómica (Polynomial Regression):** este método es usado para conocer tendencias a gran escala y patrones de comportamiento de los datos. La Regresión Polinómica no es realmente un interpolador porque no trata de calcular los valores desconocidos de Z. Este método procesa los datos para el análisis de tendencias en la superficie. Su versión computacional es muy veloz para el procesamiento de cualquier rango y tamaño de datos muestrales, pero para datos locales, mucha información se pierde en la cuadrícula generada.

- **Funciones de Base Radial (Radial Basis Function, RBF):** las funciones de base radial (Con sus siglas en inglés RBF) son una serie de técnicas de interpolación exacta, es decir: la superficie debe pasar por cada valor de muestra medido. Hay cinco funciones diferentes en este método que calculan pesos que se asignan a los datos.
- **Triangulación con Interpolación Lineal (Triangulation with Linear Interpolation):** es un método exacto de interpolación basado en la triangulación óptima de Delaunay. El algoritmo crea triángulos dibujando líneas entre los puntos de datos. Los puntos originales se conectan de una manera que ningún lado de los triángulos se intercepta con los vértices de los otros triángulos cuyos vértices coinciden con los puntos conocidos.
- **Ponderados Mviles (Moving Average):** asigna valores a los nodos ponderando los datos dentro del sector de búsqueda del programa. Sin embargo, el uso de este método no es recomendado para series de datos de tamaños moderados, pero es una buena herramienta para series de datos arriba de los 1000 puntos en territorios muy extensos.
- **Datos Métricos (Data Metrics):** es mayormente utilizado para graficar parámetros estadísticos de una serie de datos. Este método difiere de los otros métodos porque no estima nuevos valores de Z en la cuadrícula, sino que genera mapas de parámetros estadísticos de una serie de datos.

- **Polinomio Local (Local Polynomial):** funciona mejor con los conjuntos de datos que son relativamente parejos en los sectores búsqueda. Este método ajusta un polinomio de orden con el uso de los puntos dentro de una zona definida.

Para generar el archivo tipo malla a utilizar en el software DAN3D, se debería de probar cada uno de los métodos y observar cuál de todos se ajusta más a lo que se busca para dicho estudio. En este caso, se escoge el método de interpolación Kriging debido a que es más flexible para cualquier tipo de datos y es recomendado su uso por el tipo de mapas que genera, aunque, cuando la serie de datos es muy extensa, este método puede tardar más tiempo en los cálculos.

Una vez se ha escogido el método de interpolación, se debe ingresar a la pestaña Datos de malla (Grid Data) luego aparecerá el cuadro de dialogo mostrado en la figura 5-11:

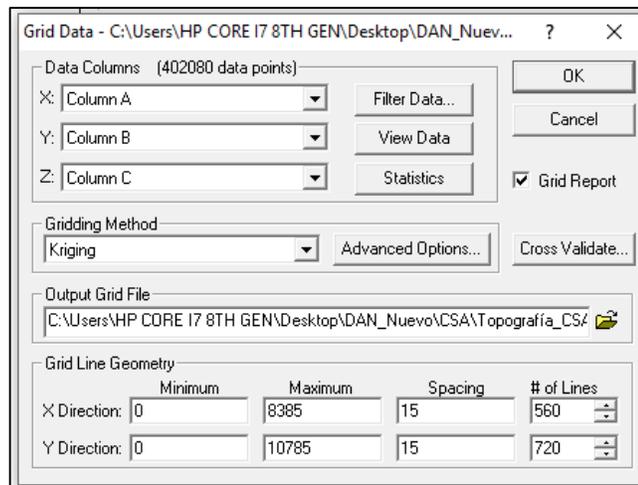


FIGURA 5-11 Cuadro de dialogo Grid Data donde se escogerá el método de interpolación a utilizar

[Fuente: Elaboración propia en software Surfer].

En este cuadro, se debe verificar y cambiar algunos datos. Primero, se debe verificar que en la sección de Columna de datos (Data Columns) coincidan las columnas con los ejes respectivos (X con Columna A, Y con columna B y Z con Columna C), luego en el método de malla (Gridding Method) se escoge el método de interpolación Kriging. En el archivo de salida de malla (Output Grid File) se escoge el nombre del archivo, en este caso Topografía_CSA, también la ubicación donde éste será guardado y el formato de archivo con el que se guardará, que debe ser GS ASCII (*.grd) para que pueda ser leído por el DAN3D. Lo siguiente es cambiar el espaciamiento (Spacing), ya que este debe coincidir con el espaciamiento dado (Cell Size) al Modelo Digital de Elevación (DEM). Una vez efectuado lo anterior se da clic en OK.

El resultado final es el siguiente:

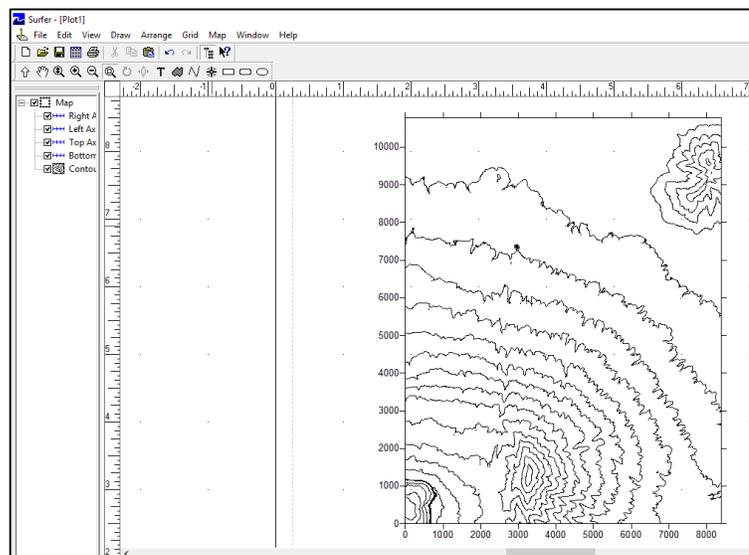


FIGURA 5-12 Archivo de topografía de la ruta a utilizar [Fuente: Elaboración propia en software Surfer].

El software DAN3D permite la colocación de imágenes de fondo en sus simulaciones. Para obtener una imagen de la topografía, se puede exportar el archivo de topografía y guardar en formato tipo Windows Bitmap (*.bmp).

Esto se logra en el Surfer 8.0 en la pestaña Archivo>Exportar (File>Export), se abre un cuadro de dialogo en donde se debe seleccionar el nombre del archivo, la ubicación donde se guardará y el formato al cual se exportará como se muestra en la figura 5-13:

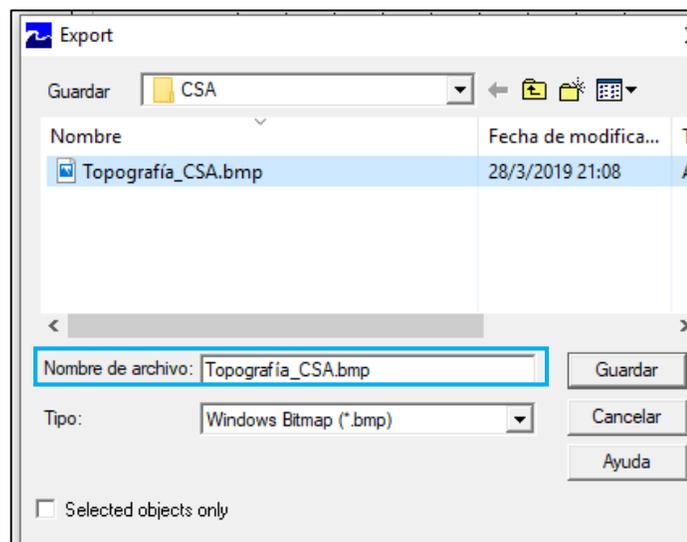


FIGURA 5-13 Exportación de archivo tipo malla (.grd) a uno tipo imagen (.bmp)

[Fuente: Elaboración propia en software Surfer].

5.2.2 Archivo de la Topografía de la Masa Deslizante (Source Depth)

Para la selección de los volúmenes de liberación, se tomo en cuenta la información generada por la USGS, en donde determinan que zona podria

alcanzar un flujo con un volumen específico (de 100,000 a 2,000,000 de metros cúbicos). Con esto, se generan los volúmenes de 50,000, 100,000, 300,000 y 500,000 metros cúbicos.

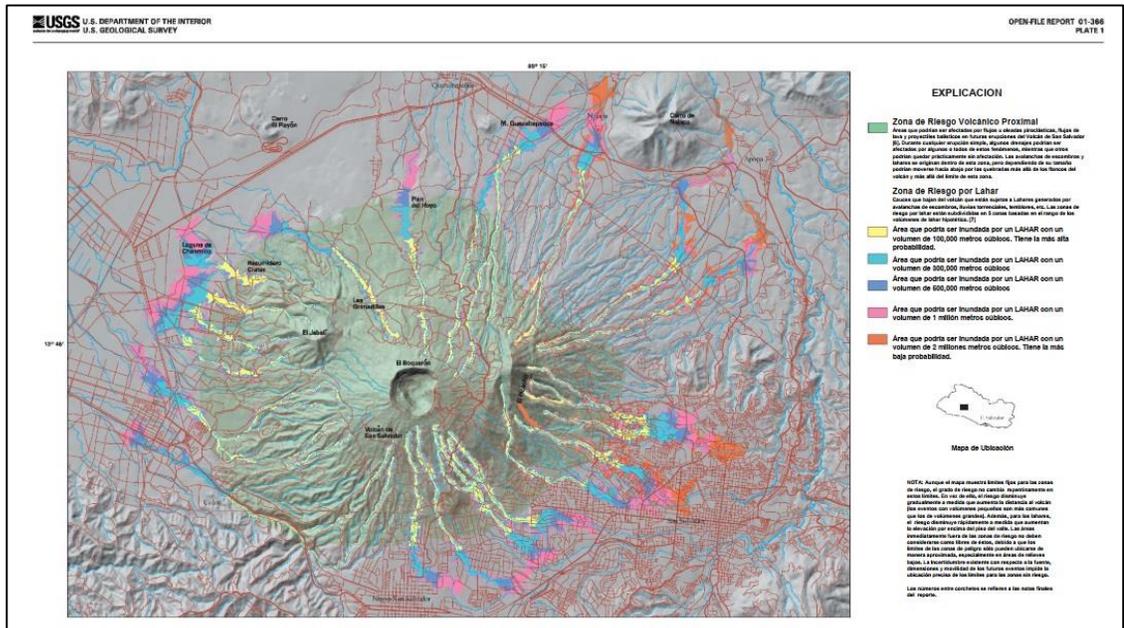


FIGURA 5-14 Zonificación de riesgo por Lahares para el volcán de San Salvador
[Fuente: Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS)].

A continuación, se enumeran los pasos a seguir en la generación del archivo de la Masa Deslizante, la cual está definida como la topografía de profundidad vertical de la masa deslizante en la posición inicial, tiempo = 0:

1. Se debe delimitar la zona de inicio de flujo, para esto se debe de crear un archivo tipo (*.bln) que son archivos que guardan información y son bastante usados en cartografía. En el Surfer 8.0, se abre el mapa de

topografía con el menú Mapa>Contorno>Nuevo mapa de contorno (Map>Contour>New Contour Map).

2. A continuación, se da clic en Contornos (Contours) y en el menú Mapa>digitalizar (Map>Digitaze) se procede a delimitar la zona de inicio del flujo como se muestra en la figura 5-15:

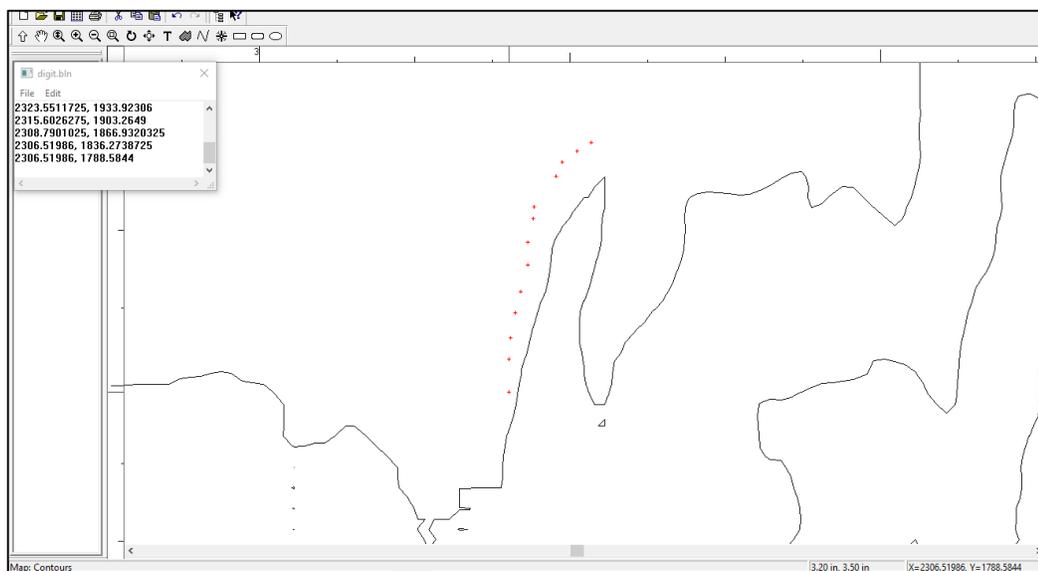


FIGURA 5-15 Generación de archivo tipo .bln de la zona de inicio de flujo

[Fuente: Elaboración propia en software Surfer].

Luego, se procede a guardar este archivo con el menú Archivo>Guardar como (File>Save As) y se le asigna un nombre, en este caso se escogió el nombre Área.

3. El siguiente paso es “blanquear” los datos que se encuentran fuera del área trazada. Primero se abre el archivo (*.bln) y se observa una tabla con una serie de puntos. La fila 1 columna A, muestra el total de datos

pulsados, para el ejemplo se tiene un total de 27. Este valor de 27 debe ser cambiado a 28 y se debe copiar los valores de la fila 2 columnas A y B y se deben pegar en la fila 29, esto para que el primero y ultimo valor coincidan y que el polígono formado cierre.

La fila 1 columna B, muestra el valor de 1, este valor debe ser cambiado por el valor de 0 garantizando así que todos los valores de elevación afuera del área sean 0. Luego se guarda y se abre un nuevo Documento de trazo (Plot Document).

	A1	28			
	A	B	C	D	E
1	28	0			
2	2417.7492	2149.8190			
3	2375.6355	2146.8100			
4	2356.0841	2142.2982			
5	2336.5309	2119.7378			
6	2316.9795	2097.1774			
7	2316.9795	2008.4402			
8	2312.4660	1957.3031			
9	2313.9705	1913.6868			
10	2313.9705	1855.0290			
11	2313.9705	1821.9406			
12	2316.9795	1773.8125			
13	2327.5075	1760.2756			
14	2339.5399	1746.7404			
15	2366.6121	1743.7314			
16	2386.1635	1758.7711			
17	2399.7005	1761.7801			
18	2420.7564	1779.8288			
19	2419.2519	1814.4199			
20	2438.8051	1827.9568			
21	2437.3006	1898.6453			
22	2453.8448	1921.2057			
23	2450.8375	2032.5052			
24	2471.8935	2055.0656			
25	2467.3817	2094.1702			
26	2468.8862	2118.2333			
27	2459.8610	2130.2658			
28	2437.3006	2139.2910			
29	2417.7492	2149.8190			
30					
31					

FIGURA 5-16 Archivo Area.blm modificado para luego pasar al proceso de blanqueo del mismo

[Fuente: Elaboración propia en software Surfer].

4. En este nuevo Plot, se ejecuta el menú Malla>Blanqueado (Grid>Blank), se selecciona el archivo de topografía, Topografía_CSA.grd y luego se selecciona el archivo Area.bln. Finalmente pide seleccionar la ubicación en que se guardara en el archivo, el nombre y formato de este que debe ser en formato ASCII XYZ (*.dat). Para este caso, se busca que la masa deslizante tenga un volumen de 50,000 m³ por este motivo se guardara con el nombre de Vol50.dat. Cabe mencionar que muy raramente se obtendrá el volumen que se busca al primer intento, esto lleva un proceso de prueba y error hasta dar con el volumen buscado.

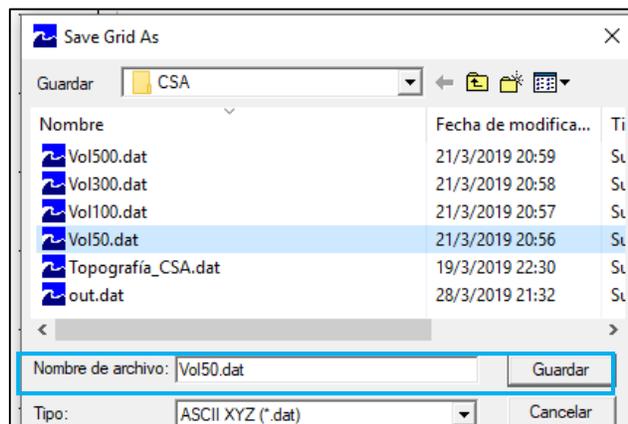


FIGURA 5-17 Proceso de blanqueo del archivo Area.bln [Fuente: Elaboración propia en software Surfer].

5. Se abre el archivo creado en el paso anterior y aparece una tabla como la que se muestra en la figura 5-17. En esta tabla se puede apreciar en la columna C, que muestra los valores correspondientes a las elevaciones, que todos los puntos que están fuera del área trazada muestran un valor de 1.701E+38. Estos puntos deben tener el valor de 0, para cambiar esto

se debe seguir el menú Malla>Transformar (Grid>Transform), y en el cuadro de dialogo que se muestra, se digita la ecuación “C=If (C=1.701E+38,0, C) como se muestra en la figura 5-18.

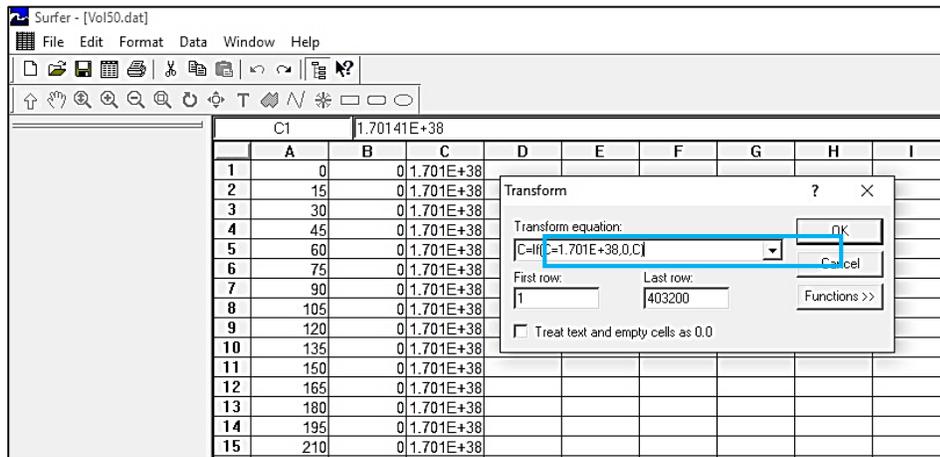


FIGURA 5-18 Asignación de valor de 0 a puntos fuera del área trazada

[Fuente: Elaboración propia en software Surfer].

- Se debe asignar un espesor a la masa deslizante, en este caso se usará un espesor de 1 para que el volumen de liberación sea de 50,000 m³. Para este fin se vuelve a usar el menú Grid>Transform... y se digita la siguiente ecuación $C=If(C>0, 1C)$ luego se guarda y se cierra. Este proceso se muestra en la figura 5-18.

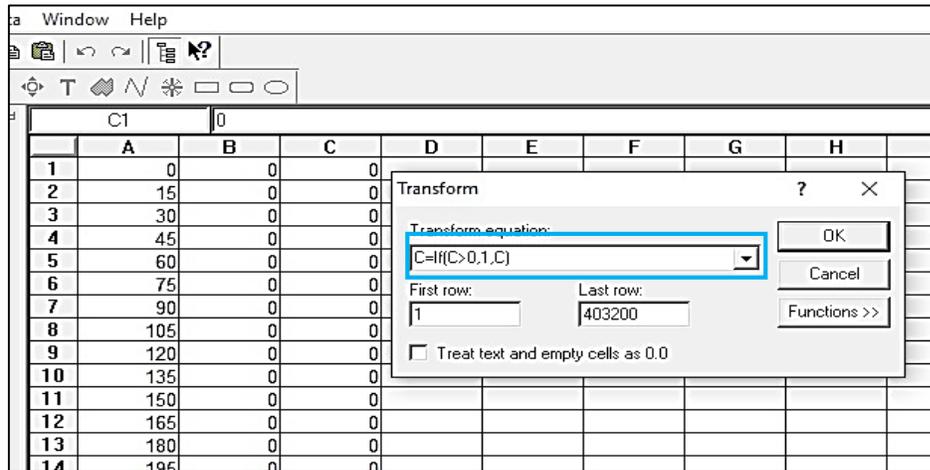


FIGURA 5-19 Asignando el valor de 1 a los puntos dentro del área trazada

[Fuente: Elaboración propia en software Surfer].

- Se abre un nuevo Plot en Surfer, y se sigue la secuencia de pasos que se detallan, en el paso 6 de la sección 5.1.1, para la creación del archivo de topografía con la diferencia de que al existir valores de elevación de 0 se utilizara el método de interpolación Nearest Neighbor (Vecino más Cercano). Se debe tener el cuidado de asignar el mismo espaciamiento de nodos asignado al archivo de topografía y también que se guarde en formato GS ASCII (*.grd).

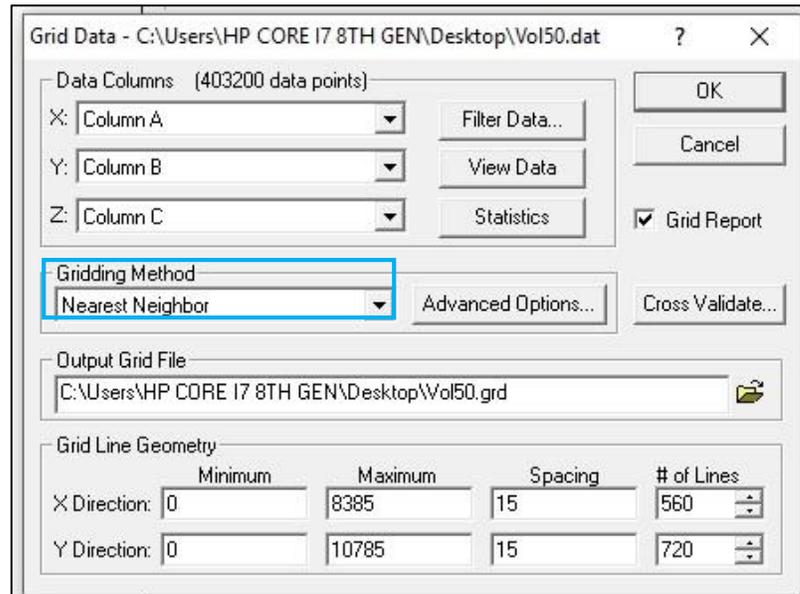


FIGURA 5-20 Interpolación de archivo tipo (.dat) archivo tipo malla (.grd) para poder ser utilizado en el software DAN3D [Fuente: Elaboración propia en software Surfer].

- Por último, verificar que el volumen de liberación fue estimado de manera correcta, para esto se abre el software DAN3D y se ingresan los archivos tipo malla (en este paso debido a que solo es verificación del volumen no es necesario ingresar todos los valores que nos pide el DAN3D) luego se guarda el archivo y se ejecuta el modelo. Aparecerá una ventana como la mostrada en la figura 5-21. Se puede observar en el cuadro de control de simulación (Run Control Box) en la parte de volumen deslizable (Slide Volumen) que, efectivamente, el volumen estimado es de 50,000 m³.

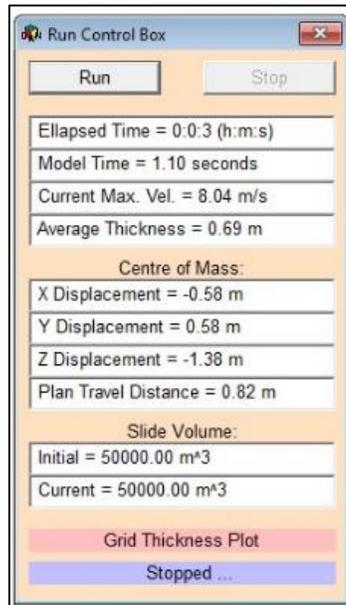


FIGURA 5-21 Verificación del volumen en software DAN3D

[Fuente: Elaboración propia en software DAN3D].

5.3 EJECUCIÓN DE UNA SIMULACIÓN EN DAN3D

Una vez creados los archivos de malla se procede a simular los diferentes volúmenes creados. A manera de ejemplo, solamente se simulará el volumen de 50,000 m³. En la siguiente secuencia de pasos se muestra y explican en que consiste cada uno de los parámetros y datos a usar para las simulaciones:

1. Primero se abre el software DAN3D, y se selecciona Crear un nuevo archivo (Create a New File). Luego aparecerá el cuadro de dialogo Parámetros de control (Control Parameters) mostrado en la figura 5-22 y se explican cada uno de ellos.

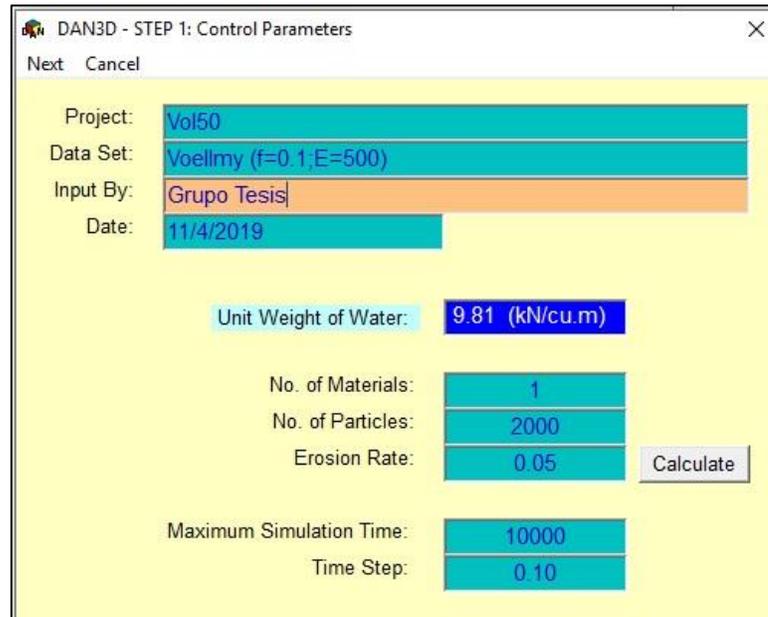


FIGURA 5-22 Cuadro de dialogo de Parámetros de Control en software DAN3D

[Fuente: Elaboración propia en software DAN3D].

- **Proyecto (Project):** en este parámetro se elige un nombre para el Proyecto. En este caso se simulará un volumen de 50,000 m³ entonces se asigna el nombre de Vol50. Este parámetro es opcional.
- **Conjunto de Datos (Data Set):** aquí se ingresa el conjunto de datos a simular y la reología a utilizar. Este parámetro es opcional.
- **Ingresado Por (Input By):** nombre de la persona que ingresa los datos. Este parámetro es opcional.

- **Fecha (Date):** fecha actual del sistema en que se simula.
- **Peso Unitario del Agua (Unit Weight of Water):** peso unitario del agua que se establece de 9.81 kN/m^3 .
- **Número de Materiales (No. of Materials):** número de materiales a simular. En el área de estudio se sabe que existe más de un material, pero para este caso se simulara como si solo existiera 1 material.
- **Número de Partículas (No. of Particles):** es el número de partículas suavizadas a utilizar en el proceso de interpolación del SHP. El máximo número que se puede usar es de 4000 y el mínimo de 100. Para este caso ya que diversos estudios han demostrado que para volúmenes entre $4,000$ y $700,000 \text{ m}^3$ un número de partículas de 2000 da resultados muy acertados. Por lo anterior se elige un número de partículas de 2000.
- **Tasa de Erosión (Erosion Rate):** representa la profundidad normal al lecho erosionada por unidad de profundidad de flujo y desplazamiento unitario. Para este caso ya que no se cuenta con información suficiente para calcular este parámetro se deja el valor por defecto dado por el software de 0.05. Si se tiene suficiente información este parámetro se puede aproximar con el botón Calcular (Calculate).

- **Máximo Tiempo de Simulación (Maximum Simulation Time):** tiempo al cual la simulación debería detenerse. Si se desea, este parámetro puede modificarse durante la simulación. Durante la calibración del modelo, se determinó que un valor 10,000 segundos era suficiente para realizar las simulaciones.
- **Paso del Tiempo (Time Step):** paso del tiempo usado en el análisis numérico. Este valor usualmente esta entre 0.05 y 0.1, pero es dependiente del problema ya que, un incremento del “Time Step” resulta en una decreciente precisión de los resultados.

Para la calibración del modelo, se realizaron una serie de simulaciones con parámetros específicos y un volumen de liberación de 100,000 m³ y se fue probando con distinto paso de tiempo y se observó el área de impacto que generaba cada simulación.

Con lo anterior, se empezó a observar cierta similitud entre las manchas generadas y se determinó que un valor entre 0.075 y 0.25 segundos era aceptable para este caso en específico. Por lo anterior se determinó 0.1 segundos como paso de tiempo.

Debido a que no se cuentan con antecedentes históricos en la zona de estudio, no se pudo realizar una verdadera calibración del modelo, por lo que se optó (según lo descrito anteriormente) y basado en un estudio realizado en el picacho,

a escoger el valor de 0.1 segundos como paso de tiempo para los modelos a realizar.

2. Una vez seleccionados los parámetros de control se da clic en siguiente (Next) y aparecerá un nuevo cuadro de dialogo “Grid File Assignment” en el cual se asignarán los archivos tipo malla creados en las secciones anteriores. Como se muestra en la siguiente figura. Es recomendable guardar los archivos tipo malla en una misma carpeta.

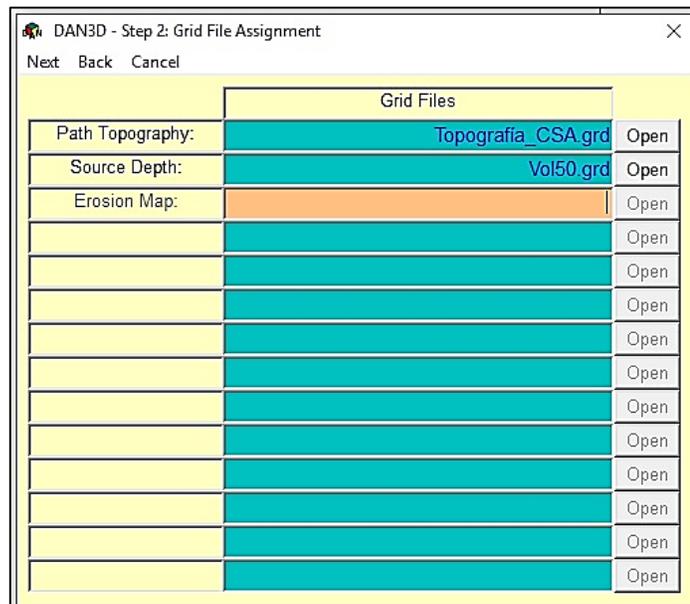


FIGURA 5-23 Cuadro de dialogo de asignación de archivos tipo malla en software DAN3D [Fuente: Elaboración propia en software DAN3D].

3. Una vez seleccionados los archivos tipo malla, se da clic en Next y aparece el cuadro de dialogo Material Editor que aparece en la figura 5.23.

A continuación, se explica cada uno de ellos:

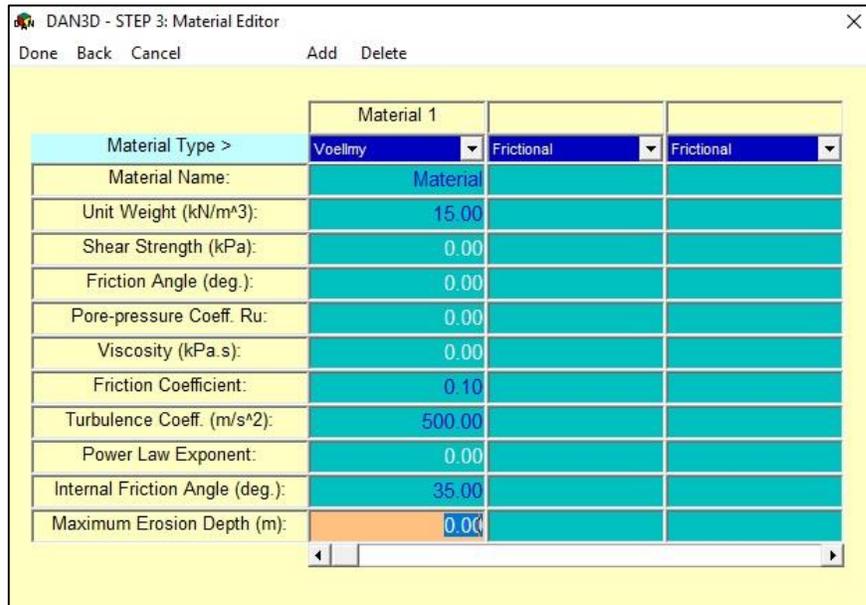


FIGURA 5-24 Cuadro de diálogo de asignación de características de los materiales a simular en software DAN3D [Fuente: Elaboración propia en software DAN3D].

- **Tipo de material (Material Type):** se asigna según el comportamiento del material, debido a esto se usará la reología de Voellmy ya que se asume que las tensiones de corte en el cuerpo son pequeñas, y que la resistencia al flujo se concentra en la base del mismo. Por otro lado, Richenmann&Koch (1997) mostraron que le modelo de Voellmy también ofrece buenos resultados en la simulación de flujos detríticos en canales torrenciales, por lo que es el más adecuado para el análisis.
- **Nombre del Material (Material Name):** aquí se asigna un nombre al material a simular. Este dato es opcional.
- **Peso Unitario (Unit Weight):** peso unitario del material a simular. Para el caso de las cuencas a simular, se tienen distintos tipos de suelo, pero los

predominantes son las Piroclásticas que tienen un valor recomendado de 16 kN/m^3 y cenizas volcánicas mejor conocidas como Tierra Blanca que su valor de peso unitario esta entre 13 y 14 kN/m^3 . Se tomará un valor promedio de 15 kN/m^3 para ambas cuencas.

- **Esfuerzo Cortante (Shear Strenght):** es el esfuerzo cortante del material, como el esfuerzo en estado estacionario no-drenado de materiales licuados. Se activa únicamente para las reologías Plásticas y de Bingham y se expresa en kPa.
- **Angulo de Fricción (Friction Angle):** ángulo de fricción del material. Se mide en grados y no puede ser mayor de 45° . Únicamente se elige en la reología Friccional.
- **Coeficiente de Presión de Poros (Pore Pressure Coefficient):** relación de la presión de poro al esfuerzo normal total en la base de la masa deslizante. Parámetro usado únicamente en la reología Friccional y es adimensional.
- **Viscosidad (Viscosity):** viscosidad dinámica y plástica de un fluido. Únicamente es usada en las reologías Newtoniana y de Bingham y se expresa en kPa.s.
- **Coeficiente de Fricción (Fricction Coefficient):** es definido como la tangente del ángulo de fricción dinámico total. Este coeficiente es adimensional y se utiliza en la reología de Voellmy. Debe estar entre 0 y

1. En este caso, se usa la recomendación dada por el profesor Hungr para el coeficiente de fricción de 0.1.

- **Coeficiente de Turbulencia (Turbulent Coefficient):** define el término de turbulencia en la ecuación de cortante basal. Es usado únicamente en la reología de Voellmy y se expresa en m/s^2 . Nuevamente, el profesor Hungr recomienda un valor de $500 m/s^2$, pero para este análisis se tomará el valor de $1500 m/s^2$, debido a que es el valor más desfavorable ya que el flujo se expande más sobre la superficie en análisis. Por lo que se recomienda realizar más investigaciones para definir este parámetro acorde a la cuenca en estudio.
- **Exponente de la Ley de Potencia (Power Law Exponent):** es el exponente que define la reología de la Ley de la Potencia.
- **Angulo de Fricción Interna (Internal Friction Angle):** ángulo que define la cantidad de fricción interna de un material. Este término se usa para derivar los coeficientes de presión de los esfuerzos tangenciales (k_x y k_y) utilizados en la fórmula desarrollada por Savage y Hutter (1987).

El software DAN3D asume que todos los materiales son friccionales cuando se deforman internamente. Es decir, para cada partícula, su resistencia a la deformación por corte es proporcional al esfuerzo normal que experimenta. Se tiene un valor predeterminado de 35° . Debido a que no se cuenta con la información suficiente para determinar este valor, se usa el valor por defecto 35° .

- **Máxima Profundidad Erosionada (Maximum Erosion Depth):** profundidad a la que el material es erosionado después de que la masa deslizante pase sobre él. Cuando no se cuenta con la información necesaria para obtener este dato se puede dejar en blanco.
4. Luego, se tienen otros parámetros adicionales como los que se muestran en el menú Tools>Options en la viñeta Parameters (Ver Figura 5-25). Los parámetros se describen a continuación:
- **Longitud Constante Suavizada (Smoothing Length Constant):** medida de la anchura del núcleo de interpolación de Gauss. Este valor determina el radio de influencia de cada partícula. DAN3D define un valor por defecto de 4 y es adimensional.
 - **Coefficiente de Suavidez de la Velocidad (Velocity Smoothing Coefficient):** este coeficiente es arbitrario y adimensional y se utiliza para determinar qué tan potente es el algoritmo de suavidez de la velocidad. Por defecto, DAN3D establece el valor de 0.01.
 - **Coefficiente de Rigidez (Stiffness Coefficient):** se usa para determinar los coeficientes de presión k_x y k_y . Es un valor adimensional y por defecto se establece de 200.
 - **Margen de Corte para Valores de Espesor (Slide Margin Cutoff Thickness):** valor de corte mínimo por debajo del cual las partículas o los nodos de la cuadrícula no se dibujarán en la pantalla durante la ejecución. Este parámetro se utiliza para eliminar gráficamente partículas atípicas o

nodos de la malla extrapolados innecesariamente pequeños. No elimina estas partículas completamente, se pueden encontrar en los archivos de salida de datos.

- **Número de Pasos de Tiempo para la Actualización de la Pantalla (Number of Timesteps Between Screen Update):** designa los números de pasos del tiempo antes de actualizar la pantalla. Entre mayor es este valor, menor es el tiempo en que se puede modelar un problema complejo. Este parámetro no afecta el análisis ni la salida de datos. Para minimizar el tiempo de las simulaciones se selecciona un valor de 100 para este parámetro.

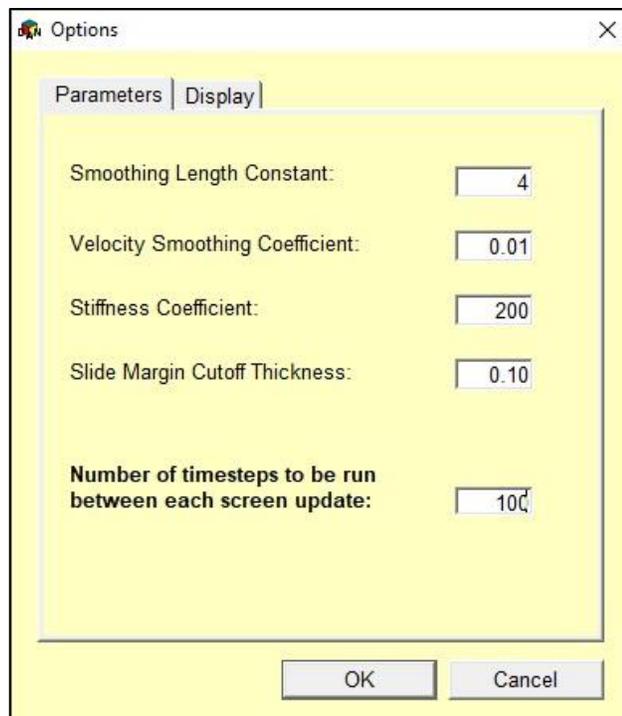


FIGURA 5-25 Cuadro de diálogo de parámetros generales en software DAN3D

[Fuente: Elaboración propia en software DAN3D].

En la viñeta Display, se encuentra la configuración de leyenda de los resultados graficados en la pantalla dependiendo de que grafica se seleccione.

5. Durante una simulación, se pueden mostrar varios tipos de gráficos en la pantalla. Se pueden mostrar dos tipos generales de gráficos, Gráficos de Partículas (Particle Plots) y de Malla (Grid Plots). Los gráficos de partículas se refieren a las características de cada partícula lisa individual. Los gráficos de malla se refieren a los datos de partículas extrapoladas a las ubicaciones de nodo de malla espaciadas uniformemente definidas en los archivos de malla de entrada de topografía. Los gráficos se seleccionan en el menú “Plots” y se describen a continuación:

- **Particle Thickness Plot:** muestra la profundidad de cada partícula del flujo (m).
- **Particle Velocity Plot:** muestra la velocidad de cada partícula del flujo (m/s).
- **Particle Volume Plot:** muestra el volumen de cada partícula del flujo (m³).
- **Grid Thickness Plot:** muestra la profundidad sobre cada nodo del mallado (m).
- **Grid Velocity Plot:** muestra la velocidad sobre cada nodo del mallado (m/s).
- **Grid Erosion Thickness Plot:** muestra la profundidad erosionada sobre cada nodo del mallado (m).

- **Impact Area Plot:** muestra el área impactada por el deslizamiento durante su descenso. Esta gráfica representa el grosor máximo del flujo que ha pasado por cada nodo del mallado desde el comienzo de la simulación. La gráfica se puede mostrar simultáneamente con cualquiera de las otras gráficas y se dibuja en gris. Se selecciona la gráfica Grid Thickness Plot para ser visualizada en la pantalla del DAN3D.
6. A continuación, se debe asignar una ubicación donde se guardarán el modelo y los archivos que este genera. Para este fin se utiliza el menú Tools>Data Output Options aparecerá un cuadro de dialogo como el mostrado en la figura 5-26. En este se muestran dos viñetas. La primera, Parameters, en ella se escoge una ubicación que será donde se guardarán los archivos y también pide que se especifique el lapso de tiempo al cual se irán guardando cada archivo, en esta investigación se escoge de 100 segundos para no tener demasiados archivos una vez haya concluido la simulación. En la siguiente viñeta, Output Files mostrada en la figura 5-27, se escogen los archivos tipo malla que generara la simulación.

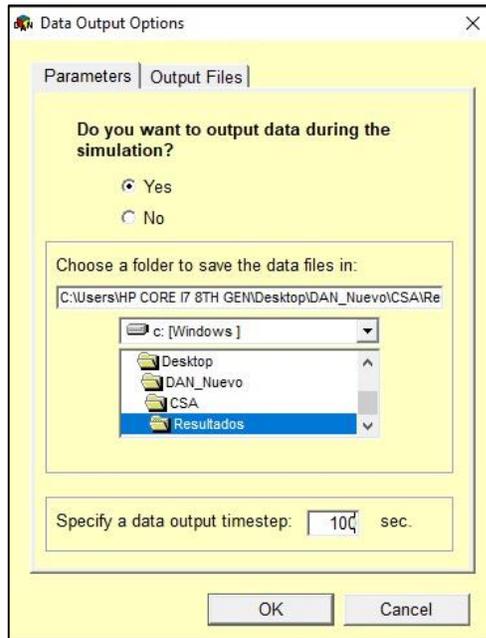


FIGURA 5-26 Cuadro de diálogo de asignación ubicación donde se guardará la simulación en software DAN3D [Fuente: Elaboración propia en software DAN3D].

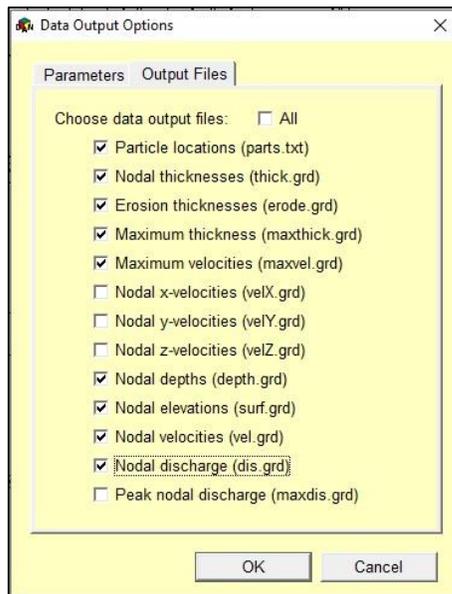


FIGURA 5-27 Cuadro de diálogo de asignación de archivos que generara la simulación en software DAN3D [Fuente: Elaboración propia en software DAN3D].

Los archivos de salida que puede generar una simulación de un flujo de escombros en DAN3D se describen a continuación:

- **Output.txt:** archivo que proporciona la velocidad máxima (m/s), longitud suavizada usada en la interpolación (m), espesor promedio (m), la localización del centro de masa en X y Y (m) y el volumen actual (m³) de cada paso de tiempo.
- **Finaloutput.txt:** este archivo proporciona un resumen de todos los parámetros de entrada y salida que incluyen tiempo final (s), posiciones finales en X y Y del centro de masa (m), velocidad máxima del deslizamiento durante toda la simulación (m/s), el ángulo de viaje (grados) y el volumen inicial y final. Este archivo se va actualizando por cada paso del tiempo.
- **Parts.txt:** archivo de texto que muestra en columnas la siguiente información para cada partícula del flujo: posición en X y Y de cada partícula (m), profundidad (m), velocidad (m/s), volumen (m³), los coeficientes de presión en X y Y (k_x y k_y) y la aceleración centrípeta para cada partícula.
- **Thick.grd:** muestra el espesor de cada nodo para cada paso de tiempo (m).
- **Erode.grd:** muestra el espesor erosionado para cada paso de tiempo (m).
- **Maxthick.grd:** muestra el máximo espesor o profundidad (m) que ha pasado por cada nodo del mallado desde el comienzo de la simulación.

- **Maxvel.grd:** muestra la velocidad máxima que se observó en cada nodo del mallado (m/s).
 - **VelX.grd:** muestra la velocidad en el instante en la dirección X sobre cada nodo del mallado (m/s).
 - **VelY.grd:** muestra la velocidad en el instante en la dirección Y sobre cada nodo del mallado (m/s).
 - **VelZ.grd:** muestra la velocidad en el instante en la dirección Z sobre cada nodo del mallado (m/s).
 - **Depth.grd:** muestra la profundidad final en metros (m) en cada nodo del mallado.
 - **Surf.grd:** muestra la elevación de la superficie sobre cada nodo del mallado (m).
 - **Vel.grd:** muestra la velocidad sobre cada nodo del mallado en (m/s).
 - **Dis.grd:** muestra la descarga sobre cada nodo del mallado (m²/s).
 - **Maxdis.grd:** muestra la descarga máxima sobre cada nodo del mallado (m²/s).
7. Una vez ingresados todos los parámetros, se procede a guardar y ejecutar el modelo. Se debe guardar antes de ejecutar porque de lo contrario el software no permitirá ejecutar la simulación. Para ejecutar una simulación se debe hacer clic en el botón Run del Run Control Box que aparece al costado izquierdo de la ventana principal del DAN3D (Figura 5-28). Con

cada actualización de pantalla, los datos relevantes al deslizamiento se muestran en el Run Control Box. Estos datos se describen a continuación:

- **Tiempo Transcurrido (Elapsed Time):** tiempo transcurrido del sistema desde que la simulación comenzó (Horas: Minutos: Segundos).
- **Tiempo de Modelación (Model Time):** es el tiempo transcurrido desde que empezó la simulación del modelo (s).
- **Velocidad Máxima Actual (Current Maximum Velocity):** velocidad máxima general experimentada a lo largo de todo el flujo desde que inició la simulación (m/s).
- **Espesor Promedio (Average Thickness):** en este se muestra el espesor promedio actual del flujo (m).
- **Desplazamiento del Centro de Masa (Displacement of Centre of Mass):** muestra el desplazamiento que ha tenido el centro de masa del flujo desde su posición inicial. Se expresa en metros y está representado para cada eje (X, Y y Z).
- **Distancia en Planta que ha Viajado el Centro de Masa (Plan Travel Distance of Centre of Mass):** desplazamiento horizontal en planta que ha viajado el centro de masa desde su posición inicial (m).
- **Volumen Inicial del Flujo (Initial Slide Volume):** muestra el volumen de liberación del flujo en un tiempo igual a cero (m³).
- **Volumen Final del Flujo (Final Slide Volume):** volumen actual del flujo expresado en metros cúbicos (m³). Si no se considera una máxima

profundidad erosionada en las propiedades del material, este volumen será igual que el volumen de liberación del flujo.

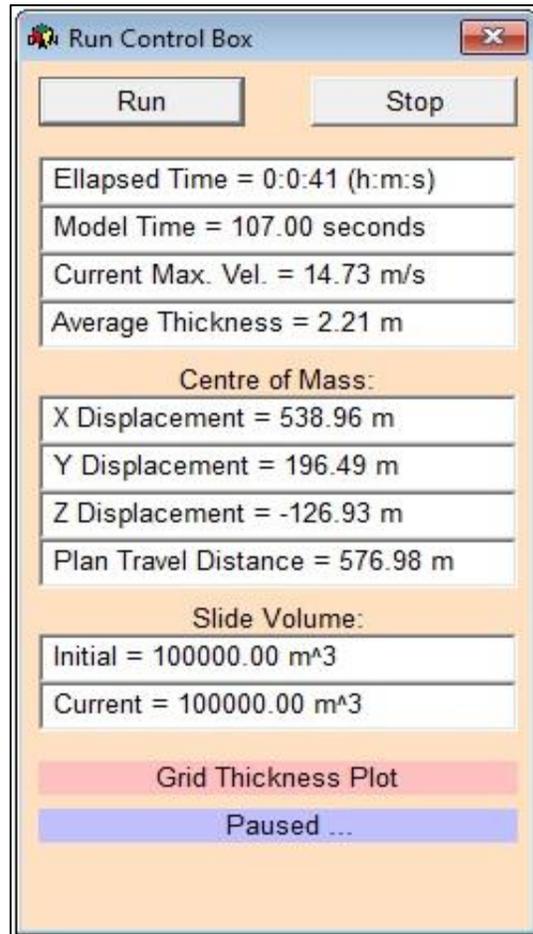


FIGURA 5-28 Cuadro de control, Run Control Box, en el cual se observarán los datos generales de la simulación en software DAN3D [Fuente: Elaboración propia en software DAN3D].

En la figura 5-29, se muestra la simulación del flujo en el DAN3D de la cuenca San Antonio de un volumen de 50,000 m³.

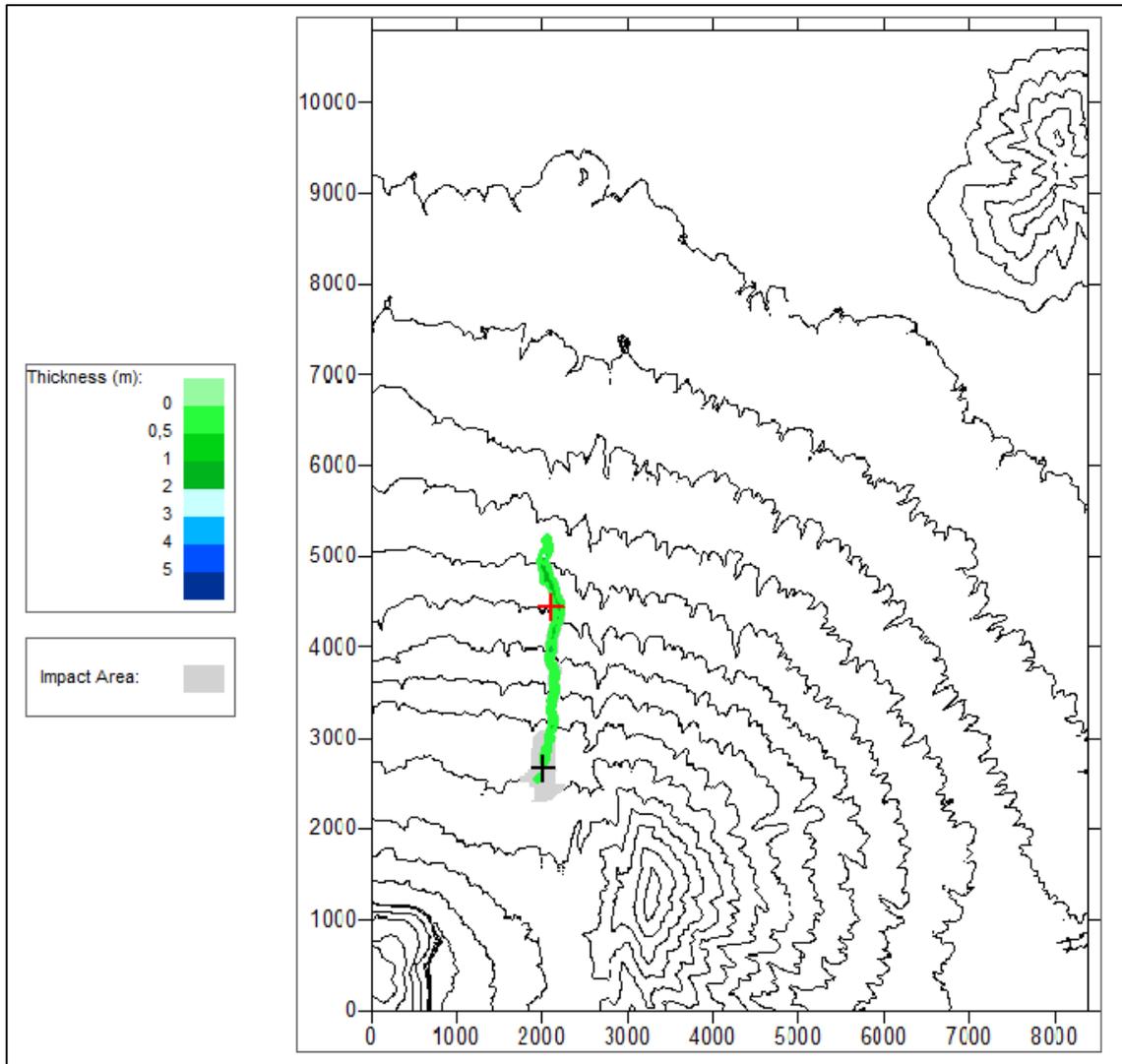


FIGURA 5-29 Mancha del flujo de escombros en cuenca San Antonio, para un volumen de 50,000 m³ en el software DAN3D [Fuente: Elaboración propia en software DAN3D].

5.4 GENERACIÓN DE MAPAS

La generación de mapas que se realizaron, representan las manchas de los flujos de escombros para diferentes volúmenes en cada cuenca (San Antonio y El Ángel), simulados en el DAN3D. Con la obtención de las simulaciones finalizadas en el DAN3D, estos resultados con la ayuda de software Surfer 8 se georreferenciaron y exportaron en shape para abrirlos y trabajarlos en el software Qgis.

Para la generación de los archivos resultados en formato shape se utilizó el archivo en formato *.grd "Maxthick" que, como se explicó en el Capítulo 5, muestra las profundidades máximas obtenidas durante la simulación realizada en DAN3D que para la conversión de este en archivo en formato *.grd a tipo *.shp se detallan a continuación los siguientes pasos:

1. En la pestaña "Map>Contour Map" se selecciona "New Contour Map" (como se muestra en la Figura 5-30) y se busca la ubicación en donde se guardaron los resultados generados durante la simulación en DAN3D y se selecciona el último archivo que en el caso de la simulación con volumen de 50,000 m³ es el "Maxthick100" como se observa en la Figura 5-30:

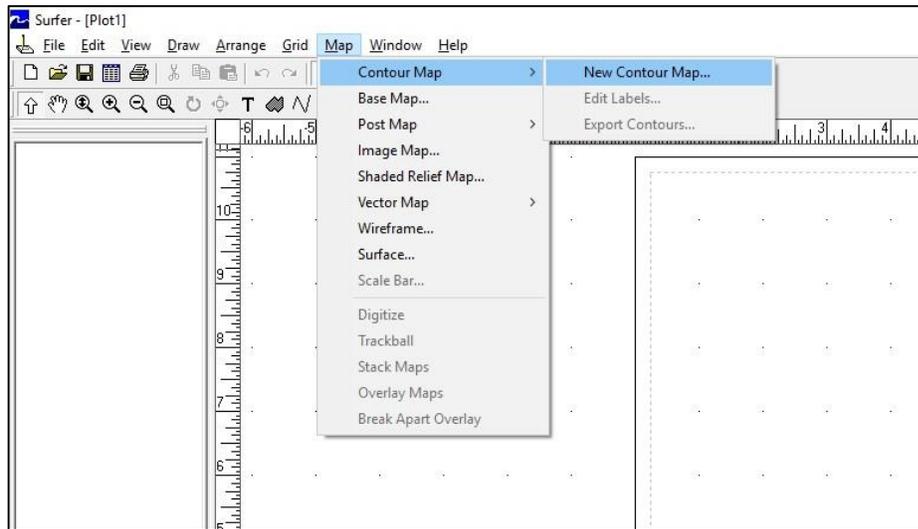


FIGURA 5-30 Introducción de archivo *.grd al software Surfer 8.0

[Fuente: Elaboración propia en software Surfer 8.0].

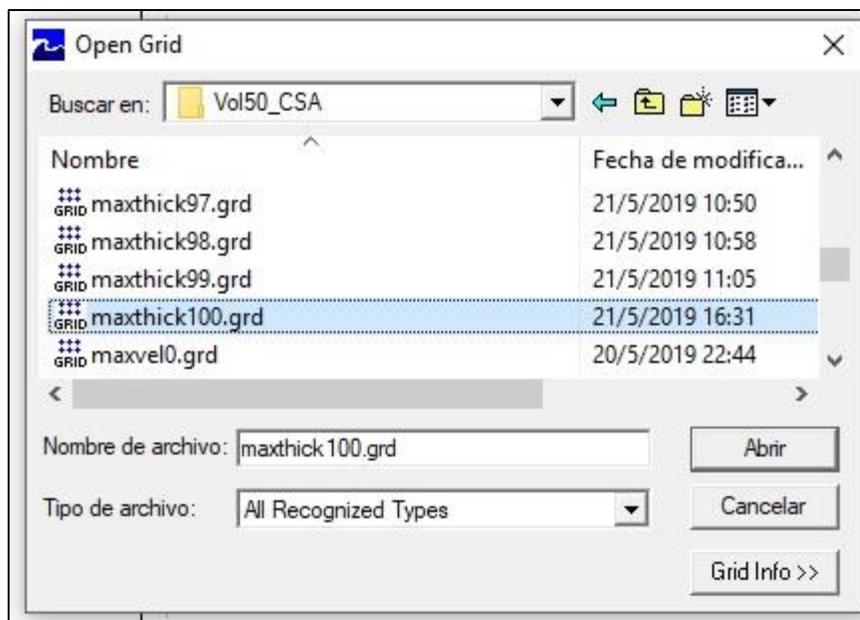


FIGURA 5-31 Ubicación de archivo "Maxthick100" [Fuente: Elaboración propia en software Surfer 8].

2. Luego, se procede a exportar el archivo “Maxthick100” a formato Shape para poder elaborar los mapas en el software QGIS. Lo anterior se logra en la pestaña “File>Export” como se muestra en la Figura 5-31.

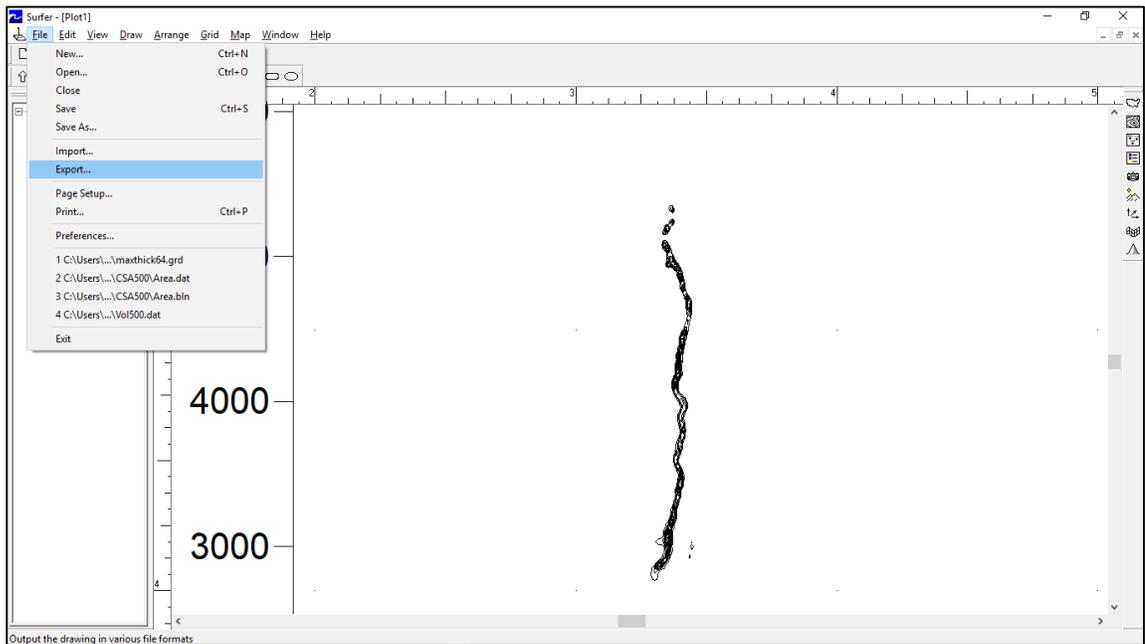


FIGURA 5-32 Exportación de archivo Maxthick100.grd a formato *.shp

[Fuente: Elaboración propia en software Surfer 8].

3. En la ventana emergente, se selecciona el formato de exportación, el nombre del archivo y la ubicación donde se guardará dicho archivo como se muestra en la figura 5-33.

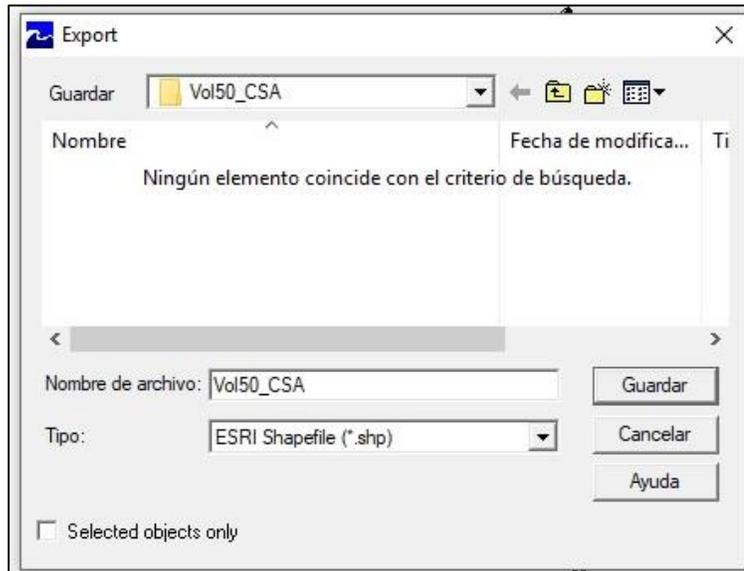


FIGURA 5-33 Selección del formato a exportar, así como su nombre y ubicación en donde se guardará dicho archivo [Fuente: Elaboración propia en software Surfer 8].

- Finalmente aparecerá una ventana como la que se muestra en la figura 5-34 en donde se elige la escala del archivo tipo Shape.

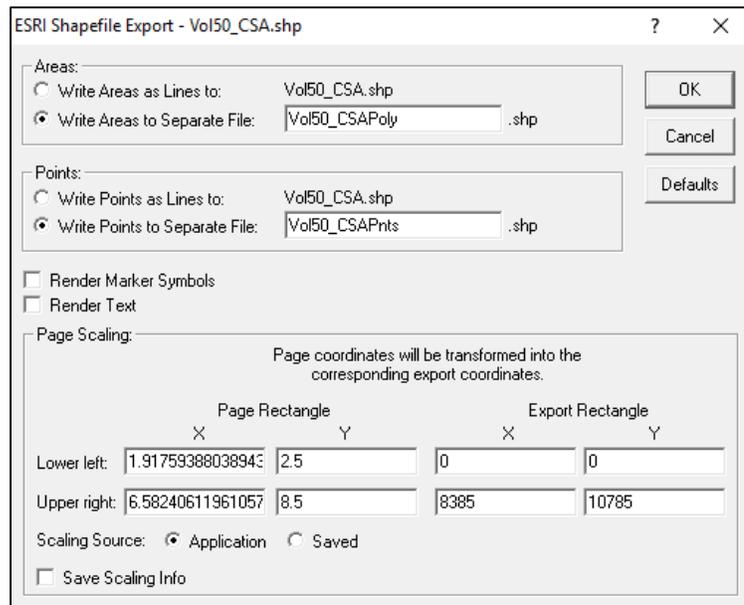


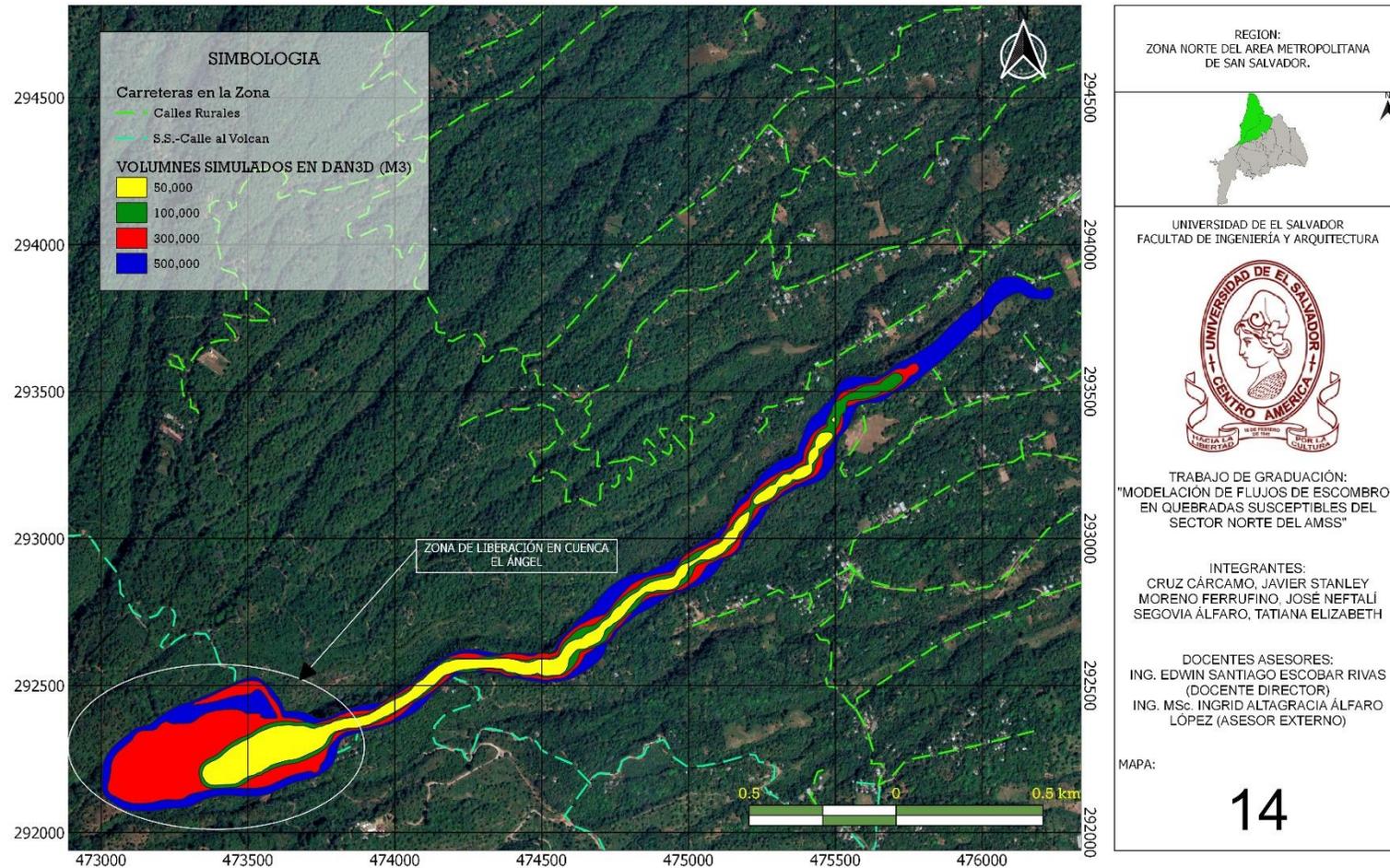
FIGURA 5-34 Escala de exportación al archivo tipo shape [Fuente: Elaboración propia en software Surfer

8].

Luego, se da clic en “Ok” y ya se tiene creado el shape que se utilizó en QGIS para generar los mapas 14 y 15 en donde se muestran detalladamente las manchas de los diferentes volúmenes de flujos de escombros en la zona de estudio.

En el mapa 14 y 15 se muestran detalladamente los resultados tipo manchas de los diferentes volúmenes de flujos de escombros en la zona de estudio.

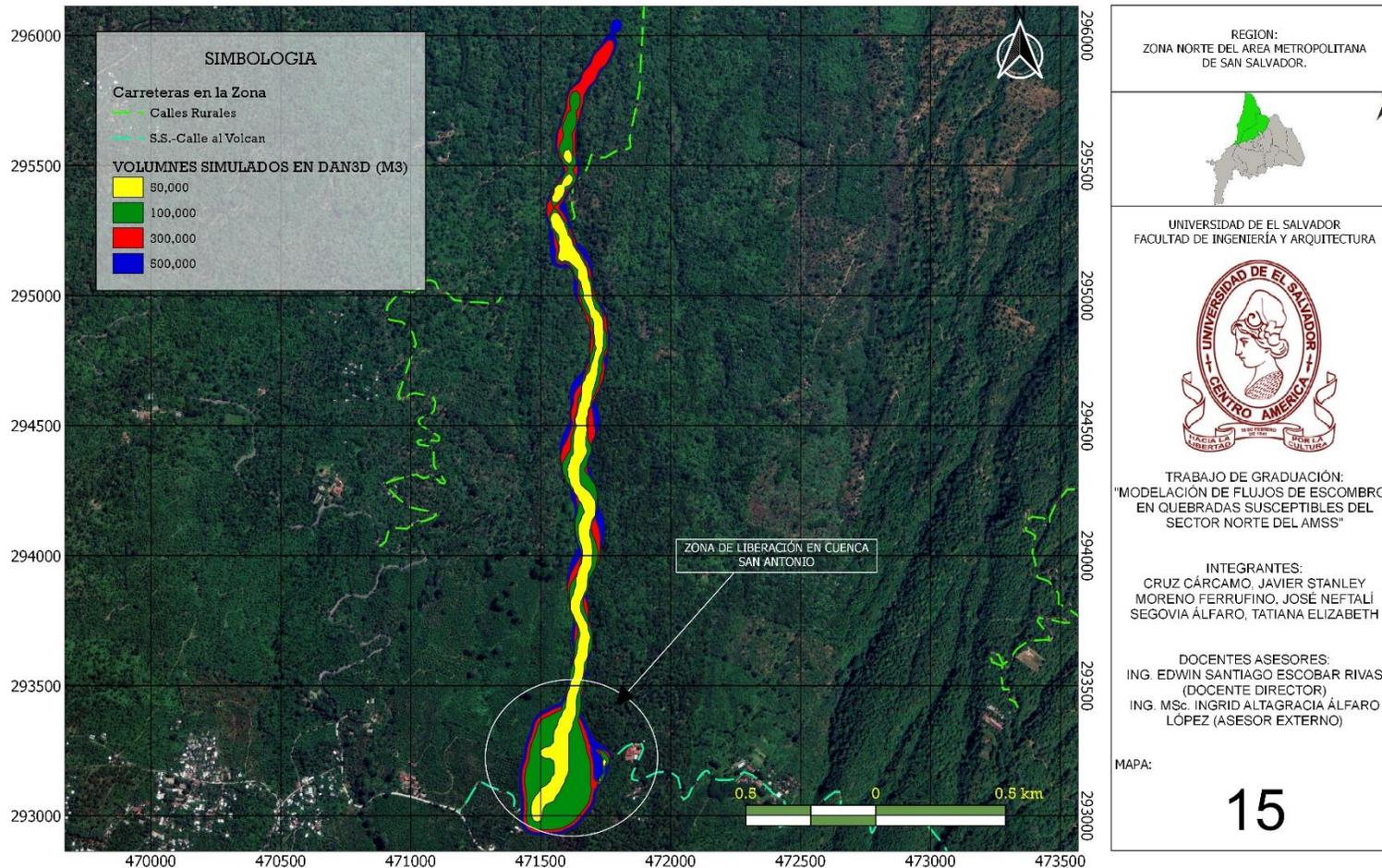
FLUJO DE ESCOMBRO EN CUENCA EL ANGEL



MAPA 14 Mancha de flujo de escombros en Cuenca San Antonio, de diferentes volúmenes simulados en el DAN3D.

[Fuente: Elaboración propia en software Qgis].

FLUJO DE ESCOMBRO EN CUENCA SAN ANTONIO



MAPA 15 Mancha de flujo de escombros en Cuenca El Ángel, de diferentes volúmenes simulados en el DAN3D

[Fuente: Elaboración propia en software Qgis]

CAPÍTULO VI

ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1 RESUMEN

En este Capítulo se realizará el análisis de los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas en el software DAN3D, con el objetivo de presentar y analizar los resultados y su aplicabilidad, pudiéndose determinar la condición más probable a un futuro evento de flujo de escombros.

También, se presentan y explican en forma ordenada, los archivos generados en el DAN3D, se determinan los parámetros más importantes de cada flujo simulado, como: profundidad máxima, velocidad máxima, distancia máxima recorrida, área de impacto, cota más alta y más baja entre otros; éstos parámetros se utilizarán para determinar la susceptibilidad en el sector respecto a un probable evento de flujo de escombros.

Con los archivos tipo malla que se pueden obtener de las simulaciones, es posible generar mapas de intensidad considerando las máximas profundidades de cada flujo, en los cuales se pueden determinar las zonas de inicio, transporte

y depósito, con la ayuda del perfil topográfico y de la trayectoria que simula el flujo.

Al obtenerse las zonas de inicio, transporte y depósito, se determinarán para su análisis, las secciones transversales, en donde se mostrará la altura alcanzada por cada flujo y la posible erosión y cambio de sección del canal natural del río o quebrada debido al paso del flujo.

Finalmente, se generará el mapa de amenaza, en donde se muestran las viviendas, calles, infraestructuras públicas, etc. que puedan ser afectadas por un determinado evento de flujo y así poder presentar recomendaciones sobre qué acciones realizar en dichos sectores.

6.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.2.1 Escenarios Simulados en el DAN3D

Se realizaron una serie de simulaciones en el DAN3D para la cuenca San Antonio y la cuenca El Ángel. En la figura 6-1 se muestra las zonas de liberación del flujo de cada cuenca.

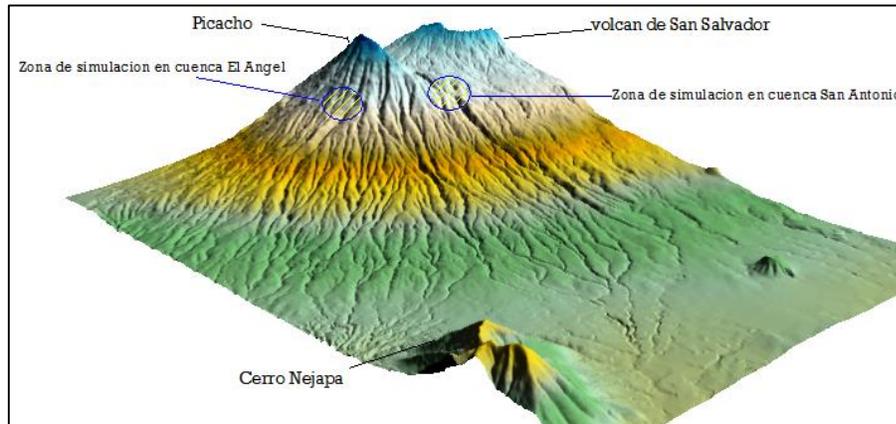


FIGURA 6-1 Zona de liberación en cuenca San Antonio y El Ángel

[Fuente: Elaboración propia en software Surfer 8.0].

La superficie de ruptura que dio origen al flujo de escombros, fue definida mediante la topografía digitalizada en el Capítulo 3, en base a curvas de nivel a cada 5 metros, e imágenes históricas de Google Earth en la zona, donde se define un posible flujo inicial y proponiendo en cada modelación, los volúmenes mencionados en el Capítulo 5 (50,000, 100,000, 300,000 y 500,000 m³); también, se define el Coeficiente de turbulencia (ξ) para todos los escenarios como 1,500 m/s², por ser el más desfavorable en las simulaciones realizadas de prueba y error. Este Coeficiente de turbulencia representa el cortante basal del flujo y toma en cuenta la resistencia del flujo que depende de la velocidad, en materiales granulares según Voellmy¹⁸. A continuación, se muestran la tabla 6.2-1 de los escenarios simulados en el DAN3D para cada una de las cuencas:

¹⁸ Modelación de Flujos de Derrubios Empleando el Método SPH, Aplicación en Casos Reales, Sánchez Morales, Mila, Universidad Politécnica de Madrid, 2009.

Escenarios simulados en el DAN3D			
Escenario	Cuenca San Antonio	Escenario	Cuenca El Ángel
SA-01	Vol. 50,000 m ³ $\xi=1500$ m/s ²	EA-01	Vol. 50,000 m ³ $\xi=1500$ m/s ²
SA-02	Vol. 100,000 m ³ $\xi=1500$ m/s ²	EA-01	Vol. 100,000 m ³ $\xi=1500$ m/s ²
SA-03	Vol. 300,000 m ³ $\xi=1500$ m/s ²	EA-03	Vol. 300,000 m ³ $\xi=1500$ m/s ²
SA-04	Vol. 500,000 m ³ $\xi=1500$ m/s ²	EA-04	Vol. 500,000 m ³ $\xi=1500$ m/s ²

Tabla 6.2-1 Escenarios simulados en el DAN3D [Fuente: Elaboración propia].

6.2.2 Elementos de Salida del DAN3D

El software *DAN3D*, proporciona como elementos de salida, dos informes que contienen las principales características del flujo simulado: *output.txt* y *finaloutput.txt*.

```

finaloutput: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
F:\taty\CSA2\vol150\vol150_CSA_e1500.dn3
Project:      vol150 csa
Job:         voellmy f=0.1 y e=1500
Input by:    cap5
Number of Materials: 1
Number of Particles: 2000
Erosion Rate (m^-1): 0.05
Smoothing Length Constant: 4
Velocity Smoothing Coefficient: 0.01
Stiffness Coefficient: 200
Time Step (s): 0.1
Elevation File Name: F:\taty\CSA2\vol150\Topografía_CSA.grd
Depth File Name: F:\taty\CSA2\vol150\vol150.grd
Erosion File Name: None

Material 1
Unit weight (kN/m^3): 15
voellmy Rheology
Shear Strength (kPa): 0
Friction Angle (deg.): 5.71059
Friction Coefficient: 0.1
Pore-pressure Coefficient: 0
Viscosity (kPa.s): 0
Turbulence Coefficient (m/s^2): 1500
Power Law Exponent: 0
Internal Friction Angle (deg.): 35

End Time (s): 10000
Final COM X-Position (m): 2625.22
Final COM Y-Position (m): 4577
Maximum Slide velocity (m/s): 26.2491
Travel Angle (deg.): 14.3611
Start volume (m^3): 50074.7
Final volume (m^3): 50074.7

Output files saved in: F:\taty\CSA2\vol150\resultados\
Output time interval (s): 100

```

FIGURA 6-2 Informe "finaloutput" del Escenario 1: vol. 50,000 m³ $\xi=1,500$ m/s² cuenca San Antonio

[Elaboración propia en software DAN3D].

En la Figura 6-2 se muestra el informe final de salida proporcionado por el DAN3D, correspondiente al Escenario SA-1: vol. 50,000 m³ $\xi=1,500$ m/s², de la cuenca San Antonio, según tabla 6.2-1.

Como se puede observar, este informe contiene la información suministrada de los valores de entrada, descrita en la sección del capítulo 5.2 ejecución de una simulación del DAN3D.

```

output: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
COM Y-Position (m)= 4577
Volume (m^3)= 50074.7

t (s)= 9999.7
Max. Velocity (m/s)= 0.89573
Smoothing length (m)= 13.6896
Average thickness (m)= 1.6057
COM X-Position (m)= 2625.22
COM Y-Position (m)= 4577
Volume (m^3)= 50074.7

t (s)= 9999.8
Max. Velocity (m/s)= 0.972181
Smoothing length (m)= 13.6895
Average thickness (m)= 1.60571
COM X-Position (m)= 2625.22
COM Y-Position (m)= 4577
Volume (m^3)= 50074.7

t (s)= 9999.9
Max. Velocity (m/s)= 0.71822
Smoothing length (m)= 13.6894
Average thickness (m)= 1.60574
COM X-Position (m)= 2625.22
COM Y-Position (m)= 4577
Volume (m^3)= 50074.7

t (s)= 10000
Max. Velocity (m/s)= 0.718187
Smoothing length (m)= 13.6892
Average thickness (m)= 1.60577
COM X-Position (m)= 2625.22
COM Y-Position (m)= 4577
Volume (m^3)= 50074.7

```

FIGURA 6-3 informe “output” del Escenario 1: vol. 50,000 m³ $\xi=1,500$ m/s² cuenca San Antonio [Fuente: Elaboración propia en software DAN3D].

Se observa en la figura 6-3, que el informe output proporcionado por el DAN3D, presenta la información guardada y acumulada en cada paso de tiempo establecido. Para continuar con el análisis de resultados de los escenarios simulados en el DAN3D, es necesario tener en cuenta los siguientes aspectos:

1. Extracción de los valores de los parámetros de ruta de cada escenario, que dan como resultado en los informes *generados en el DAN3D*. Los valores a extraer son los siguientes:

- Profundidad del flujo.
 - Velocidad del flujo.
 - Distancia recorrida del flujo.
 - Área de impacto.
 - Área máxima transversal del flujo.
 - Cota inicial y final del flujo.
2. Comparación de los valores de cada uno de los escenarios estudiados en la cuenca San Antonio y la cuenca El Ángel, y determinar cuál escenario es más probable en cada una de ellas.
 3. Análisis del área de impacto o de afectación según los escenarios simulados, considerando proyecciones a futuro de áreas de suelo urbanizable, así como las zonas urbanizadas existentes, considerando, además, infraestructura pública, calles, obras de paso, cultivos, puentes, etc. Observadas desde la plataforma de Imágenes satelitales con Google Earth.

Con lo descrito anteriormente se procede a mostrar los resultados obtenidos de cada uno de los escenarios simulados en el DAN3D pertenecientes a La cuenca El Ángel y a la cuenca del Rio San Antonio.

Se puede observar en las tablas 6.2-2 y 6.2-3 los resultados de los flujos de escombros simulados en el DAN3D de la cuenca San Antonio. El área de liberación corresponde a las coordenadas, $X=471,628.34$ y $Y=293,439.89$ proyección Lambert por el lado Nort-Oeste del Picacho (Entre el Boquerón y el

Picacho). Los recorridos en las simulaciones para los distintos volúmenes considerados en el análisis, proyectan la dirección del flujo hacia el tramo del cauce principal de la quebrada llamada “La Quebradona”.

Cuenca San Antonio							
Escenarios	Volumen (m ³)	Coordenadas Lambert				Cota (msnm)	
		Inicio		Final		Inicial	Final
		X	Y	X	Y	Z	
SA-01	50,000	471,628.34	293,439.89	471,604.50	295,561.16	1173.84	751.75
SA-02	100,000			471,550.54	295,334.06		750.00
SA-03	300,000			471,773.00	295,980.51		710.00
SA-04	500,000			471,797.35	296,063.59		705.00

Tabla 6.2-2 valores de coordenadas del flujo en cuenca San Antonio.

[Fuente: elaboración propia con los resultados obtenidos en software DAN3D].

Características de flujo de cada uno de los escenarios en la cuenca San Antonio.

Cuenca San Antonio					
Escenarios	Volumen (m ³)	Área de Impacto (m ²)	Profundidad Máxima (m)	Velocidad Máxima (m/s)	Distancia Recorrida (m)
SA-01	50,000	114,889.58	8.28	26.25	1,895.77
SA-02	100,000	215,295.02	9.66	32.86	2,121.40
SA-03	300,000	297,026.45	18.92	37.23	2,544.74
SA-04	500,000	363,468.07	24.50	39.14	2,629.14

Tabla 6.2-3 valores de las características del flujo de escombros en cuenca San Antonio.

[Fuente: elaboración propia con los resultados obtenidos en software DAN3D].

De la misma forma, se obtienen los resultados de los escenarios del flujo de escombros simulados en el DAN3D, corresponden a la cuenca El Ángel, según tabla 6.2-4 y 6.2-5. El área de liberación corresponde a las coordenadas, X=473,777.69 y Y=292,337.01 proyección Lambert por el lado Este del Picacho.

Los recorridos de estos flujos resultaron ser dirigidos por tramo del cauce principal llamada “Quebrada Las Chacas”.

Cuenca El Ángel							
Escenarios	Volumen (m ³)	Coordenadas Lambert				Cota (Msnm)	
		Inicio		Final		Inicial	Final
		X	Y	X	Y	Z	
EA-01	50,000	473,777.69	292,337.01	475,486.11	293,358.50	1145.24	755.00
EA-02	100,000			475,733.37	293,552.10		705.00
EA-03	300,000			476,248.48	293,825.00		705.00
EA-04	500,000			476,255.48	297,825.59		650.00

Tabla 6.2-4 Valores de coordenadas del flujo en cuenca El Ángel

[Fuente: Elaboración propia con los resultados obtenidos en software DAN3D].

Características de flujo de cada uno de los escenarios en la cuenca El Ángel.

Cuenca El Ángel					
Escenarios	Volumen (m ³)	Área De Impacto (m ²)	Profundidad Máxima (m)	Velocidad Máxima (m/s)	Distancia Recorrida (m)
EA-01	50,000	107,412.83	6.20	21.50	1,990.50
EA-02	100,000	174,144.66	8.41	24.20	2,302.40
EA-03	300,000	340,782.68	19.22	31.74	2,509.97
EA-04	500,000	523,550.91	18.36	37.73	3,096.19

Tabla 6.2-5 Valores de las características del flujo de escombros en cuenca El Ángel.

[Fuente: elaboración propia resultados en software DAN3D].

En la tabla 6.2-5 se pueden observar las características de flujo de cada uno de los escenarios sobre la cuenca El Ángel. A pesar de que estos escenarios difieren entre sí por los volúmenes considerados, se puede establecer que cada uno de estos valores obtenidos son directamente proporcionales a la cantidad de volumen de liberación.

6.3 MAPAS DE INTENSIDADES PARA CADA ESCENARIO

En esta sección se presenta los mapas de profundidades alcanzados por cada volumen simulado, con el fin de determinar de mejor manera las zonas de Inicio, transporte y depósito. Esto se puede lograr verificando las zonas que tienen mayores profundidades y en cuales el flujo solo transitó.

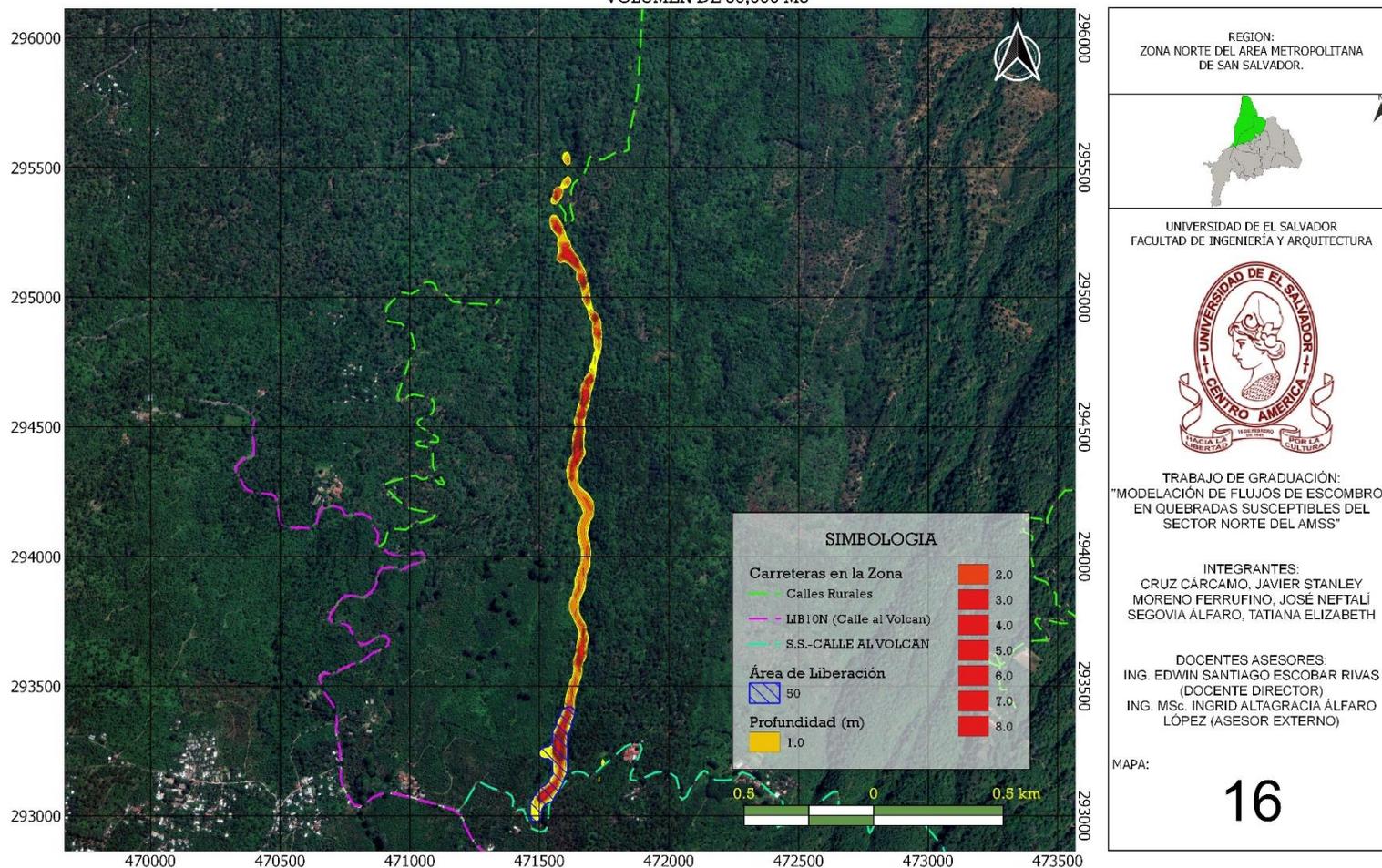
En los mapas de intensidades se tienen señalizados desde un tono de amarillo a rojo las diferentes profundidades, donde el tono rojo representa la presencia de profundidades mayores; estas áreas serán consideradas como zona de depósito, en primer lugar debido a sus pendientes suficientemente pequeñas para ya no permitir el desplazamiento por gravedad, en segundo lugar por cambio brusco en la trayectoria en dirección horizontal y en tercer lugar, por el cambio de geología y coeficiente de rugosidad, es decir una zona con material duro o rocoso que no permite al sedimento continuar su trayectoria.

Los resultados de las profundidades en la trayectoria del flujo de los diferentes volúmenes simulados en el DAN3D, para la cuenca San Antonio, se muestran en los mapas 16 al 19. En la tabla 6.2-3, se muestra los resultados máximos de cada uno de los volúmenes correspondiente a la cuenca San Antonio, en el cual la profundidad máxima de cada flujo se da en la zona de inicio [área de liberación según simbología en los mapas 16 al 19 (zona achurada)], debido a que en ésta zona es donde ocurre el deslizamiento y comienza a formarse el flujo de escombros.

La zona de transporte se caracteriza por tener ancho del flujo y profundidades moderadas y no tan profundas, con respecto al volumen simulado. En esta zona se puede apreciar que las profundidades en los mapas 16 y 17, son pequeñas y casi iguales, que en los mapas 18 y 19. También es muy notorio que en el ancho del flujo existe una gran diferencia en donde este ancho es proporcional al volumen simulado.

La zona de depósito se presenta en las coordenadas Lambert 471,761 y 294,422 entre las elevaciones 985 y 970 msnm en el mapa 16 y en las coordenadas Lambert 471,608 y 295,528 y entre las elevaciones 800 y 770 msnm en mapa 17. En los volúmenes mayores (300,000 y 500,000 m³) que se presentan en los mapas 18 y 19, el flujo sigue su trayectoria hasta que llega a las coordenadas 471,632 y 295,742 entre las elevaciones 760 y 745 que también presenta pequeñas acumulaciones de sedimentos. Es evidente que los montículos de sedimentos, en la zona de depósito, están más dispersos en los mapas 16 y 17 que en los mapas 18 y 19.

FLUJO DE ESCOMBRO EN CUENCA SAN ANTONIO
VOLUMEN DE 50,000 M3



REGION:
ZONA NORTE DEL AREA METROPOLITANA
DE SAN SALVADOR.

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

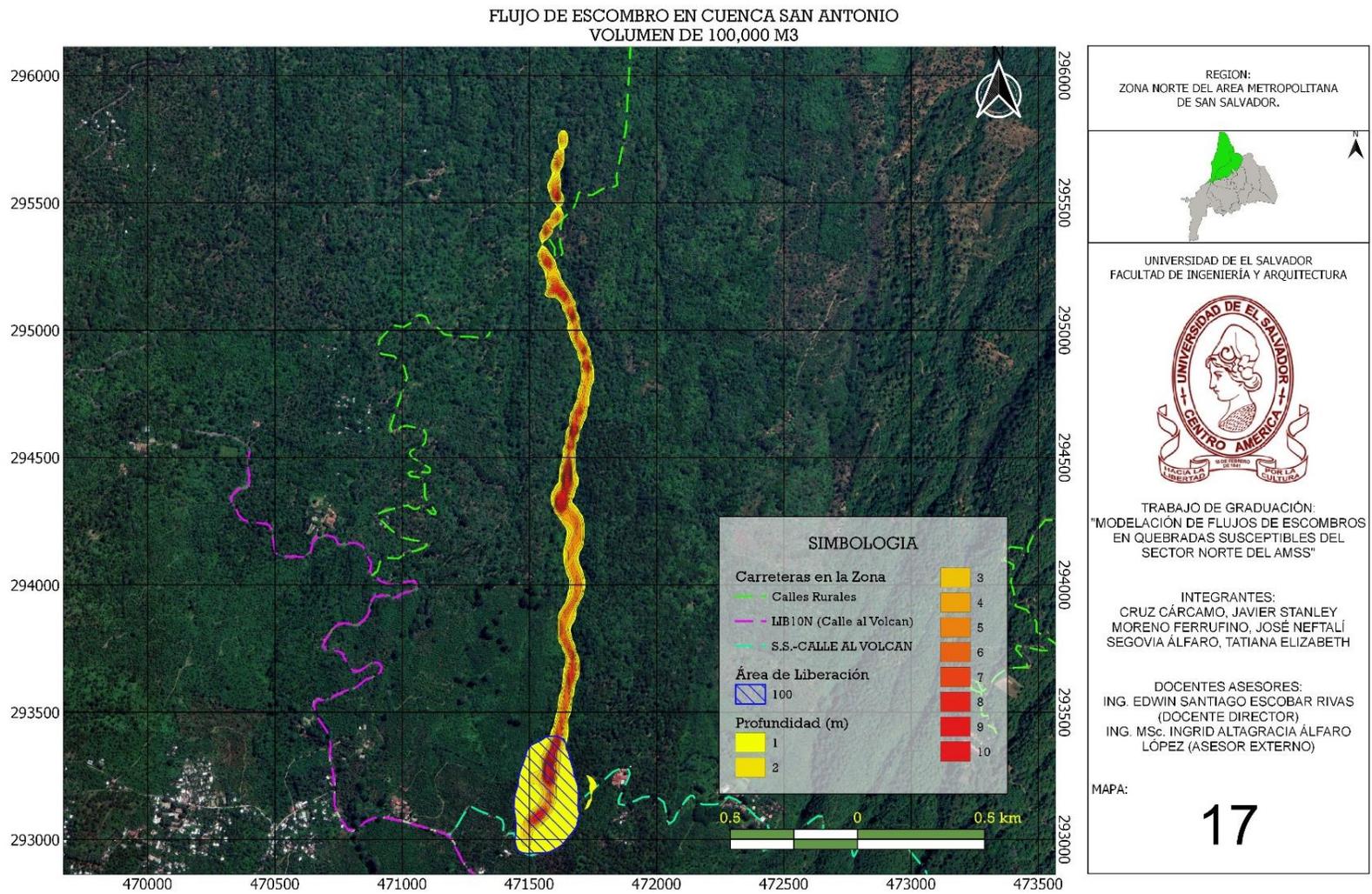
TRABAJO DE GRADUACIÓN:
"MODELACIÓN DE FLUJOS DE ESCOMBROS
EN QUEBRADAS SUSCEPTIBLES DEL
SECTOR NORTE DEL AMSS"

INTEGRANTES:
CRUZ CÁRCAMO, JAVIER STANLEY
MORENO FERRUFINO, JOSÉ NEFTALÍ
SEGOVIA ÁLFARO, TATIANA ELIZABETH

DOCENTES ASESORES:
ING. EDWIN SANTIAGO ESCOBAR RIVAS
(DOCENTE DIRECTOR)
ING. MSc. INGRID ALTAGRACIA ÁLFARO
LÓPEZ (ASESOR EXTERNO)

Mapa 16: Simulación de flujo de escombros correspondiente al escenario SA-01, con un volumen de liberación de 50,000

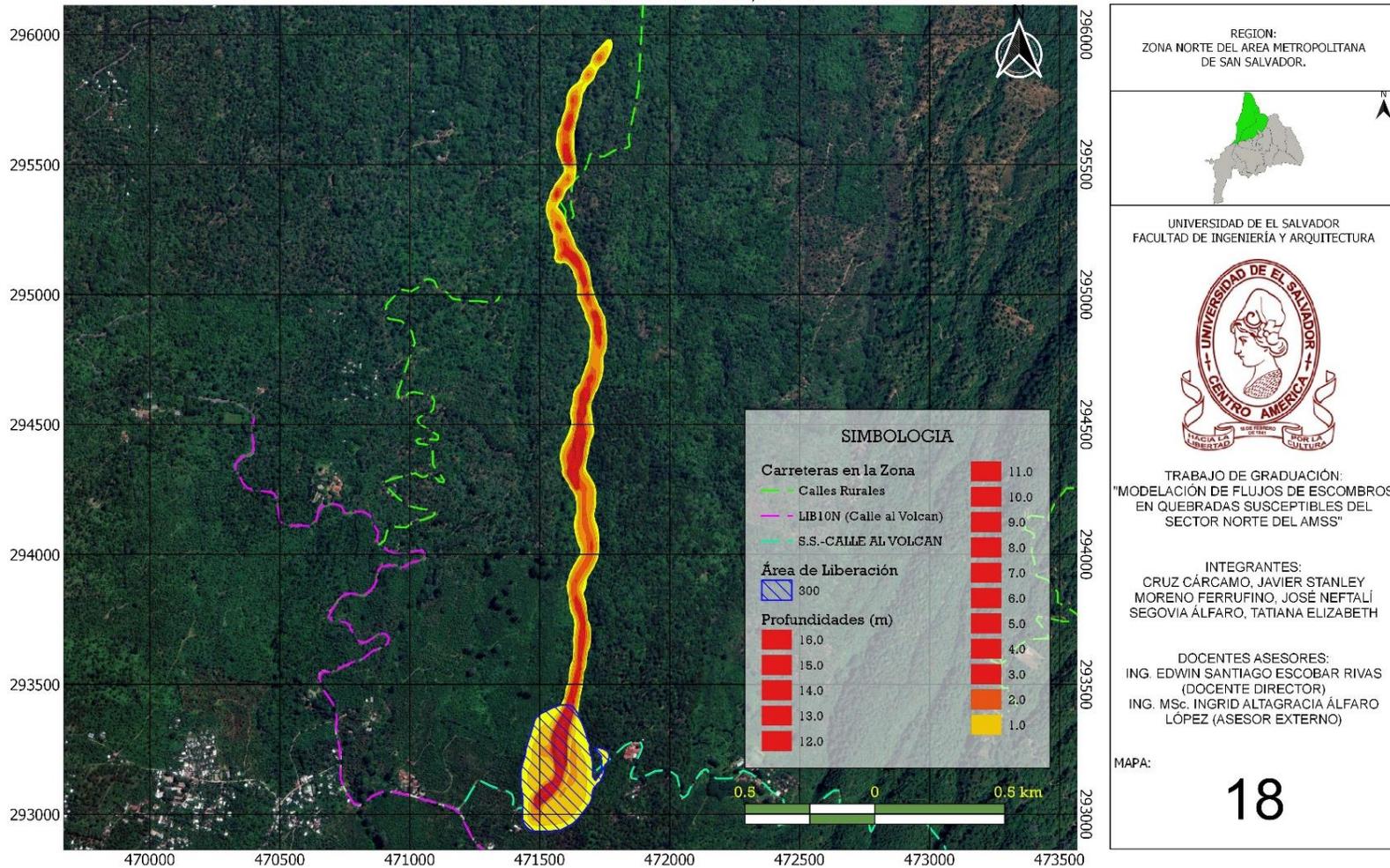
[Fuente: Elaboración propia en software QGIS].



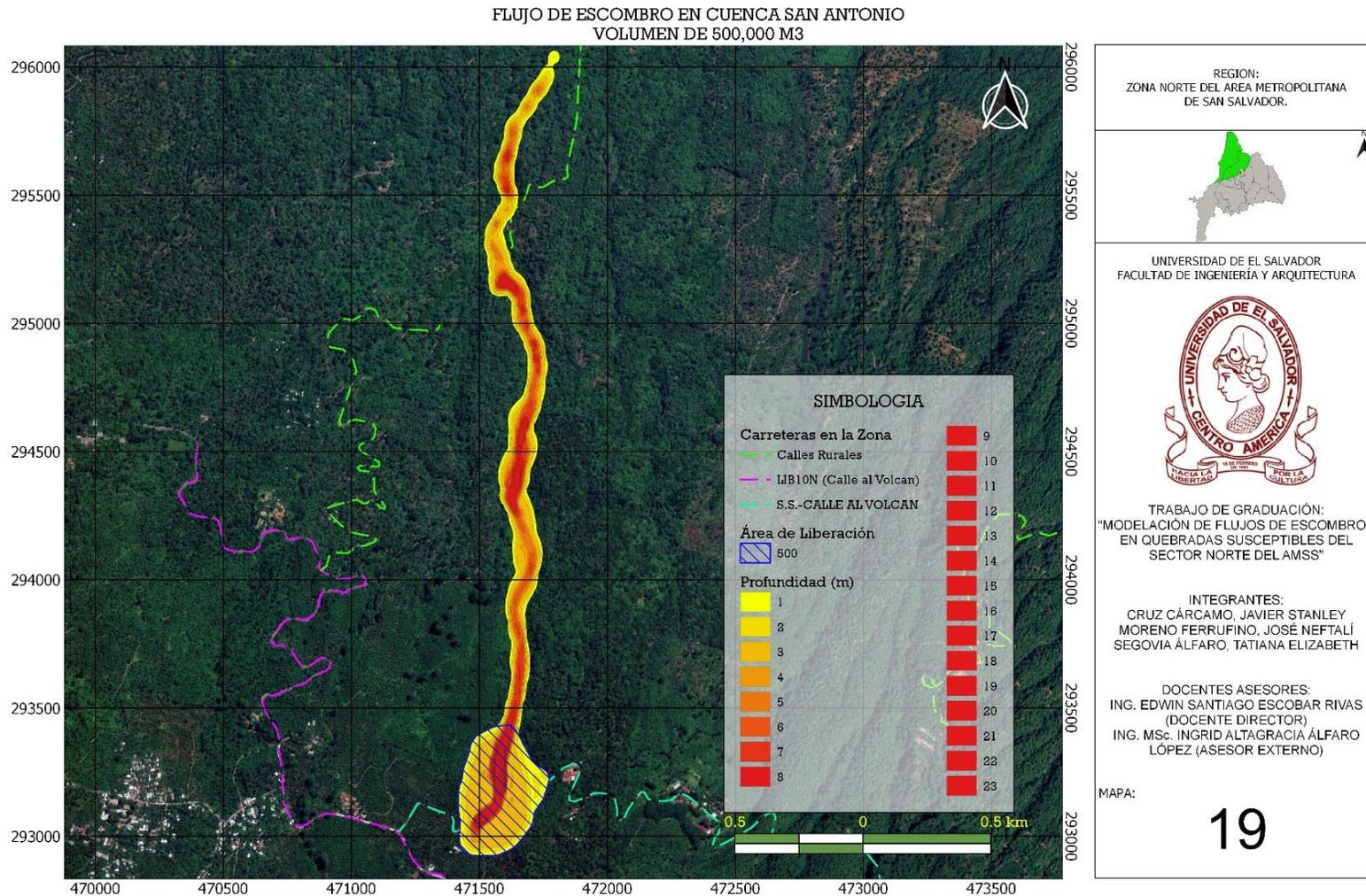
MAPA 17 Simulación de flujo de escombro correspondiente al escenario SA-02, con un volumen de liberación de 100,000

[Fuente: Elaboración propia en software QGIS].

FLUJO DE ESCOMBRO EN CUENCA SAN ANTONIO
VOLUMEN DE 300,000 M3



MAPA 18 Simulación de flujo de escombros correspondiente al escenario SA-03, con un volumen de liberación de 300,000 [Fuente: Elaboración propia en software QGIS].



MAPA 19 Simulación de flujo de escombros correspondiente al escenario SA-04, con un volumen de liberación de 500,000

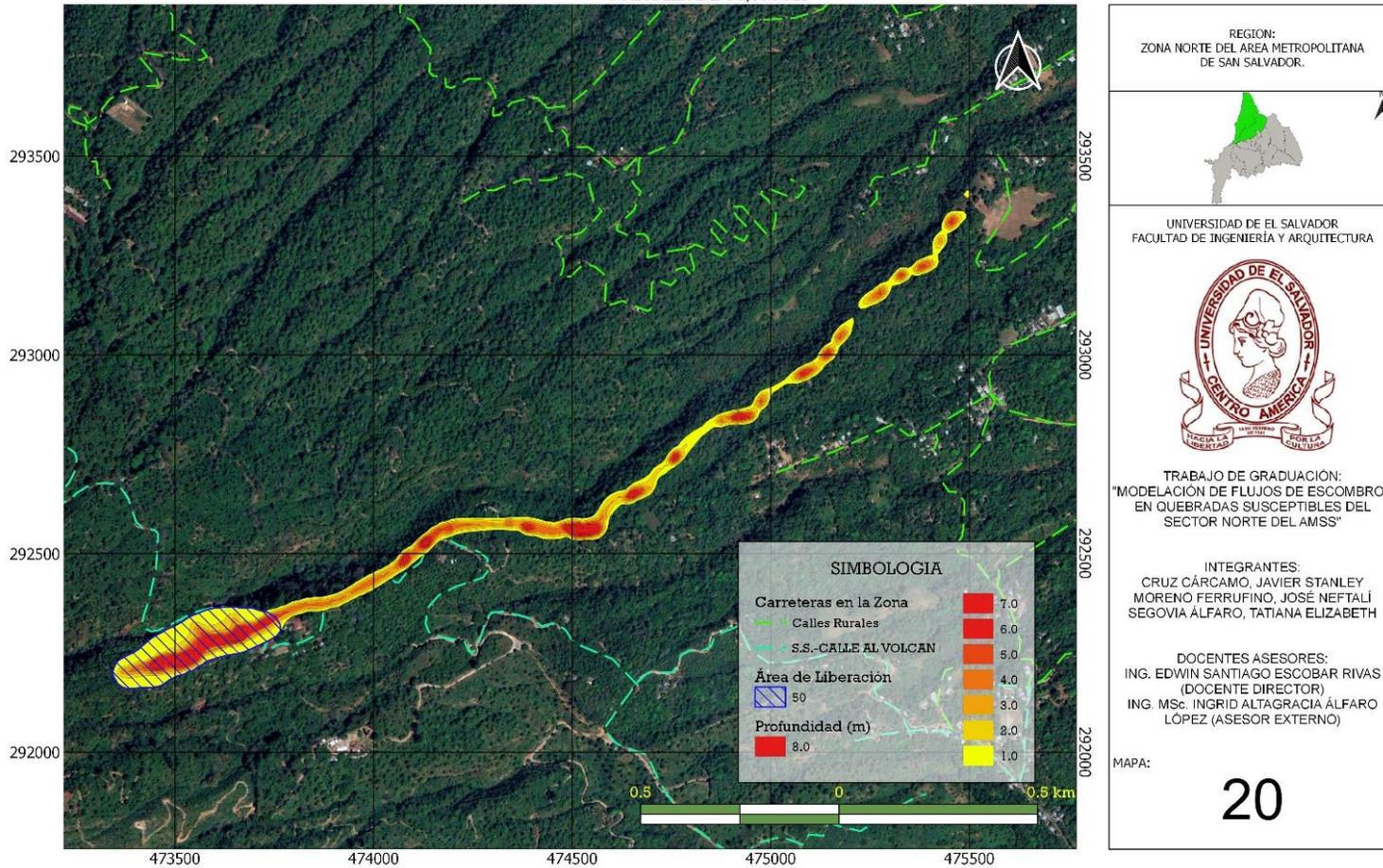
[Fuente: Elaboración propia en software QGIS].

De igual manera, en los Mapas del 20 al 23, se muestran los resultados de profundidades correspondientes a los volúmenes simulados en el DAN3D de la cuenca El Ángel. En la tabla 6.2-5, se muestra los resultados máximos de cada uno de los volúmenes correspondiente a la cuenca El Ángel, siendo del mismo modo que la profundidad máxima se da en la zona de inicio.

En la zona de transporte, se tienen profundidades iguales en los Mapas 22 y 23 pero mayores, que en los mapas 20 y 21. Al igual que el ancho del flujo en la cuenca San Antonio, aquí el ancho también va variando conforme al volumen simulado.

Se logra apreciar que en las coordenadas Lambert 474,523 y 292,538 y entre las elevaciones 1100 y 1085 msnm se tiene una zona de depósito, como se aprecia en los mapas 20, 21 y 22; pero el volumen de 500,000 m³ que se presentan en el Mapa 23, el flujo sigue su trayectoria hasta que llega a las coordenadas Lambert 476,065 y 293,846 y entre las elevaciones 680 y 700 msnm que también presenta pequeñas acumulaciones de sedimentos.

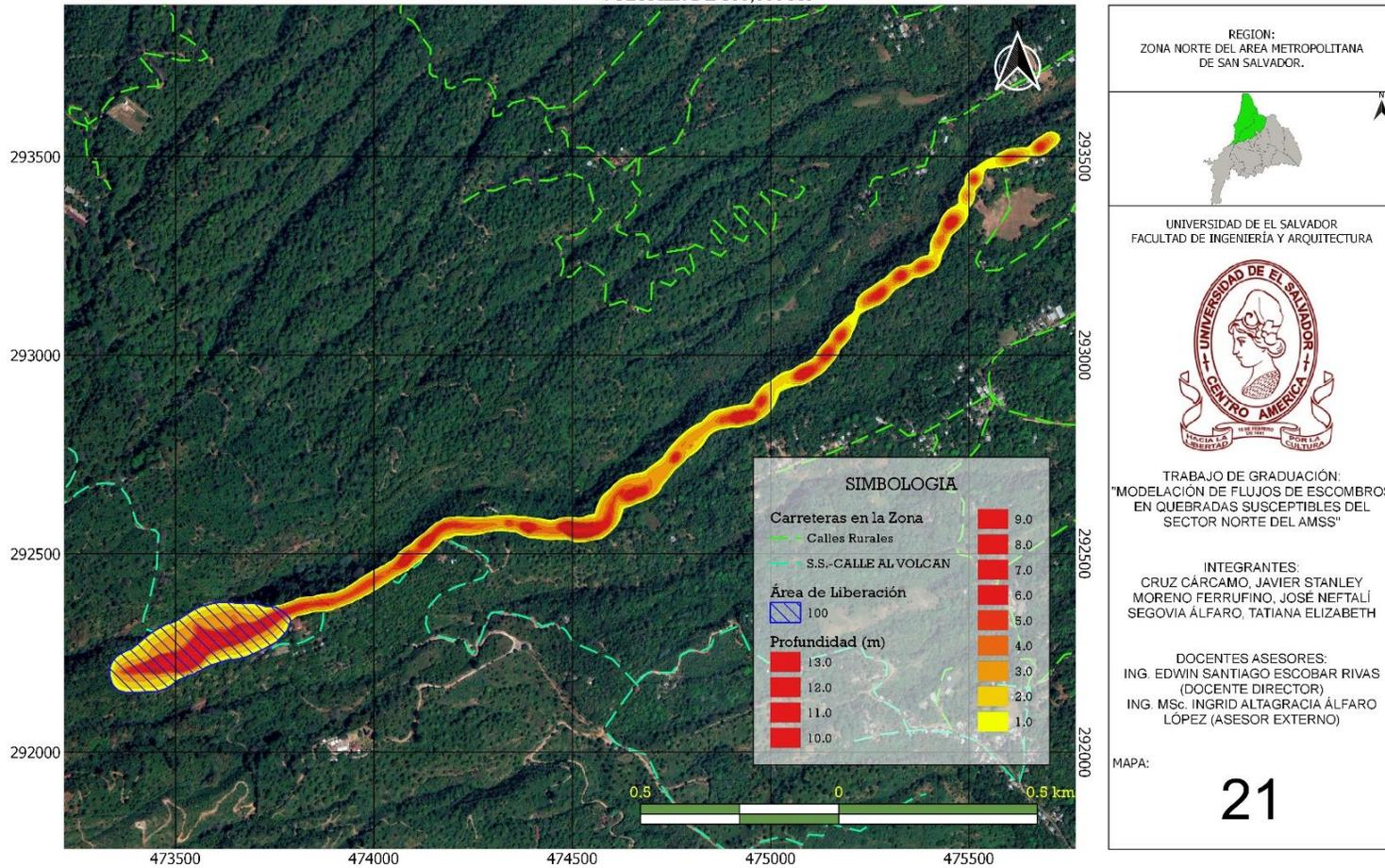
FLUJO DE ESCOMBRO EN CUENCA EL ÁNGEL
VOLUMEN DE 50,000 M3



MAPA 20 Simulación de flujo de escombros correspondiente al escenario EA-01, con un volumen de liberación de 50,000

[Fuente: Elaboración propia en software QGIS].

FLUJO DE ESCOMBRO EN CUENCA EL ÁNGEL
VOLUMEN DE 100,000 M3



REGION:
ZONA NORTE DEL AREA METROPOLITANA
DE SAN SALVADOR.

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

TRABAJO DE GRADUACIÓN:
"MODELACIÓN DE FLUJOS DE ESCOMBROS
EN QUEBRADAS SUSCEPTIBLES DEL
SECTOR NORTE DEL AMSS"

INTEGRANTES:
CRUZ CÁRCAMO, JAVIER STANLEY
MORENO FERRUFINO, JOSÉ NEFTALÍ
SEGOVIA ÁLFARO, TATIANA ELIZABETH

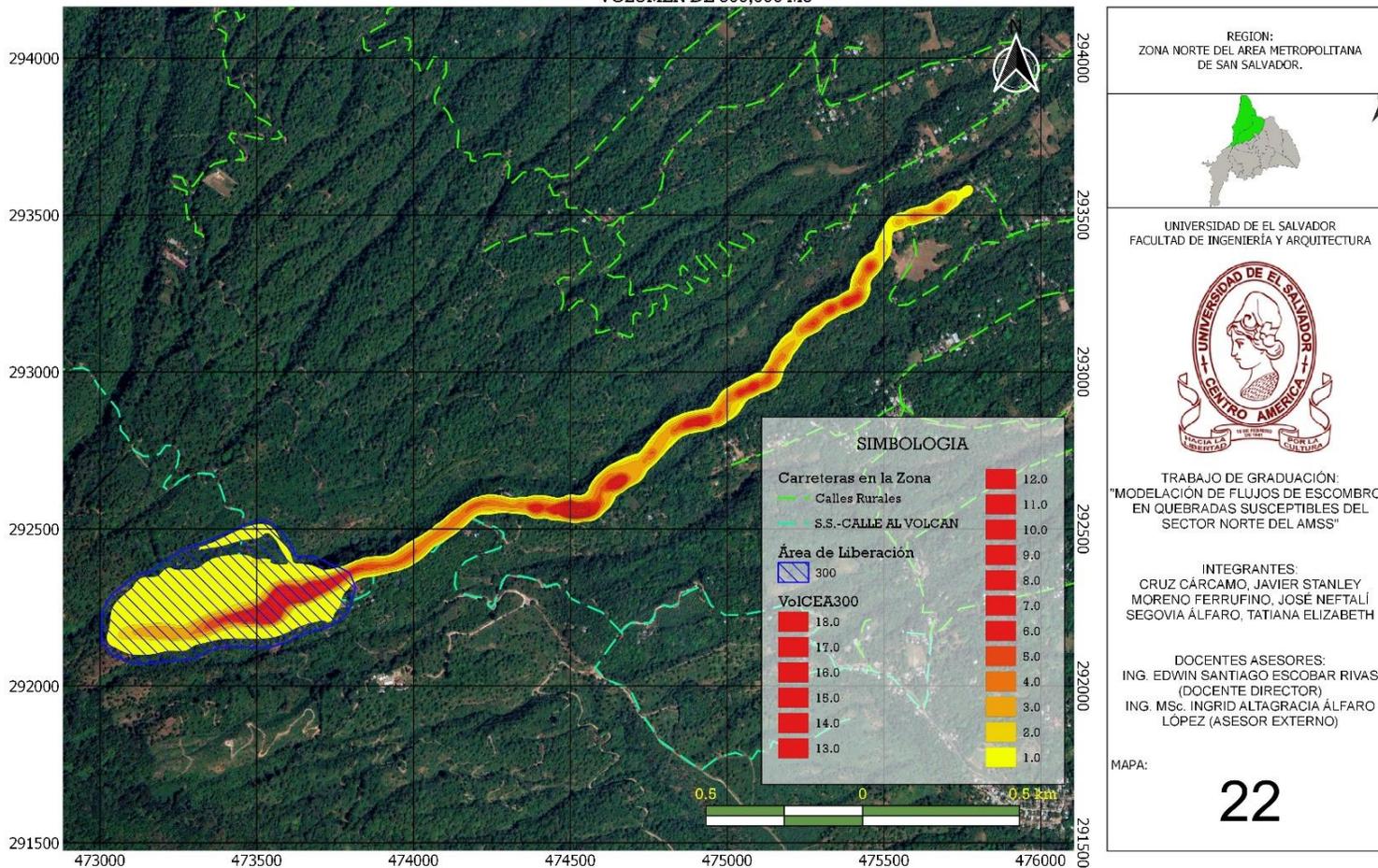
DOCENTES ASESORES:
ING. EDWIN SANTIAGO ESCOBAR RIVAS
(DOCENTE DIRECTOR)
ING. MSc. INGRID ALTAGRACIA ÁLFARO
LÓPEZ (ASESOR EXTERNO)

MAPA:
21

MAPA 21 Simulación de flujo de escombros correspondiente al escenario EA-02, con un volumen de liberación de 100,000

[Fuente: Elaboración propia en software QGIS].

FLUJO DE ESCOMBRO EN CUENCA EL ÁNGEL
VOLUMEN DE 300,000 M3



REGION:
ZONA NORTE DEL AREA METROPOLITANA
DE SAN SALVADOR.

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

TRABAJO DE GRADUACIÓN:
"MODELACIÓN DE FLUJOS DE ESCOMBROS
EN QUEBRADAS SUSCEPTIBLES DEL
SECTOR NORTE DEL AMSS"

INTEGRANTES:
CRUZ CÁRCAMO, JAVIER STANLEY
MORENO FERRUFINO, JOSÉ NEFTALÍ
SEGOVIA ÁLFARO, TATIANA ELIZABETH

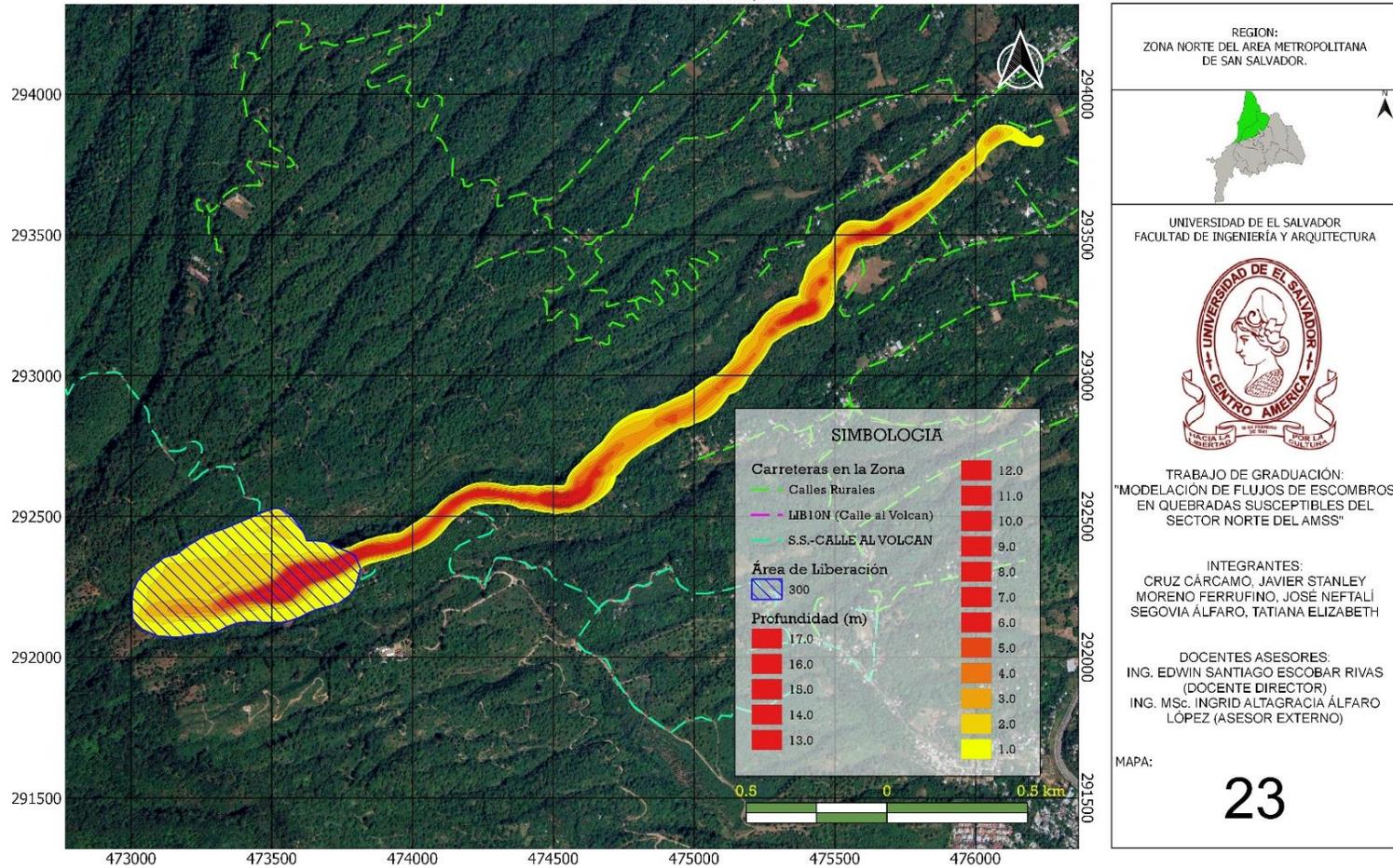
DOCENTES ASESORES:
ING. EDWIN SANTIAGO ESCOBAR RIVAS
(DOCENTE DIRECTOR)
ING. MSc. INGRID ALTAGRACIA ÁLFARO
LÓPEZ (ASESOR EXTERNO)

MAPA:
22

MAPA 22 Simulación de flujo de escombros correspondiente al escenario EA-03, con un volumen de liberación de 300,000

[Fuente: Elaboración propia en software QGIS].

FLUJO DE ESCOMBRO EN CUENCA EL ÁNGEL
VOLUMEN DE 600,000 M3



REGION:
ZONA NORTE DEL AREA METROPOLITANA
DE SAN SALVADOR.

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

TRABAJO DE GRADUACIÓN:
"MODELACIÓN DE FLUJOS DE ESCOMBROS
EN QUEBRADAS SUSCEPTIBLES DEL
SECTOR NORTE DEL AMSS"

INTEGRANTES:
CRUZ CÁRCAMO, JAVIER STANLEY
MORENO FERRUFINO, JOSÉ NEFTALÍ
SEGOVIA ÁLFARO, TATIANA ELIZABETH

DOCENTES ASESORES:
ING. EDWIN SANTIAGO ESCOBAR RIVAS
(DOCENTE DIRECTOR)
ING. MSc. INGRID ALTAGRACIA ÁLFARO
LÓPEZ (ASESOR EXTERNO)

MAPA:
23

MAPA 23 Simulación de flujo de escombros correspondiente al escenario EA-04, con un volumen de liberación de 500,000

[Fuente: Elaboración propia en software QGIS].

La información obtenida anteriormente se debe constatar con un análisis de pendientes (que se realizará en la siguiente sección de este Capítulo) de la trayectoria que siguió el flujo para definir con certeza las zonas de inicio, transporte y depósito.

6.4 SECCIONES TOPOGRÁFICAS DE FLUJO

En esta sección, se presentará un análisis que define las zonas de inicio, transporte y depósito del flujo y con esto determinar las secciones transversales a analizar. Para lograr lo anterior, es necesario el perfil de la ruta que siguió el flujo; en los flujos simulados esta ruta coincide con el cauce principal de la cuenca.

Tomando el análisis realizado en la Tesis de maestría “Debris Flow Characteristic along the Main Channel with Structures in the Arenal de Mejicanos, San Salvador, El Salvador”, se define que en las zonas donde la pendiente es mayor a 20° es más probable que se presente el inicio del flujo. En las zonas donde la pendiente esta entre 10° y 20° se denominará como la zona de transporte y donde la pendiente es menor o igual a 10° será la zona de depósito. Es importante mencionar que lo anterior se tomará como criterio base para definir las zonas de inicio, transporte y depósito, pero, posiblemente en un flujo no se desarrolle totalmente pasando por estas zonas y logre terminar su recorrido en zona de transporte. Si el recorrido del flujo está en la zona de transporte, este se encuentra en estado de transición, debido a que en cualquier momento este

puede desplazarse a la zona de depósito. Los factores en que depende el flujo son la cantidad de precipitación que se tenga en la zona, la geología, el tipo de suelo, la fricción, volumen de flujo, morfología, entre otros.

Tomando lo anterior como punto base, se tiene los siguientes perfiles de las rutas que siguió el flujo en las cuencas San Antonio y El Ángel y en donde se define a qué distancia se presentan pendientes mayores a 20° (Zona 1: Inicio de flujo), las zonas donde la pendiente está entre 10° y 20° (Zona 2: Transporte) y las pendientes menores a 10° (Zona 3: Deposito).

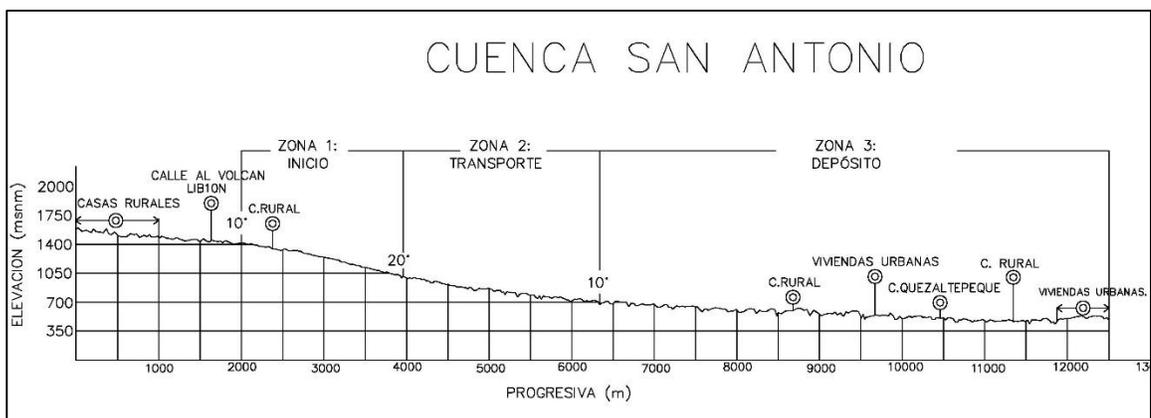


FIGURA 6-4 Representación de las zonas de Inicio, Transporte y Deposito del flujo según la pendiente

[Fuente: Elaboración propia].

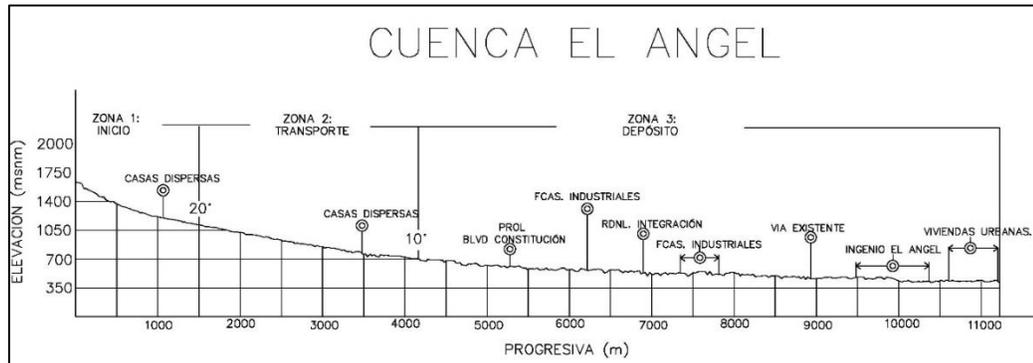


FIGURA 6-5 Representación de las zonas de Inicio, Transporte y Depósito del flujo según la pendiente
[Fuente: Elaboración propia].

Con el fin de determinar las secciones transversales a analizar, se ha superpuesto la trayectoria de los diferentes perfiles de cada volumen simulados, mostrados en la Figura 6-4 y 6-5, cada uno de los flujos analizados como se muestra en las Figuras 6-6 y 6-7, que corresponden a los flujos de la cuenca San Antonio y El Ángel respectivamente:

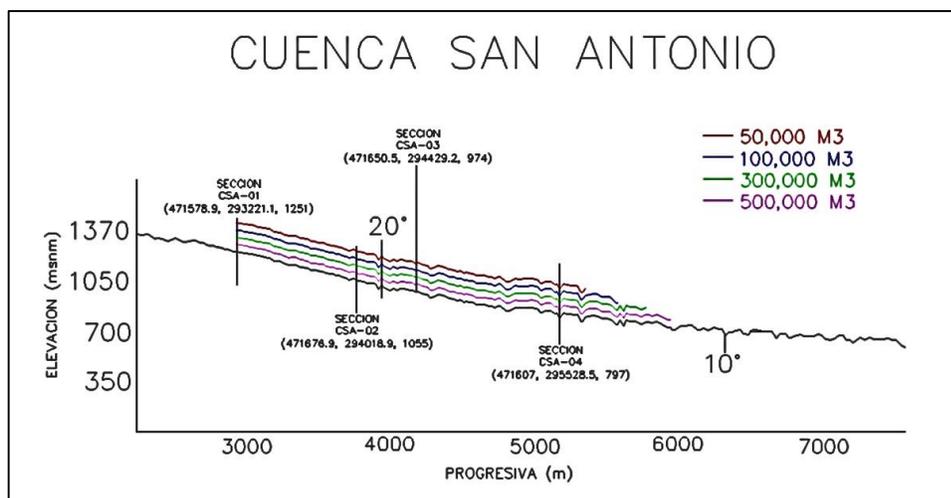


FIGURA 6-6 Secciones transversales a analizar en la cuenca San Antonio

[Fuente: Elaboración propia].¹⁹

¹⁹ Nota: Cada línea de volumen de flujo no representa profundidades solamente la trayectoria.

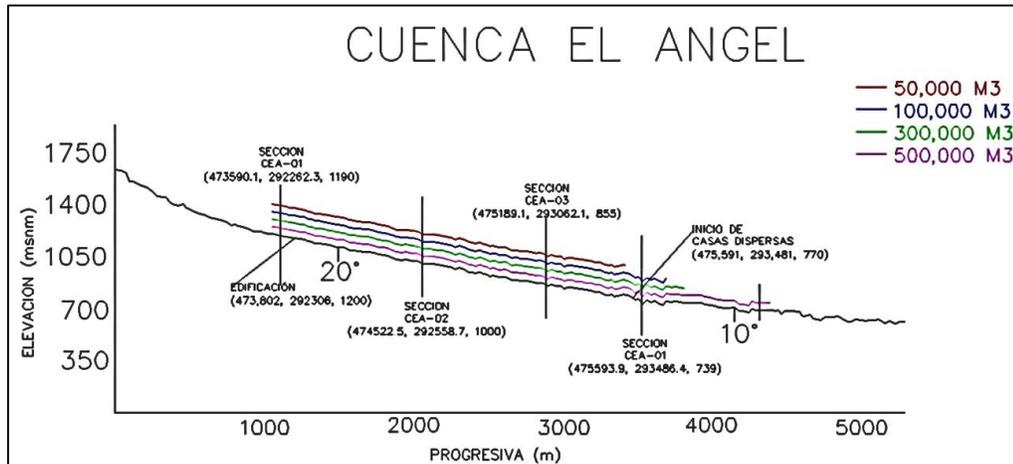


FIGURA 6-7 Secciones transversales a analizar en la cuenca San Antonio

[Fuente: Elaboración propia].

Es importante mencionar que los perfiles mostrados en las Figuras 6-6 y 6-7 son de ilustración, no representan ningún espesor de sedimento real. Únicamente son para ilustrar en que zona alcanzan los flujos longitudinalmente y en cuales áreas se presentaran las secciones transversales de los flujos.

Como se observa en las Figuras 6-6 y 6-7, solo uno de los flujos, el escenario EA-04 que corresponde al volumen de 500,000 m³ de la cuenca El Ángel, alcanza la zona que en esta sección se define como de depósito, por esto, se utiliza el análisis realizado en la sección 6.2, para seleccionar las secciones transversales a analizar. También, en la cuenca El Ángel los flujos afectan algunas estructuras en la zona de liberación, en las coordenadas 473,802 y 292,306 y en la elevación 1,200 y algunas viviendas dispersas en la zona de depósito. Estas estructuras también son de interés, por ende, se realizarán secciones transversales en estos

sitios. Se establecen las siguientes secciones transversales, según las zonas consideradas como de inicio, transporte y depósito en la sección 6.2:

Cuenca San Antonio				
Sección	Coordenadas			Zona
	X	Y	Cota	
CSA-01	471578.9	293221.1	1251	INICIO
CSA-02	471676.9	294018.9	1055	TRANSPORTE
CSA-03	471650.5	294429.2	974	TRANSPORTE
CSA-04	471607	295528.5	797	DEPÓSITO

Tabla 6.4-1 Ubicación de secciones transversales de la cuenca San Antonio. [Fuente: elaboración propia].

En la Figura 6-8 a la 6-15, se muestran los escenarios en la Tabla 6.4-1 correspondientes a los volúmenes de 50,000, 100,000, 300,000 y 500,000 metros cúbicos, de la cuenca San Antonio. En ellos se puede observar la profundidad máxima que estos flujos alcanzan y la extensión de los mismos. Para explicar un poco estas secciones, se observa en la figura 6-8, que corresponde a los volúmenes de 50,000 y 100,000 metros cúbicos, en donde se tiene una profundidad máxima de 8 metros y una extensión de 96.88 metros en el caso del volumen de 50,000 m³. En el de 100,000 m³, éste alcanza una profundidad máxima ligeramente menor que el de 50,000 pero un ancho mucho mayor (226.27 metros). También, se muestran las zonas erosionadas que dejó el flujo, así como también el cambio de sección que dejó debido a la erosión y al depósito que generaron estos flujos. En las Figuras 6-8 y 6-9, se tiene un mayor ancho de flujo a las demás secciones debido que en estas se ubica el área de liberación de los escenarios simulados de la cuenca San Antonio.

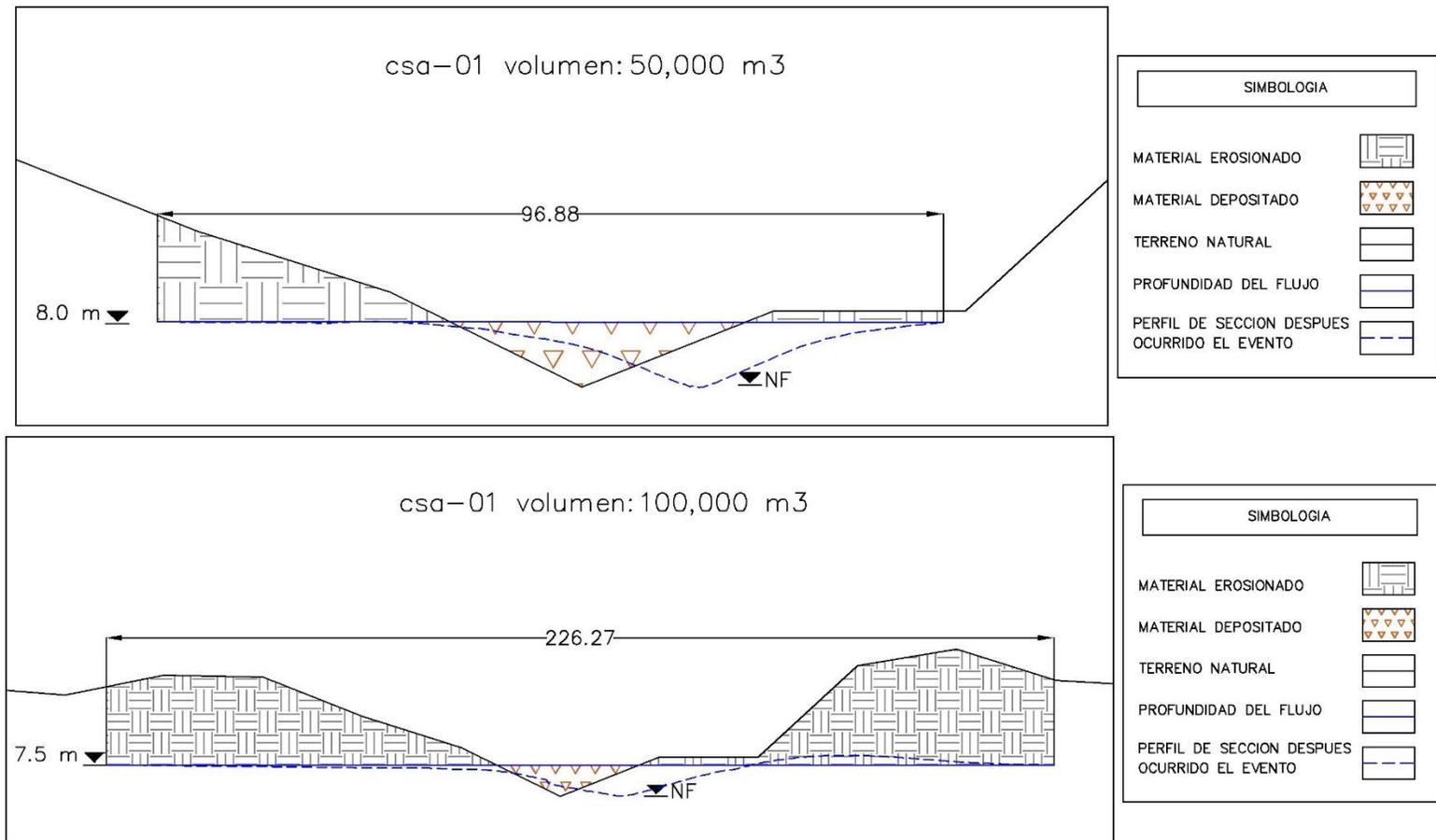


FIGURA 6-8 Sección transversal CSA-01 correspondientes a los escenarios SA-01 (sección superior) y SA-02 (sección inferior) de la cuenca San Antonio [Fuente: Elaboración propia].

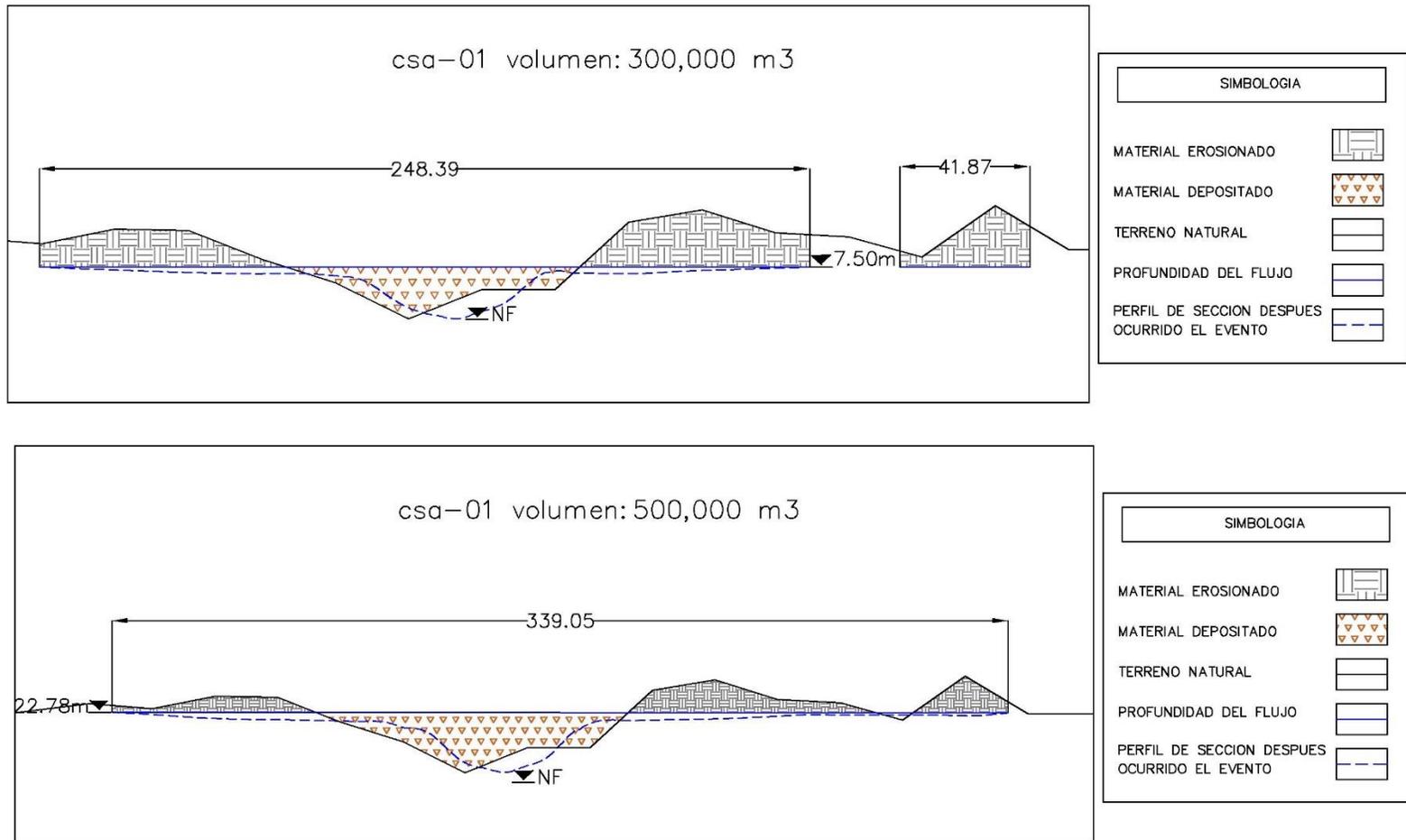


FIGURA 6-9 Sección transversal CSA-01 correspondientes a los escenarios SA-03 (sección superior) y SA-04 (sección inferior) de la cuenca San Antonio [Fuente: Elaboración propia].

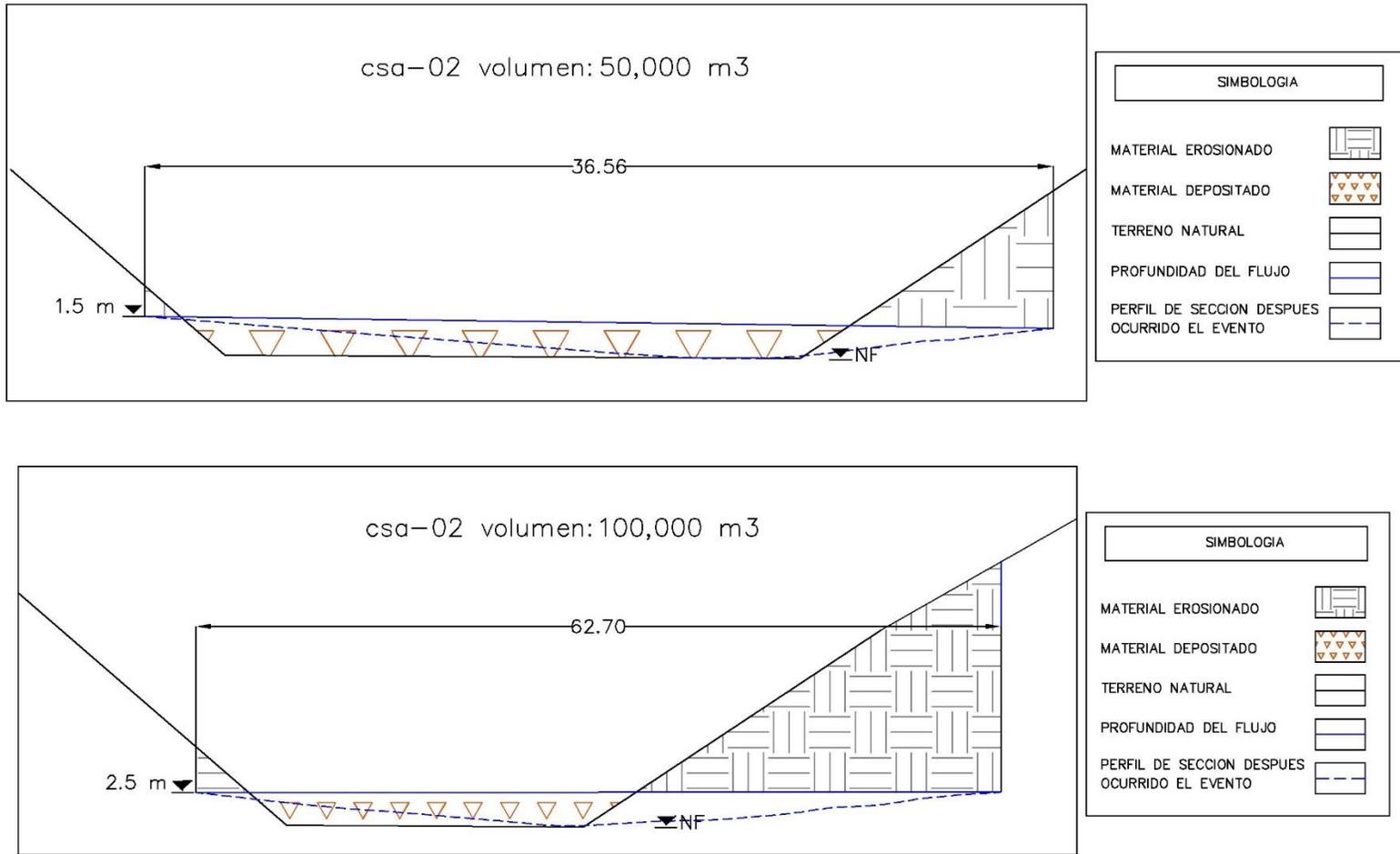


FIGURA 6-10 Sección transversal CSA-02 correspondientes a los escenarios SA-01 (sección superior) y SA-02 (sección inferior) de la cuenca San

Antonio [Fuente: Elaboración propia].

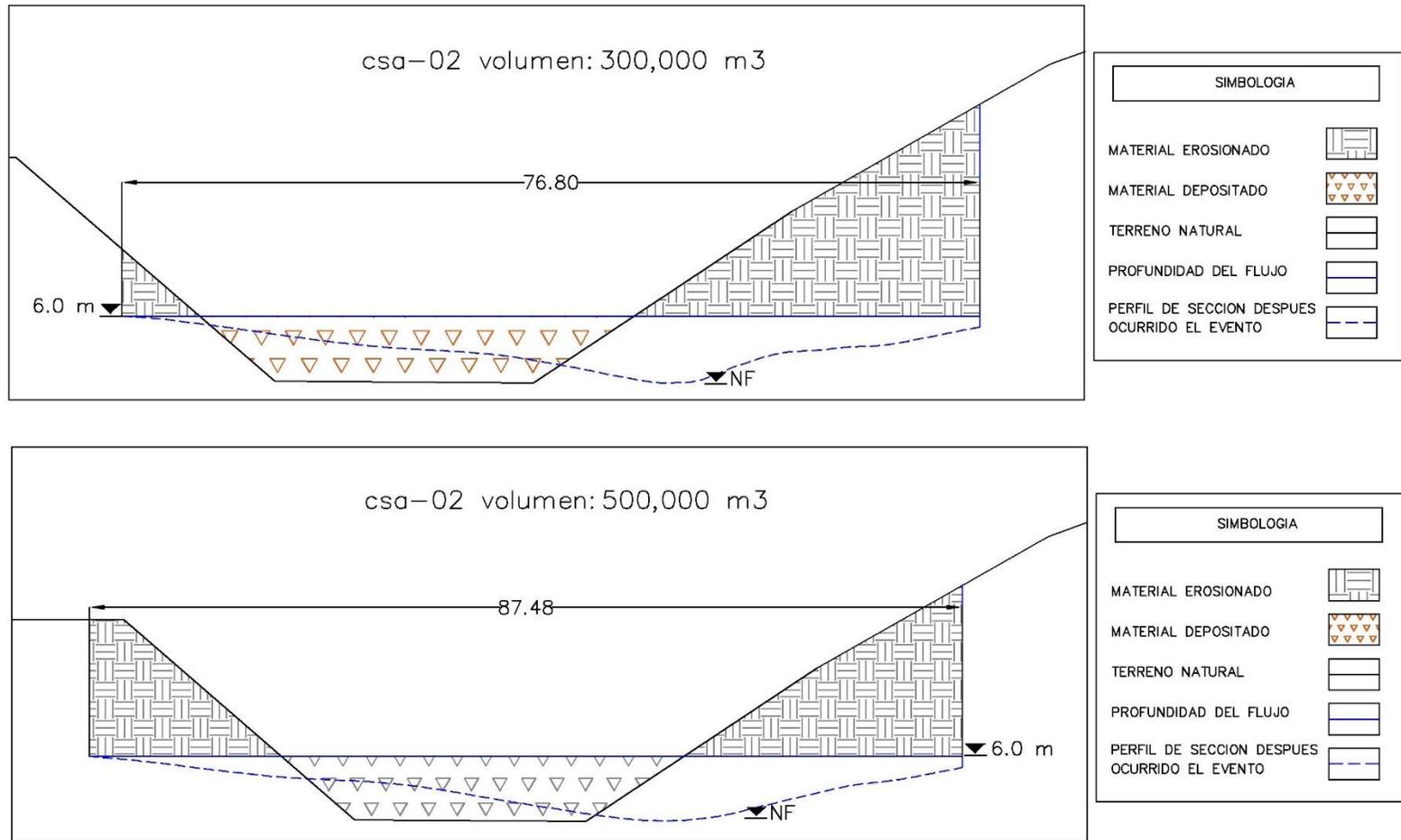


FIGURA 6-11 Sección transversal CSA-02 correspondientes a los escenarios SA-03 (sección superior) y SA-04 (sección inferior) de la cuenca San Antonio [Fuente: Elaboración propia].

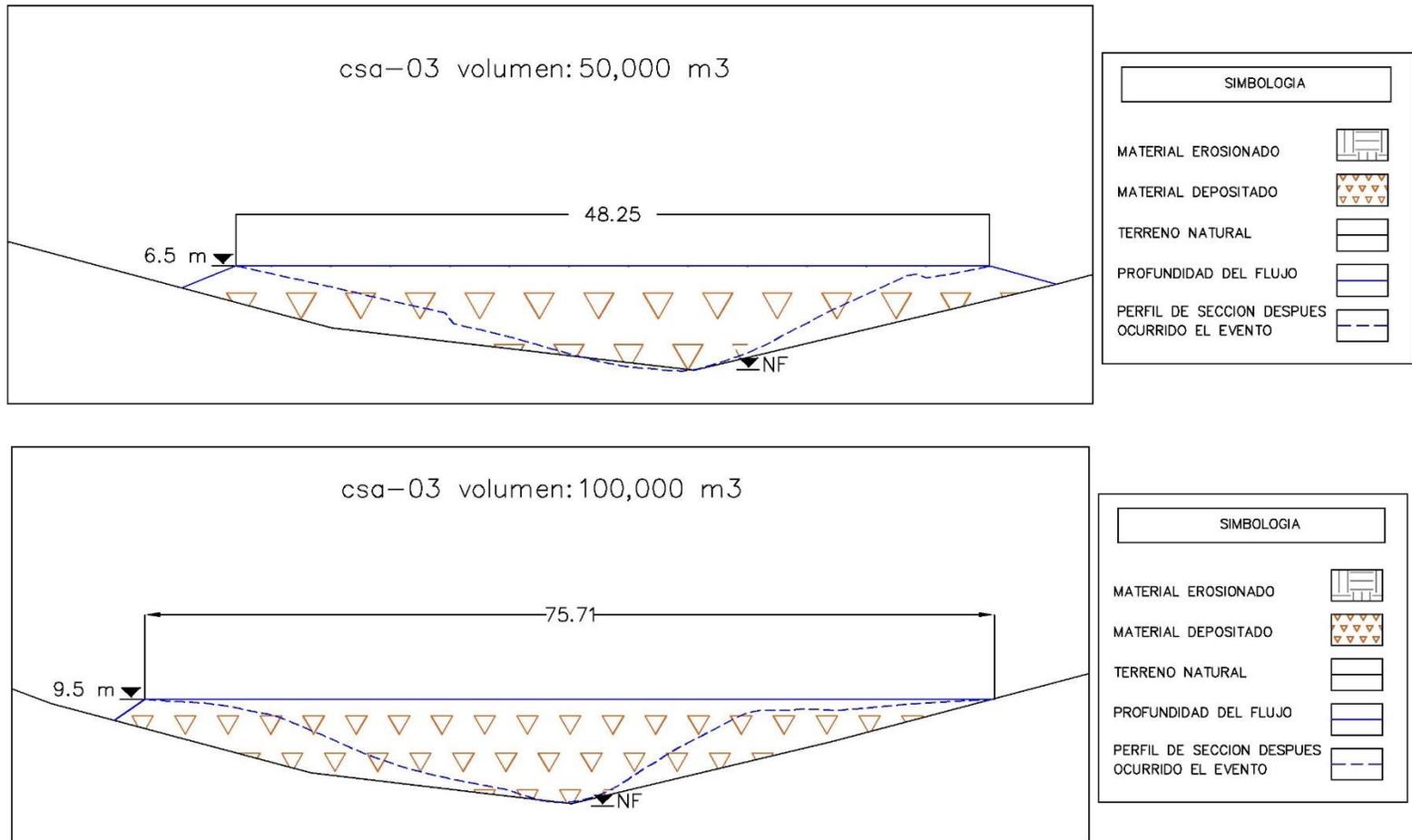


FIGURA 6-12 Sección transversal CSA-03 correspondientes a los escenarios SA-01 (sección superior) y SA-02 (sección inferior) de la cuenca San Antonio. [Fuente: Elaboración propia].

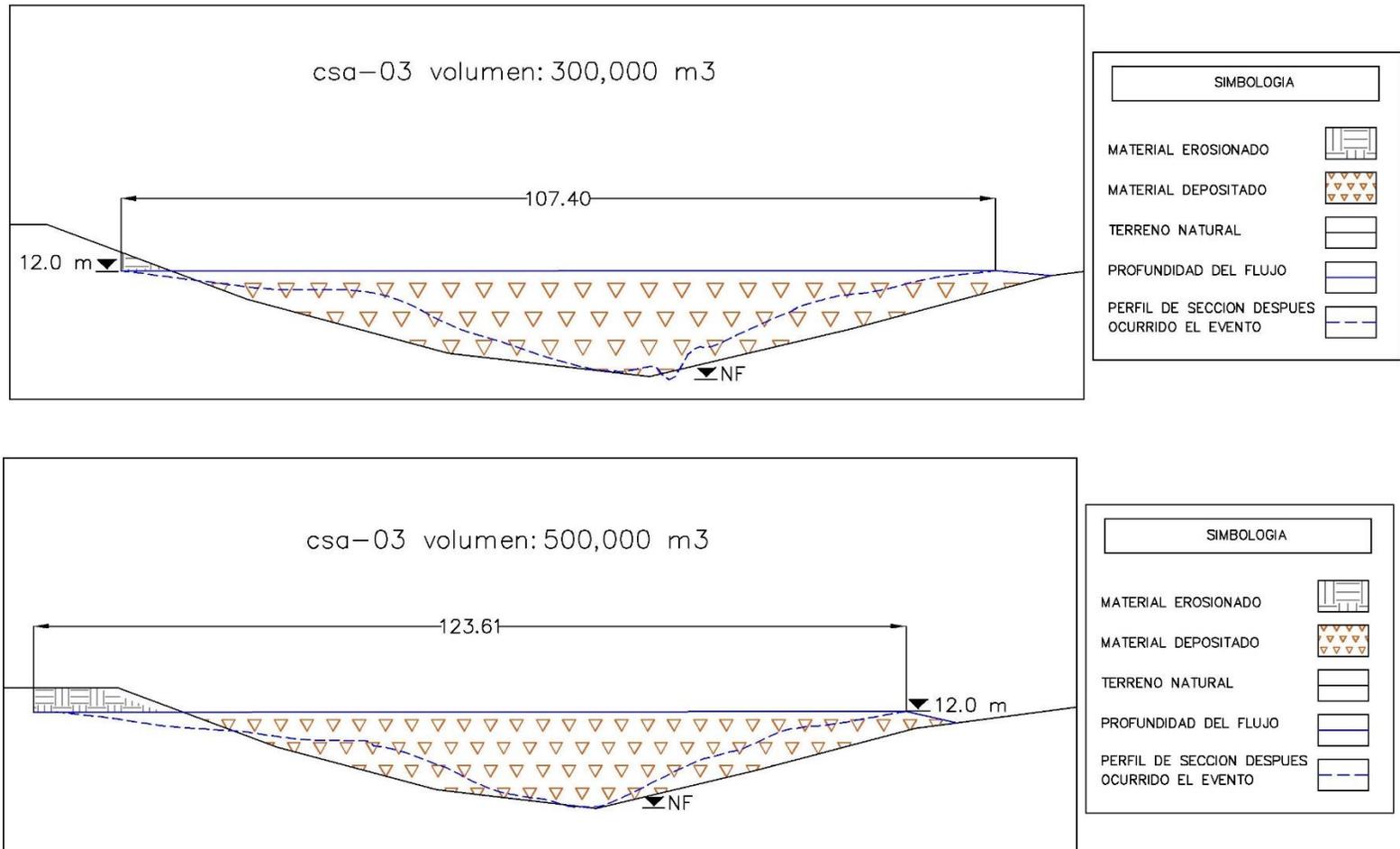


FIGURA 6-13 Sección transversal CSA-03 correspondientes a los escenarios SA-03 (sección superior) y SA-04 (sección inferior) de la cuenca San

Antonio [Fuente: Elaboración propia].

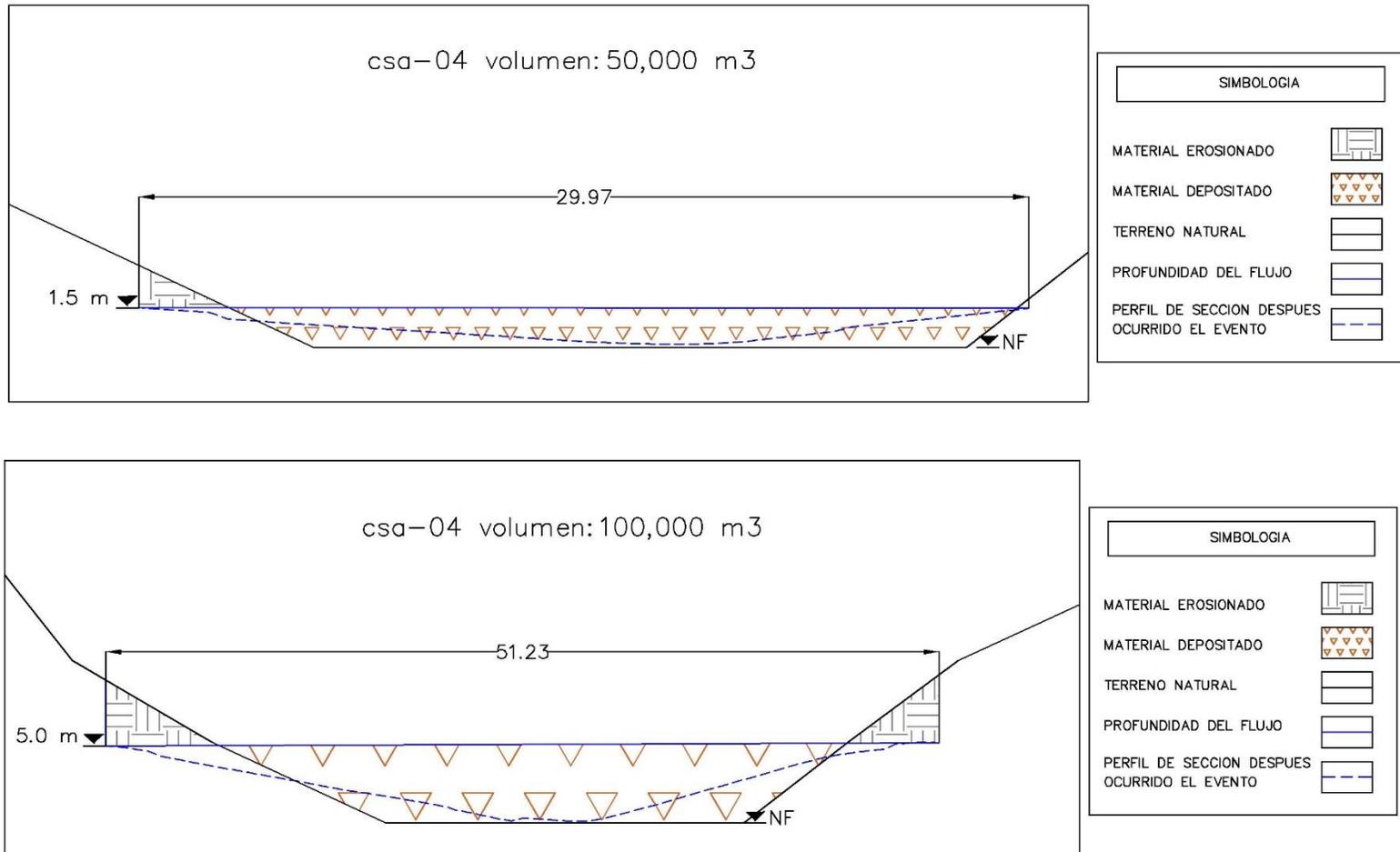


FIGURA 6-14 Sección transversal CSA-04 correspondientes a los escenarios SA-01 (sección superior) y SA-02 (sección inferior) de la cuenca San Antonio [Fuente: Elaboración propia].

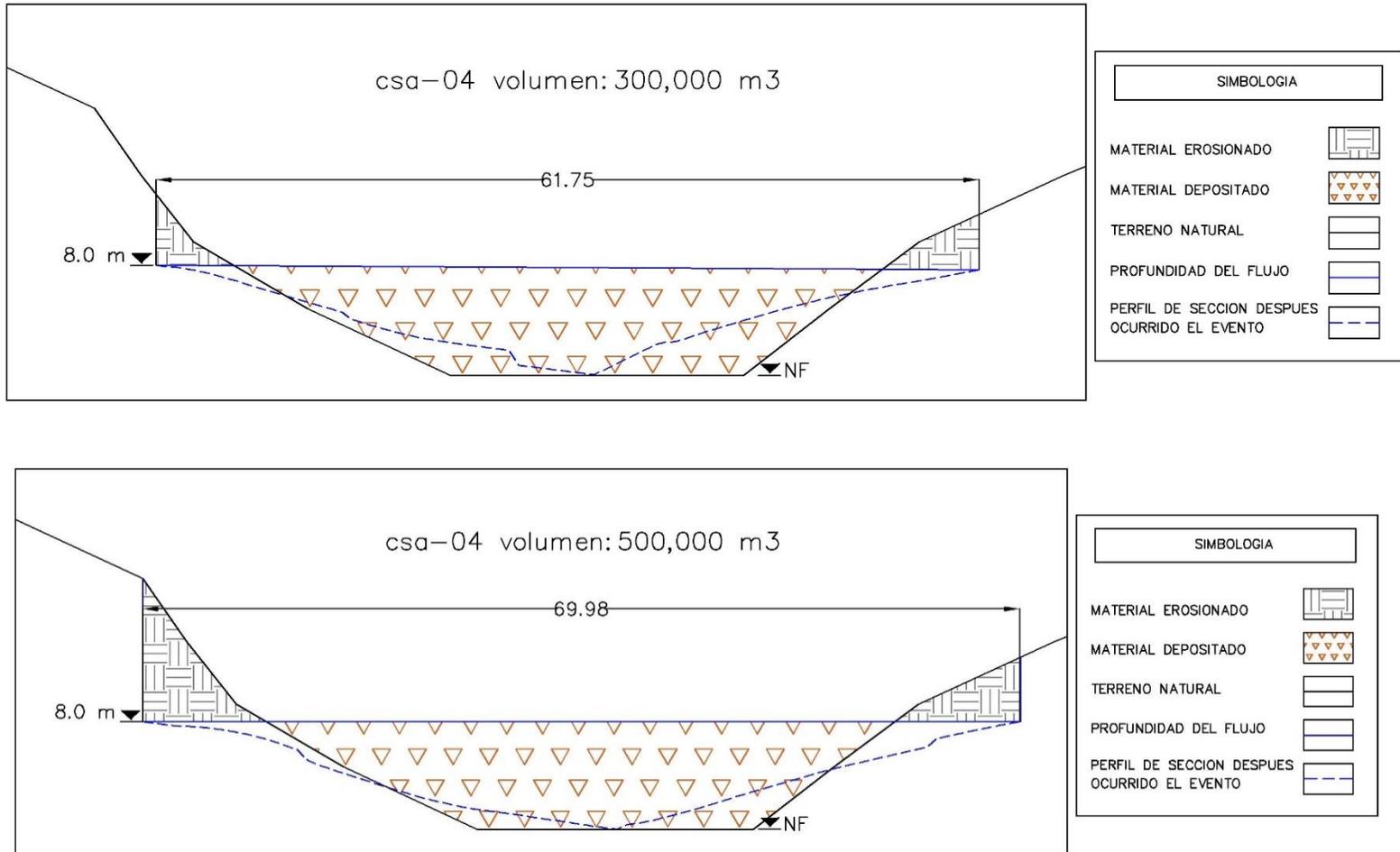


FIGURA 6-15 Sección transversal CSA-04 correspondientes a los escenarios SA-03 (sección superior) y SA-04 (sección inferior) de la cuenca San

Antonio [Fuente: Elaboración propia].

Cuenca El Ángel				
Sección	Coordenadas			Zona
	X	Y	Cota	
CEA-01	473590.1	292262.3	1190	INICIO
CEA-02	474522.5	292558.7	1000	TRANSPORTE
CEA-03	475189.1	293062.1	855	TRANSPORTE
CEA-04	475593.9	293486.4	739	DEPÓSITO

Tabla 6.4-2 Ubicación de secciones transversales de la cuenca El Ángel. [Fuente: elaboración propia].

La tabla 6.4-2, muestra las secciones transversales, que están en diferentes ubicaciones a lo largo del flujo, y en las figuras 6-16 a la 6-23, se muestran los escenarios por sección y por diferente volumen, de la cuenca El Ángel.

Se logra observar en la figura 6-16, correspondiente a la sección CSA-01 con volúmenes de 50,000 y 100,000 metros cúbicos, tiene una profundidad máxima de 3.5 metros y una extensión de 123.38 metros en el caso del volumen de 50,000 m³. En el de 100,000 m³, este alcanza una profundidad máxima de 5 metros y una extensión (226.27 metros).

De igual manera se pueden apreciar que hay secciones que presentan, erosión y depósito de material como en las figuras 6-16 y 6-17, y otras secciones solo depósito como en las figuras 6-18 al 6-20.

En la sección CEA-04, no se tiene una sección para el volumen de 50,000 m³ debido a que este flujo de escombros no alcanza esa zona.

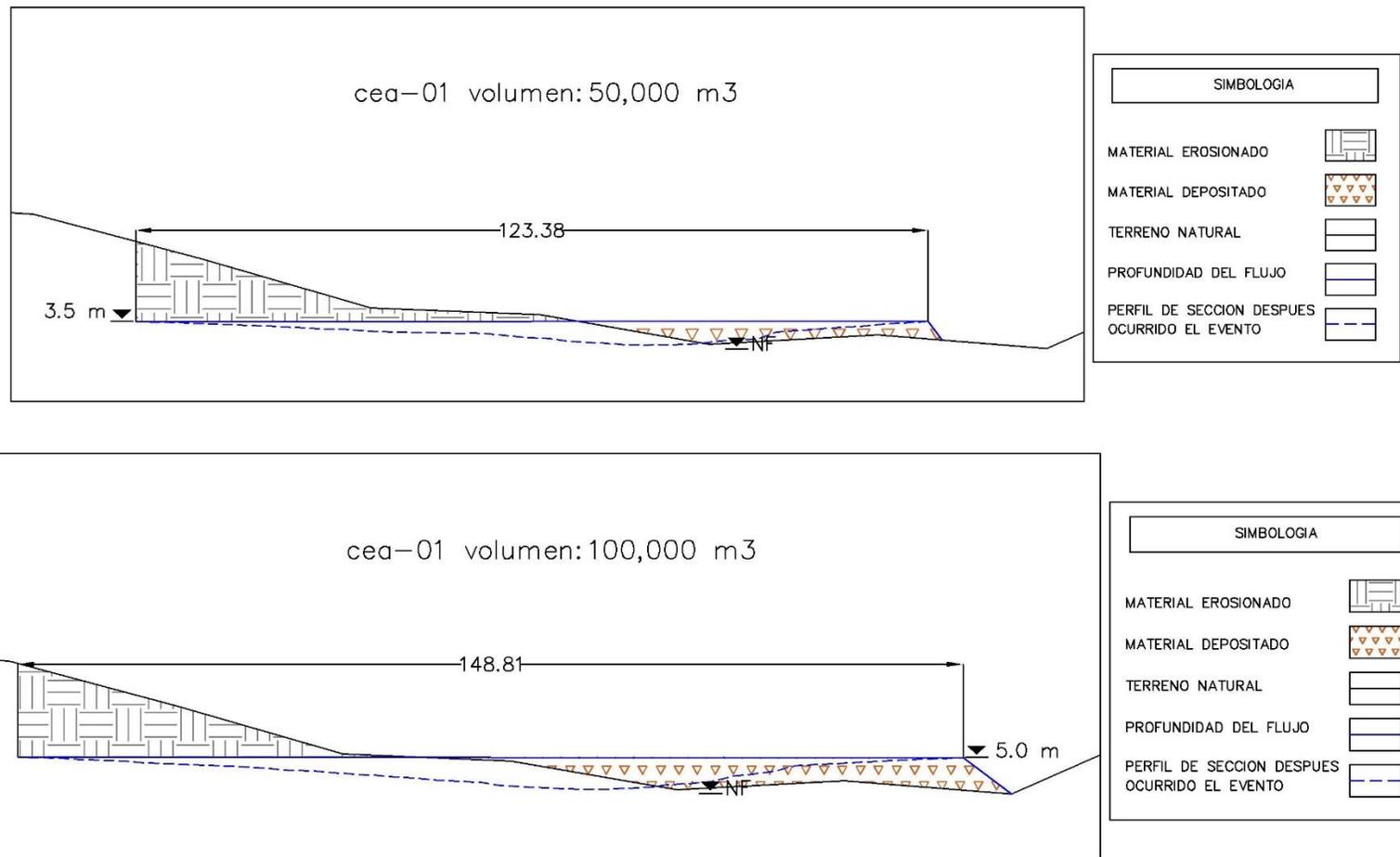


FIGURA 6-16 Sección transversal CEA-01 correspondientes a los escenarios EA-01 (sección superior) y EA-02 (sección inferior) de la cuenca El Ángel

[Fuente: Elaboración propia].

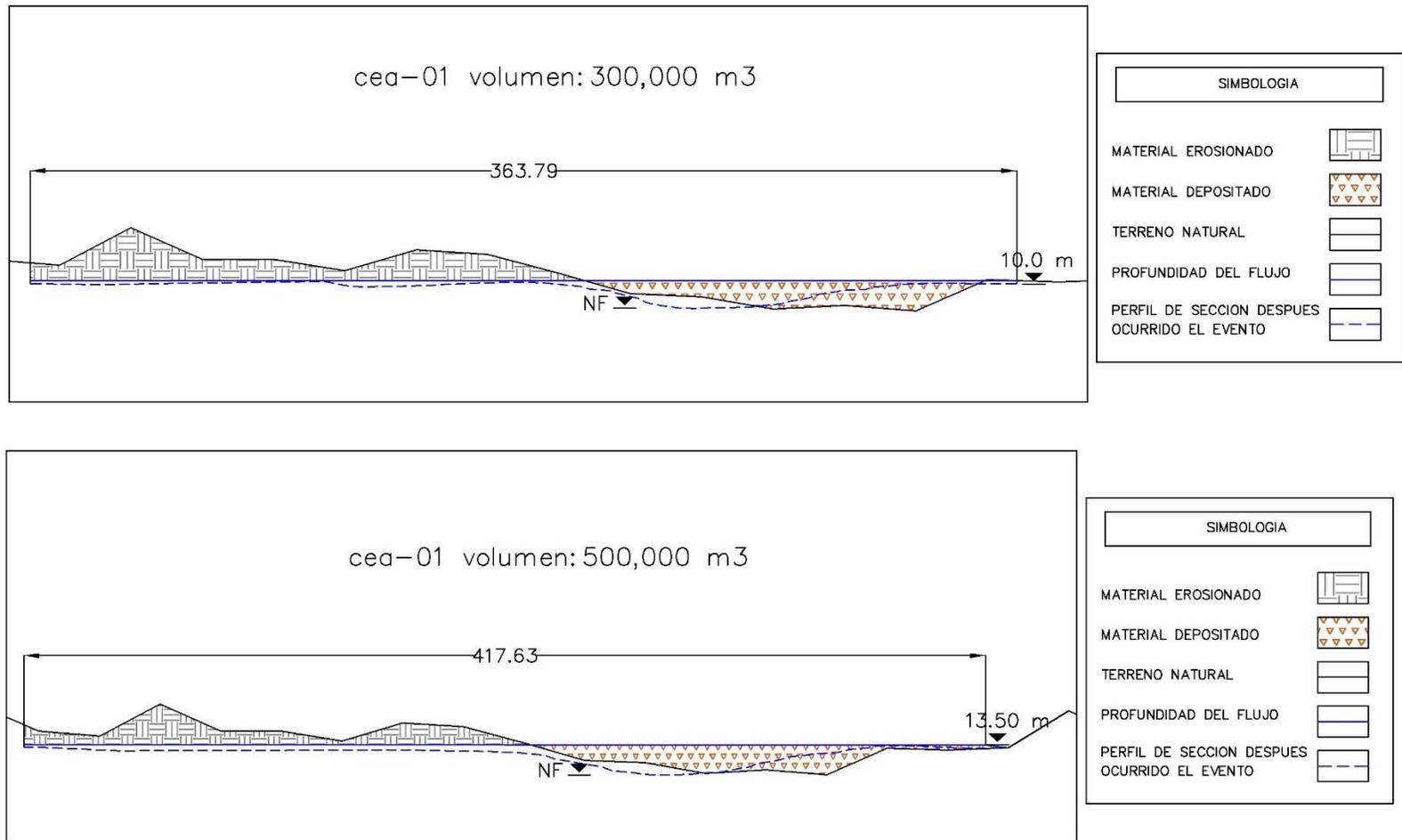


FIGURA 6-17 Sección transversal CEA-01 correspondientes a los escenarios EA-03 (sección superior) y EA-04 (sección inferior) de la cuenca El Ángel

[Fuente: Elaboración propia].

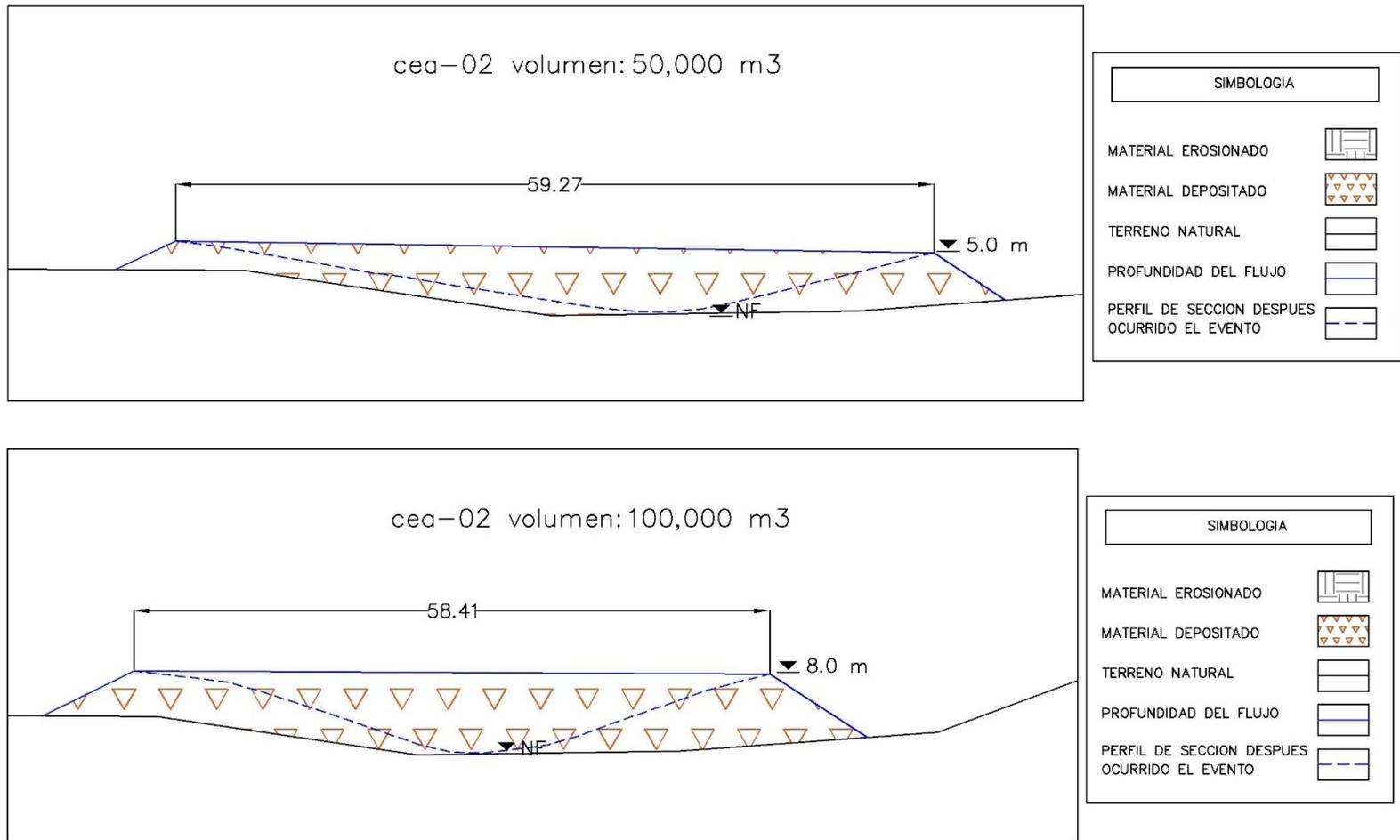


FIGURA 6-18 Sección transversal CEA-02 correspondientes a los escenarios EA-01 (sección superior) y EA-02 (sección inferior) de la cuenca El Ángel

[Fuente: Elaboración propia].

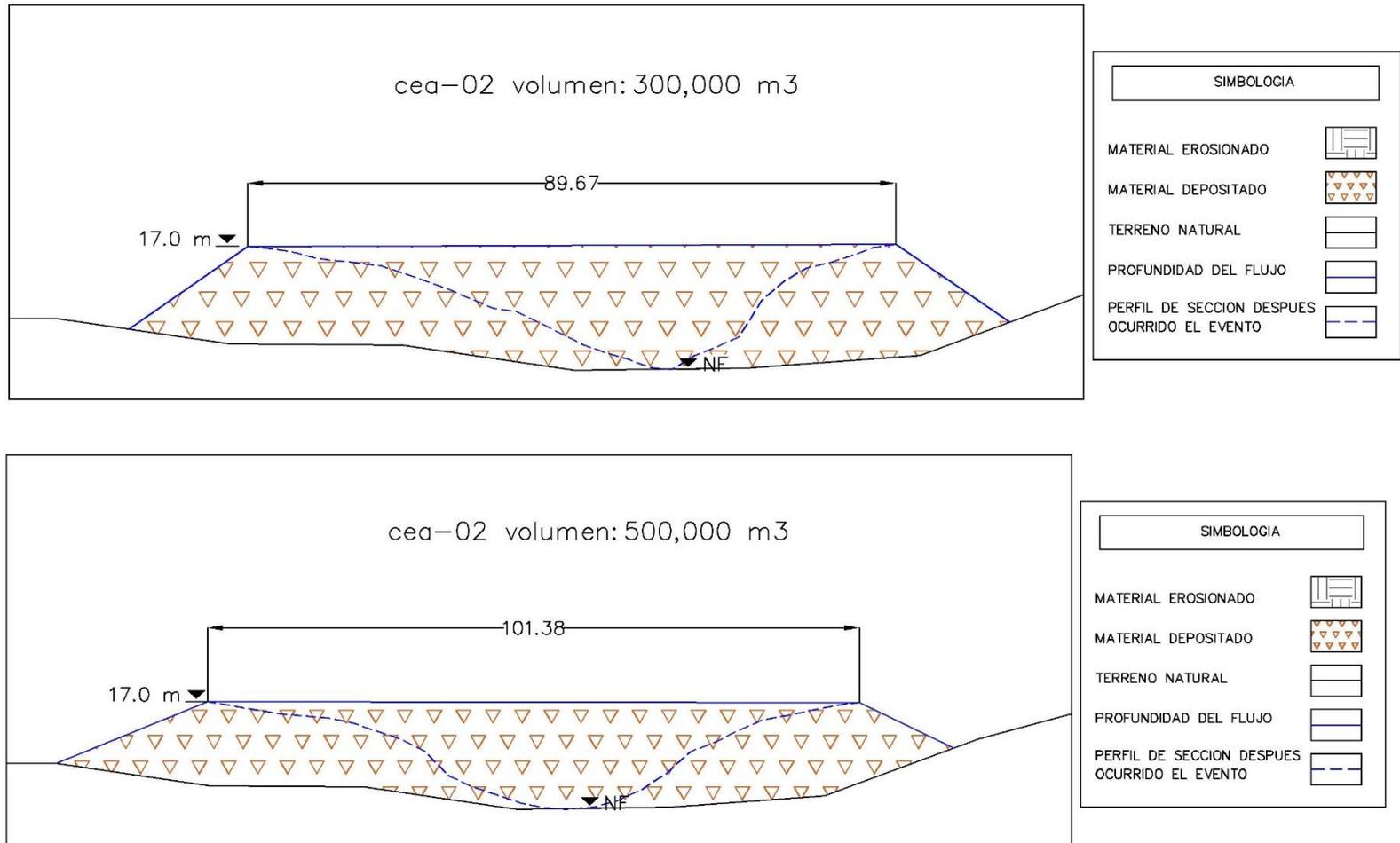


FIGURA 6-19 Sección transversal CEA-02 correspondientes a los escenarios EA-03 (sección superior) y EA-04 (sección inferior) de la cuenca El Ángel

[Fuente: Elaboración propia].

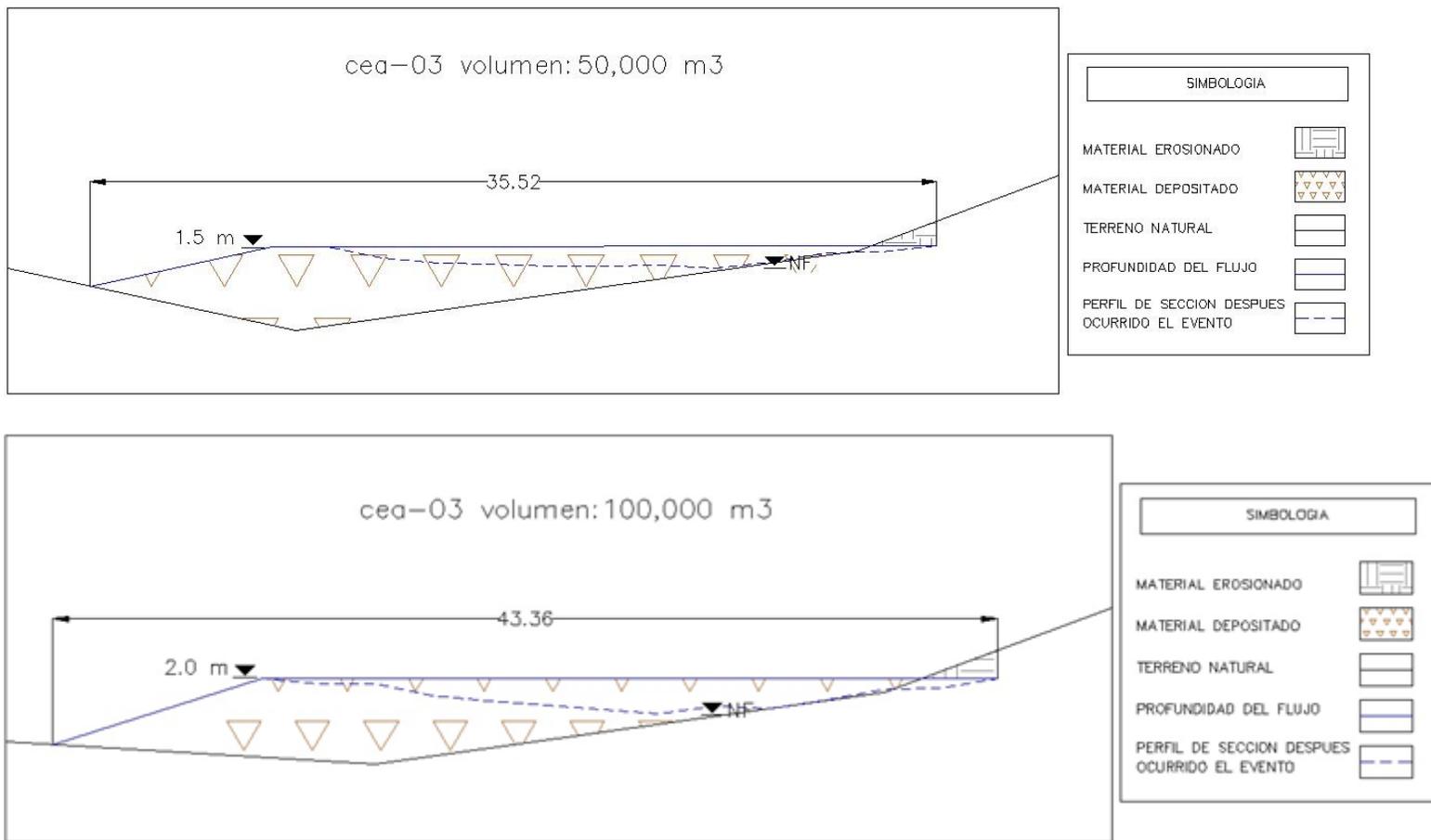


FIGURA 6-20 Sección transversal CEA-03 correspondientes a los escenarios EA-01 (sección superior) y EA-02 (sección inferior) de la cuenca El Ángel [Fuente: Elaboración propia].

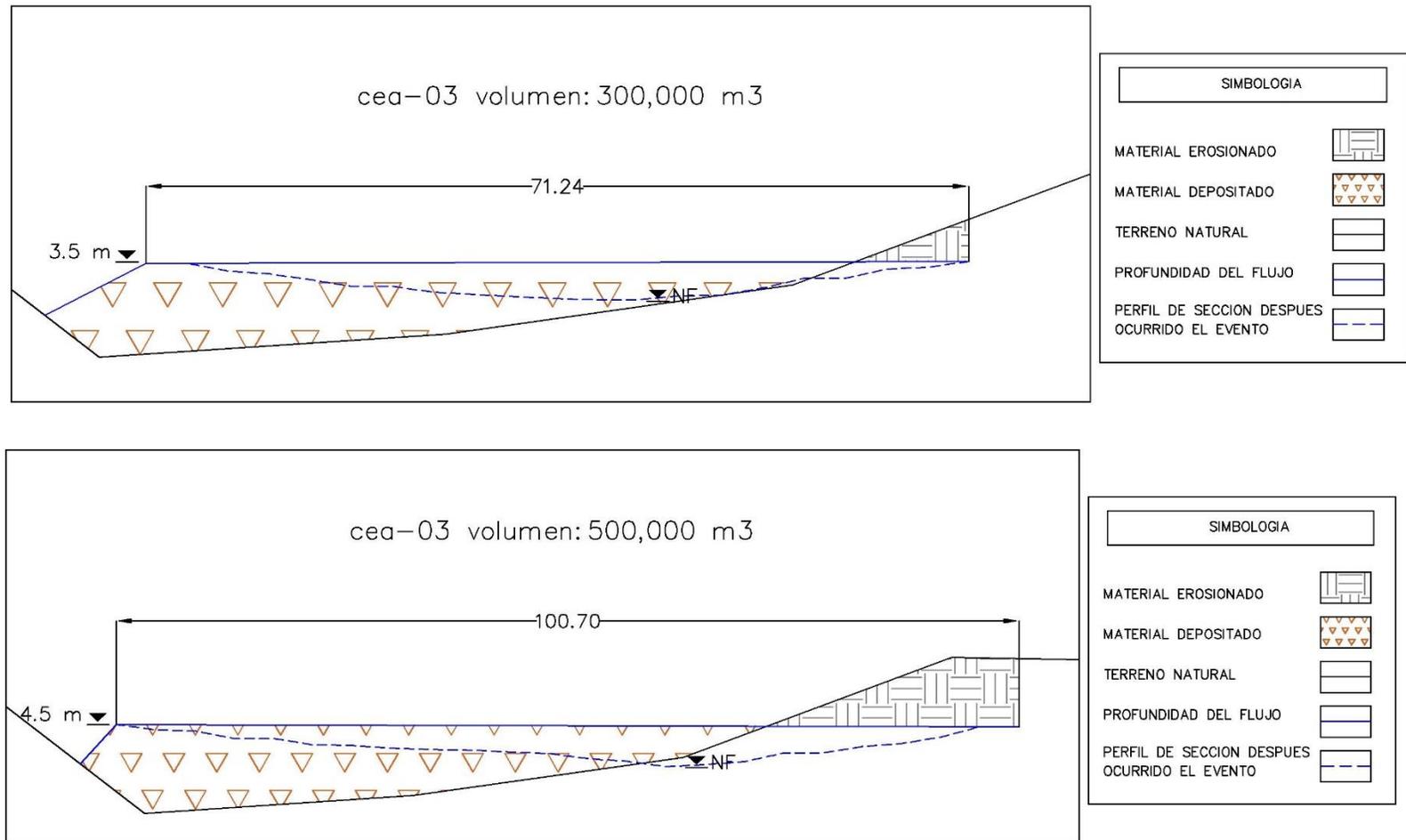


FIGURA 6-21 Sección transversal CEA-03 correspondientes a los escenarios EA-03 (sección superior) y EA-04 (sección inferior) de la cuenca El Ángel

[Fuente: Elaboración propia].

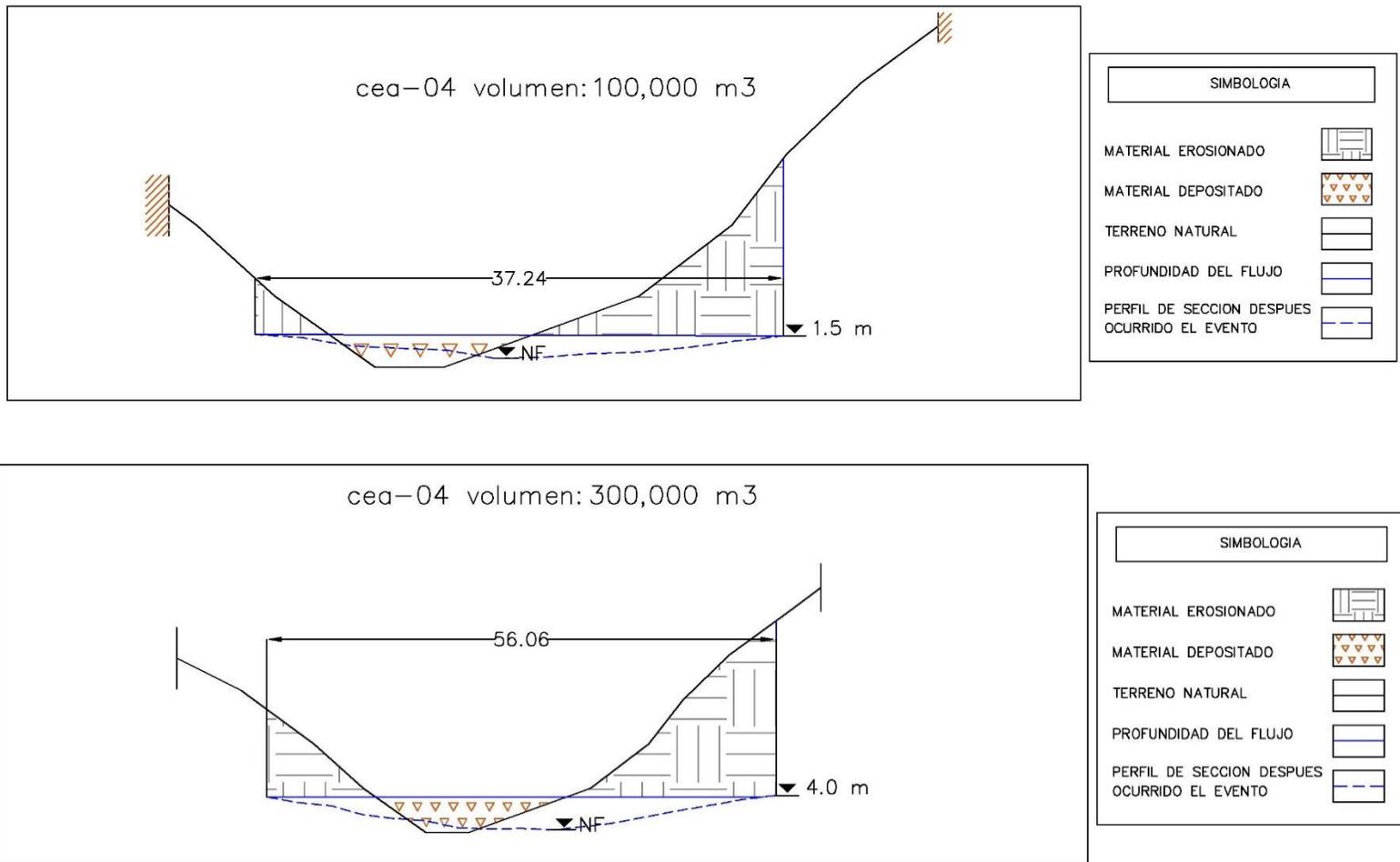


FIGURA 6-22 Sección transversal CEA-04 correspondientes a los escenarios EA-02 (sección superior) y EA-03 (sección inferior) de la cuenca El Ángel

[Fuente: Elaboración propia].

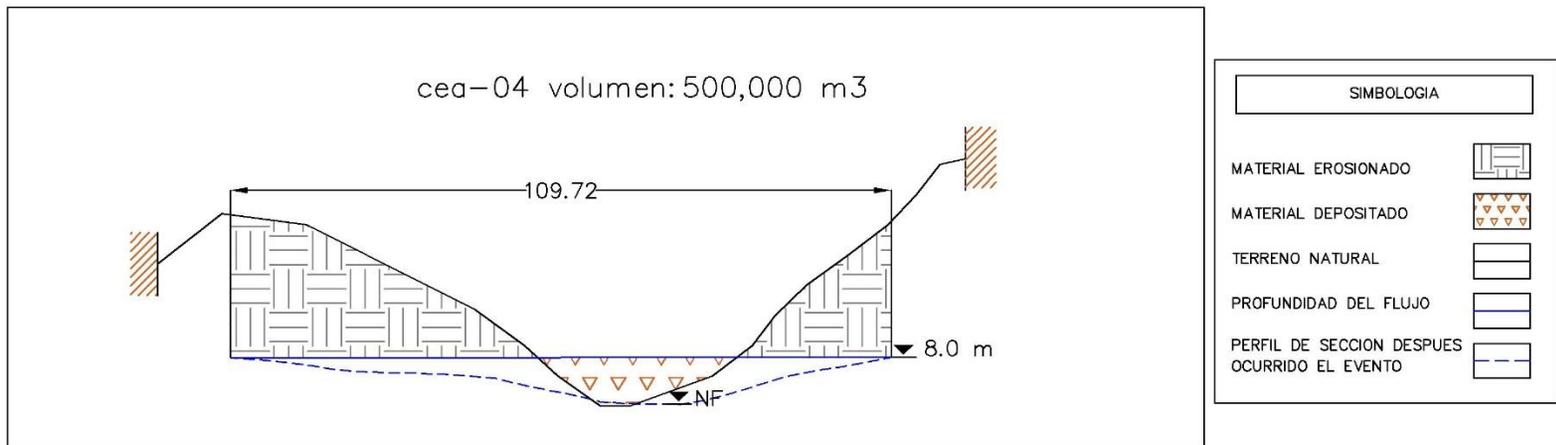


FIGURA 6-23 Sección transversal CEA-04 correspondientes a los escenarios EA-04 de la cuenca El Ángel [Fuente: Elaboración propia].

6.5 MAPA DE AMENAZA

En esta sección, se presentarán mapas de amenaza para ambas cuencas. Aunque solo en la cuenca El Ángel están presentes estructuras civiles (edificaciones, casas, calles, etc.), que serían afectadas al ocurrir un evento como flujo de escombros, también se mostrará para la cuenca San Antonio un mapa de amenaza con el fin de determinar la zona de protección que debe respetarse para evitar pérdidas humanas y materiales al ocurrir un evento como flujo de escombros.

En la cuenca El Ángel, se detallará una distribución de áreas de las estructuras que pueden ser dañadas por un flujo de escombros modelado. También se delimitará un área de protección. Esta zona de protección se establecerá según el Art. 16 de la Ordenanza Plan Parcial El Ángel, en donde se indica que para quebradas la distancia es de 30 metros, 15 metros a cada lado del eje del cauce del río. Esta zona de protección, aunque esta propuesta para inundaciones, se considera adecuada para un flujo de escombros:

Zona	Área (m ²)	Porcentaje de la Cuenca
Área de Impacto	174,144.66	0.75
Caminos Rurales	7,402.6	0.03
Casas Dispersas o Edificaciones	8,952.4	0.04
Área de Protección Recomendada	86,815.7	0.37

Tabla 6.5-1 Posibles áreas a ser afectadas por un flujo de escombros y área de protección de la cuenca El

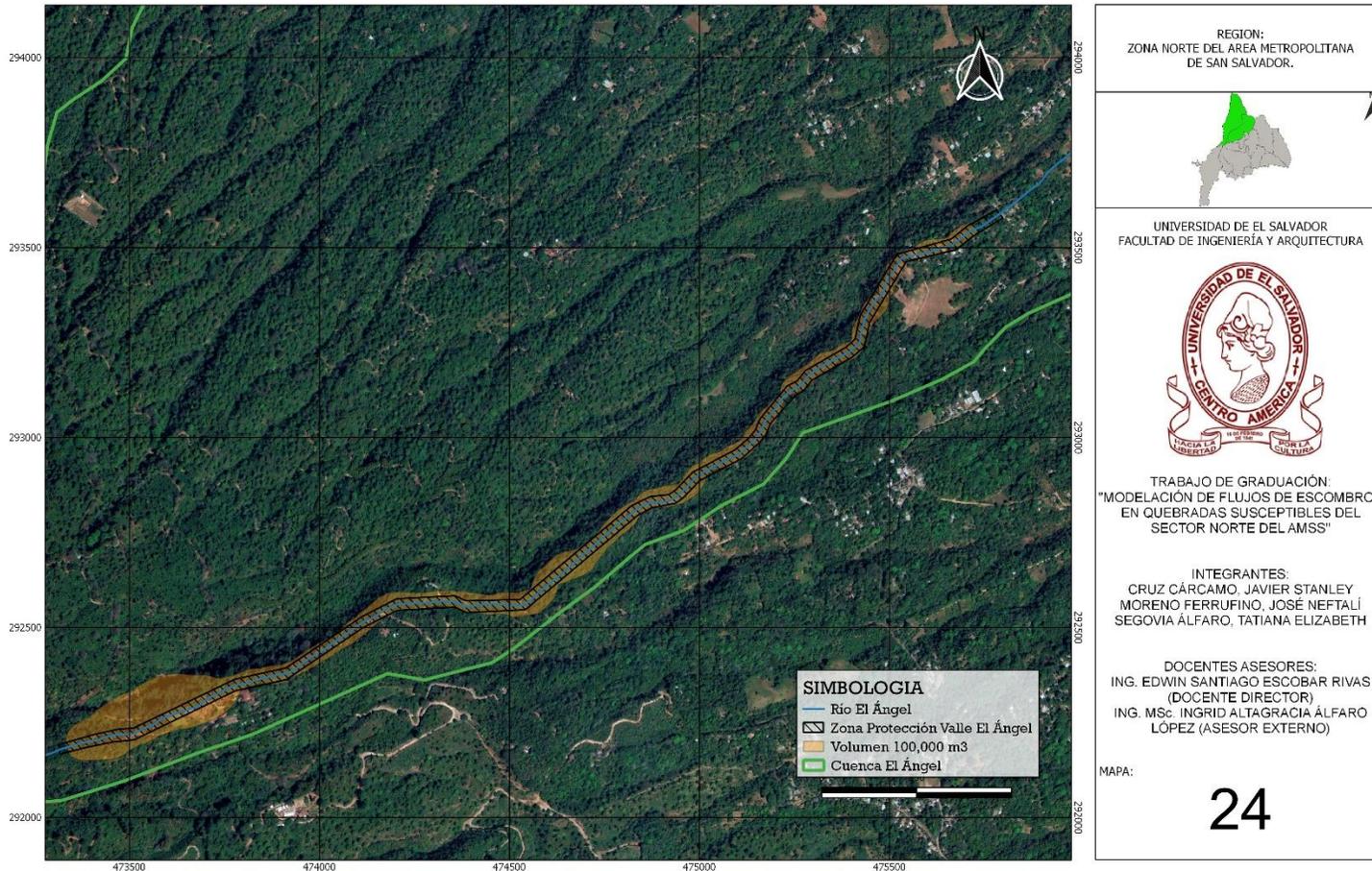
Ángel. [Fuente: elaboración propia].

Es importante mencionar, que el flujo modelado se detuvo a 700 metros de la prolongación del Boulevard Constitución, que es una de las principales carreteras que conectan los municipios de Apopa, Nejapa, el Norte y el Oriente del País, entre otros, con San Salvador y viceversa (Figura 6-25).

En la figura 6-26, se observa que están presentes algunas viviendas dispersas. En estas zonas que ya existen viviendas y que están en riesgo de un evento como un flujo de escombros, para asegurarles protección, se debería de realizar obras de protección aguas arriba para mitigar, o inclusive, detener un posible flujo proveniente de la ladera nor-este del volcán de San Salvador. Dichas obras de mitigación, dependiendo de la topografía real en campo, pueden ser muros de contención o gaviones, e inclusive usar disipadores de energía de losas de dentadas de concreto para reducir la velocidad de arrastre del flujo de escombros, donde se requiera de un especialista para una propuesta de diseño.

A continuación, se presenta el mapa de la cuenca El Ángel con las posibles zonas a ser afectadas por un flujo de escombros y el área recomendada como zona de protección:

MAPA DE AMENAZA DE LA CUENCA EL ÁNGEL



MAPA 24 Mapa de amenaza de la cuenca El Ángel. Representación de las posibles zonas afectadas y una propuesta de zona de protección

[Fuente: Elaboración propia en software QGIS].

MAPA DE AMENAZA DE LA CUENCA EL ÁNGEL



MAPA 25 Zona de protección para un posible evento de flujo de escombros en cuenca El Ángel

[Fuente: Elaboración propia en software QGIS].

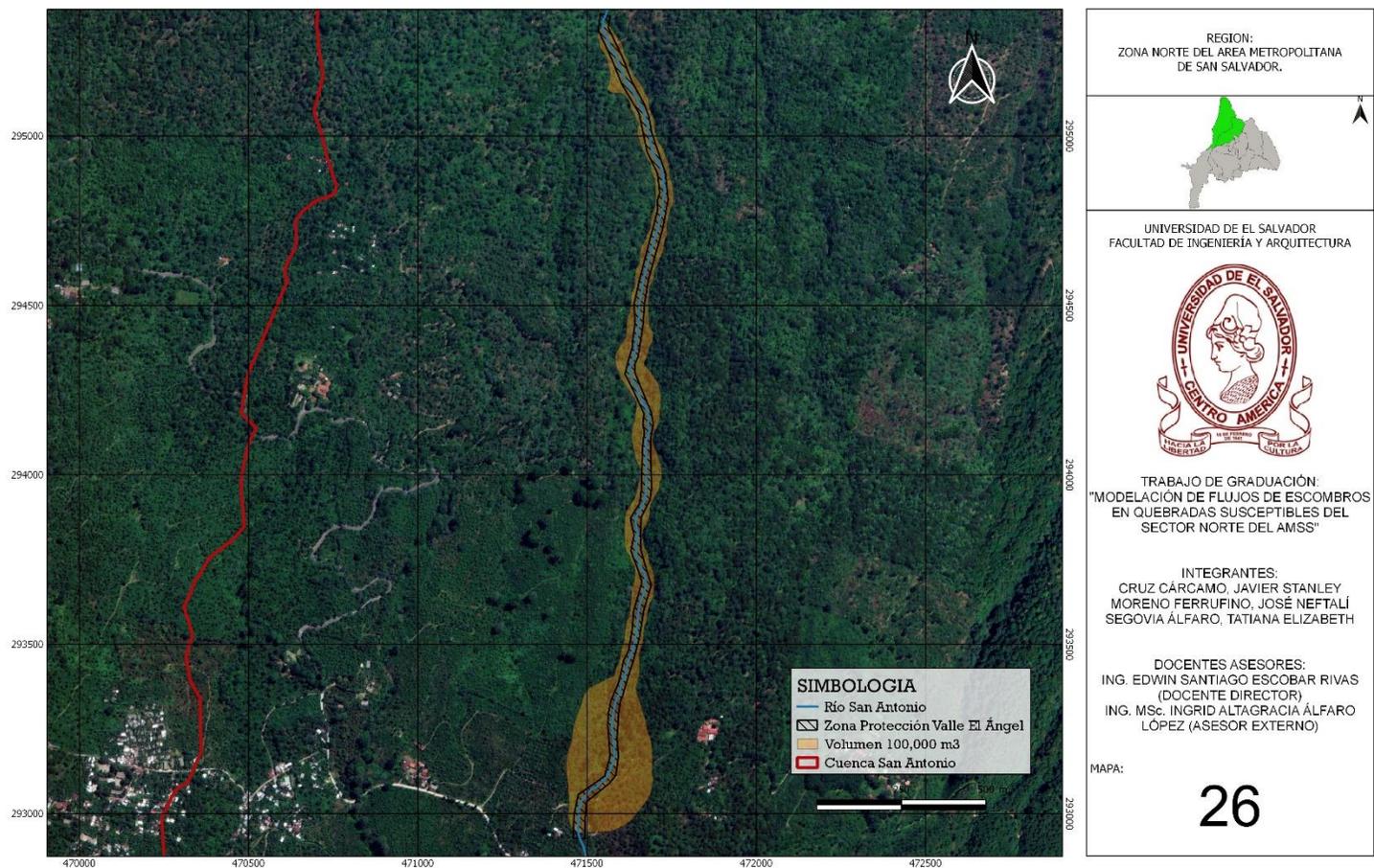
En la cuenca San Antonio, los flujos simulados no alcanzan ninguna estructura; sin embargo, eso no implica que el área estará totalmente segura por un flujo de escombros, ya que en cualquier momento puede ocurrir un evento de este tipo y ocasionar pérdidas de vidas humanas, así como materiales; por lo que, se propone continuar de manera similar con lo establecido en el Art. 16 de la Ordenanza Plan Parcial El Ángel, en donde se indica que para quebradas la distancia es de 30 metros, 15 metros a cada lado del eje del cauce del río.

Zona	Área (M²)	Porcentaje de la Cuenca
Área de Impacto	215,295.01	0.65
Área de Protección Recomendada	74,587.29	0.23

Tabla 6.5-2 Áreas a ser afectadas por un flujo de escombros y área de protección de la cuenca San Antonio. [Fuente: elaboración propia].

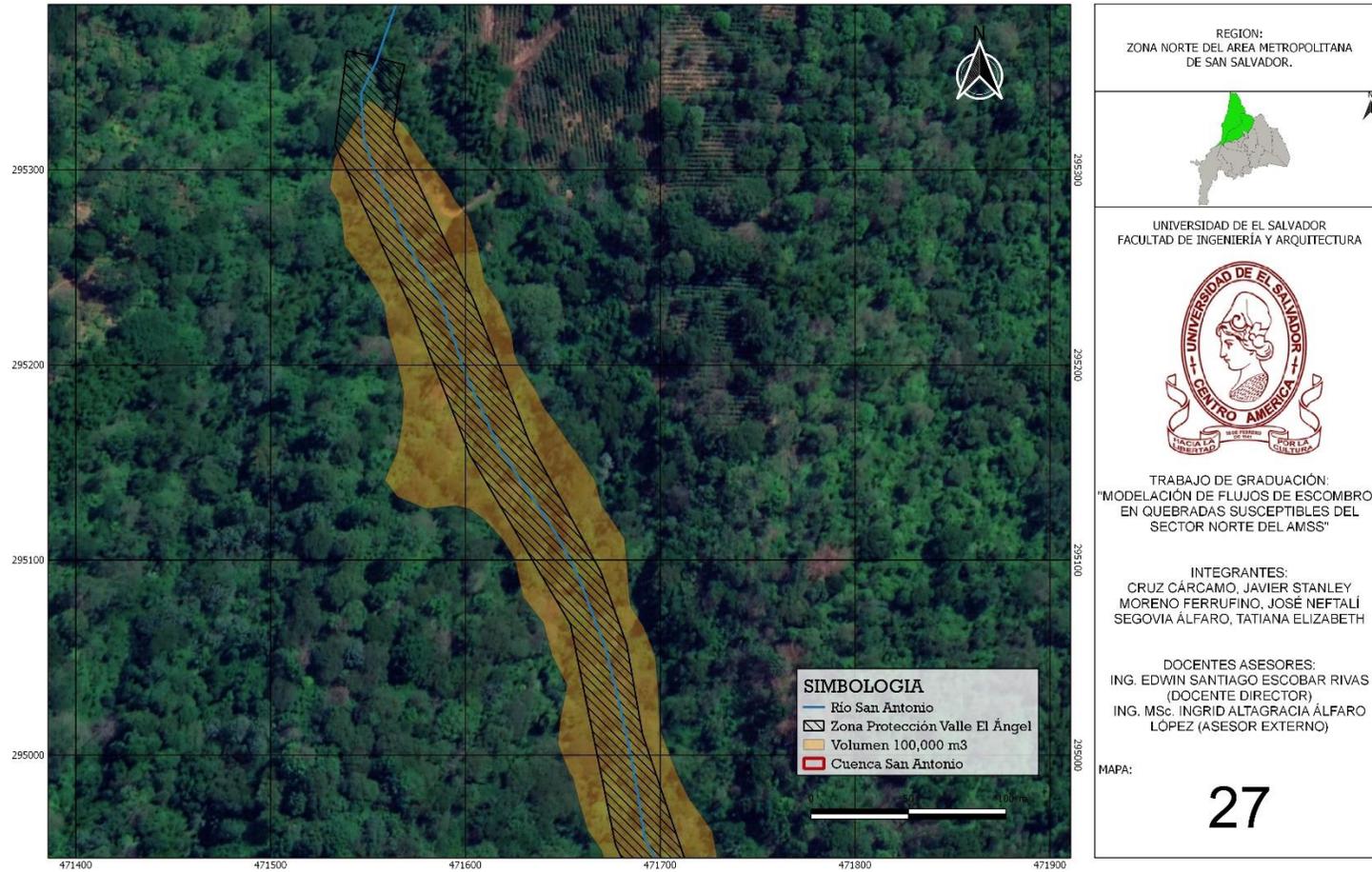
En los mapas 27 y 28, se presenta las posibles zonas a ser afectadas por un flujo de escombros y el área recomendada como zona de protección para la cuenca San Antonio:

MAPA DE AMENAZA DE LA CUENCA SAN ANTONIO



MAPA 26 Mapa de amenaza de la cuenca San Antonio. Representación de las posibles zonas afectadas y una propuesta de zona de protección [Fuente: Elaboración propia en software QGIS].

MAPA DE AMENAZA DE LA CUENCA SAN ANTONIO



MAPA 27 Zona de protección para un posible evento de flujo de escombros en cuenca San Antonio [Fuente: Elaboración propia en software QGIS].

6.6 CONCLUSIONES

Los flujos de escombros (Lahares) son conocidos como movimientos de masa que generan efectos catastróficos en la naturaleza y algunas veces en la infraestructura construida por él hombre, incluso con pérdidas de vidas, debido a su rapidez, la cantidad de energía liberada y el alto volumen de sedimento desplazado aguas abajo. En El Salvador se han registrado flujos de escombros en distintos lugares debido a eventos de origen sísmicos o por precipitación pluvial excesiva, como los registrados por el MARN, en el volcán de San Vicente (20 de noviembre del 2016), volcán de San Miguel (2013 y 2014), El Cerro El Picacho (1982) y otros deslizamientos ocurridos que no han sido registrados hasta la fecha, pero sus huellas son palpables al recorrer las zonas; las pérdidas causadas por estos movimientos pueden ser muy significativas, con importantes pérdidas económicas y de vidas humanas; por lo que se han desarrollado métodos empíricos y analíticos, con el objetivo de estimar los principales parámetros de flujo de escombros que se pueden usar para desarrollar medidas de mitigación y coexistencia en áreas susceptibles a este fenómeno. En este contexto, esta investigación busca contribuir a un mayor conocimiento utilizando el software DAN3D y métodos empíricos y/o numéricos para estimar los principales parámetros que permiten evaluar las medidas de mitigación y convivencia en zonas susceptibles.

Los casos de flujo de escombros presentados para distintos volúmenes realizados para las cuencas del Rio El Ángel, ubicada dentro del municipio de Apopa y la cuenca del Rio San Antonio ubicada dentro del municipio de Nejapa, ambos pertenecientes al departamento de San Salvador y ubicados en la zona norte del AMSS, fueron investigados y analizados con relaciones empíricas y simulación numérica con el programa DAN3D. Los resultados obtenidos no pueden ser comparados, ya que no se cuenta con registros históricos de estos eventos en la zona, pero los resultados podrían servir de indicador para tomar medidas de protección según la trayectoria obtenida del flujo de escombros que muestran las modelaciones, para proteger futuras construcciones, ya sea del sector urbano, industrial o agrícola que se desarrollen en la zona.

De esta manera, en este Trabajo de Graduación, se presentan las principales Conclusiones:

- Basados en las características geomorfológicas e hidrológicas de la zona de estudio, vistas en el capítulo 3, de las cuencas del Rio San Antonio y Rio El Ángel, se consideran susceptibles a fenómenos reductores; tales como deslizamientos, derrumbes y flujos de escombros; ya que cuentan con zonas de pendientes muy pronunciadas y con materiales de arrastre que se pueden transformar en corrientes de residuos.

- El volumen total movilizado por el flujo de escombros es un parámetro muy importante, pero difícil de predecir en el área del evento, con muchos resultados variables. Una evaluación rigurosa de la masa total requiere un estudio detallado de la topografía, además de las visitas y pruebas de campo para medir y observar el material arrastrado y obtener valores de volúmenes mejor adaptados al lugar para una simulación; no obstante, se ha trabajado con las herramientas que han estado al alcance, considerándose que se han obtenido resultados bastante confiables.
- Controlar la descarga de agua y sedimentos captados por las cuencas en cantidad y tiempo de ocurrencia, con el propósito de establecer puntos de control y obtener información necesaria para la delimitación de la zona por la generación de un flujo de escombros aguas arriba.
- El aumento o avance desmedido de la infraestructura sobre todo dentro del área de la cuenca del Rio El Ángel y el Rio San Antonio y zonas aledañas, reducirá la capacidad de infiltración del agua y generará un aumento en la escorrentía, por consiguiente, se tendrá un aumento del caudal en la parte baja de las cuencas. Según la presente investigación, se tiene que el 11.43% del área de la cuenca del Rio el Ángel (Municipio de Apopa) y un 7.01% del área de la cuenca del Rio San Antonio (Municipio de Nejapa) es suelo urbano y el 45.31% y 6.23% del área en crecimiento (suelo urbanizable). (según la Tabla 3.2-11 Uso de Suelos).

- Las lluvias, ya sean muy intensas o muy prolongadas, junto con los sismos de gran magnitud funcionan como factores desencadenantes para el origen de deslizamientos de tierra, derrumbes y flujos de escombros.
- Los incrementos de la precipitación debido a eventos extremos; provocan una serie de impactos físicos que pudieran deteriorar cada vez más las condiciones de vulnerabilidad y riesgo en las zonas delimitadas en la cuenca de estudio.
- El software DAN3D según estudios realizados por el profesor Hungr sobre eventos simulados, es el que más se adapta a situaciones reales, por lo que mostró una alta sensibilidad para detallar la topografía del terreno, lo que indica la importancia de la investigación del área y resultados que pueden servir como indicador según los parámetros reológicos y las condiciones de geológicas de la zona, que se ingresan al momento de modelar un flujo.
- La aplicación de reología de Voellmy en flujos de escombros, comprende dos análisis; uno reológico interno, dependiente del ángulo de fricción interna del material y el segundo un análisis reológico basal, dependiente del coeficiente de fricción 0.005 y del parámetro de turbulencia que para todos los escenarios se utilizó 1,500; entre la base del flujo y la superficie de la ladera; estos parámetros son considerados aparentes por lo que las propiedades de los materiales en general no pueden ser medidas en el laboratorio. Por tal motivo, en el caso de la asignación de un peso

específico del material se tomó un valor promedio de 15 KN/m^3 , el cual se consideró de esta manera ya que las cuencas al modelar el flujo cuentan con distintos tipos de suelos; desde materiales piroclásticos en estado suelto y saturado como también tierra blanca.

- Todas las simulaciones fueron ejecutadas con un paso de tiempo de 0.1 segundos, debido a que no se pudo realizar la calibración por falta de registros históricos en el área de estudio. Pero a su vez garantiza una precisión en los resultados ya que este valor usualmente anda por el rango de 0.05 a 0.1.
- De acuerdo a los resultados de la simulación del flujo de $100,000 \text{ m}^3$ de la cuenca El Ángel (escenario EA-02), se obtiene un área de afectación de aproximadamente 17.41 km^2 , que corresponde a un 0.75% sobre el territorio al Norte del AMSS, que se encuentra en una zona de posible amenaza.
- La predicción futura con mayor distancia máxima recorrida corresponde al escenario EA-04, de la cuenca El Ángel, el cual posee el mayor volumen de liberación ($500,000.00 \text{ m}^3$) con respecto a los demás escenarios. Esta longitud equivale a la coordenada Lambert en X de: 475593.9 m, el cual el flujo simulado se detuvo a 700 metros de la prolongación del Boulevard Constitución, que es una de las principales carreteras que conectan los municipios de Apopa, Nejapa entre otros con San Salvador y viceversa.

6.7 RECOMENDACIONES

- Es necesario realizar visitas de campo y recopilar información de flujos de escombros generados en la zona norte del AMSS, para obtener datos geotécnicos de eventos de flujos reales y así establecer registros históricos que sirvan como parámetro o guía para simulación y validación de casos reales, que ayuden a la calibración de los modelos; además, de calcular los volúmenes de los flujos que se pueden generar según los factores geológicos o litológicos existentes en la zona.
- Colocar un sistema de alerta temprana por deslizamientos en lugares estratégicos, como los núcleos poblacionales, que monitoree y muestren si hay lluvias de alta intensidad o riesgo de deslizamiento por sismo, para que la población tenga el tiempo necesario para evacuar la zona.
- Con el fin de cuidar y proteger la infraestructura, agricultura, y la población de la zona, se debe analizar el flujo cuidadosamente, para que, al proponer diseños para las medidas de mitigación, se adecuen a las condiciones del flujo considerando el volumen de sedimento desplazado y trayectoria del flujo más cercano; como actualizar datos de lluvia en estaciones meteorológicas para obtener mejores resultados en el análisis hidrológico.
- Es necesario contar con curvas de nivel a cada metro mínimo, para mejorar la precisión topográfica y así obtener una mejor trayectoria del flujo.

- Actualmente la cuenca del Rio San Antonio no cuenta con área urbanizable sujeta a riesgo por flujo de escombros, por lo que se sugiere, si en un futuro se desea urbanizar esta zona; realizar un análisis de vulnerabilidad aguas arriba que sirva de parámetro para establecer una posible zona de protección y de ser necesario proponer alguna medida de mitigación, para evitar riesgo por la generación de un flujo.
- Utilizar mapeo geológico a detalle para una posible calibración y validación del modelo.

BIBLIOGRAFÍA

- Alfaro, I.A. (2014) Debris Flow Characteristic along the Main Channel with Structures in the Arenal de Mejicanos, San Salvador, El Salvador. Tesis presentada en cumplimiento parcial del requisito de Maestría en Gestión de Desastres. National Graduate Institute for Policy Studies (GRIPS) Tokyo, Japón.
- Andrea Balbuzano Pelizoni, Universidade Federal do Rio de Janeiro Março 2014. Análise De Fluxos De Detritos Na Região Serrana Fluminense.
- Cepeda, J., J.A. Chávez y C.C. Martínez (2009) Procedure for the selection of runout model parameters from landslides back analyses: application to the Metropolitan Area of San Salvador, El Salvador, Norwegian Geotechnical Institute (NGI) and the International Centre for Geohazards (ICG).
- Chow, V., D.R. Maidment y L.W. Mays (1994). Hidrologia Aplicada. Mc Graw Hill.
- Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos, Centro de Ingeniería Hidrológica (2016). Manual del Usuario del Sistema de Modelado Hidrológico HEC-HMS Versión 4.2.1.
- DIGESTYC Dirección General de Estadísticas y Censos (2016) “Encuesta de Hogares de Propósitos Múltiples”.
- Dirección General del Observatorio Ambiental, (2012), Escenario de riesgo: Amenazas por inundación Cuenca alta del río Acelhuate: Arenal Monserrat,

Arenal Mejicanos, Arenal Tutunichapa, Quebrada El Garrobo. Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN).

- Gómez, L.C., Avalos, I.B. (2014) Balance Hídrico y Análisis de Calidad del Agua en la Cuenca del Río San Antonio, Municipio de Nejapa, Departamento de San Salvador. Trabajo de Graduación presentado para optar al grado de Ingeniero Civil de la Universidad de El Salvador.
- Handal, J.L., López, V.L. y Mixco, L.E. (2009) Simulación de Flujos de Escombros Utilizando el Modelo Numérico-Dinámico DAN-3D sobre el Flanco Este de El Picacho. Trabajo de Graduación presentado para optar al grado de Ingeniero Civil de la Universidad Centroamericana José Simeón Cañas.
- Hungr, O. and McDougall, S. (2009). Two numerical models for landslide dynamic analysis. Computers & Geosciences.
- Hungr Geotechnical Engineering, Inc., (2010). DAN3D Dynamic Analysis of Landslides in Three Dimensions.
- Jadir Solís Montero, Cholula, Puebla, México (2003). Paquete Interactivo para Análisis Hidrológico.
- Jaime Suarez, Deslizamientos Volumen I: Análisis Geotécnico, 2009, primera edición.
- Kiernan, S.H. y O. Ledru (1996) Remedial measures against landslides hazards at the San Salvador volcano, El Salvador. Trabajo de Graduación

presentado para optar al grado de Master of Science del Royal Institute of Technology, Estocolmo, Suecia.

- López Cadenas de Llano, F. (Coord.), (1994). “Restauración hidrológico-forestal de cuencas” Mundi Prensa –Tragsa, 902 pp.
- Major, J.J., S.P. Schiling, D.J., C.D. Escobar y C.R. Pullinger (2009) Riesgos Volcanicos en la Región de San Salvador, El Salvador, United State Geological Survey Reporte de archivo abierto, 01-366.
- McKinnon, Mika, (2010). Landslide runout: statistical analysis of physical characteristics and model parameters.
- Ministerio de Media Ambiente y Recursos Naturales, (2014), Deslave por intensas lluvias sobre el volcán Chaparrastique, San Miguel.
- Ramos, J.H. (2016), Análisis Hidrológico del Río Sensunapán, como alternativa de la Gestión de Riesgos y Reducción de la Vulnerabilidad, en el Departamento de Sonsonate, El Salvador. Trabajo de Graduación presentado para optar al grado de Ingeniero Agrónomo de la Universidad de El Salvador.
- Romero, Bernardo (2012), Clasificación de Suelos por División Política de El Salvador, C.A. Ministerio de Agricultura y Ganadería de El Salvador.
- Romero, Bernardo (2010), Conflicto de Uso de Suelo en la República de El Salvador. Ministerio de Agricultura y Ganadería de El Salvador.
- Rubio, J. Levantamiento de Deslizamientos de Tierra en el Volcán de San Salvador.

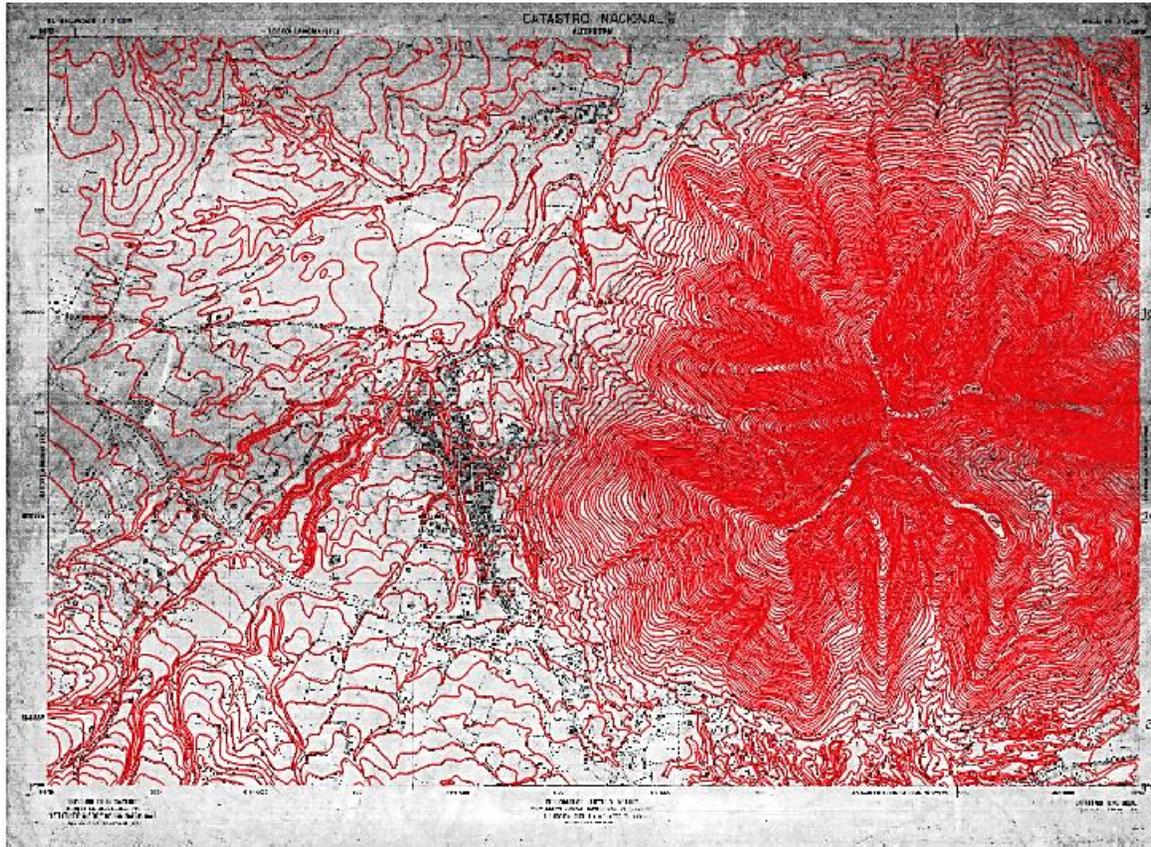
- Schwab, G.O. -Frevort, R.K. -Edminster, T.W. "Ingeniería de Conservación de Suelos y Aguas", Ed. Limusa, 570 pp.

Páginas WEB consultadas:

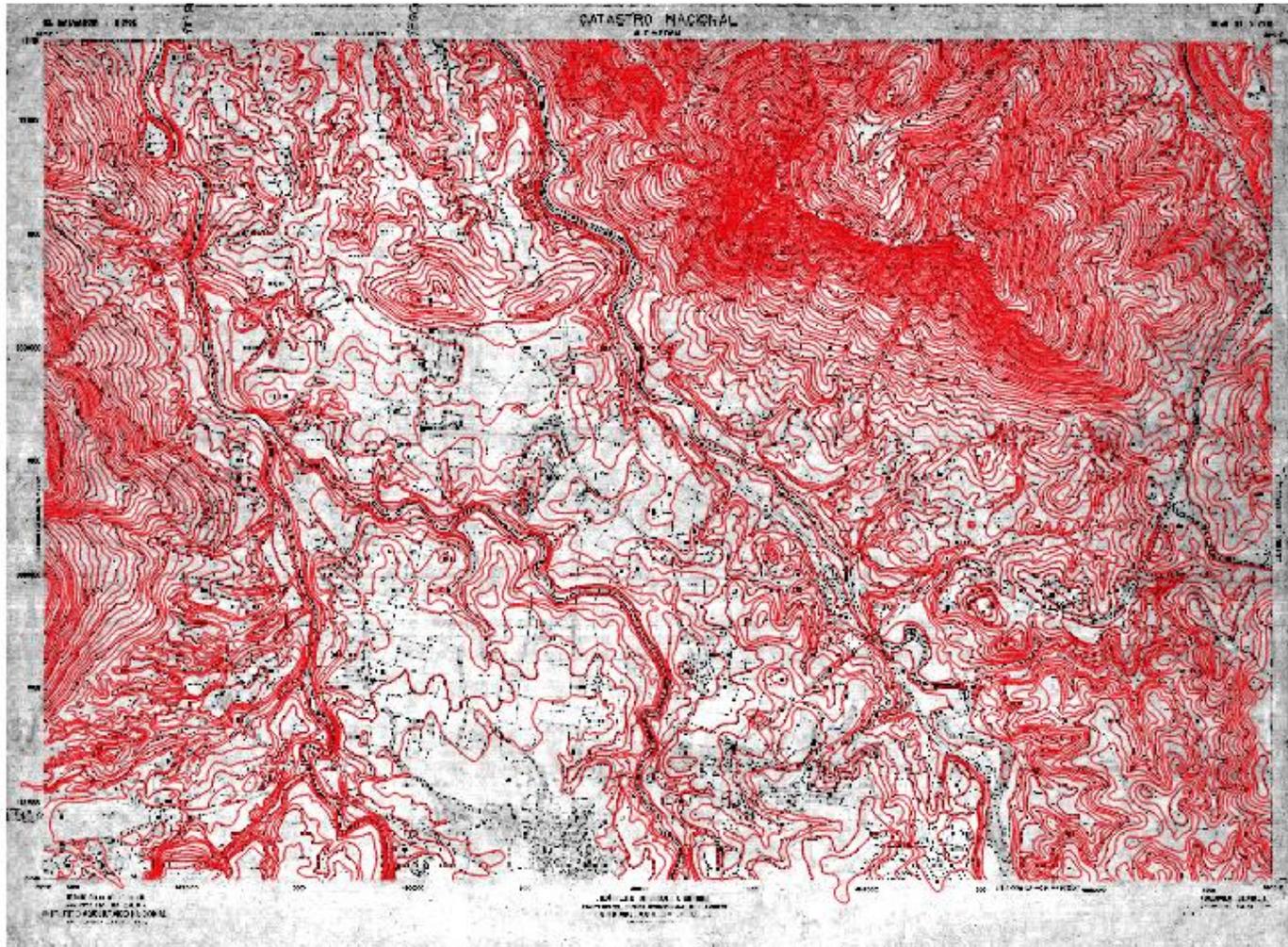
- Valores del N.º de Curva (cálculo de la Escorrentía)
- <http://geoportalopamss.org.sv/> Febrero de 2017
- <http://www.cnr.gob.sv/geoportal-cnr/> Noviembre de 2015

ANEXOS

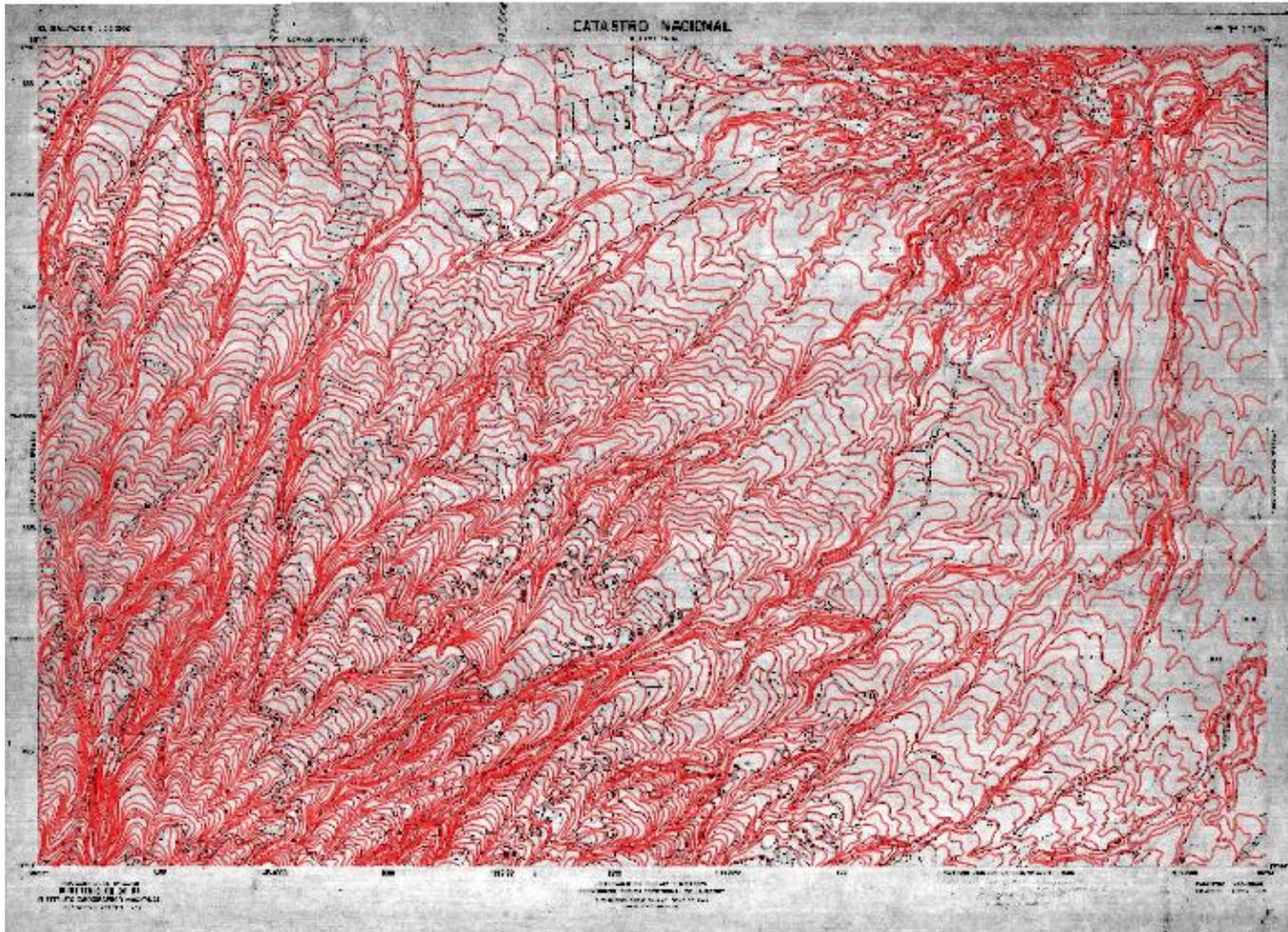
A. DIGITALIZACIÓN DE CUADRANTES CON CURVAS DE NIVEL A CADA 5 METROS DE LA ZONA DE ESTUDIO PARA LA GENERACIÓN DE DEM



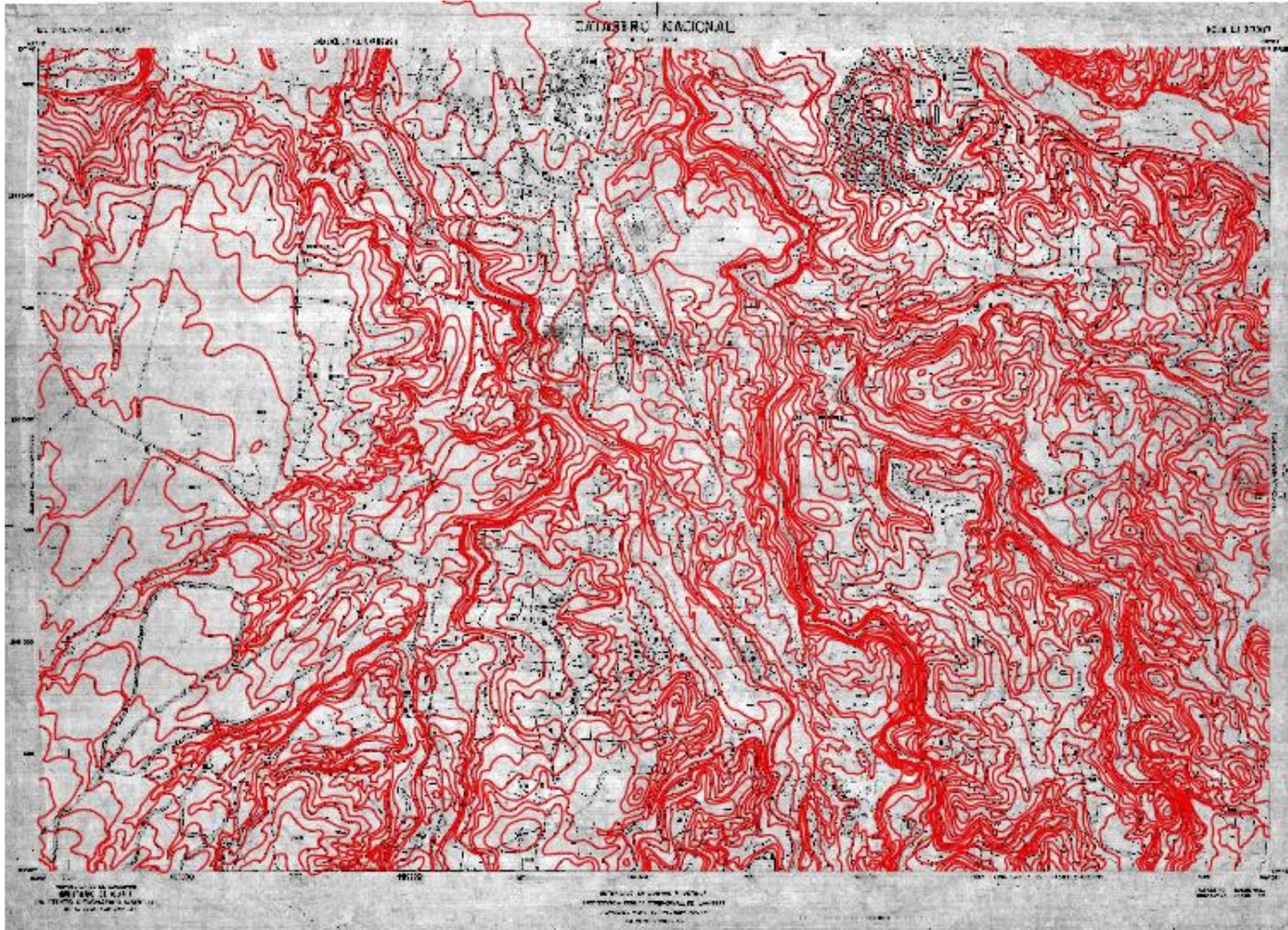
A-1 Digitalización de curvas de nivel cuadrante 37201.



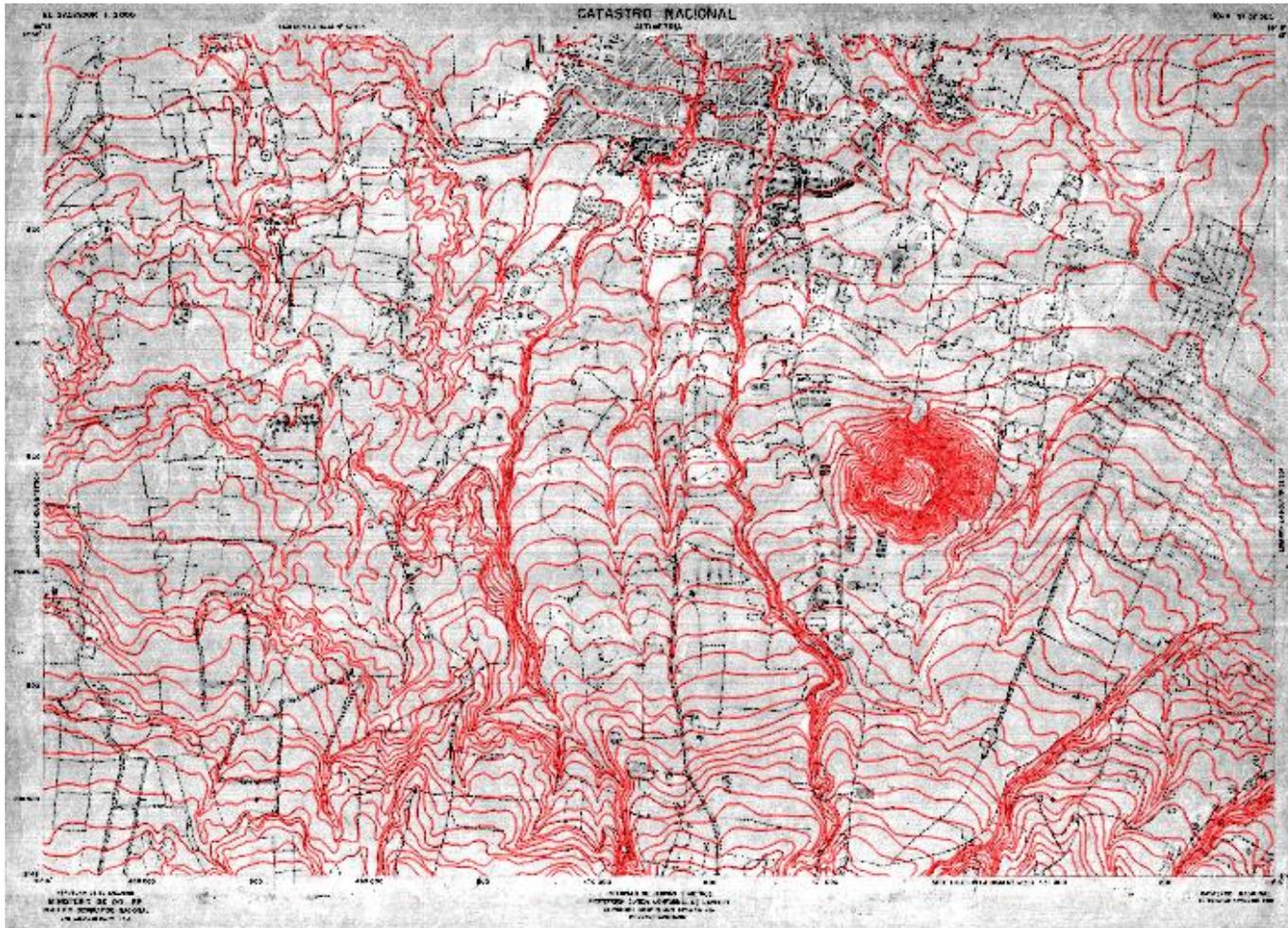
A-2 Digitalización de curvas de nivel cuadrante 37202.



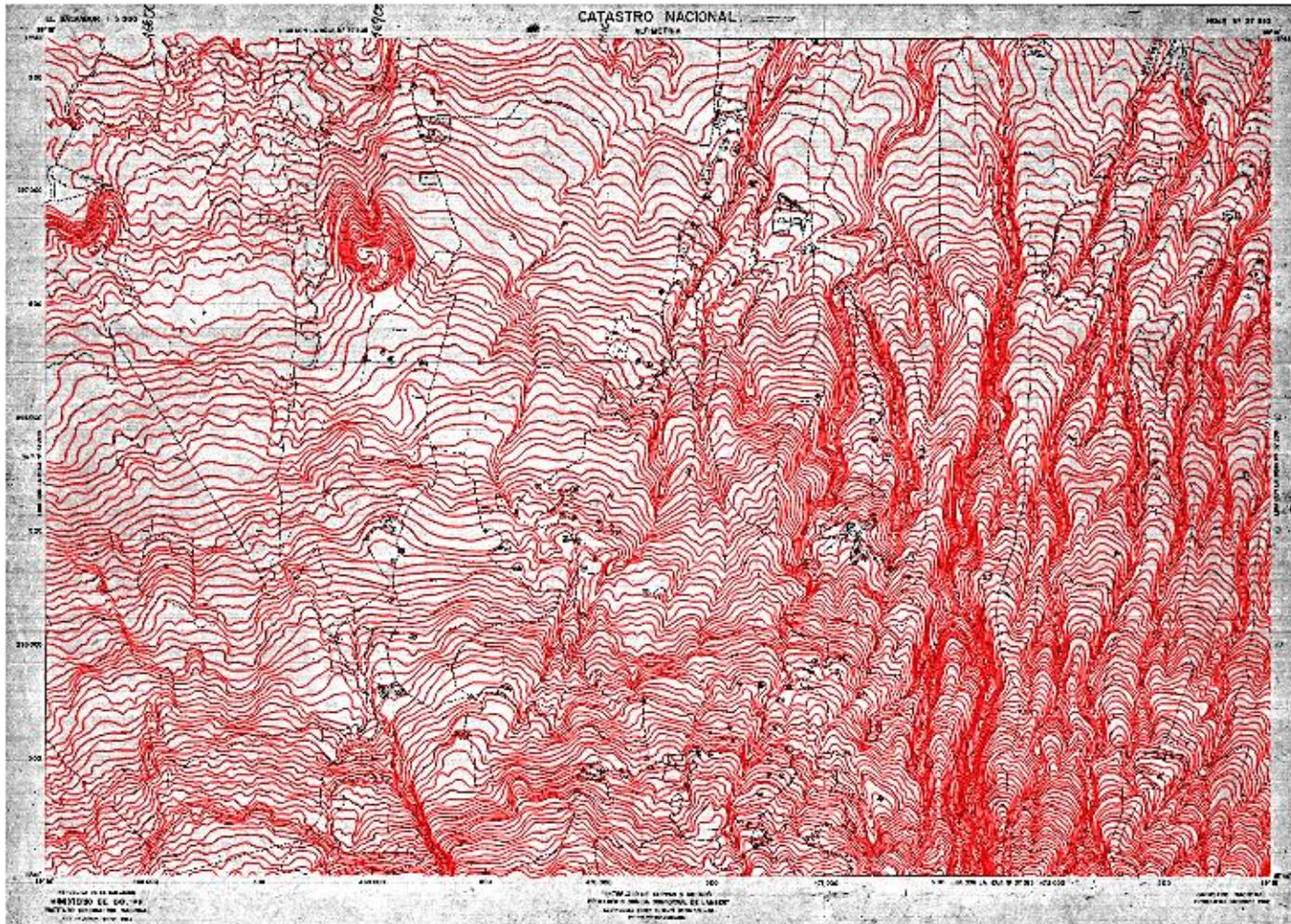
A-3 Digitalización de curvas de nivel cuadrante 37206.



A-4 Digitalización de curvas de nivel cuadrante 37207.

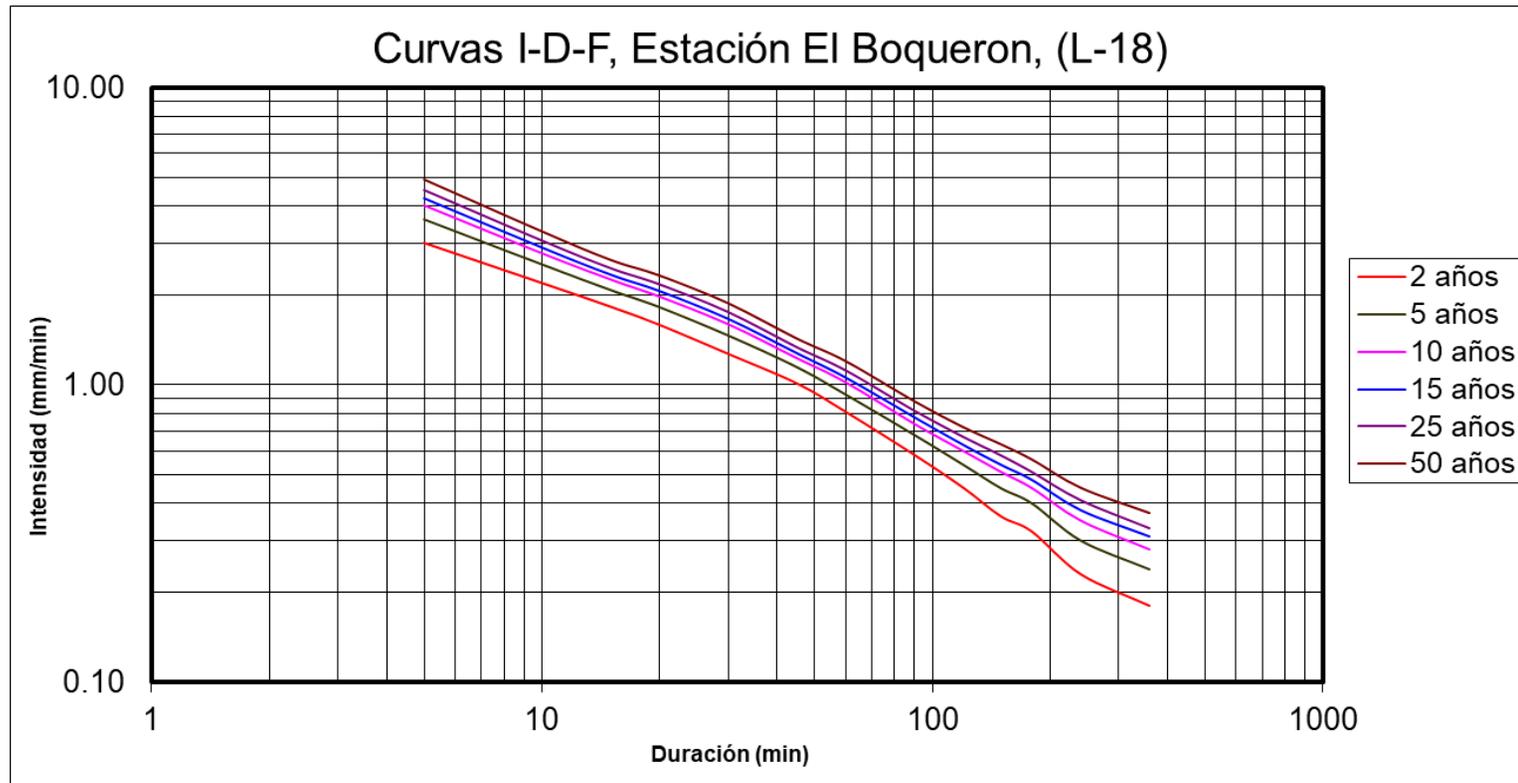


A-5 Digitalización de curvas de nivel cuadrante 37305.



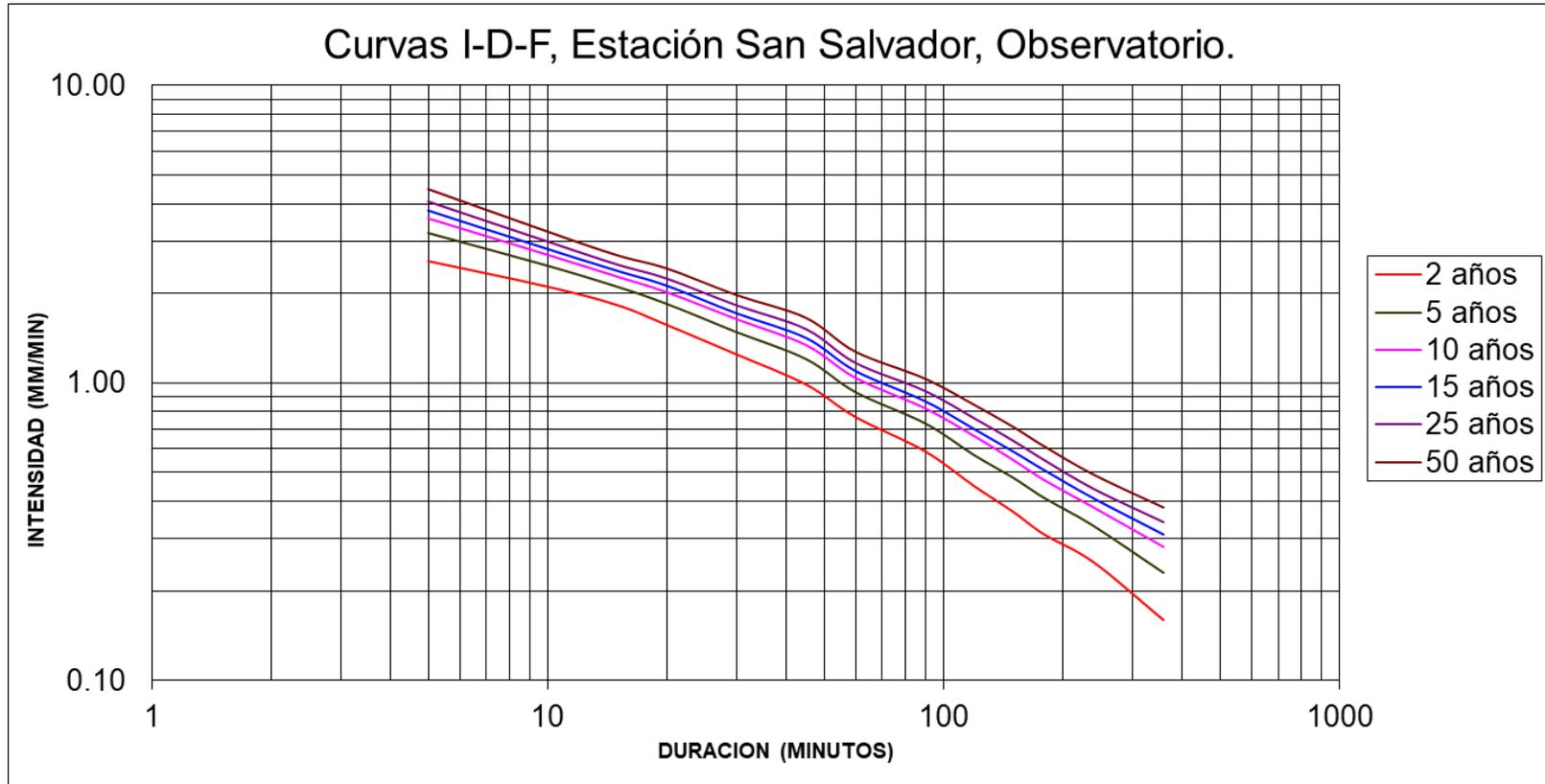
A-6 Digitalización de curvas de nivel cuadrante 37310.

B. CURVAS I-D-F- DE LAS ESTACIONES METEOROLOGICAS CERCANAS A LA ZONA DE INTERES

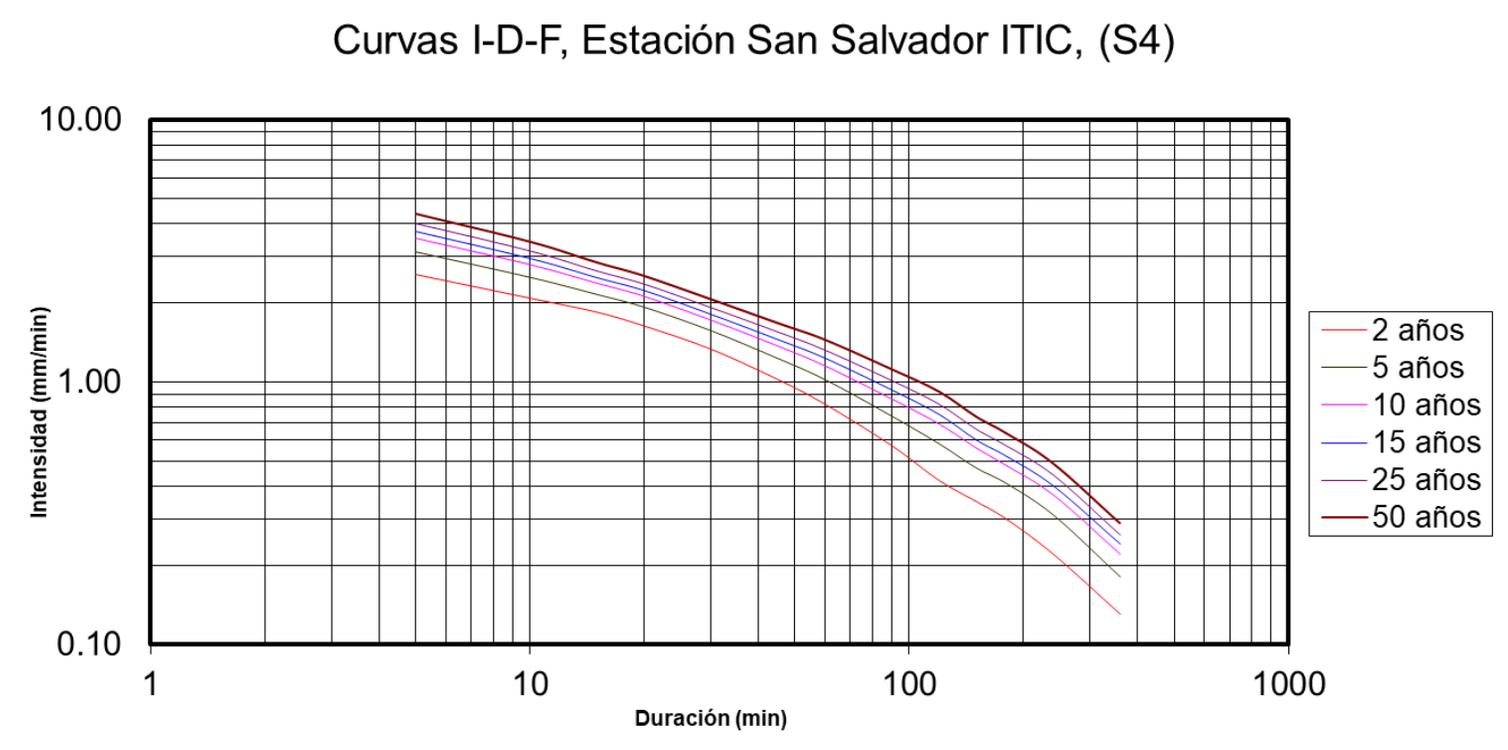


B-1 Curvas I-D-F Estación El Boquerón.

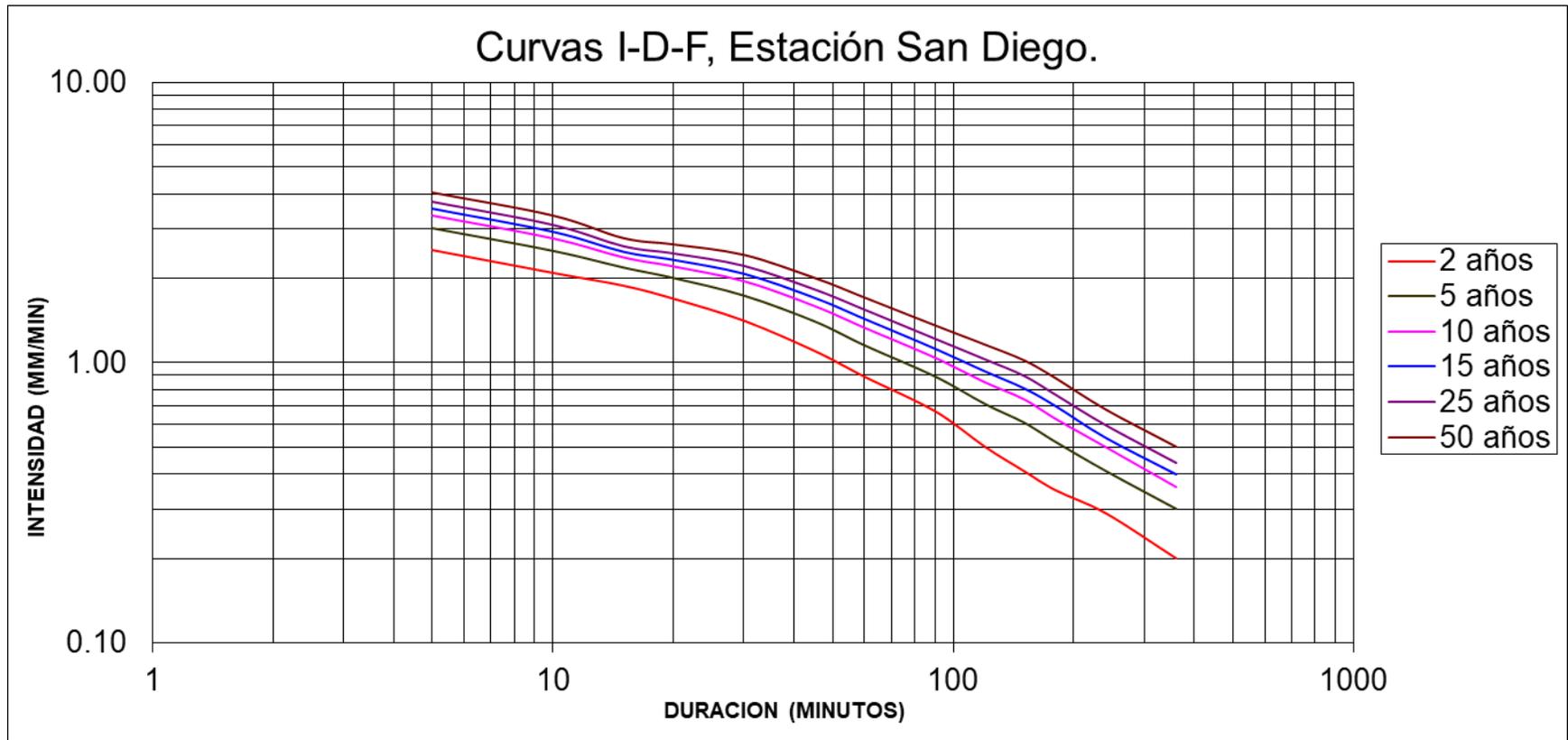
Curvas I-D-F, Estación San Salvador, Observatorio.



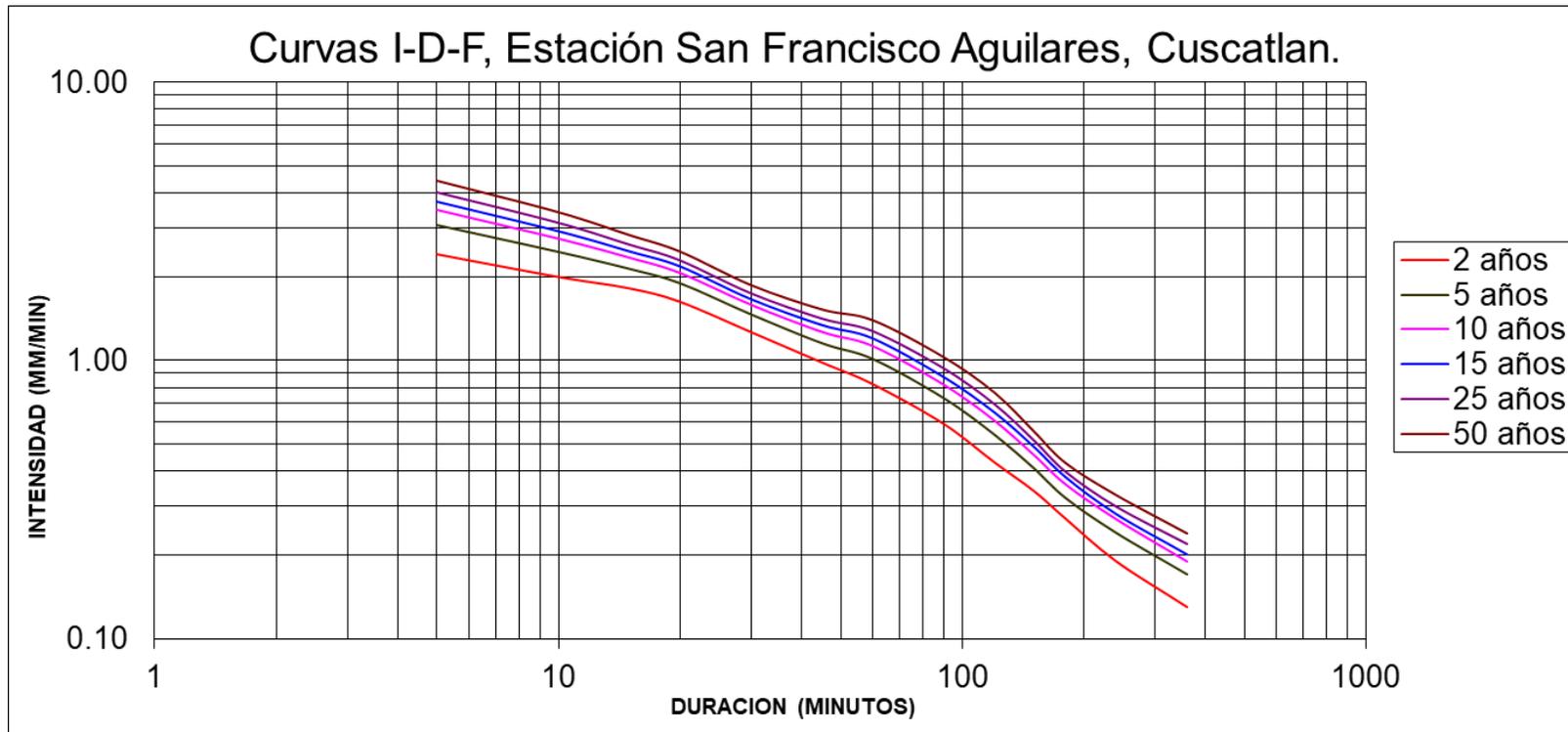
B-2 Curvas I-D-F Estación San Salvador, Observatorio.



B-3 Curvas I-D-F Estación San Salvador, ITIC.



B-4 Curvas I-D-F Estación San Diego.



B-5 Curvas I-D-F Estación San Francisco Aguilares, Cuscatlán.

C. RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS MODELOS REALIZADOS EN DEL DAN3D PARA CADA ESCENARIO

finaloutput 50CEA.bt: Bloc de notas	output 50CEA.bt: Bloc de notas
<pre> Archivo Edición Formato Ver Ayuda C:\Users\Satellite\Desktop\DAN3D VOLUMEN DE ESTUDIO\CEA\simulacion EA\vol. 50_E=1500_CEA\vol.50_E=1500_CEA.dn3 Project: vol.50_E=1500_CEA Job: Voellmy(F=0.1,E=1500) Input by: Tesis Number of Materials: 1 Number of Particles: 2000 Erosion Rate (m^-1): 0 Smoothing Length Constant: 4 Velocity Smoothing Coefficient: 0 Stiffness Coefficient: 200 Time Step (s): 0.1 Elevation File Name: C:\Users\Satellite\Desktop\DAN3D VOLUMEN DE ESTUDIO\CEA\simulacion EA\vol. 50_E=1500_CEA\Topografia_CEA.grd Depth File Name: C:\Users\Satellite\Desktop\DAN3D VOLUMEN DE ESTUDIO\CEA\simulacion EA\vol. 50_E=1500_CEA\Vol150.grd Erosion File Name: None Material 1 Unit Weight (kN/m^3): 15 Voellmy Rheology Shear Strength (kPa): 0 Friction Angle (deg.): 0 Friction Coefficient: 0 Pore-pressure Coefficient: 0 Viscosity (kPa.s): 0 Turbulence Coefficient (m/s^2): 1500 Power Law Exponent: 0 Internal Friction Angle (deg.): 35 End Time (s): 3180 Final COM X-Position (m): 4680.87 Final COM Y-Position (m): 2811.94 Maximum Slide Velocity (m/s): 36.059 Travel Angle (deg.): 8.28361 Start Volume (m^3): 50029.9 Final Volume (m^3): 50029.9 Output files saved in: C:\Users\Satellite\Desktop\DAN3D VOLUMEN DE ESTUDIO\CEA\simulacion EA\vol. 50_E=1500_CEA\ Output time interval (s): 100 </pre>	<pre> Archivo Edición Formato Ver Ayuda t (s)= 3179.6 Max. Velocity (m/s)= 3.20651 Smoothing length (m)= 36.7564 Average thickness (m)= 0.162387 COM X-Position (m)= 4680.87 COM Y-Position (m)= 2811.9 Volume (m^3)= 50029.9 t (s)= 3179.7 Max. Velocity (m/s)= 3.20802 Smoothing length (m)= 36.7543 Average thickness (m)= 0.162404 COM X-Position (m)= 4680.87 COM Y-Position (m)= 2811.91 Volume (m^3)= 50029.9 t (s)= 3179.8 Max. Velocity (m/s)= 3.23284 Smoothing length (m)= 36.7531 Average thickness (m)= 0.162415 COM X-Position (m)= 4680.87 COM Y-Position (m)= 2811.92 Volume (m^3)= 50029.9 t (s)= 3179.9 Max. Velocity (m/s)= 3.25111 Smoothing length (m)= 36.7525 Average thickness (m)= 0.162422 COM X-Position (m)= 4680.87 COM Y-Position (m)= 2811.93 Volume (m^3)= 50029.9 t (s)= 3180 Max. Velocity (m/s)= 3.25754 Smoothing length (m)= 36.7524 Average thickness (m)= 0.162425 COM X-Position (m)= 4680.87 COM Y-Position (m)= 2811.94 Volume (m^3)= 50029.9 </pre>

C-1 Resultados de simulación escenario CEA-1 con un volumen de 50,000 m³.

finaloutput 50CSA.txt: Bloc de notas	output 50CSA.txt: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda C:\Users\Satellite\Desktop\DAN3D VOLUMEN DE ESTUDIO\CSA\Simulacion SA\Vol.50_CSA\Vol.50_E=1500_CSA\VOL.50_E=1500_CSA.dn3 Project: VOL.50_E=1500_CSA Job: Voellmy(F=0.1,E=1500) Input by: Tesis Number of Materials: 1 Number of Particles: 2000 Erosion Rate (m ⁻¹): 0 Smoothing Length Constant: 4 Velocity Smoothing Coefficient: 0 Stiffness Coefficient: 200 Time Step (s): 0.1 Elevation File Name: C:\Users\Satellite\Desktop\DAN3D VOLUMEN DE ESTUDIO\CSA\Simulacion SA\Vol.50_CSA\Vol.50_E=1500_CSA\Topografia_CSA.grd Depth File Name: C:\Users\Satellite\Desktop\DAN3D VOLUMEN DE ESTUDIO\CSA\Simulacion SA\Vol.50_CSA\Vol.50_E=1500_CSA\Vo150.grd Erosion File Name: None Material 1 Unit Weight (kN/m ³): 15 Voellmy Rheology Shear Strength (kPa): 0 Friction Angle (deg.): 0 Friction Coefficient: 0 Pore-pressure Coefficient: 0 Viscosity (kPa.s): 0 Turbulence Coefficient (m/s ²): 1500 Power Law Exponent: 0 Internal Friction Angle (deg.): 35 End Time (s): 1923.3 Final COM X-Position (m): 2730.5 Final COM Y-Position (m): 6281.74 Maximum Slide Velocity (m/s): 34.3256 Travel Angle (deg.): 10.1891 Start Volume (m ³): 50074.7 Final Volume (m ³): 50074.7 Output files saved in: C:\Users\Satellite\Desktop\DAN3D VOLUMEN DE ESTUDIO\CSA\Simulacion SA\Vol.50_CSA\Vol.50_E=1500_CSA\ Output time interval (s): 100	Archivo Edición Formato Ver Ayuda t (s)= 1922.9 Max. Velocity (m/s)= 6.24934 Smoothing length (m)= 24.1806 Average thickness (m)= 0.41095 COM X-Position (m)= 2730.58 COM Y-Position (m)= 6281.72 Volume (m ³)= 50074.7 t (s)= 1923 Max. Velocity (m/s)= 6.25745 Smoothing length (m)= 24.1897 Average thickness (m)= 0.410716 COM X-Position (m)= 2730.56 COM Y-Position (m)= 6281.72 Volume (m ³)= 50074.7 t (s)= 1923.1 Max. Velocity (m/s)= 6.18898 Smoothing length (m)= 24.1992 Average thickness (m)= 0.410467 COM X-Position (m)= 2730.54 COM Y-Position (m)= 6281.73 Volume (m ³)= 50074.7 t (s)= 1923.2 Max. Velocity (m/s)= 6.04316 Smoothing length (m)= 24.2091 Average thickness (m)= 0.410207 COM X-Position (m)= 2730.52 COM Y-Position (m)= 6281.73 Volume (m ³)= 50074.7 t (s)= 1923.3 Max. Velocity (m/s)= 5.82255 Smoothing length (m)= 24.2193 Average thickness (m)= 0.409937 COM X-Position (m)= 2730.5 COM Y-Position (m)= 6281.74 Volume (m ³)= 50074.7

C-2 Resultados de simulación escenario CSA-1 con un volumen de 50,000 m³.

finaloutput.txt: Bloc de notas	output.txt: Bloc de notas
<p>Archivo Edición Formato Ver Ayuda</p> <p>C:\Users\HP CORE I7 8TH GEN\Desktop\Vol1100_CEA\Vol1100CEA1500.dn3</p> <p>Project: Vol1100</p> <p>Job: Voellmy (f=0.1;E=1500)</p> <p>Input by: Grupo Tesis</p> <p>Number of Materials: 1</p> <p>Number of Particles: 2000</p> <p>Erosion Rate (m⁻¹): 0.05</p> <p>Smoothing Length Constant: 4</p> <p>Velocity Smoothing Coefficient: 0.01</p> <p>Stiffness Coefficient: 200</p> <p>Time Step (s): 0.1</p> <p>Elevation File Name: C:\Users\HP CORE I7 8TH GEN\Desktop\Vol1100_CEA\Topografia_CEA.grd</p> <p>Depth File Name: C:\Users\HP CORE I7 8TH GEN\Desktop\Vol1100_CEA\Vol1100.grd</p> <p>Erosion File Name: None</p> <p>Material 1</p> <p>Unit Weight (kN/m³): 15</p> <p>Voellmy Rheology</p> <p>Shear Strength (kPa): 0</p> <p>Friction Angle (deg.): 5.71059</p> <p>Friction Coefficient: 0.1</p> <p>Pore-pressure Coefficient: 0</p> <p>Viscosity (kPa.s): 0</p> <p>Turbulence Coefficient (m/s²): 1500</p> <p>Power Law Exponent: 0</p> <p>Internal Friction Angle (deg.): 35</p> <p>End Time (s): 8456.4</p> <p>Final COM X-Position (m): 2678.98</p> <p>Final COM Y-Position (m): 1513.74</p> <p>Maximum Slide Velocity (m/s): 24.2044</p> <p>Travel Angle (deg.): 11.7808</p> <p>Start Volume (m³): 100000</p> <p>Final Volume (m³): 100000</p> <p>Output files saved in: C:\Users\HP CORE I7 8TH GEN\Desktop\Vol1100_CEA\GRD\</p> <p>Output time interval (s): 100</p>	<p>Archivo Edición Formato Ver Ayuda</p> <p>t (s)= 8456</p> <p>Max. Velocity (m/s)= 0.375663</p> <p>Smoothing length (m)= 17.8028</p> <p>Average thickness (m)= 2.00165</p> <p>COM X-Position (m)= 2678.98</p> <p>COM Y-Position (m)= 1513.74</p> <p>Volume (m³)= 100000</p> <p>t (s)= 8456.1</p> <p>Max. Velocity (m/s)= 0.388595</p> <p>Smoothing length (m)= 17.8027</p> <p>Average thickness (m)= 2.00165</p> <p>COM X-Position (m)= 2678.98</p> <p>COM Y-Position (m)= 1513.74</p> <p>Volume (m³)= 100000</p> <p>t (s)= 8456.2</p> <p>Max. Velocity (m/s)= 0.364746</p> <p>Smoothing length (m)= 17.8026</p> <p>Average thickness (m)= 2.00167</p> <p>COM X-Position (m)= 2678.98</p> <p>COM Y-Position (m)= 1513.74</p> <p>Volume (m³)= 100000</p> <p>t (s)= 8456.3</p> <p>Max. Velocity (m/s)= 0.302772</p> <p>Smoothing length (m)= 17.8024</p> <p>Average thickness (m)= 2.0017</p> <p>COM X-Position (m)= 2678.98</p> <p>COM Y-Position (m)= 1513.74</p> <p>Volume (m³)= 100000</p> <p>t (s)= 8456.4</p> <p>Max. Velocity (m/s)= 0.205933</p> <p>Smoothing length (m)= 17.8022</p> <p>Average thickness (m)= 2.00174</p> <p>COM X-Position (m)= 2678.98</p> <p>COM Y-Position (m)= 1513.74</p> <p>Volume (m³)= 100000</p>

C-3 Resultados de simulación escenario CEA-2 con un volumen de 100,000 m³.

finaloutput.txt: Bloc de notas	output.txt: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda C:\Users\HP CORE I7 8TH GEN\Desktop\Vol1100_CSA\Vol1100CSA1500.dn3 Project: Vol1100 Job: Voellmy (f=0.1;E=1500) Input by: Grupo Tesis Number of Materials: 1 Number of Particles: 2000 Erosion Rate (m ⁻¹): 0.05 Smoothing Length Constant: 4 Velocity Smoothing Coefficient: 0 Stiffness Coefficient: 200 Time Step (s): 0.1 Elevation File Name: C:\Users\HP CORE I7 8TH GEN\Desktop\Vol1100_CSA\Topografía_CSA.grd Depth File Name: C:\Users\HP CORE I7 8TH GEN\Desktop\Vol1100_CSA\Vol1100.grd Erosion File Name: None Material 1 Unit Weight (kN/m ³): 15 Voellmy Rheology Shear Strength (kPa): 0 Friction Angle (deg.): 5.71059 Friction Coefficient: 0.1 Pore-pressure Coefficient: 0 Viscosity (kPa.s): 0 Turbulence Coefficient (m/s ²): 1500 Power Law Exponent: 0 Internal Friction Angle (deg.): 35 End Time (s): 10000 Final COM X-Position (m): 2623.06 Final COM Y-Position (m): 4705.49 Maximum Slide Velocity (m/s): 32.8642 Travel Angle (deg.): 13.9001 Start Volume (m ³): 100350 Final Volume (m ³): 100350 Output files saved in: C:\Users\HP CORE I7 8TH GEN\Desktop\Vol1100_CSA\GRD\ Output time interval (s): 100	Archivo Edición Formato Ver Ayuda t (s)= 9999.6 Max. Velocity (m/s)= 1.56597 Smoothing length (m)= 16.7257 Average thickness (m)= 2.12004 COM X-Position (m)= 2623.06 COM Y-Position (m)= 4705.49 Volume (m ³)= 100350 t (s)= 9999.7 Max. Velocity (m/s)= 1.35339 Smoothing length (m)= 16.7248 Average thickness (m)= 2.12023 COM X-Position (m)= 2623.06 COM Y-Position (m)= 4705.49 Volume (m ³)= 100350 t (s)= 9999.8 Max. Velocity (m/s)= 1.37132 Smoothing length (m)= 16.7241 Average thickness (m)= 2.12037 COM X-Position (m)= 2623.06 COM Y-Position (m)= 4705.49 Volume (m ³)= 100350 t (s)= 9999.9 Max. Velocity (m/s)= 1.49099 Smoothing length (m)= 16.7238 Average thickness (m)= 2.12045 COM X-Position (m)= 2623.06 COM Y-Position (m)= 4705.49 Volume (m ³)= 100350 t (s)= 10000 Max. Velocity (m/s)= 1.52303 Smoothing length (m)= 16.7238 Average thickness (m)= 2.12045 COM X-Position (m)= 2623.06 COM Y-Position (m)= 4705.49 Volume (m ³)= 100350

C-4 Resultados de simulación escenario CSA-2 con un volumen de 100,000 m³.

finaloutput.txt: Bloc de notas	output.txt: Bloc de notas
<p>Archivo Edición Formato Ver Ayuda</p> <p>C:\Users\HP CORE I7 8TH GEN\Desktop\Vol1300_CSA_1500\Vol1500CEA1500.dn3</p> <p>Project: Vo1500</p> <p>Job: Voellmy (f=0.1;E=1500)</p> <p>Input by: Grupo Tesis</p> <p>Number of Materials: 1</p> <p>Number of Particles: 2000</p> <p>Erosion Rate (m⁻¹): 0.05</p> <p>Smoothing Length Constant: 4</p> <p>Velocity Smoothing Coefficient: 0.01</p> <p>Stiffness Coefficient: 200</p> <p>Time Step (s): 0.1</p> <p>Elevation File Name: C:\Users\HP CORE I7 8TH GEN\Desktop\Vol1300_CSA_1500\Topografia_CEA.grd</p> <p>Depth File Name: C:\Users\HP CORE I7 8TH GEN\Desktop\Vol1300_CSA_1500\Vol1300.grd</p> <p>Erosion File Name: None</p> <p>Material 1</p> <p>Unit Weight (kN/m³): 15</p> <p>Voellmy Rheology</p> <p>Shear Strength (kPa): 0</p> <p>Friction Angle (deg.): 5.71059</p> <p>Friction Coefficient: 0.1</p> <p>Pore-pressure Coefficient: 0</p> <p>Viscosity (kPa.s): 0</p> <p>Turbulence Coefficient (m/s²): 1500</p> <p>Power Law Exponent: 0</p> <p>Internal Friction Angle (deg.): 35</p> <p>End Time (s): 7007.8</p> <p>Final COM X-Position (m): 2758.02</p> <p>Final COM Y-Position (m): 1562.22</p> <p>Maximum Slide Velocity (m/s): 31.7442</p> <p>Travel Angle (deg.): 12.7729</p> <p>Start Volume (m³): 301080</p> <p>Final Volume (m³): 301080</p> <p>Output files saved in: C:\Users\HP CORE I7 8TH GEN\Desktop\Vol1300_CSA_1500\GRD\</p> <p>Output time interval (s): 100</p>	<p>Archivo Edición Formato Ver Ayuda</p> <p>t (s)= 7007.4</p> <p>Max. Velocity (m/s)= 0.0793267</p> <p>Smoothing length (m)= 24.7291</p> <p>Average thickness (m)= 2.89408</p> <p>COM X-Position (m)= 2758.02</p> <p>COM Y-Position (m)= 1562.22</p> <p>Volume (m³)= 301080</p> <p>t (s)= 7007.5</p> <p>Max. Velocity (m/s)= 0.0911177</p> <p>Smoothing length (m)= 24.7291</p> <p>Average thickness (m)= 2.89408</p> <p>COM X-Position (m)= 2758.02</p> <p>COM Y-Position (m)= 1562.22</p> <p>Volume (m³)= 301080</p> <p>t (s)= 7007.6</p> <p>Max. Velocity (m/s)= 0.106524</p> <p>Smoothing length (m)= 24.7291</p> <p>Average thickness (m)= 2.89408</p> <p>COM X-Position (m)= 2758.02</p> <p>COM Y-Position (m)= 1562.22</p> <p>Volume (m³)= 301080</p> <p>t (s)= 7007.7</p> <p>Max. Velocity (m/s)= 0.121285</p> <p>Smoothing length (m)= 24.7291</p> <p>Average thickness (m)= 2.89408</p> <p>COM X-Position (m)= 2758.02</p> <p>COM Y-Position (m)= 1562.22</p> <p>Volume (m³)= 301080</p> <p>t (s)= 7007.8</p> <p>Max. Velocity (m/s)= 0.135933</p> <p>Smoothing length (m)= 24.7291</p> <p>Average thickness (m)= 2.89408</p> <p>COM X-Position (m)= 2758.02</p> <p>COM Y-Position (m)= 1562.22</p> <p>Volume (m³)= 301080</p>

C-5 Resultados de simulación escenario CEA-3 con un volumen de 300,000 m³.

finaloutput.txt: Bloc de notas	output.txt: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda F:\taty\CSA\New folder\Vol1300_CSA_1500.dn3 Project: csa Job: f=0.1 e=1500 Input by: csa Number of Materials: 1 Number of Particles: 2000 Erosion Rate (m ⁻¹): 0.05 Smoothing Length Constant: 4 Velocity Smoothing Coefficient: 0.01 Stiffness Coefficient: 200 Time Step (s): 0.1 Elevation File Name: F:\taty\CSA\Topografía_CSA.grd Depth File Name: F:\taty\CSA\New folder\Vol1300.grd Erosion File Name: None Material 1 Unit Weight (kN/m ³): 15 Voellmy Rheology Shear Strength (kPa): 0 Friction Angle (deg.): 5.71059 Friction Coefficient: 0.1 Pore-pressure Coefficient: 0 Viscosity (kPa.s): 0 Turbulence Coefficient (m/s ²): 1500 Power Law Exponent: 0 Internal Friction Angle (deg.): 35 End Time (s): 5402.9 Final COM X-Position (m): 2637.58 Final COM Y-Position (m): 4765.74 Maximum Slide Velocity (m/s): 37.2305 Travel Angle (deg.): 13.9784 Start Volume (m ³): 300047 Final Volume (m ³): 300047 Output files saved in: F:\taty\CSA\New folder\Resultados_e=1500\ Output time interval (s): 100	Archivo Edición Formato Ver Ayuda t (s)= 5402.5 Max. Velocity (m/s)= 1.10557 Smoothing length (m)= 22.9334 Average thickness (m)= 3.78934 COM X-Position (m)= 2637.58 COM Y-Position (m)= 4765.74 Volume (m ³)= 300047 t (s)= 5402.6 Max. Velocity (m/s)= 1.20485 Smoothing length (m)= 22.9333 Average thickness (m)= 3.78938 COM X-Position (m)= 2637.58 COM Y-Position (m)= 4765.74 Volume (m ³)= 300047 t (s)= 5402.7 Max. Velocity (m/s)= 1.30575 Smoothing length (m)= 22.9331 Average thickness (m)= 3.78946 COM X-Position (m)= 2637.58 COM Y-Position (m)= 4765.74 Volume (m ³)= 300047 t (s)= 5402.8 Max. Velocity (m/s)= 1.40723 Smoothing length (m)= 22.9328 Average thickness (m)= 3.78955 COM X-Position (m)= 2637.58 COM Y-Position (m)= 4765.74 Volume (m ³)= 300047 t (s)= 5402.9 Max. Velocity (m/s)= 1.50822 Smoothing length (m)= 22.9326 Average thickness (m)= 3.78964 COM X-Position (m)= 2637.58 COM Y-Position (m)= 4765.74 Volume (m ³)= 300047

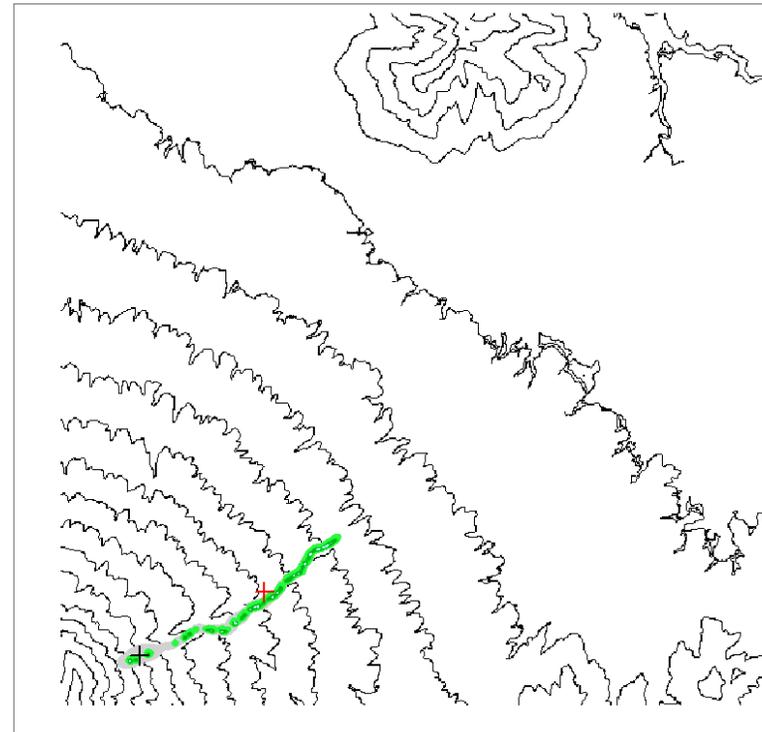
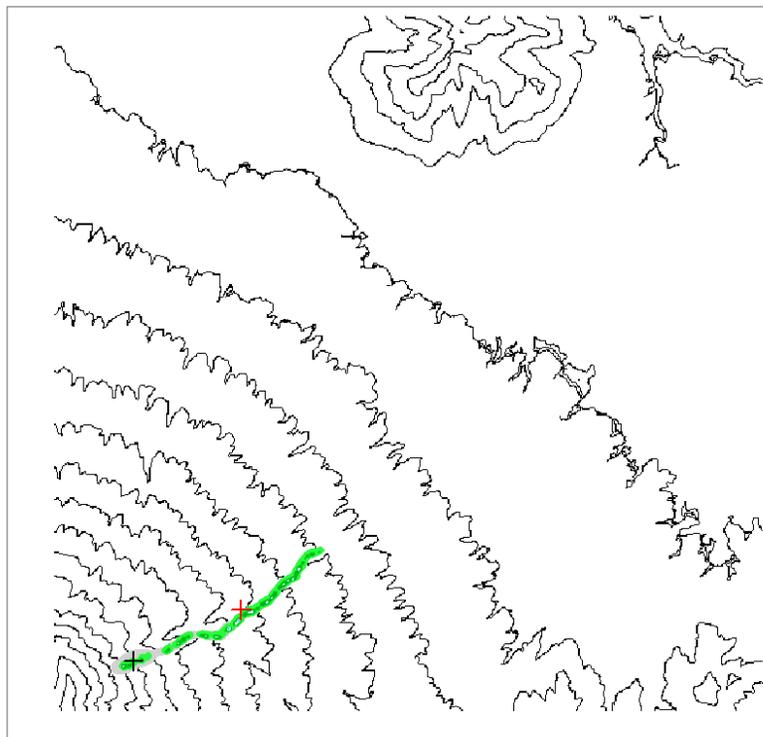
C-6 Resultados de simulación escenario CSA-3 con un volumen de 300,000 m³.

finaloutput.txt: Bloc de notas	output.txt: Bloc de notas
<pre> Archivo Edición Formato Ver Ayuda C:\Users\HP CORE I7 8TH GEN\Desktop\VOL500CEA1500\Vol500CEA1500.dn3 Project: Vol1500 Job: Voellmy (f=0.1;E=1500) Input by: Grupo Tesis Number of Materials: 1 Number of Particles: 2000 Erosion Rate (m^-1): 0.05 Smoothing Length Constant: 4 Velocity Smoothing Coefficient: 0 Stiffness Coefficient: 200 Time Step (s): 0.1 Elevation File Name: C:\Users\HP CORE I7 8TH GEN\Desktop\VOL500CEA1500\Topografia_CEA.grd Depth File Name: C:\Users\HP CORE I7 8TH GEN\Desktop\VOL500CEA1500\Vol1500.grd Erosion File Name: None Material 1 Unit Weight (kN/m^3): 15 Voellmy Rheology Shear Strength (kPa): 0 Friction Angle (deg.): 5.71059 Friction Coefficient: 0.1 Pore-pressure Coefficient: 0 Viscosity (kPa.s): 0 Turbulence Coefficient (m/s^2): 1500 Power Law Exponent: 0 Internal Friction Angle (deg.): 35 End Time (s): 2561.9 Final COM X-Position (m): 3047.68 Final COM Y-Position (m): 1800.24 Maximum Slide Velocity (m/s): 37.7349 Travel Angle (deg.): 12.1058 Start Volume (m^3): 501800 Final Volume (m^3): 501800 Output files saved in: C:\Users\HP CORE I7 8TH GEN\Desktop\VOL500CEA1500\GRD\ Output time interval (s): 100 </pre>	<pre> Archivo Edición Formato Ver Ayuda t (s)= 2561.5 Max. Velocity (m/s)= 2.8577 Smoothing length (m)= 28.8658 Average thickness (m)= 3.44451 COM X-Position (m)= 3047.68 COM Y-Position (m)= 1800.24 Volume (m^3)= 501800 t (s)= 2561.6 Max. Velocity (m/s)= 2.92107 Smoothing length (m)= 28.8646 Average thickness (m)= 3.44477 COM X-Position (m)= 3047.68 COM Y-Position (m)= 1800.24 Volume (m^3)= 501800 t (s)= 2561.7 Max. Velocity (m/s)= 2.97481 Smoothing length (m)= 28.8634 Average thickness (m)= 3.44502 COM X-Position (m)= 3047.68 COM Y-Position (m)= 1800.24 Volume (m^3)= 501800 t (s)= 2561.8 Max. Velocity (m/s)= 3.01886 Smoothing length (m)= 28.8622 Average thickness (m)= 3.44526 COM X-Position (m)= 3047.68 COM Y-Position (m)= 1800.24 Volume (m^3)= 501800 t (s)= 2561.9 Max. Velocity (m/s)= 3.05324 Smoothing length (m)= 28.8612 Average thickness (m)= 3.44548 COM X-Position (m)= 3047.68 COM Y-Position (m)= 1800.24 Volume (m^3)= 501800 </pre>

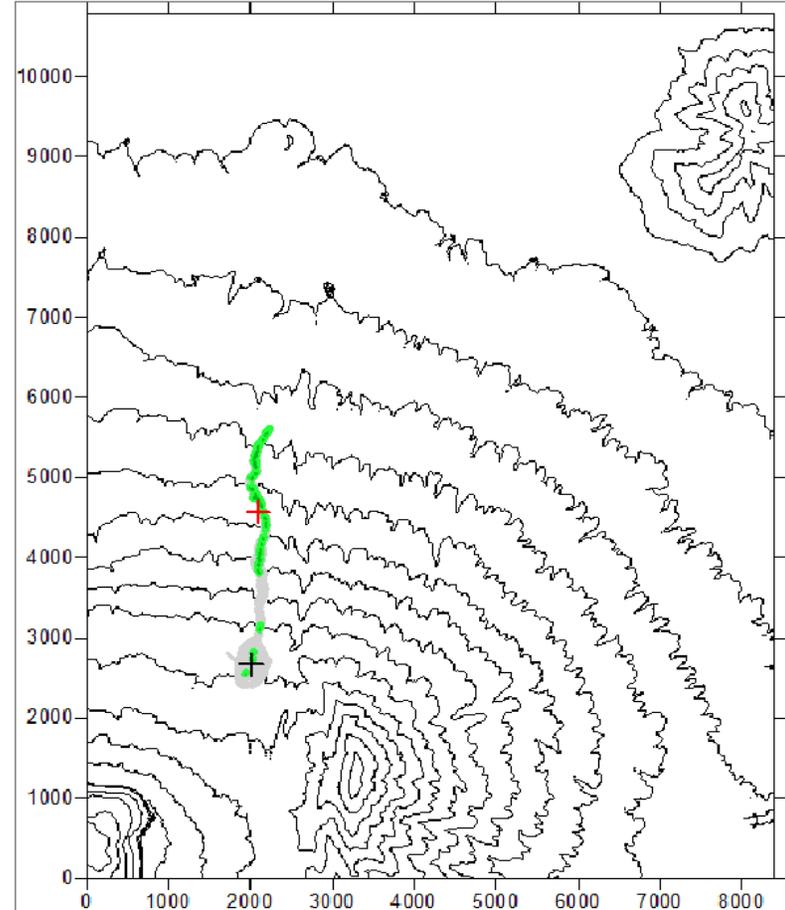
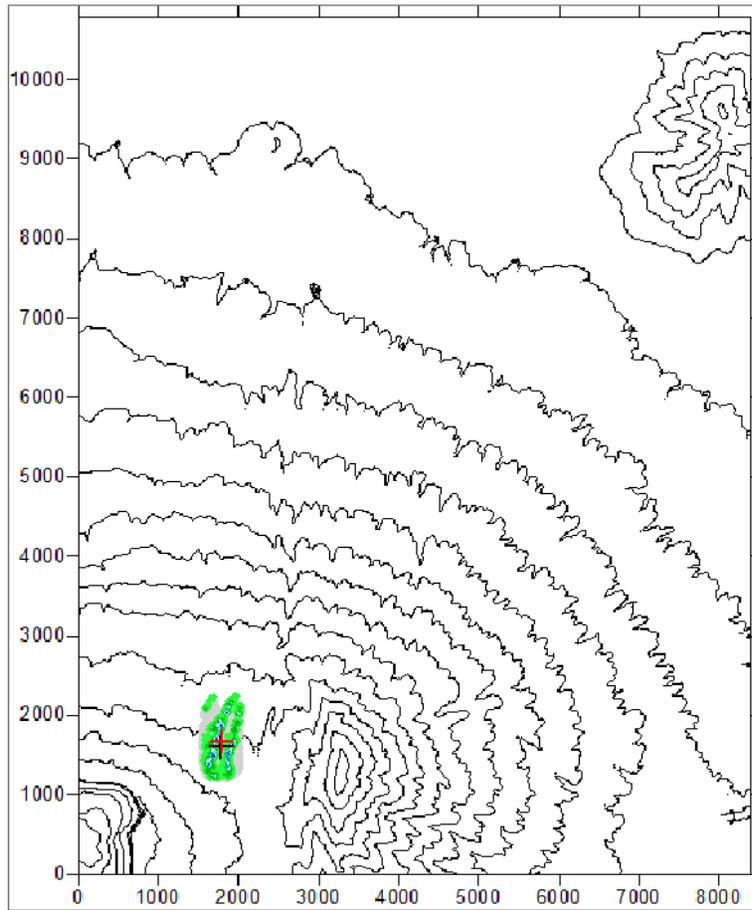
C-7 Resultados de simulación escenario CEA-4 con un volumen de 500,000 m³.

finaloutput.txt: Bloc de notas	output.txt: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda C:\Users\HP CORE I7 8TH GEN\Desktop\Vo1500CSA1500\CSA500\f.dn3 Project: Job: Input by: Number of Materials: 1 Number of Particles: 2000 Erosion Rate (m ⁻¹): 0 Smoothing Length Constant: 4 Velocity Smoothing Coefficient: 0 Stiffness Coefficient: 200 Time Step (s): 0.1 Elevation File Name: C:\Users\HP CORE I7 8TH GEN\Desktop\Vo1500CSA1500\Topografía_CSA.grd Depth File Name: C:\Users\HP CORE I7 8TH GEN\Desktop\Vo1500CSA1500\CSA500\Vo1300.grd Erosion File Name: None Material 1 Unit Weight (kN/m ³): 20 Frictional Rheology Shear Strength (kPa): 0 Friction Angle (deg.): 0 Friction Coefficient: 0 Pore-pressure Coefficient: 0 Viscosity (kPa.s): 0 Turbulence Coefficient (m/s ²): 0 Power Law Exponent: 0 Internal Friction Angle (deg.): 35 End Time (s): 0.6 Final COM X-Position (m): 2563.51 Final COM Y-Position (m): 2961.04 Maximum Slide Velocity (m/s): 5.53642 Travel Angle (deg.): 63.9284 Start Volume (m ³): 500044 Final Volume (m ³): 500044	Archivo Edición Formato Ver Ayuda t (s)= 0.2 Max. Velocity (m/s)= 1.84647 Smoothing length (m)= 33.993 Average thickness (m)= 3.32533 COM X-Position (m)= 2563.46 COM Y-Position (m)= 2960.79 Volume (m ³)= 500044 t (s)= 0.3 Max. Velocity (m/s)= 2.76945 Smoothing length (m)= 33.9876 Average thickness (m)= 3.32591 COM X-Position (m)= 2563.47 COM Y-Position (m)= 2960.83 Volume (m ³)= 500044 t (s)= 0.4 Max. Velocity (m/s)= 3.69216 Smoothing length (m)= 33.9783 Average thickness (m)= 3.32694 COM X-Position (m)= 2563.48 COM Y-Position (m)= 2960.88 Volume (m ³)= 500044 t (s)= 0.5 Max. Velocity (m/s)= 4.61451 Smoothing length (m)= 33.9646 Average thickness (m)= 3.32844 COM X-Position (m)= 2563.49 COM Y-Position (m)= 2960.95 Volume (m ³)= 500044 t (s)= 0.6 Max. Velocity (m/s)= 5.53642 Smoothing length (m)= 33.9464 Average thickness (m)= 3.33043 COM X-Position (m)= 2563.51 COM Y-Position (m)= 2961.04 Volume (m ³)= 500044

C-8 Resultados de simulación escenario CSA-4 con un volumen de 500,000 m³.



C-9 Zona de liberación y transporte del escenario CEA-3 con un volumen de 300,000 m³.



C-10 Zona de liberación y transporte del escenario CSA-3 con un volumen de 300,000 m³.