



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y
LA CONSTRUCCIÓN**

**CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO
AMBIENTE**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN
DEL TÍTULO DE INGENIERO GEÓGRAFO Y DEL MEDIO
AMBIENTE**

AUTOR: PAVÓN BENÍTEZ, ALEXIS MARCELO

**TEMA: APLICACION DEL MODELO AUTÓMATA CELULAR DE
EVOLUCIÓN DEL PAISAJE CAESAR-LISFLOOD PARA
DETERMINAR ZONAS CON AMENAZA DE INUNDACIONES EN
LA MICROCUENCA DEL RÍO CRISTAL.**

TUTOR: ING. PADILLA, OSWALDO, PhD (Cand.)

SANGOLQUÍ, FEBRERO, 2017



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “**APLICACION DEL MODELO AUTÓMATA CELULAR DE EVOLUCIÓN DEL PAISAJE CAESAR-LISFLOOD, PARA DETERMINAR ZONAS CON AMENAZA DE INUNDACIONES EN LA MICROCUENCA DEL RÍO CRISTAL**”.

realizado por el señor **ALEXIS MARCELO PAVÓN BENÍTEZ**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar al señor **ALEXIS MARCELO PAVÓN BENÍTEZ** para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 08 de febrero del 2017


Atentamente,

Director

Ing. Oswaldo Vinicio Padilla Almeida, PhD(cand).



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, *ALEXIS MARCELO PAVÓN BENÍTEZ*, con cédula de identidad N° 1718725292 declaro que este trabajo de titulación “**APLICACION DEL MODELO AUTÓMATA CELULAR DE EVOLUCIÓN DEL PAISAJE CAESAR-LISFLOOD, PARA DETERMINAR ZONAS CON AMENAZA DE INUNDACIONES EN LA MICROCUENCA DEL RÍO CRISTAL**” ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente, declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 08 de marzo del 2017

ALEXIS MARCELO PAVÓN BENÍTEZ

C.C. 1722628219



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

AUTORIZACIÓN

Yo, *ALEXIS MARCELO PAVÓN BENÍTEZ*, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca virtual de la institución el presente trabajo de titulación “*“APLICACION DEL MODELO AUTÓMATA CELULAR DE EVOLUCIÓN DEL PAISAJE CAESAR-LISFLOOD, PARA DETERMINAR ZONAS CON AMENAZA DE INUNDACIONES EN LA MICROCUENCA DEL RÍO CRISTAL”*”, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 08 de marzo del 2017

ALEXIS MARCELO PAVÓN

C.C. 1718725292

DEDICATORIA

A Dios, aquella fuerza que me da ánimos cuando ya no tengo fuerza, y me hace seguir adelante, haciéndome saber que nunca estaré solo.

A Andrea y Johann, por ser mí motivo de seguir adelante y sonreír todos los días.

A mi madre, mi hermana y a Viky, por ser parte importante de mi vida.

A mis amigos Alexis, Fernando y David, quienes me brindaron momentos de felicidad y alegría, convirtiendo los años de juventud en una experiencia inolvidable.

AGRADECIMIENTO

A mi familia por ser el motor que me impulsa a querer alcanzar nuevos objetivos, cada día, por confiar siempre en mí, animarme a ser alguien mejor y tenerme paciencia.

A mis amigos, por su apoyo incondicional en los momentos difíciles de mi vida y en los buenos también.

A todos mis profesores de la Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente principalmente a mi tutor Ing. Oswaldo Padilla, por guiarme y transmitirme sus conocimientos durante la elaboración del presente proyecto, siendo para mí, no solo un profesor, sino un buen amigo.

ÍNDICE

CERTIFICACIÓN	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	iii
AUTORIZACIÓN	iv
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	vi
ÍNDICE	vii
ÍNDICE DE TABLAS	xii
ÍNDICE DE FIGURAS	xv
RESUMEN.....	xxi
ABSTRACT.....	xxii
1 CAPITULO I : ASPECTOS GENERALES	1
1.0 RESUMEN.....	1
1.1 ANTECEDENTES	1
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.3 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DEL PROBLEMA A RESOLVER	4
1.4 OBJETIVO GENERAL Y ESPECÍFICOS.....	5
1.5 METAS	6
1.6 LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN	7
2 CAPITULO II: ASPECTOS GENERALES	8
2.0 RESUMEN.....	8

2.1	MORFOMETRÍA DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS E ÍNDICES HIDROLÓGICOS.....	8
2.1.1	Demarcación de la cuenca hidrográfica.....	9
2.1.2	Características morfométricas.....	9
2.1.3	Orientación de la cuenca.....	11
2.1.4	Diagrama ombrotermico de gaussen.....	12
2.1.5	Los índices climáticos.....	13
2.1.6	Tiempo de concentración (tc)	14
2.1.7	Factor de forma de horton (rf)	16
2.1.8	Índice de compacidad de Gravellius (kc).....	17
2.1.9	Pendiente media	17
2.1.10	Curva hipsométrica	18
2.1.11	Etapas de un río.....	19
2.1.12	Red de drenaje.....	21
2.1.13	Patrón de drenaje.....	23
2.1.14	Drenaje de la cuenca	24
2.1.15	Definición y clasificación de flujo.....	25
2.2	AMENAZA	28
2.2.1	Amenazas Naturales.....	28
2.2.2	Inundaciones	29
2.3	ANÁLISIS DE CRECIDAS	32
2.3.1	Introducción	32
2.3.2	Distribución de Gumbel aplicado al análisis de crecidas.....	33
2.4	COEFICIENTE DE RUGOSIDAD (N DE MANNING).....	36
2.4.1	Método de Cowan (Chow, 1959).....	36
2.4.2	Método de Strickler.....	38

2.5	MODELAMIENTO DE SISTEMAS FLUVIALES	39
2.5.1	Antecedentes	39
2.5.2	Modelización Numérica.....	40
2.5.3	Modelos de evolución del paisaje (LEMS).....	42
2.6	CAESAR.....	44
2.6.1	Introducción	44
2.6.2	Modelos autómata celular	45
2.6.3	Antecedentes de modelos celulares para la evolución del paisaje e inundaciones pluviales	48
2.6.4	Descripción del Modelo.....	51
2.6.5	CAESAR-Lisflood.....	62
2.7	HEC-RAS	67
2.7.1	Generalidades de HEC-RAS.....	67
2.7.2	Fundamentos teóricos	67
2.7.3	HEC-GeoRAS.....	75
3	CAPITULO III: METODOLOGÍA.....	77
3.0	RESUMEN	77
3.1	RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN PARA LA METODOLOGÍA	78
3.2	METODOLOGÍA DE LA CARACTERIZACIÓN MORFOMÉTRICA DE LA MICROCUENCA E ÍNDICES HIDROLÓGICOS.....	78
3.2.1	Delimitación de la cuenca hidrográfica	78
3.2.2	Forma de la cuenca	85
3.2.3	Orientación de la cuenca.....	86
3.2.4	Elaboración de diagrama ombrotérmico.....	86
3.2.5	Determinación índice de Lang.....	91
3.2.6	Determinación índice de aridez de Martone	92

3.2.7	Determinación del coeficiente pluviométrico de Emberger.....	93
3.2.8	Calculo del tiempo de concentración (tc)	94
3.2.9	Factor de forma de Horton (Rf)	96
3.2.10	Índice de compacidad de Gravellius (Kc).....	97
3.2.11	Perfil de la microcuenca.....	99
3.2.12	Curva hipsométrica	100
3.2.13	Etapas de un río.....	104
3.2.14	Red de drenaje.....	106
3.2.15	Patrón de drenaje.....	110
3.2.16	Drenaje de la cuenca	112
3.3	MODELAMIENTO DE ZONAS DE INUNDACIÓN CON HEC-RAS	113
3.3.1	Información y datos	113
3.3.2	Análisis de Crecidas.....	115
3.3.3	Coeficiente de rugosidad (n de Manning).....	121
3.3.4	Desarrollo del modelo.....	130
3.4	MODELAMIENTO DE ZONAS DE INUNDACIÓN CON CAESAR-LISFLOOD.....	144
3.4.1	Información y Datos	144
3.4.2	Descripción y uso del modelo CAESAR-Lisflood	155
3.4.3	Carga de Archivos e inicio de Modelamiento.....	180
4	CAPITULO IV: RESULTADOS	182
4.0	RESUMEN	182
4.1	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	182
4.1.1	Afectación a la zona urbana de Montalvo.....	182
4.1.2	Afectación al uso y cobertura de suelo	199
4.1.3	Mapa de amenaza por inundación.....	208

4.2	DISCUSIÓN	209
5	CAPITULO V	213
5.0	RESUMEN	213
5.1	CONCLUSIONES	213
5.2	RECOMENDACIONES	217
6	BIBLIOGRAFIA	218

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 EL CONSOLIDADO GENERAL DE AFECTACIONES 2012.	2
Tabla 2 VALORES DEL COEFICIENTE DE CONTRACCIÓN Y EXPANSIÓN.	75
Tabla 3 INFORMACIÓN RECOPIADA	78
Tabla 4 INFORMACIÓN DE FORMA	85
Tabla 5 DATOS GENERALES ESTACIÓN BALZAPAMBA	87
Tabla 6 PRECIPITACIÓN MENSUAL DE LA ESTACIÓN BALZAPAMBA	87
Tabla 7 TEMPERATURA MENSUAL DE LA ESTACIÓN BALZAPAMBA	88
Tabla 8 DATOS USADOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE LANG... ..	91
Tabla 9 TABLA DE DATOS USADOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE ARIDEZ DE MARTONE.	92
Tabla 10 ÍNDICE DE ARIDEZ DE MARTONE	93
Tabla 11 TABLA DE DATOS USADOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE PLUVIOMÉTRICO DE EMBERGER	93
Tabla 12 TABLA COEFICIENTE PLUVIOMÉTRICO DE EMBERGER	94
Tabla 13 DATOS DE TC CCP.....	94
Tabla 14 DATOS DE TC GIANDOTTI	95
Tabla 15 TABLA TIEMPO DE CONCENTRACIÓN TÉMEZ	96
Tabla 16 DATOS DE (RF).....	97
Tabla 17 DATOS DE PM	98
Tabla 18 INTERVALOS PARA PENDIENTE MEDIA	99
Tabla 19 PENDIENTES MEDIAS DIVIDIDAS POR INTERVALOS	100
Tabla 20 ZONIFICACIÓN Y CLASIFICACIÓN POR INTERVALOS DE PENDIENTES.	101
Tabla 21 INTERVALOS DE PENDIENTES	104
Tabla 22 DATOS Y RESULTADOS DE LA DETERMINACIÓN DE DENSIDAD DE DRENAJE	112
Tabla 23 COEFICIENTES DE TRANSPOSICIÓN ECHEANDÍA – RÍO CRISTAL ...	115

Tabla 24	COEFICIENTES DE LAS VARIABLES Y \square_N Y S_N	116
Tabla 25	CAUDALES MÁXIMOS EN LOS SITIOS DE INTERÉS	118
Tabla 26	DATOS PRELIMINARES PARA REALIZAR CÁLCULOS.....	120
Tabla 27	MÁXIMAS CRECIDAS	121
Tabla 28	PORCENTAJE DE HUMEDAD (W%) Y PESO SECO.....	126
Tabla 29	VALORES N DE MANNING DE LOS PUNTOS DE TOMA DE MUESTRAS.....	129
Tabla 30	DESCRIPCIÓN DE LAS PRIMERAS 6 LINEAS EN UN ASCII DE ARCGIS.....	151
Tabla 31	TAMAÑO Y PORCENTAJE DE CLASES DE GRANO.....	162
Tabla 32	TABLA DEL VALOR DE MANNING GENERADO EN EL P1.	180
Tabla 33	RESUMEN DE ÁREAS AFECTADAS EN MONTALVO CON HEC- RAS CON CAUDAL MÁXIMO MEDIO	184
Tabla 34	RESUMEN DE ÁREAS AFECTADAS EN MONTALVO CON HEC- RAS EN UN TR= 5 AÑOS.....	186
Tabla 35	RESUMEN DE ÁREAS AFECTADAS EN MONTALVO CON HEC- RAS EN UN TR= 10 AÑOS.....	187
Tabla 36	RESUMEN DE ÁREAS AFECTADAS EN MONTALVO CON HEC- RAS EN UN TR= 25 AÑOS.....	189
Tabla 37	RESUMEN DE ÁREAS AFECTADAS EN MONTALVO CON HEC- RAS EN UN TR=50 AÑOS.....	190
Tabla 38	RESUMEN DE ÁREAS AFECTADAS EN MONTALVO CON HEC- RAS EN UN TR= 100 AÑOS.....	192
Tabla 39	RESUMEN DE ÁREAS AFECTADAS EN MONTALVO CON HEC- RAS EN UN TR= 1000 AÑOS.....	193
Tabla 40	RESUMEN DE ÁREAS AFECTADAS EN MONTALVO CON CL EN MODO CAPTACIÓN.....	195
Tabla 41	RESUMEN DE ÁREAS AFECTADAS EN MONTALVO CON CL EN MODO ALCANCE.....	197
Tabla 42	CODIFICACIÓN DE COBERTURAS DE SUELO	201
Tabla 43	AFECTACIÓN ECONÓMICA DE ÁREAS DE USO Y COBERTURA DE SUELO CON QM.....	202

Tabla 44	AFECTACIÓN ECONÓMICA DE ÁREAS DE USO Y COBERTURA DE SUELO CON TR5	203
Tabla 45	AFECTACIÓN ECONÓMICA DE ÁREAS DE USO Y COBERTURA DE SUELO CON TR10.....	203
Tabla 46	AFECTACIÓN ECONÓMICA DE ÁREAS DE USO Y COBERTURA DE SUELO CON TR25	204
Tabla 47	AFECTACIÓN ECONÓMICA DE ÁREAS DE USO Y COBERTURA DE SUELO CON TR50.....	205
Tabla 48	AFECTACIÓN ECONÓMICA DE ÁREAS DE USO Y COBERTURA DE SUELO CON TR100.....	205
Tabla 49	AFECTACIÓN ECONÓMICA DE ÁREAS DE USO Y COBERTURA DE SUELO CON TR1000.....	206
Tabla 50	AFECTACIÓN ECONÓMICA DE ÁREAS DE USO Y COBERTURA DE SUELO EN MODO DE CAPTACIÓN.....	207
Tabla 51	AFECTACIÓN ECONÓMICA DE ÁREAS DE USO Y COBERTURA DE SUELO EN MODO DE ALCANCE.....	208

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 LONGITUD Y PERÍMETRO DE UNA CUENCA.....	11
Figura 2 DIAGRAMA OMBROTÉRMICO DE GAUSSEN.....	12
Figura 3 CURVAS HIPSOMETRICAS CARACTERÍSTICAS.....	19
Figura 4 ETAPAS DE LOS RÍOS	20
Figura 5 DIFERENTES MÉTODOS DE JERARQUIZACIÓN	22
Figura 6 PATRONES DE DRENAJE.	23
Figura 7 TRAYECTORIA DE LAS PARTÍCULAS EN UN FLUJO LAMINAR.....	27
Figura 8 TRAYECTORIA DE LA PARTÍCULAS EN UN FLUJO TURBULENTO CON COMPONENTES DE VELOCIDAD EN DIRECCIONES DISTINTAS AL SENTIDO DE FLUJO.	27
Figura 9 ESPACIO EUCLIDIANO	46
Figura 10 CONJUNTO DE ESTADOS.....	47
Figura 11 VECINDAD DE VON NEUMANN.....	47
Figura 12 VECINDAD DE MOORE.....	48
Figura 13 DIAGRAMA DE LOS PROCESOS CLAVE QUE OPERAN EN EL MODELO CA.....	52
Figura 14 LAS INTERACCIONES ENTRE LOS PARÁMETROS TOPMODEL.....	53
Figura 13 DIAGRAMA QUE REPRESENTA LA EXPLORACIÓN DE LA ZONA DE CAPTACIÓN MEDIANTE ALGORITMO DE SACANEO.....	58
Figura 16 REPRESENTACIÓN DE LOS TÉRMINOS DEL BALANCE DE ENERGÍA. ..	70
Figura 17 DISTRIBUCIÓN DE LA SECCIÓN PARA OBTENER EL FACTOR DE TRANSPORTE KT.	72
Figura 18 HERRAMIENTA FILL ARCGIS	79
Figura 19 HERRAMIENTA FLOW DIRECTION ARCGIS.....	80
Figura 20 HERRAMIENTA FLOW ACCUMULATION ARCGIS.....	80
Figura 21 OBTENCIÓN DE RASTER ARCGIS.....	81

Figura 22 HERRAMIENTA CON ARCGIS.....	82
Figura 23 HERRAMIENTA STREAM TO FEATURE ARCGIS.....	82
Figura 24 GENERACIÓN DE VECTOR ARCGIS.....	83
Figura 25 PUNTO DE DESFOGUE DE LA MICROCUENCA ARCGIS.....	83
Figura 26 PUNTO DE DESFOGUE INTERPOLADO DE LA MICROCUENCA ARCGIS.....	84
Figura 27 DTM DELIMITACIÓN DE LA MICROCUENCA ARCGIS.....	85
Figura 28 ORIENTACIÓN DE LA MICROCUENCA ARCGIS.....	86
Figura 29 PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL PARA LA ESTACIÓN BALSAPAMBA (MM).	88
Figura 30 TEMPERATURA MEDIA MENSUAL PARA LA ESTACIÓN BALSAPAMBA (MM).	89
Figura 31 DIAGRAMA OMBROTÉRMICO DE LA ESTACIÓN BALSAPAMBA PERIODO DE 1964-1998.	90
Figura 32 DIAGRAMA OMBROTÉRMICO DE LA ESTACIÓN BALSAPAMBA PERIODO DE 1964-1998.	90
Figura 33 CLIMODIAGRAMA DE WALTER Y GAUSSEN DE LA ESTACIÓN BALSAPAMBA PERIODO DE 1964-1998.	91
Figura 34 TABLA DE ÍNDICE DE LANG.....	92
Figura 35 VALORES INTERPRETATIVOS DEL FACTOR FORMA Y SUSCEPTIBILIDAD DE CRECIDAS.....	97
Figura 36 VALORES INTERPRETATIVOS DEL FACTOR FORMA Y SUSCEPTIBILIDAD DE CRECIDAS GRAVELLIUS.	98
Figura 37 PERFIL DE LA MICROCUENCA.....	99
Figura 38 CURVA HIPSOMÉTRICA DE LA MICROCUENCA DEL RÍO CRISTAL. ..	101
Figura 39 CURVAS HIPSOMETRICAS CARACTERÍSTICAS.....	103
Figura 40 CURVA HIPSOMÉTRICA DE LA MICROCUENCA DEL RÍO CRISTAL ...	103
Figura 41 DIFERENTES ETAPAS DEL RÍO CRISTAL.....	105
Figura 42 ORDEN 1 DE LA JERARQUIZACIÓN DE LA RED DE DRENAJE.....	107
Figura 43 ORDEN 2 DE LA JERARQUIZACIÓN DE LA RED DE DRENAJE.....	107

Figura 44: ORDEN 3 DE LA JERARQUIZACIÓN DE LA RED DE DRENAJE.....	108
Figura 45: ORDEN 4 DE LA JERARQUIZACIÓN DE LA RED DE DRENAJE.....	108
Figura 46 ORDEN 5 DE LA JERARQUIZACIÓN DE LA RED DE DRENAJE.....	109
Figura 47 ORDEN 6 DE LA JERARQUIZACIÓN DE LA RED DE DRENAJE.....	109
Figura 48 PATRONES DE DRENAJE DENDRÍTICO DE LA MICROCUENCA DEL RÍO CRISTAL.....	110
Figura 49 DENSIDAD DE DRENAJE.....	112
Figura 50 ISOYETAS QUE ATRAVIESAN LOS RÍOS SOLOMA (PROYECTO ECHEANDÍA) Y CRISTAL (PROYECTO BALSAPAMBA).	114
Figura 51 MAPA DE UBICACIÓN DE LOS PUNTOS DE RECOLECCIÓN DE SEDIMENTO	122
Figura 53 TOMA DE MUESTRAS EN PUNTO 1	122
Figura 54 TOMA DE MUESTRAS EN PUNTO 2	123
Figura 55 TOMA DE MUESTRAS EN PUNTO 3	123
Figura 56 TOMA DE MUESTRAS EN PUNTO 4	124
Figura 56 MUESTRAS ANTES DE ENTRAR AL HORNO.	127
Figura 57 MUESTRAS DESPUÉS DE SECAR AL HORNO.....	127
Figura 59 TAMICES Y FONDOS.....	128
Figura 60 MATERIAL RETENIDO POR TAMICES	128
Figura 60 TIN EN BASE A DTM DE LA MICROCUENCA DEL RÍO CRISTAL.....	130
Figura 61 EXTENSIÓN HEC-GEORAS	131
Figura 62 MENÚ CREAR CAPAS RAS	132
Figura 63 EDICIÓN DE CENTER LINE DE ZONA BAJA (MONTALVO).....	133
Figura 64 EDICIÓN DE BANKS LINE DE ZONA BAJA (MONTALVO).....	133
Figura 65 EDICIÓN DE FLOWPATH LINE DE ZONA BAJA (MONTALVO).....	134
Figura 66 EDICIÓN DE SECCIONES TRANSVERSALES DE ZONA BAJA (MONTALVO).....	135
Figura 67 VENTANO PRINCIPAL DE HEC-RAS.....	136

Figura 68 GEOMETRÍA DEL RÍO CRISTAL	137
Figura 69 COBERTURA DE SUELO 2010.....	137
Figura 70 INGRESO DE VALORES DE MANNING PARA TODAS LAS SECCIONES.....	138
Figura 71 CROSS SECTION DATA, MOSTRANDO LA SECCIÓN 100.9801	139
Figura 72 MODULO DONDE SE INGRESA LOS DIFERENTES CAUDALES	140
Figura 73 MODULO DE ENTRADA DE CONDICIONES DE CONTORNO	141
Figura 74 CONVERSIÓN DE FORMATO SDF A XML	141
Figura 75 INGRESO DE DATOS EN LAYER SETUP	142
Figura 76 RÍO, POLÍGONOS CREADOS A PARTIR DEL FLOWPHAT Y SECCIONES TRANSVERSALES DE ZONA BAJA (MONTALVO).....	143
Figura 77 CREACIÓN DEL ARCHIVO TIN DE LAS SECCIONES DE UN TIEMPO DE RETORNO DE 1000 AÑOS EN ARCGIS.	143
Figura 78 SIMULACIÓN DE LA INUNDACIÓN DE UN TRAMO DEL RÍO CRISTAL SERCANO A MONTALVO.	144
Figura 79 CUENCA DEL RÍO CRISTAL MEDIANTE MÉTODO AUTOMÁTICO DE DELIMITACIÓN DE CUENCAS DE ARCGIS.	146
Figura 80 CLASIFICACIÓN DE CAPA ACCFLOW (FLOW ACUMULATION), DETERMINANDO CANALES PRINCIPALES.....	147
Figura 81 SECTORES DESIGNADOS EN FUNCIÓN A COTA.....	148
Figura 82 AMBIENTE PCI GEOMATICA	149
Figura 83 A) SECTOR 1 SIN NODATA, B) SECTOR 1 CON NODATA.....	150
Figura 84 ARCHIVO ASCII MON15 (DEM).....	151
Figura 85 ARCHIVO DE PRESIPITACIÓN RESULTADO.	152
Figura 86 ARCHIVO DE DESCARGA RESULTADO.	153
Figura 87 GRAFICA DE CORRELACIÓN ENTRE ESTACIÓN H343 Y H346.....	154
Figura 88 PANTALLA PRINCIPAL DE CAESAR-LISFLOOD.....	155
Figura 89 BARRA DE MENÚ PRINCIPAL DE CAESAR-LISFLOOD	155
Figura 90 PESTAÑA DE ARCHIVO.....	157

Figura 91 PESTAÑA NUMÉRICA	159
Figura 92 TABLA DE SEDIMENTOS	161
Figura 93 PESTAÑA DESCRIPCIÓN	165
Figura 94 PESTAÑA CUADRICULA	166
Figura 95 PESTAÑA HIDROLOGÍA	167
Figura 96 APLICACIÓN RASTEREDIT MOSTRANDO PARTE DE LA ZONA DE ESTUDIO	168
Figura 97 PESTAÑA VEGETACIÓN	171
Figura 98 PESTAÑA PROCESOS DE PENDIENTE.....	172
Figura 99 PESTAÑA MODELO DUNA.....	174
Figura 100 PESTAÑA DEL MODELO DE FLUJO	175
Figura 101 CAPTURA DE LA APLICACIÓN ONLINE DE LA UNIVERSIDAD ESTATAL DE SAN DIEGO.....	178
Figura 102 Botón load data.....	180
Figura 103 MODELAMIENTO EN CURSO EN CAEAR- LISFLOOD	181
Figura 104 ESTRUCTURAS PRINCIPALES DE MONTALVO	183
Figura 106 PORCENTAJE DE ÁREAS INUNDADAS Y SU ALTURA PARA UN CAUDAL MÁXIMO MEDIO.....	185
Figura 106 PORCENTAJE DE ÁREAS INUNDADAS Y SU ALTURA PARA UN TIEMPO DE RETORNO DE 5 AÑOS	187
Figura 107 PORCENTAJE DE ÁREAS INUNDADAS Y SU ALTURA PARA UN TIEMPO DE RETORNO DE 10 AÑOS	188
Figura 108 PORCENTAJE DE ÁREAS INUNDADAS Y SU ALTURA PARA UN TIEMPO DE RETORNO DE 25 AÑOS.....	190
Figura 109 PORCENTAJE DE ÁREAS INUNDADAS Y SU ALTURA PARA UN TIEMPO DE RETORNO DE 50 AÑOS.....	191
Figura 110 PORCENTAJE DE ÁREAS INUNDADAS Y SU ALTURA PARA UN TIEMPO DE RETORNO DE 100 AÑOS.....	193
Figura 111 PORCENTAJE DE ÁREAS INUNDADAS Y SU ALTURA PARA UN TIEMPO DE RETORNO DE 1000 AÑOS.....	194

Figura 112 PORCENTAJE DE ÁREAS INUNDADAS Y SU ALTURA RESULTADO MEDIANTE MODO CAPTACIÓN (CATCHMENT).....	196
Figura 113 PORCENTAJE DE ÁREAS INUNDADAS Y SU ALTURA RESULTADO MEDIANTE MODO CAPTACIÓN (REACH).	199
Figura 114 COBERTURA DE SUELO 2010, SEÑALANDO ÁREA DE ESTUDIO DEL PRESENTE TRABAJO.....	200

RESUMEN

Mediante la implementación de modelos de diferente índole procedimental para la simulación de eventos naturales adversos de origen natural; lo que da como resultado, diversas estimaciones de estos fenómenos, algunos bastante complejos, por tomar en consideración la interacción de varios fenómenos físicos naturales. Una de las herramientas para la estimación del comportamiento de las cuencas hidrográficas y su capacidad de generar eventos hidrometeorológicos extremos, es la morfometría, factor de relevancia en la formación de causes y el enrutamiento de flujos. Existen varias metodologías con sus propios algoritmos de aplicación, sin embargo, muchos de estos procedimientos fueron creados para áreas específicas y no consideran la morfología como un ente dinámico, por lo cual, el presente estudio muestra la aplicación del modelo de evolución del paisaje (LEM) CAESAR-Lisflood, por ser un modelo dinámico, que usa la tecnología Autómata Celular (AC) para dar paso en series de tiempo. De igual forma en el presente estudio se compara con el modelo hidráulico HEC-RAS y su afectación real en la cuenca baja, principalmente Montalvo. De este análisis se recopila la afectación tanto en el área amanzanada, donde se determina que el modo de captación de CL, tiene una mayor distribución de la lámina de agua, afectando a todos los sectores amanzanados, alcanzando el 90,72 % del sector 1, llegando a alturas de inundación de 0,05 a 0,25 metros, con daños en 19 infraestructuras y pérdidas de hasta 646,64 Ha. De igual forma en el modo alcance alcanza porcentajes de inundación en los diferentes sectores, llegando hasta un 79,39 % del sector 3, y una afectación de 23 infraestructuras. En comparación HEC-RAS solo alcanza a un máximo 31% de inundación en el sector 2 y 5 infraestructuras afectadas.

Palabras clave:

- **MODELAMIENTO**
- **INUNDACIONES**
- **GRANULOMETRÍA**
- **EVOLUCIÓN DEL PAISAJE**
- **AUTÓMATA CELULAR.**

ABSTRACT

Through the implementation of models of different procedural nature for the simulation of adverse natural events of natural origin; What results, several estimates of these phenomena, some complex enough, to take into account the interaction of several natural physical phenomena. One of the tools for estimating the behavior of watersheds and their capacity to generate extreme hydrometeorological events is morphometry, a factor of relevance in the formation of causes and the routing of flows. There are several methodologies with their own application algorithms, however, many of these procedures were created for specific areas and do not consider morphology as a dynamic entity, so, the present study shows the application of the landscape evolution model (LEM) CAESAR-Lisflood, for being a dynamic model, that uses the technology Automaton Cellular (AC) to give step in time series. Similarly in the present study compared to the hydraulic model HEC-RAS and its real effect on the low, mainly Montalvo. This analysis compiles the effect in both the conglomerate area, where it is determined that the mode of capture of CL, has a greater distribution of the water sheet, affecting all the sectors amanzanados, reaching 90.72% of sector 1 , Reaching flood heights of 0.05 to 0.25 meters, with damage to 19 infrastructures and losses of up to 646.64 Ha. Likewise in the mode reaches percentages of flood in the different sectors of up to 79.39% Of sector 3, and an allocation of 23 infrastructures. In comparison HEC-RAS only reaches a maximum 31% of flood in sector 2 and 5 infrastructures affected.

Keywords:

- **MODELING**
- **FLOODING**
- **GRANULOMETRY**
- **LANDSCAPE EVOLUTION**
- **CELLULAR AUTOMATON.**

1 CAPITULO I

ASPECTOS GENERALES

1.0 Resumen

En este capítulo se tratara tanto los antecedentes, justificación, objetivos y metas del presente proyecto, así como las limitaciones de esta.

1.1 Antecedentes

Las inundaciones son amenazas generadas por factores meteorológicos y atmosféricos que ocasionan cambios climáticos severos, produciendo eventos diversos como: inundaciones en sí, desbordamientos fluviales, precipitaciones de alta intensidad, tormentas eléctricas, marejadas oleajes, vientos huracanados, tsunamis (maremotos) y déficit de escorrentía.

En el país, los eventos hidrometeorológicos han ocasionado una variedad de impactos, siendo las inundaciones uno de los más frecuentes y las que han provocado mayor afectación. Siendo producto de las actividad del clima, sin embargo, es necesario mencionar al fenómeno de El Niño (o ENSO por sus siglas en inglés que significan El Niño Southern Oscillation) como causante de cambios sustanciales en los fenómenos estivales ya que produce, (con intervalos de tiempo que varían de manera irregular cada 2 a 7 años), severas alteraciones del clima en la cuenca del Pacífico (PNUMA & MAE, 2008).

Las afectaciones generales del país por inundaciones (ver Tabla 1), siendo las lluvias intensas el principal factor de afectación (SNGR, 2012), son:

Tabla 1
El consolidado general de afectaciones 2012.

Afectaciones	Cantidad
Personas Afectadas	107002
Personas Evacuadas	6875
Damnificadas	1887
Albergues	141
Personas albergadas	4253
Personas que permanecen con familias acogientes	2220
Escuelas Afectadas	48
Puentes	61
Viviendas afectadas	16258

Fuente: SNGR, (2012).

En la micro cuenca del río Cristal los años en los que se registraron las mayores crecientes de los principales ríos que la conforman (Cristal, Tulundrún y Jebalen) fueron: en 1973, 1982-83 y 1997, año en que se produjeron la mayor cantidad de daños materiales (Medrano, 2004). Además, se observa en las estadísticas de las bases de datos del Sistema de Inventario de Efectos de Desastres, que de los años 2009 al 2014 la zona sufrió inundaciones y desbordamientos con un impacto significativo en las zonas pobladas de la zona.

En la actualidad, a nivel mundial, existen algunos medios de prevención de inundaciones como son: Red de Instrumentos de Alerta, Modelos Computacionales, Delimitación de las Zonas de Inundaciones mediante herramientas geológicas, que constituyen herramientas tradicionales para una política de ordenamiento del territorio que incluya la mitigación de riesgos naturales y toda la legislación que esta conlleva. Mas la innovación de la tecnología, que ha ido cambiando desde finales de la década de 1970, cuando investigadores comenzaron a utilizar modelos numéricos basados en procesos computacionales para simular cómo los ríos y paisajes interactuaron en escalas de tiempo grandes, ha hecho que se desarrolle nuevas ideas

sobre el desarrollo de modelos más dinámicos y reales de amenazas naturales. Entre los más innovadores están: los modelos de evolución del paisaje (LEMS por sus siglas en inglés), que simulan el desarrollo de las cuencas hidrográficas, los cuales guían el agua a través de una malla de celdas generalmente pixeles (que representan el paisaje) de acuerdo con la pendiente más pronunciada, erosionando y depositando sedimentos de acuerdo a la cantidad de agua en una celda, que a su vez determina la superficie que desagua en ella (T J Coulthard & Van de Wiel, 2012).

Entre los LEMS se destaca a CAESAR (Cellular Automaton Evolutionary Slope And River model), el cual es un modelo de evolución del paisaje bidimensional basado en autómatas celulares, que hace énfasis en el modelado de inundaciones, erosión y transporte de sedimentos, el cual ha sido desarrollado por el Prof. PhD. Tom Coulthard en su Tesis de Doctorado (Coulthard, T. J., 1999) donde modela el cambio del paisaje en periodos de tiempo grandes. El modelo tiene como fundamento teórico que, el área está representada por celdas y estas son una célula del sistema autómatas, cada célula tiene propiedades individuales como son: elevación, profundidad, descarga y el tamaño de grano del sedimento. Para cada paso de tiempo, la célula cambia de acuerdo con las leyes o reglas de transición que es principio básico de los autómatas celulares. En el caso de CAESAR, consta de cuatro reglas de transición generales, las cuales abarcan rutinas hidrológicas, hidráulicas, erosión fluvial/deposición y la última y más compleja, que engloba procesos de ladera, movimiento y arrastre de masas (T J Coulthard & Van de Wiel, 2012). Lo cual no se ha aplicado, como tal, en el Ecuador y en específico en la microcuenca del río Cristal.

1.2 Planteamiento del problema

En las últimas décadas se han producido daños por inundaciones en zonas pobladas de la micro cuenca del río Cristal, debido a su régimen pluvial y al fenómeno de El Niño, hasta el momento no se han realizado estudios de esta índole con el principio de autómatas celulares, que permitan determinar zonas de

inundación y desbordamiento, las cuales son variables a considerar en planes de contingencia, gestión de riesgo, o para fines de atención de emergencias, trayendo consigo graves afectaciones económicas, tanto en la zona urbana de Montalvo, como la zona rural.

1.3 Justificación e importancia del problema a resolver

Las inundaciones son fenómenos naturales muy habituales, y más aún, con el rápido cambio del clima global se tiene esperado que acontecimientos fluviales extremos sean más recurrentes, y en consecuencia más severos para las poblaciones aledañas. Por ende el control de las inundaciones es una preocupación primordial, junto con la necesidad de supervisar las inundaciones en situaciones zonas de riesgo.

Las provincias de Los Ríos y Bolívar, pertenecientes a la Zona de Planificación 5, en donde se encuentra la microcuenca del Río Cristal, históricamente han sufrido de amenazas naturales cíclicas como son: inundaciones, deslizamientos, sequías, erupciones volcánicas y sismos. Los fenómenos naturales de riesgo se han registrado en lugares llanos (SENPLADES, 2010). En particular, estos fenómenos son agravados por el fenómeno El Niño.

Históricamente inundaciones han afectado a la cuenca baja del río Cristal, dadas por altos niveles de precipitación, las cuales dejan incomunicadas a cientos de familias en Montalvo, Vinces, Urdaneta y Ventanas. Por ese motivo, la Secretaría Nacional de Gestión de Riesgo y la Prefectura declararon en alerta naranja a estas zonas y en emergencia a la provincia en 2013. La mayor afectación que se presenta hasta ahora en la provincia de Los Ríos, debido a la estación invernal, se reportó en el cantón Montalvo. Allí, debido a las inundaciones se han perdido 150 hectáreas de cultivos de arroz según MAGAP, (SNGR, ” 2013).

En el ámbito local de la microcuenca del Río Cristal, se ha invertido en el sector turístico para el aprovechamiento de los recursos naturales. Dicho impulso es afectado por el temporal que se presenta en la época de lluvia, donde las

precipitaciones oscilan los 1500 a 2200 mm/año, presentando problemas de sedimentación, inundaciones, desbordamientos y otros desastres naturales en la cuenca baja, afectando principalmente a las zonas urbanas y rurales de Montalvo que cuenta con más de 3000 habitantes.

Los Gobiernos Autónomos Descentralizados, han asumido acciones en tema del ordenamiento territorial y la gestión de riesgos, desarrollando proyectos de planificación y prevención, puesto que, la prevención a pesar de no evitar el desencadenamiento de fenómenos naturales, sí evita la pérdida a gran escala de vidas y bienes en general. Por lo que han apostado en alternativas nuevas para determinar zonas de desastres.

Por estas razones, los modelos de simulación basados en fenómenos físicos, son necesarios para permitir una mejor comprensión de los procesos implicados en los desastres naturales. Estos modelos globales o locales deberán integrarse para lograr un sistema de simulación, que pueda predecir eficientemente la evolución en tiempo y espacio, en el caso del presente proyecto, del escurrimiento y patrones de flujo y de acumulación de aguas durante las inundaciones. Fundamentalmente, es la meta que se pretende realizar en el trabajo propuesto como proyecto de grado.

1.4 Objetivo general y específicos

OBJETIVO GENERAL

Determinar zonas de inundaciones, utilizando el modelo autómeta celular de evolución del paisaje CAESAR en la microcuenca del río Cristal.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Caracterizar morfométricamente la microcuenca del Río Cristal, como elemento para estimar la situación real de la microcuenca.
2. Realizar el análisis granulométrico de parte del cauce principal de la microcuenca del río Cristal.

3. Simular los canales y patrones de flujo de llanuras de inundación mediante CAESAR-Lisflood y HEC-RAS, y su comparación.
4. Determinar zonas de inundación para las áreas de asentamientos de la cuenca baja según la simulación del modelo CAESAR-Lisflood.
5. Estimar de forma generalizada la afectación económica de los diferentes escenarios de inundación producidos por los modelos.

1.5 Metas

De acuerdo a los objetivos:

- Una base de datos gráfica y alfanumérica, necesaria para el uso del modelo CAESAR-Lisflood.
- Resultados del análisis granulométrico de sedimentos de algunos puntos de la microcuenca del río Cristal.
- 18 Mapas de zonas de inundaciones, tanto en la zona rural como urbana (Monatalvo), resultado de los modelo CAESAR-Lisflood en sus dos modos y HEC-RAS, a escala 1: 50000.
- Base de datos Hidrometeorológicos en formato ASCII, compatible con el modelo CAESAR-Lisflood.
- Plantear herramientas de difusión de la investigación, tales como: video de simulación de Inundaciones y cambio del paisaje en la zona de estudio mediante CAESAR-Lisflood, artículo científico.
- Análisis de pérdidas económicas en la zona urbana y rural de la microcuenca del río Cristal.

1.6 Limitaciones de la investigación

El área de estudio presenta limitaciones en lo que refiere a existencia y disponibilidad de información meteorológica, las estaciones meteorológicas ubicadas en el área de estudio poseen datos incompletos en sus registros, por este motivo, se procede a implementar técnicas para la estimación de datos faltantes con la finalidad de poder ejecutar los modelos a analizar. Además para los cálculos requeridos para realizar las simulaciones de CAESAR, se necesita de una gran capacidad computacional, a tal nivel que fue necesario el uso de estaciones de trabajo sofisticadas, y aumentar el tamaño de pixel.

2 CAPITULO II

ASPECTOS GENERALES

2.0 Resumen

En el presente capítulo se aglutinan los principios teóricos, en los cuales se basa la investigación, enfocándose en cuatro principales temas: morfometría de cuencas hidrográficas, análisis de crecidas, modelamiento de sistemas fluviales mediante modelos numéricos.

2.1 Morfometría de cuencas hidrográficas e índices hidrológicos

Es el estudio cuantitativo de las características físicas de una cuenca hidrográfica, y es usado principalmente para el análisis la red de drenaje, las pendientes y la forma de una cuenca mediante el cálculo de valores numéricos. Dentro de este contexto, es de interés señalar que las mediciones realizadas deben ser hechas sobre un mapa digital o analógico con suficiente información hidrográfica y topográfica. La morfometría de cuencas se le denomina también morfología de cuencas hidrográficas según Linsley et al. (1977) y geomorfología de la cuenca según Chow et al. (1994), aunque este último término no es del todo adecuado puesto que se puede errar con la interpretación que hace la geomorfología como rama de la geografía física (Delgadillo & Moreno, 2012).

El análisis de la Morfometría de Cuencas así como de los índices hidrológicos, resulta de gran utilidad puesto que permite el estudiar las semejanzas entre flujos de diferentes tamaños, con el fin de aplicar los resultados de los modelos realizados en pequeña escala a diferentes prototipos de tamaño real según criterios de Chow et al. (1994), (Delgadillo & Moreno, 2012).

Otro aspecto importante, reside en los objetivos fundamentales de estos estudios, orientados a inferir posibles picos de crecidas o avenidas en caso de tormentas, cuyas repercusiones de tipo socioeconómico motivan a poner especial atención, tanto a la hora de usar el territorio, como en el momento de definir obras estructurales para el control de crecidas excepcionales bajo cierta porcentaje de probabilidad (Delgadillo & Moreno, 2012).

2.1.1 Demarcación de la cuenca hidrográfica

Los cauces de los ríos continuamente se encuentran en la parte baja de la superficie del terreno, por lo cual entre dos cauces siempre existirá una línea divisoria más alta llamada *divortium aquarum*, puesto que trazando una línea por la divisoria de aguas que rodea al río en estudio y todos sus afluentes se delimita el área que drena las aguas precipitadas hacia el río de interés (cuenca hidrográfica), (Oñate, 2010).

2.1.2 Características morfométricas

Son peculiaridades que nos permite establecer comparaciones entre cuencas estudiadas, con otras en las que no se cuenta con la suficiente información, (Oñate, 2010).

2.1.2.1 Área de la cuenca

Una cuenca tiene su superficie definida por su contorno, la cual representa su área de drenaje, la que está comprendida desde la línea divisoria de aguas hasta un punto consentido, pudiendo ser una estación de aforos, desembocaduras propias del río o alguna área de influencia. Es posiblemente el parámetro más importante

interviniendo directamente en la cantidad de agua que ella puede producir y consecuentemente en la magnitud de los caudales (Oñate, 2010).

2.1.2.2 Perímetro de la cuenca

El perímetro de la cuenca es la longitud del contorno del área de la cuenca (Valtierra & Domínguez, 2006).

2.1.2.3 Longitud del cauce

La longitud de cauce principal es la del cauce más largo que esté presente en la cuenca (Valtierra & Domínguez, 2006).

2.1.2.4 Longitud de la cuenca

La distancia de una línea recta que va desde el punto de salida de la cuenca o desfogue hasta de la divisoria de aguas de la misma y que además es paralela al cauce (L) (Valtierra & Domínguez, 2006).

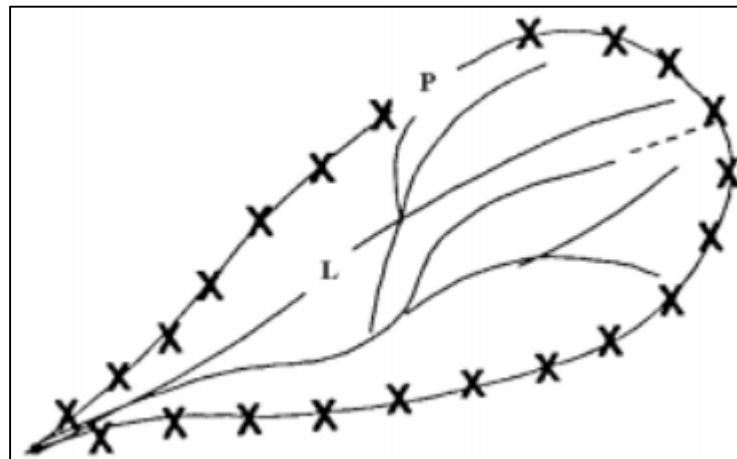


Figura 1 Longitud y perímetro de una cuenca

Fuente: (S. Ibáñez, Moreno, & Gisbert, 2010)

2.1.2.5 Altura máxima y mínima

Es la cota del punto más prominente y más bajo de la microcuenca, y este último es usualmente, el punto de salida o desfogue de la microcuenca (Valtierra & Domínguez, 2006).

2.1.3 Orientación de la cuenca

Se la define como la dirección en la cual se encuentra la cuenca hidrográfica, a partir de la suma de la pendiente general y la dirección de su caudal, se determina para calcular el número de horas diarias que permanece soleada la cuenca. A medida que aumenta la elevación, éste factor puede ser un componente importante para el cálculo de la evaporación y evapotranspiración. Con una dirección Norte-Sur, no es posible que las dos vertientes reciban una insolación uniforme a lo largo del día, contrariamente a si esta tuviese una dirección Este-Oeste (Delgadillo & Moreno, 2012).

2.1.4 Diagrama ombrotermico de gausсен

Según Almorox Alonso, (2003):

El diagrama ombrotérmico de Gausсен permite identificar el período seco en el cual la precipitación es menor a dos veces la temperatura media (como aproximación a la sequedad estacional tomando a $2 \cdot t_m$ una estimación de la evapotranspiración). Para la representación de este se procede a poner los 12 meses del año en el eje X y en con un doble eje Y, se coloca en un lado las precipitaciones medias mensuales (en mm) y en el otro las temperaturas medias mensuales (en °C). Se tiene que considerar que la escala de precipitaciones debe ser doble que la de temperaturas, lo que se traduce a que °C en temperatura se toma dos mm en precipitación.

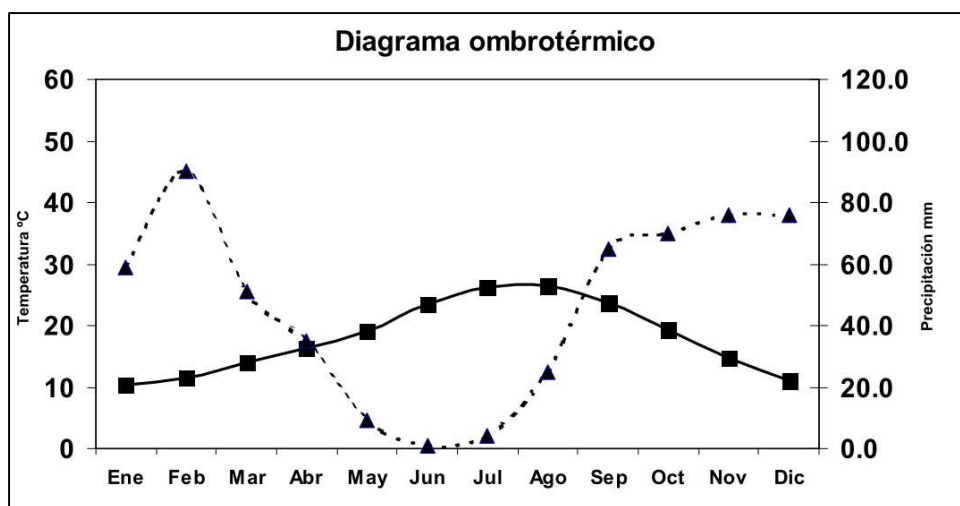


Figura 2 Diagrama ombrotérmico de Gausсен.

Fuente: (S. Ibáñez et al., 2010)

2.1.5 Los índices climáticos

Los índices climáticos son el resultado de fórmulas matemáticas y estadísticas, que relacionan parámetros físicos como son la temperatura y precipitación, con datos descriptivos de las cuencas hidrográficas y su medio geográfico tales como la altitud o la latitud, determinando a su vez la relación entre la vegetación y el clima. Tal como lo establece la Organización Meteorológica Mundial (OMM), el cálculo de los índices climáticos es una herramienta útil para caracterizar el clima, presentar los patrones climáticos históricos y detectar los cambios (Alcaraz, 2013).

2.1.5.1 Determinación índice de lang

Es un índice termopluviométrico que estima la eficiencia de la precipitación en relación con la temperatura, dando como resultado una estimación del tipo de clima del área a ser estudiada, tomando como factor principal la humedad. Se lo calcula como el cociente entre la precipitación total anual y la temperatura media anual de un lugar, o una zona específica (Alcaraz, 2013).

$$I_l = P/t_m \quad (1)$$

Donde P es precipitación total anual en mm y t_m es temperatura media anual en °C.

2.1.5.2 Determinación índice de aridez de Martone

Diseñado con el mismo fin que el índice de Lang, mas este índice es más apropiado para clima frío visto que adiciona una constante al denominador lo que evita valores negativos en sus resultados. El valor que se suma a la temperatura del

denominador es 10, valor que cambia por el 7 en la delimitación de zonas húmedas y secas de Köppen, (Alcaraz, 2013).

$$La = \frac{P}{T + 10} \quad (2)$$

En donde P es precipitación media anual (mm), y T es temperatura media anual en °C.

2.1.5.3 Determinación del coeficiente pluviométrico de Emberger

El índice de Emberger se obtiene al considerar la precipitación media anual, la temperatura media de las precipitaciones máximas del mes más cálido y la temperatura media de las precipitaciones mínimas del mes más frío. (Almorox J, 2003). El índice de Emberger o coeficiente pluviométrico se calcula mediante la expresión:

$$Q = \frac{(100XP)}{Mi^2 - mi^2} \quad (3)$$

Donde P es Precipitación Total anual mm, Mi es la temperatura media mensual del mes más cálido y mi es la temperatura media mensual del mes más frío.

2.1.6 Tiempo de concentración (tc)

En hidrología, el tiempo de concentración se define como el tiempo que pasa desde el final de un evento pluvial (lluvia) hasta el final de la escorrentía en el punto de desfogue. Representa el tiempo que tarda en llegar al aforo la última gota de lluvia que cae en el extremo más alto de la cuenca de captación y que circula por escorrentía directa. Por lo tanto, el tiempo de concentración sería el tiempo necesario para que con una intensidad de escorrentía constante alcance un caudal máximo.

Siguiendo esta definición se entiende que el tiempo de concentración es de gran importancia en los estudios que se realizan sobre inundaciones por su capacidad de determinar si una cuenca hidrográfica es susceptible a crecidas. A continuación se describen algunas fórmulas para calcular este parámetro (Barranco, L., Rodríguez, J, 2009):

2.1.6.1 Tiempo de concentración California Culvert Practice

$$T_c = \left(\frac{0,87XL^3}{E_{max} - E_{min}} \right)^{0,385} \quad (4)$$

Dónde:

Tc: Tiempo de Concentración, en Horas.

L: Longitud del Cauce más Largo, en Km.

Emáx: Elevación Máxima, en metros.

Emín: Elevación Mínima, en metros.

2.1.6.2 Tiempo de concentración GIANDOTTI

$$T_c = \frac{\sqrt{A} + 1.5L}{0,9\sqrt{(E_{max} + E_{min})/2}} \quad (5)$$

Dónde:

Tc: Tiempo de Concentración, en Horas.

L: Longitud del Cauce más Largo, en Km.

Emáx: Elevación Máxima, en metros.

Emín: Elevación Mínima, en metros.

A: Área de la Cuenca, en Km².

2.1.6.3 Tiempo de concentración de Témez

$$tc = 0,3 \left(\frac{L}{S^{0,25}} \right)^{0,76} \quad (6)$$

Dónde:

Tc: Tiempo de Concentración, en Horas.

L: Longitud del Cauce más Largo, en Km.

S: Pendiente en %

2.1.7 Factor de forma de horton (rf)

El factor de forma de Horton Intenta medir cuan cuadrada o alargada puede ser una cuenca hidrográfica. Es de importancia puesto que una cuenca con un factor de forma bajo, esta menos sujeta a crecientes que una cuenca con una superficie similar con un mayor factor de forma. Numéricamente expresa la relación que existe entre el área de la cuenca hidrográfica, y el cuadrado de la longitud axial de la misma (Lb). La longitud axial se la mide a lo largo del desarrollo longitudinal del cauce principal, hasta llegar al *divortium acuarum* de la cuenca en el punto más alejado (LONDOÑO ARANGO, 2001).

$$Rf = \frac{A}{Lb^2} \quad (7)$$

Dónde:

Rf: Factor de Forma de Horton

A: Área de la cuenca (km²)

Lb: Longitud axial (km)

2.1.8 Índice de compacidad de Gravellius (kc)

Este índice está definido como la relación entre el perímetro P y el perímetro de un círculo que contenga la misma área A de la cuenca hidrográfica. Mientras este índice se acerque más a la unidad su comportamiento torrencial será mayor (LONDOÑO ARANGO, 2001).

$$K = 0,282 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (8)$$

2.1.9 Pendiente media

Relación entre la diferencia de alturas del cauce principal y la longitud del mismo, el cual determina si las aguas de las cuencas hidrográficas son sometidas a grandes velocidades (Delagadillo & Moreno, 2012).

$$Pm = \frac{Hmax - Hmin}{L} * 100$$

Dónde:

Pm: Pendiente Media

L: Longitud del Cauce (m)

Hmáx: Cota Máxima (m)

Hmín: Cota Mínima (m)

2.1.10 Curva hipsométrica

La curva hipsométrica se construye llevando al eje de las abscisas los valores de la superficie drenada de la cuenca en km² o en porcentaje, según los intervalos deseados y calcular el área en cada rango, en el eje de las ordenadas va la elevación regularmente en metros sobre el nivel del mar, normalmente se puede decir que los dos extremos de la curva tienen variaciones abruptas. La función hipsométrica es una forma conveniente y objetiva de describir la relación entre la propiedad altimétrica de la cuenca en un plano y su elevación, mediante esta se puede estimar la fase de la cuenca hidrográfica (S. Ibáñez et al., 2010).

Esta curva representa el área drenada que varía con la altura de la superficie de la cuenca, lo que refleja su actividad geomorfológica (Aristizabal Murillo, 2013).

2.1.10.1 Fases de una Cuenca

Según Strahler (1964), la importancia de la relación de porcentaje de área y elevación, reside en que es un indicador del estado de equilibrio dinámico de la cuenca. La Figura 3 muestra tres curvas hipsométricas correspondientes a tres cuencas hipotéticas que tienen potenciales evolutivos distintos (Félix, 2009)

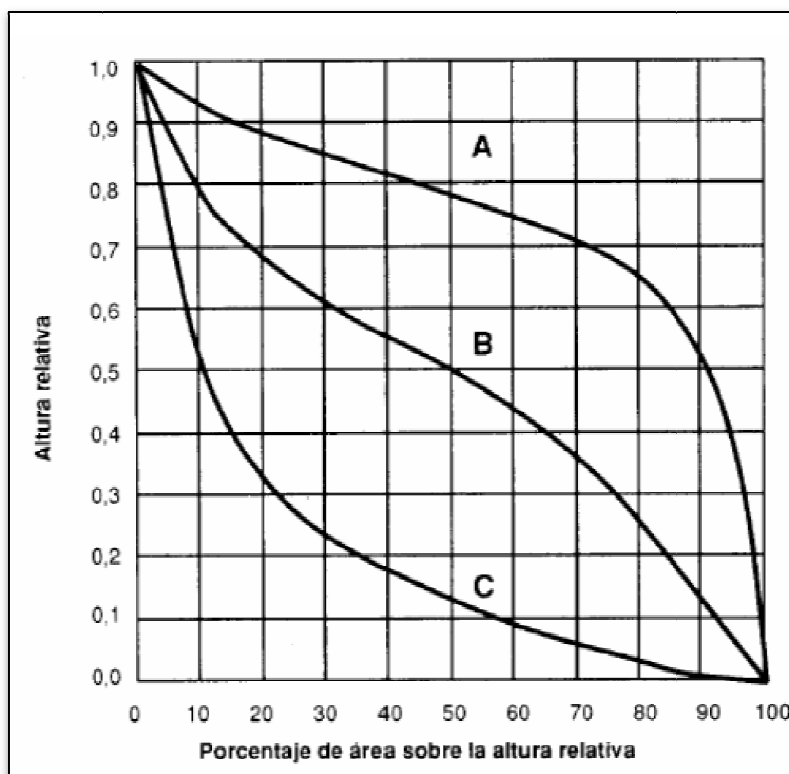


Figura 3 Curvas Hipsométricas características.

Fuente: (Oñate. 2010)

La curva superior A refleja una cuenca con un gran potencial erosivo; mientras que la curva intermedia B es característica cuenca en equilibrio; y finalmente la curva inferior C es una cuenca sedimentaria. Representadas las distintas fases de la vida de los ríos (Burgos, 2005):

Curva A: fase de juventud

Curva B: fase de madurez

Curva C: fase de vejez

2.1.11 Etapas de un río

Esta teoría es basada en estudios del geólogo y geógrafo William Morris Davis, según él las formas del modelado de un paisaje evolucionan gradual y

sistemáticamente, pasando en una ordenada sucesión de eventos, por estadios perfectamente identificables, dividiendo al paisaje en juventud, madurez y senectud o vejes. Esta evolución del relieve se produce en ciclos sucesivos, en cada uno de los cuales alterna una fase corta de constitución del relieve por la acción de las fuerzas tectónicas, y una fase larga de destrucción del mismo bajo la acción de los procesos de la erosión y deslizamientos (Fonsêca, 2012).

Se puede traducir la existencia de tres etapas en los ríos haciendo una analogía a las etapas del desarrollo de un ser vivo, sin embargo también puede presentarse estas etapas en un mismo lapso de tiempo en diferentes zonas geográficas del río (Marín, 2002).

En las etapas dinámicas de los ríos, se pueden identificar los diferentes tipos de cauces que se forman respecto al espacio geográfico en el cual se desarrollan (ver Figura 4).

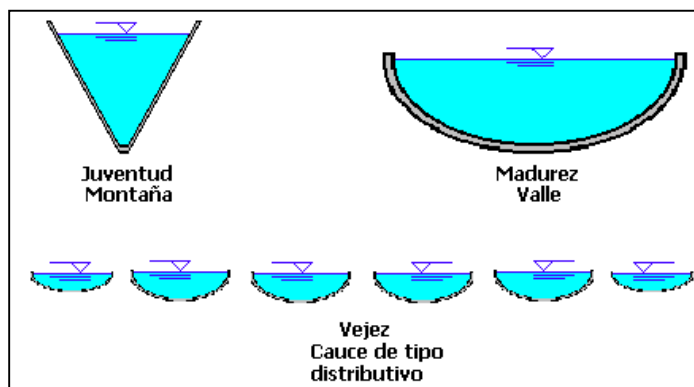


Figura 4 Etapas de los ríos

Fuente: (Marín, 2002)

En la fase de juventud el ancho del cauce es pequeño y el agua corre con ímpetu, las pendientes longitudinales y laterales son pronunciadas, la profundidad del cauce se va profundizando, por causa a la fuerza del flujo en forma de torrente. Los cuales tiene sus orígenes en las montañas como riachuelos que atraviesan la cubierta vegetal superficial o el agua brota de medios subterráneos, nutriéndose de otras fuentes en su

tramo en la montaña, a medida que transcurre el tiempo se forma un cauce principal, lo que define el nacimiento de un río. Posteriormente el río sigue su andar después de dejar zonas con pronunciadas pendientes y entonces el cauce se extiende y se estabiliza, se torna más concreto y comienza a erosionar sus propias orillas; posteriormente siguen haciéndose aportes al río de otras fuentes cercanas (tributarios), aumentando así su caudal y su área tributaria (Marín, 2002).

Posteriormente el río comienza a formar meandros transportando sedimentos provenientes del lecho, los cuales van aumentando, de esta forma incrementando el caudal sólido y en suspensión que adquiere el río, formando un cauce trenzado. De igual forma, el río estabiliza su cauce, presentando una formación geomorfológica del cauce determinada; el río en su curso hacia la desembocadura se torna de carácter distributivo en menor medida, para finalmente entrar en su etapa de vejez para desembocar en el océano. Ya en su etapa de senectud, el río se vuelve de carácter distributivo, su cauce se ensancha mucho y se forman planicies de inundación y brozaos de deltas en proximidades a su desembocadura con el mar (Marín, 2002).

2.1.12 Red de drenaje

En geomorfología, una red de drenaje es el patrón formado por los arroyos, ríos y lagos en una determinada cuenca hidrográfica. Los cuales se rigen por la topografía del terreno, ya sea una región en particular está dominado por rocas duras o blandas, y el gradiente de la tierra. Geomorfólogos e hidrólogos suelen considerar corrientes como parte de las cuencas de drenaje por lo cual es de importancia determinar la caracterización de la red de canales mediante la jerarquía de estas corrientes en la red fluvial (Pidwirny & Jones, 2006).

2.1.12.1 Jerarquización de la red fluvial

La jerarquización permite tener un mejor conocimiento de la complejidad y proceso del sistema de drenaje una cuenca. El orden se relaciona con el caudal inherente del segmento de un canal y su caudal resultante. Existen varios sistemas de jerarquización, siendo los más utilizados el de Horton (1945) y el de Strahler (1952) (Ordóñez, 2011).

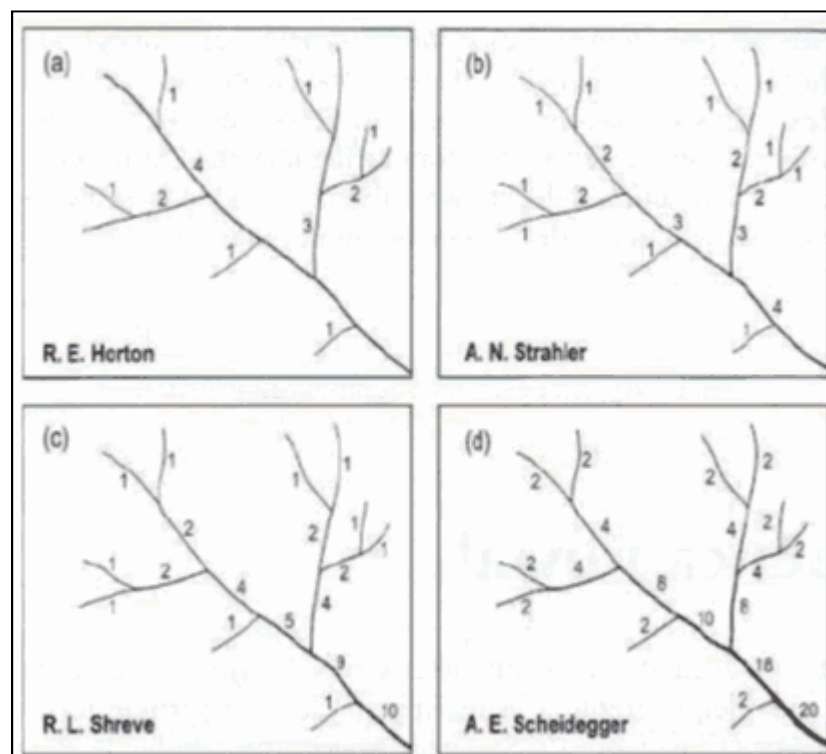


Figura 5 Diferentes métodos de jerarquización
Fuente: (S. Ibáñez et al., 2010)

Por el método de Horton los canales van numerados en función del número de afluentes que posean, de acuerdo que aquel que fluye desde el origen y no tiene ningún afluente es de orden 1, entretanto que los de orden 2 reciben dos afluentes. Si un canal recibe dos afluentes, uno de orden 1 y otro de orden 2, el resultado será un orden 3. El orden de los canales va aumentando de uno en uno. Cada canal tiene un

único orden, que se corresponderá con el mayor que puede tener al final de su recorrido, (Sara Ibáñez, Moreno, & Gisbert, 2011).

El método de Strahler es muy parecido a Horton, con la discrepancia de que un mismo canal puede poseer segmentos de diferente orden a lo largo de su curso, en función de los afluentes que le llegan en cada tramo. El orden no se aumenta cuando a un segmento de un determinado orden confluye uno de orden menor (Sara Ibáñez et al., 2011).

2.1.13 Patrón de drenaje

Se define como patrón de drenaje a la forma cómo una red se aprecia en un área determinada. Esta forma se da en función de: Pendiente de las laderas y área de drenaje, cobertura vegetal, resistencia de las rocas subyacentes, caudales, permeabilidad del suelo, nivel e intensidad de lluvias, Estructuras geológicas; En la siguiente figura se encuentra los tipos de patrones de drenaje que existen (Pidwirny & Jones, 2006).

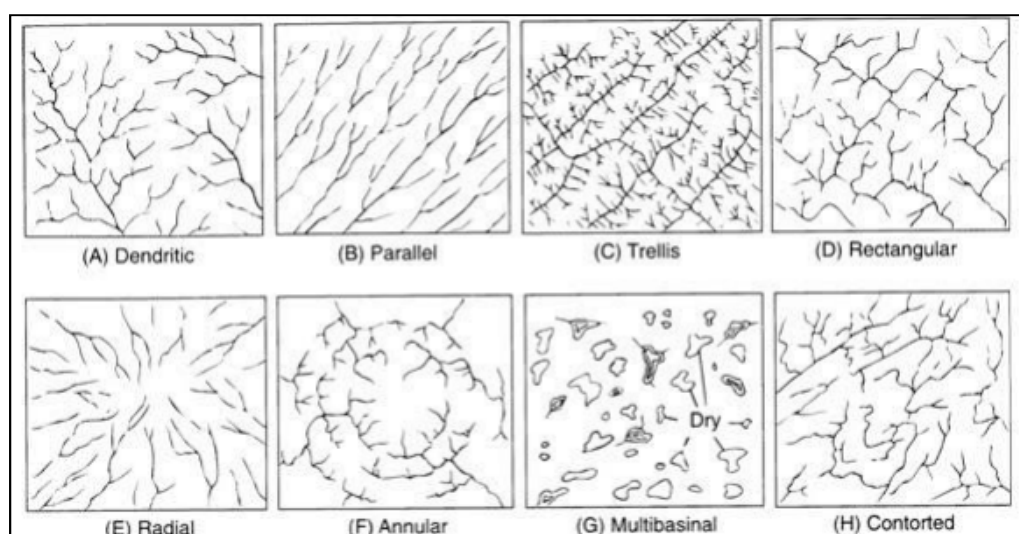


Figura 6 Patrones de drenaje.

Fuente: (Villegas, 2013)

2.1.14 Drenaje de la cuenca

Es la mayor o menor capacidad que tiene una cuenca hidrográfica para evacuar las aguas provenientes de la precipitación que quedan sobre la superficie de la tierra y como factor de capacidad es la densidad de drenaje (Pidwirny & Jones, 2006).

2.1.14.1 Densidad de drenaje (dd)

“Horton (1945) definió la densidad de drenaje de una cuenca como el cociente entre la longitud total de los canales de flujo pertenecientes a su red de drenaje y la superficie de la cuenca: En Km / Km²” (Oñate, 2010). Se determina mediante la siguiente ecuación.

$$Dd = \frac{L}{A} \quad (9)$$

Dónde:

L = Longitud total de los cursos de agua incluyendo perennes e intermitentes en km.

A= Área de cuenca hidrográfica en Km.

Oñate (2010) explica:

“Carlston (1963) estableció que el drenaje está relacionado con los aspectos hidrológicos del sistema de canales de la cuenca. Así, la densidad de drenaje la asoció con la transmisividad del suelo, el caudal o flujo base, el caudal medio anual por unidad de área y la recarga. También la densidad de drenaje depende de las condiciones climáticas; por ejemplo, de la precipitación anual media o de la intensidad de lluvia”.

La densidad de drenaje es una de las variables más importantes para el análisis morfométrico de las cuencas hidrográficas, representa el grado de disección topográfica, en paisajes desarrollados por la acción fluvial o expresa la cantidad disponible de canales para el escurrimiento y el control ejercido por las estructuras geológicas según Christofolletti (1981) (Micaeli, dos Santos, Teixeira, & Wellausen, 2012).

La densidad de drenaje es un indicador de la respuesta de la cuenca ante una lluvia intensa, por lo cual condiciona la forma del hidrograma resultante en la desembocadura de la cuenca. Mientras la densidad de drenaje es mayor, más dominante es el flujo en el cauce en relación al flujo en ladera, lo que se interpreta en un menor tiempo de respuesta de la cuenca y, por tanto, un menor tiempo para llegar al pico o cresta del hidrograma (Micaeli et al., 2012).

Este índice permite tener un mejor entendimiento de la complejidad y el desarrollo del sistema de drenaje de las cuencas hidrográficas. En términos generales, se traduce como una mayor densidad de escurrimientos lo que indica mayor estructuración de la red fluvial, o que hay mayor potencial de erosión. (Sara Ibáñez et al., 2011).

2.1.15 Definición y clasificación de flujo

2.1.15.1 Flujo

Es una definición y variable del estudio del movimiento de un fluido. En el estudio de este movimiento intervienen las leyes del movimiento de la física, las propiedades del fluido y las particularidades del medio por donde fluyen. Su clasificación puede tener diferentes enfoques, como pueden ser: cambio de velocidad y dirección que sufre las partículas debido al tramo recorrido, cambio de velocidad, dirección y posición de las partículas respecto tiempo, variaciones de las propiedades respecto al tiempo o a los procesos termodinámicos que se puedan presentar en

dichos movimientos. Así un flujo puede ser: laminar, turbulento, ideal, permanente, no permanente, entre otros (Barrera, 2003).

Para nuestro presente estudio se conceptualiza los siguientes:

a) Flujo permanente o estacionario

Según Barrera (2003):

“Es aquel flujo en que las propiedades del fluido y las condiciones de movimiento en cualquier punto no cambian con el tiempo. Un flujo es permanente si el campo de velocidades, de presión, la masa volumétrica y la temperatura en cada punto, no depende del tiempo. Las componentes u , v , w son entonces únicamente función de x , y , y z .” (Barrera, 2003).

$$\frac{\partial V}{\partial t} = 0, \frac{\partial p}{\partial t} = 0, \frac{\partial P}{\partial t} = 0, \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (10)$$

b) Flujo no permanente

“Son flujos en el campo de velocidades, presión, masa volumétrica, y temperatura varían con el tiempo” (Barrera, 2003).

$$\frac{\partial V}{\partial t} \neq 0, \frac{\partial p}{\partial t} \neq 0, \frac{\partial P}{\partial t} \neq 0, \frac{\partial T}{\partial t} \neq 0 \quad (11)$$

c) Flujo laminar

“Es aquel flujo donde las partículas del fluido se mueven a lo largo de trayectorias lisas en capas o láminas paralelas, deslizándose una capa sobre otra adyacente” (Barrera, 2003).



Figura 7 Trayectoria de las partículas en un flujo laminar.

Fuente: (Barrera, 2003)

d) Flujo turbulento

“Es aquel en que las partículas del fluido se mueven siguiendo trayectorias muy irregulares, originando un intercambio de cantidad de movimiento de una porción del fluido a otra. Es el caso de flujo más frecuente en aplicaciones prácticas” (Barrera, 2003).

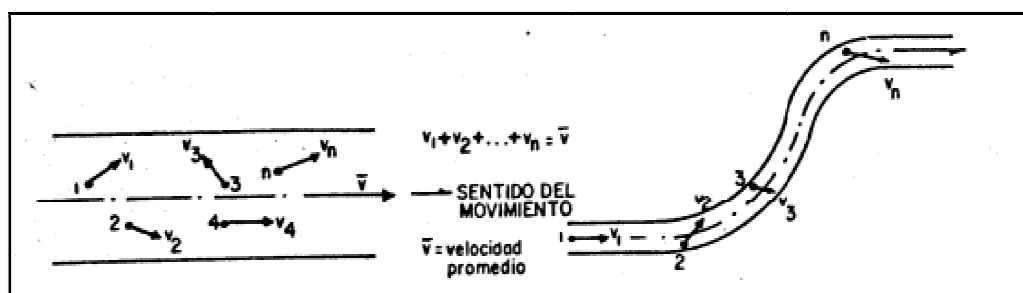


Figura 8 Trayectoria de la partículas en un flujo turbulento con componentes de velocidad en direcciones distintas al sentido de flujo.

Fuente:(Barrera, 2003).

En la sección anterior se habló de la teoría sobre la morfometría de cuencas hidrográficas, diversos indicadores hidrológicos e hidráulicos, que tiene como fin estimar el comportamiento complejo del sistema hidrográfico y marcar una línea base para el presente estudio; así como determinar algunos parámetros útiles para realizar el modelamiento de inundaciones.

2.2 Amenaza

“La amenazas es un peligro latente que se presenta ante un fenómeno físico de origen natural, sacio-natural o antropogénico, que puede producir efectos adversos, daños y pérdidas en las personas, la producción, la infraestructura, la propiedad, los bienes y servicios y en medio ambiente” (Saavedra y Vinueza, 2013).

Estos fenómenos accionantes son tanto de origen natural o entrópicos que pueden manifestarse en un sitio y un tiempo específico, estos eventos pueden producir un daño (material o inmaterial) que puede poner en peligro a un grupo de personas y su ambiente (RAMOS & RECALDE, 2013).

Es importante diferenciar la amenaza del evento que la caracteriza, puesto que la amenaza significa la potencialidad de la ocurrencia de un evento con cierto grado de severidad, mientras que el evento en sí mismo representa al fenómeno en términos de sus características, su dimensión y ubicación geográfica (Cardona A., 1993).

2.2.1 Amenazas Naturales

"Aquellos elementos del medio ambiente que son peligrosos al hombre y que están causados por fuerzas extrañas a él" (ASOCARS, REINO DE LOS PAISES BAJOS, & UNIVERSIDAD DE MAGDALENA, 2011).

Las Amenazas Naturales corresponden específicamente, a todos los fenómenos naturales tanto como los atmosféricos (lluvias intensas) , hidrológicos (inundaciones pluviales y fluviales), de erosión o fenómenos de remoción en masa (deslizamientos) y a los incendios que por su ubicación, severidad y frecuencia, tienen el potencial de afectar adversamente al ser humano, a sus estructuras y a sus actividades (ASOCARS et al., 2011).

2.2.2 Inundaciones

Las inundaciones pueden definirse como una amenaza natural de origen tanto atmosférico como hidrológico donde el agua ocupa zonas o áreas que en condiciones normales se encuentran secas (RAMOS & RECALDE, 2013).

Las inundaciones son causadas principalmente por la acción de lluvias intensas prolongadas, como sucede durante fenómenos atmosféricos extremos y prolongados, unido a deficiencias de drenaje en las localidades afectadas provocado por diferentes causas, principalmente por la acción negligente de la administración (RAMOS & RECALDE, 2013).

2.2.2.1 Tipos de inundaciones:

2.2.2.1.1 Inundaciones por precipitación in situ.

Su origen es la acumulación de agua proveniente de lluvia en una determinada área geográfica sin que ese fenómeno coincida con el desbordamiento de un cauce fluvial. Se genera tras un régimen de precipitaciones intensas (volumen considerable de lluvia en un periodo de tiempo muy corto) o persistentes (volumen moderado de lluvia en un periodo de tiempo amplio (SANCHEZ, 2015).

2.2.2.1.2 Inundaciones por desbordamientos de los ríos.

Son los desbordamientos de los cauces de ríos y arroyos, lo cuales se atribuyen en primera instancia a un excedente de agua. Pero también se toma en consideración que los cauces de los ríos y arroyos pertenecientes a una cuenca o microcuenca no siempre permanecen inalterados, puesto que son sistemas dinámicos; no son rectos ni uniformemente anchos, no tienen las mismas características geológicas en todo su

cauce, son afectados por obras antrópicas, y más aún, son afectados por fenómenos de deposición y remoción de masas, que de forma general también inciden en los desbordamientos de los cuerpos de agua (SANCHEZ, 2015).

2.2.2.1.3 Inundaciones por rotura y operación incorrecta de obras de infraestructura hidráulica

Es evidente que la rotura o el fallo de una represa, por pequeña que ésta sea, puede causar una serie de pérdidas, no sólo a la población aledaña sino también a sus bienes de importancia, como son las infraestructuras y al medio ambiente. La propagación de la onda de avenida en ese caso resultará tanto más dañina cuanto mayor sea el volumen de agua retenida, el caudal del cauce, el tiempo de propagación y los elementos existentes en la zona de afectación (AHMED, 2008).

2.2.2.2 Factores que influyen en la generación de Inundaciones

Hay que considerar de manera muy especial la creciente desaparición de la cobertura vegetal:

A veces, la obstrucción de cauces naturales o artificiales debida a la acumulación de vegetación y sedimentos, es un factor que provoca desbordamientos. Estos hechos simples pueden provocar inundaciones que llegan a generar daños inconmensurables para la vida, sus bienes e infraestructuras de poblaciones enteras, además también causan graves daños sobre el medioambiente y el suelo de las terrazas de los ríos.(AHMED, 2008).

La cubierta vegetal cumple con una función muy importante al evitar el impacto directo de las gotas de agua sobre el terreno, impidiendo su erosión, mejorando la infiltración y dificultando la escorrentía del agua hacia los ríos, prolongando su tiempo de concentración. Además ayuda en la disminución del transporte de sedimentos, que posteriormente afectan a los cauces. Todos estos factores son

cuantificables y por lo tanto se pueden prever realizando una adecuada planificación territorial, para lograr controlarlos en la medida de lo posible (INDECI, 2011).

En los ámbitos de planificación del desarrollo urbano y planificación del uso de la tierra es importante saber cuáles son las áreas susceptibles a ser afectadas por inundaciones. Además, resulta de utilidad diferenciar las áreas de inundación en función del nivel de amenaza existente. Usualmente la información de las áreas inundadas y de los niveles de amenaza se representa en forma de mapas, (INDECI, 2011).

2.2.2.2.1 El Niño Oscilación Sur (ENSO) – Fenómeno El Niño

Es un fenómeno natural de interacción entre el océano y la atmósfera que ocurre en la región del Pacífico tropical, en forma semi-periódica, con intervalos que varían entre los 2 y 7 años, aproximadamente, dichas fluctuaciones acrecentadas por un cambio climático. En el sistema océano-atmosférico, El Niño corresponde a la componente oceánica y la Oscilación Sur a la componente atmosférica (Icochea Salas, 2015).

Este fenómeno del Niño se presenta en el océano como una oscilación entre 2 etapas o fases. El periodo cálido es conocido como El Niño, cuando la temperatura superficial del mar (TSM) en todo el Pacífico ecuatorial presenta anomalías positivas, haciendo que la temperatura, la evaporación y la precipitación aumente (Constantino, Gil, Jaramillo, Benavides, & Bustillo, 2011).

Los impactos del fenómeno de El Niño en la zona andina se traducen en el aumento de pérdidas por el incremento de lluvias intensas, deslizamientos e inundaciones, principalmente en las zonas bajas de Ecuador, Perú. Los efectos, por lo tanto son, perjuicios en sectores productivos como la agricultura y la pesca, en infraestructuras viales y de vivienda, y ,en miles de damnificados por pérdida de sus bienes y medios de vida, siendo la región también un foco de emergencias sanitarias por la proliferación de vectores de contagio (Icochea Salas, 2015).

Los eventos El Niño se presentaron en 1986 - 1987 moderado, en 1991 débil y en 1997 - 1998 muy fuerte, causando daños materiales principalmente por inundaciones significativas en toda la región (CAPRADE, 2009).

2.2.2.2 Sedimentación como factor primordial en Inundaciones

Es un proceso dinámico que envuelve tres subprocesos básicos: erosión o desprendimiento, transportación y deposición., mediante el cual se acumulan partículas de tierra o suelo en el fondo de los cuerpos de agua. Haciendo que disminuya el espacio disponible para el acopio del agua en ríos, lagos y quebradas, (González -Toro, 2005).

En la presente sección se habló de la teoría sobre amenazas naturales, ahondando en los factores que dan origen a las inundaciones como agente que afecta a los sistemas fluviales, siendo la sedimentación y el fenómeno de EL Niño elementos de relevancia en la formación de este fenómeno natural.

2.3 Análisis de Crecidas

2.3.1 Introducción

El análisis de posibles inundaciones debe realizarse de tal manera que en base a éstas sean capaces de prever condiciones extremas, que puedan suscitarse en un posible futuro, en diferentes escenarios. Para esto se debe tomar como referencia de análisis el mayor caudal que posiblemente ocurra durante los próximos 100 años, y de una forma extrema hasta 1000 años. La determinación de estos caudales máximos para períodos de tiempo determinados (tiempo de retorno), se conoce como análisis de crecidas. Existen varios métodos que pueden ser empleados para realizar este análisis, siendo los métodos estadísticos los más utilizados (VILLAGOMEZ, MENDOZA, & BOWEN, 2008).

“El análisis de crecidas consiste en la determinación de los caudales máximos que puede ocurrir en una cuenca durante un período de tiempo determinado. Existen distintas formas de determinar estos caudales, clasificadas de la siguiente manera” (VILLAGOMEZ et al., 2008):

Métodos directos:

- Testigos de niveles alcanzados en avenidas históricas.
- Archivos y periódicos.
- Testimonios directos

Métodos empíricos:

- Curvas envolventes de caudales máximos en función del área.
- Aplicación de fórmulas que proporcionan un caudal punta.

Métodos estadísticos:

- Análisis estadístico de las series de caudales máximos anuales de las estaciones de aforos
- Ajuste de una distribución de Gumbel.
- Concepto del período de retorno.

Métodos hidrometeorológicos:

- Método del hidrograma unitario. En combinación o no con métodos estadísticos.

2.3.2 Distribución de Gumbel aplicado al análisis de crecidas

“La distribución de Gumbel es la distribución estadística más utilizada en la actualidad para el cálculo de la precipitación para un periodo de retorno escogido” (García, 2013). La fórmula de la distribución de Gumbel es la siguiente (García, 2013):

$$F(x) = e^{-e^{\alpha(x-\mu)}} \quad (12)$$

Dónde:

x es el valor de la variable aleatoria,

α y μ son parámetros del ajuste, y

$F(x)$ representa la probabilidad de que se produzca una precipitación con un valor menor o igual que x , es decir $F(x)$ representa la probabilidad de que un valor dado de x no sea superado.

Por lo tanto, la probabilidad de que se produzca un evento con un valor mayor que ese x dado será:

$$Prob(\xi > x) = 1 - F(x) \quad (13)$$

El período o lapso de tiempo $T(x)$ dentro del cual sería esperable que se produjese ese evento de valor x , llamado período de retorno para esa precipitación x , sería:

$$T(x) = \frac{1}{1 - F(x)} \quad (14)$$

Se definen α y μ como dos parámetros que toman los valores siguientes:

$$\alpha = \frac{S_N}{S_x} \quad (15)$$

$$\mu = \bar{x} - \bar{y}_N \frac{S_x}{S_N} \quad (16)$$

Donde \bar{y}_N y S_N son la media y la desviación típica de la variable y_i , la cual solo depende del tamaño de la muestra N .

Siendo \bar{x} la media y S_x la desviación típica de la muestra de los datos de valores

Máximos diarios de eventos anuales.

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^N \frac{x_i}{N} \quad (17)$$

$$S_x = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(x_i - \bar{x})^2}{N-1}} \quad (18)$$

Por otra parte,

$$y_i = -\text{LnLn}\left(\frac{N+1}{i}\right) \quad (19)$$

$$\bar{y}_N = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N} \quad (20)$$

$$S_N = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}_N)^2}{N}} \quad (21)$$

Despejando x de la expresión (16), se obtiene finalmente la fórmula analítica para calcular el evento máximo diario esperado para un periodo de retorno $T(x)$ dado:

$$x = \mu - \frac{1}{\alpha} \left[\text{Ln}\left(-\text{Ln}\frac{T(x)-1}{T(x)}\right) \right] \quad (22)$$

De una forma más simplificada y en términos de caudales tenemos:

$$Q_{max} = Q_m - \frac{S_Q}{S_N} (\bar{y}_N - \text{Ln}T) \quad (23)$$

En la presente sección se habló de la teoría sobre el análisis de crecidas, se especificó el método de Gumbel para la obtención de caudales máximos esperados, siendo esta metodología la más usada por su eficacia y sencillez según García (2013).

2.4 Coeficiente de rugosidad (n de Manning)

Los coeficientes de rugosidad representan la resistencia a los flujos de inundación en canales y llanuras inundables (Arcement Jr & Schneider, 1989). El coeficiente “n” de Manning, está relacionado de forma importante con los cálculos de perfiles hidráulicos, puesto que es uno de los parámetros principales para la calibración de modelos hidráulicos de un canal abierto y de superficie (Solano & Vintimilla, 2013).

El valor “n” de Manning es variable y depende de un gran número de factores entre los que incluyen principalmente: rugosidad del lecho del cauce, vegetación colindante, las mismas irregularidades del cauce, la erosión, y deposición, forma del cauce, tamaño del grano del lecho del río, material en suspensión y carga de fondo; siendo por este motivo su dificultad al momento de su determinación (Solano & Vintimilla, 2013).

2.4.1 Método de Cowan (Chow, 1959)

Según Ponce (2008) para realizar una estimación del coeficiente de rugosidad en cauces naturales se debe tener en cuenta los siguientes elementos:

- Aspereza del lecho y de las paredes.
- Presencia de vegetación y cambios estacionales de ésta.
- Irregularidad del cauce, principalmente en el perímetro mojado o variaciones de sección, forma, tamaño, etc. a lo largo del canal.
- Alineamiento del canal (curvas)

- Tendencia al embancamiento o a la socavación.
- Obstrucciones.
- Tamaño y forma del canal
- Cambios de niveles y caudales que hacen participar riberas de inundación generalmente más rugosas que el canal principal.
- Presencia de material sólido en suspensión o arrastrado por el fondo.

Para tomar en cuenta el efecto provocado por estos factores Cowan en 1956 propuso la siguiente ecuación (Arcement Jr & Schneider, 1989) :

$$n = (n_b + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)m \quad (24)$$

n_b : Valor de n para un canal recto, uniforme, prismático y con rugosidad homogénea.

n_1 : Corrección por irregularidades del perímetro mojado a lo largo del tramo estudiado.

n_2 : Corrección por variación de forma y de dimensiones de las secciones.

n_3 : Corrección por obstrucciones: troncos, rocas, etc.

n_4 : Corrección por presencia de vegetación.

m : Factor que mide la frecuencia de meandros o curvas.

Los valores de n_1 , n_2 , n_3 , n_4 , m , recomendados por Chow (1959) son los mostrados en el ANEXO1.

Para la elección de n_b se puede usar los valores estipulados en tablas por Chow (1959). Más cuando el sedimento del lecho es granular y se cuenta con una curva granulométrica, n_b puede ser estimado por la fórmula de Strickler y sus variantes.

2.4.2 Método de Strickler

Esta relación se usa principalmente cuando las superficies de contacto o el lecho del río están compuestos por material granular. El valor resultante es apto para evaluar el cálculo de n_b de la fórmula de Cowan (1956), existen variaciones de la ecuación general basadas en diferentes estudios y usos (U.S. Army Corps of Engineers, 1991).

$$n_b = Ck_s^{\frac{1}{6}} \quad (25)$$

Dónde:

k_s es el diámetro representativo del sedimento en metros, que depende de la caracterización del mismo.

C es un factor que depende de k_s y el tipo de estudio.

En el presente estudio se utilizó las siguientes ecuaciones dependiendo del tipo de lecho (U.S. Army Corps of Engineers, 1991):

Strickler (1948):

$$n_b = 0,038(D_{90})^{\frac{1}{6}} ; \quad (26)$$

Simons & Senturk (1976)

$$n_b = 0,0389(D_{50})^{\frac{1}{6}} \quad (27)$$

En la presente sección se habló de la teoría sobre el coeficiente de rugosidad de manning (n) y el método de obtención según Cowan (1956) y complementado por Chow (1959) mediante ecuaciones empíricas basadas en curvas granulométricas propuestas por Strickler (1948) y tablas de valores, los cuales son métodos relativamente sencillos de realizar y de una adecuada veracidad.

2.5 Modelamiento de Sistemas fluviales

2.5.1 Antecedentes

Los ríos son algunos de los elementos geomorfológicos más dinámicas del paisaje. A través de la erosión y la deposición continua que crean, destruyen o alterar su propia morfología, así como la del fondo del valle al cual pertenece; mediante procesos geomorfológicos de corto plazo, como la quiebra de un banco o de arrastre y deposición de sedimentos, teniendo como resultado la afectación de características morfológicas claramente reconocibles como puntos de corte de meandros, orillas de canal, islotes, cochas y terrazas fluviales (Van De Wiel, Coulthard, Macklin, & Lewin, 2011). Los tipos, la magnitud y la frecuencia de estos procesos están determinados en gran medida por las propiedades físicas del sustrato, ya sea de sedimentos o rocas, y por el clima predominante y condiciones de uso de la tierra. Por lo tanto, cualquier cambio en estas condiciones ambientales afectará la evolución del sistema del río y el paisaje de aluvión. Estos cambios en la morfología y el comportamiento dinámico del río se registran en la estratigrafía de aluvión, que, por lo tanto, puede ser visto como un archivo de los cambios ambientales pasados. Por lo tanto, una comprensión de los sistemas aluviales y la interpretación de los archivos aluviales pueden utilizarse para inferir las condiciones ambientales en tiempo pasado y futuro (Van De Wiel et al., 2011).

Por desgracia, existen algunas desventajas de esta opción. En primer lugar, la respuesta de río a la señal del medio ambiente suele ser espacial y temporalmente variable a lo largo de la cuenca, como lo demuestran los últimos estudios basados en modelos (por ejemplo, T. J. Coulthard, Lewin, & Macklin, 2005). La obtención de una perspectiva completa de la historia de aluvión, y por tanto las condiciones ambientales del pasado, requieren un análisis tridimensional completo de todo el valle aluvial lo cual es muy complejo y poco preciso, aunque se tenga nueva tecnología. Un segundo y fundamental problema es que, incluso con un análisis tridimensional completo del valle aluvial, el archivo aluvial rara vez ofrece una reconstrucción completa de las condiciones ambientales del pasado por la

destrucción parcial o total por erosión o deposición. Por último, la generalización de la observación sobre el terreno se complica aún más por la singularidad, la variabilidad espacial y temporal, y la poca frecuencia de las condiciones ambientales de conducir los procesos morfológicos en una cuenca. Estos problemas dificultan la interpretación de la actual geomorfología aluvial como una herramienta para la reconstrucción del medio ambiente pasado (Van De Wiel et al., 2011).

Los modelos computacionales o numéricos proporcionan un enfoque alternativo para abordar algunas de las deficiencias de los sistemas aluviales como archivos de los cambios ambientales. La idea principal es que los modelos representan un mundo virtual controlable que replica los aspectos más destacados del mundo real. Por otra parte, este mundo virtual se puede analizar, por completo y de forma no intrusiva, en cualquier punto en el espacio y el tiempo. Por lo tanto, los modelos computacionales de sistemas aluviales de los ríos y sus dinámicas morfológicas podrían utilizarse para probar hipótesis acerca de las condiciones ambientales del pasado, o para ejecutar escenarios hipotéticos para evaluar los impactos de los cambios ambientales futuros (por ejemplo, cambio de uso de la tierra, el cambio climático, o incluso ingeniería fluvial). Sin embargo, el modelado computacional tiene sus dificultades, que se asocian principalmente con la traducción al mundo real a un mundo numérico, (Van De Wiel et al., 2011).

2.5.2 Modelización Numérica

Los modelos numéricos pueden ser clasificados en tres grupos. En primer lugar, los modelos de “caja negra”, se llaman así porque no muestran los procesos por los cuales los resultados del modelo están vinculados a los insumos, es decir, el modelo no tiene ningún conocimiento previo de cómo funciona el sistema o lo que es. La mecánica numérica de lo que ocurre en el modelo de "caja negra" no es necesariamente representativa de lo que ocurre en la naturaleza, pero la respuesta de los resultados de los modelos a los insumos es igual o similar a la observada. Ejemplos de modelos de caja negra son modelos estadísticos y modelos de regresión

y por lo tanto llevan en muchas relaciones empíricas. En segundo lugar, los modelos estocásticos pueden incluir un elemento aleatorio a menudo en un intento de reproducir la variabilidad natural o caos que se encuentra en los sistemas naturales. Ejemplos de esto son los modelos en que los resultados son la muestra de una distribución de probabilidad. En tercer lugar, los modelos basados en procesos que intentan simular los procesos físicos que ocurren dentro del sistema a simular. El sistema (por ejemplo, un río) puede dividirse en componentes (por ejemplo, flujo y transporte de sedimentos) , y las interacciones entre estos dos procesos componentes puede entonces ser modelado (T. J. Coulthard & Van De Wiel, 2012).

Existen ventajas y desventajas asociadas con todos estos enfoques. Modelos de caja negra son sencillos y pueden funcionar bien sobre la base de los datos de los que fueron desarrollados, pero pueden no tener tan buenos resultados en diferentes circunstancias y nos dicen poco acerca de cómo un sistema puede operar. También modelos basados en procesos que nos pueden proporcionar una visión de cómo los componentes de un sistema natural dinámico (como un río) interactúan y se comportan, pero, debido a su relativa complejidad, pueden ser difíciles de validar y por lo tanto pueden jugar más de una evaluación cualitativa de un papel cuantitativo. Sin embargo, se trata de generalizaciones y muchos modelos, sobre todo de evolución del río, contienen combinaciones de proceso, caja negra y elementos estocásticos. Incluso en el corazón de los modelos de flujo realizados mediante dinámica de fluidos computacional (CFD) son basados en principios físicos, existen relaciones empíricas que describen el flujo turbulento, (T. J. Coulthard & Van De Wiel, 2012).

Para modelar las historias de los ríos y la evolución, los modelos numéricos tienen que representar (o discretizar) procesos fluviales en el tiempo y el espacio. Para el componente espacial, utilizando el ejemplo de modelado de un canal del río, se puede utilizar una serie de secciones transversales, la profundidad del agua a través de esta sección calculada, y la erosión y deposición permite interpretar los cambios en la parte inferior de la sección transversal. O, como en el caso de algunos modelos de meandro de río y trenzados como se menciona en (Howard et al, 1970), una línea simple puede ser utilizada para mostrar la ubicación de canal mientras se

mueve. Al aumentar el detalle o la representación espacial, una malla regular de dos dimensiones de cuadrícula se puede utilizar para representar una superficie o el lecho del río, donde las elevaciones celulares suben o bajan en respuesta a la erosión o deposición. Alternativamente, una malla irregular o red irregular triangular (TIN) de enlaces y nodos pueden permitir más detalle topográfico de estar representado en ciertas partes de un dominio de modelado. Por último, una malla tridimensional de células puede permitir el flujo de agua y sedimentos en todas las direcciones (T. J. Coulthard & Van De Wiel, 2012). Todos estos métodos son válidos, pero como las dimensiones representadas aumentaron, también aumenta principalmente la complejidad de los cálculos necesarios y el volumen de los datos almacenados por el modelo. Dentro de este dominio espacial multidimensional (ya sea uno, dos o tres dimensiones), las fases del sistema a ser modelado son representadas mediante variables, como pueden ser profundidad y velocidad de flujo de agua y sedimento, entre otras; estas variables que pueden cambiar a lo largo de una simulación, y luego ser alteradas por ecuaciones y/o reglas que contienen parámetros, que se mantienen constantes para una simulación específica. Estas alteraciones se producen a intervalos de tiempo dentro de la operación del modelo, que es la forma como un modelo puede discretizar el tiempo. Mas los intervalos de tiempo son típicamente fijos ,como puede ser cada minuto , hora o día, pero algunos modelos de usan de pasos de tiempo variables para que el modelo funcione más rápido en algunas ocasiones y luego más lentamente durante los períodos más complejos (T. J. Coulthard & Van De Wiel, 2012).

2.5.3 Modelos de evolución del paisaje (LEMS)

Desde finales de 1970, los investigadores comenzaron a utilizar modelos numéricos basados en procesos computacionales para simular cómo los ríos y paisajes interactuaron en escalas de tiempo grandes, puesto que la tecnología computacional fue aumentando. Se comenzó idealizar modelos dinámicos, obteniendo los primeros Modelos de Evolución del Paisaje (LEMS por sus siglas en ingles), los cuales simulan el desarrollo de las cuencas hidrográficas, estos simulan el

paso del agua a través de una malla de celdas (que representan el paisaje) de acuerdo con su topografía, erosionando y depositando sedimentos de acuerdo a la cantidad de agua en cada celda, y al mismo tiempo la cantidad de agua que escurre de ella (T. J. Coulthard & Van De Wiel, 2012).

Entre las décadas de 1980 y 1990, estos modelos fueron desarrollados de manera significativa. Con el desarrollo de ordenadores más potentes y sofisticados de uso científico, lo que permitió una representación más real de los procesos fluviales y de pendiente. Se pueden enumerar algunos trabajos representativos en esta línea como son los modelos desarrollados por Kirkby (1987), Howard, A. D. (1994) y el modelo SIBERIA de Willgoose et al. 2005 desarrollado en el MIT. Es relevante señalar que los modelos de evolución de paisaje se construyeron para estudiar redes fluviales y la evolución de la captación en escalas de tiempos grandes (miles de años) y que abarquen grandes áreas, pero con la mejora de los procesos computacionales se hizo posible el modelamiento de periodos cortos tiempo, dando una herramienta de planificación actual. Estos modelos se han utilizado para estudiar cuestiones fundamentales del desarrollo y cambio del paisaje a largo y a un relativo corto plazo, tales como la hidrografía, la erosión y deposición fluvial, procesos de ladera, el clima, la litología y hasta cambios tectónicos; estos factores se combinan para influir en los procesos hidrológicos y la morfología de la cuenca hidrográficas. Su importancia radica en su capacidad de integrar y vincular los procesos hidrológicos, de pendiente y fluviales (T. J. Coulthard & Van De Wiel, 2012).

En la anterior sección se habla de la teoría y el estado del arte sobre el modelamiento de sistemas fluviales, enfocándose principalmente en los modelos de evolución de paisaje y los autómatas celulares.

2.6 CAESAR

2.6.1 Introducción

CAESAR (Cellular Automaton Evolutionary Slope and River) es un modelo de flujo bidimensional y de transporte de sedimentos, basado en los principios de autómatas celulares (AC). Los insumos básicos del modelo son: modelo de elevación digital (DEM), datos de flujo y la información de los sedimentos. Los procesos clave que operan en el modelo se muestran en la figura 5. Este modelo puede simular los cambios morfológicos en las cuencas de los ríos o en tramos específicos de estos, así como inundaciones, durante periodos de hasta varios miles de años (T. J. Coulthard, Macklin, & Kirkby, 2002). CAESAR tiene un espacio único en el modelado fluvial puesto que tiene la capacidad para simular escalas de tiempo que son útiles para los ingenieros, investigadores de los sistemas fluviales (1 a 1000 años) y posee la capacidad de simular inundaciones y el cambio morfológico de escalas espaciales diversas, como por ejemplo de 2 km hasta más de 400 km de una cuenca hidrográfica. Su modelamiento utiliza una malla regular de celdas de forma cuadrangular (grid) para representar la cuenca estudiada. Se basa en el concepto autómatas celulares (AC), mediante el cual cada iteración repite una serie de reglas en cada célula de la cuenca, lo cual determina el comportamiento dinámico de todo el sistema. Existen algunos factores o reglas de transición en CAESAR, especificadas para cada factor del modelo, como es, el modelo hidrológico, el modelo hidráulico (enrutamiento de flujo), la erosión fluvial, la deposición y la pendiente, aquellos procesos concretos serán especificados en posteriores apartados (T. Coulthard & Van De Wiel, 2006).

A cada célula de la cuadrícula se le asigna valores iniciales para la elevación, la descarga de agua, profundidad del agua, área de drenaje y las fracciones granulométricas. Para cada paso de tiempo o su iteración correspondiente estos valores se actualizan en relación con los vecinos inmediatos de acuerdo con las reglas de transición aplicadas a cada célula (T. Coulthard & Van De Wiel, 2006).

CAESAR inicialmente fue diseñado para simular la respuesta geomorfológica de las cuencas hidrográficas a los cambios en el clima o cobertura del suelo. Su objetivo era abordar el debate sobre si los cambios en el clima o los cambios antropogénicos en la cobertura terrestre, habían producido cambios en el comportamiento de un río en el Reino Unido durante el Holoceno (T. Coulthard & Van De Wiel, 2006).

Este modelo fue inicialmente parte de un proyecto de tesis doctoral, y desde entonces el modelo ha crecido, tanto en sofisticación y aplicación. CAESAR ha demostrado ser muy versátil, y hasta la fecha se ha aplicado a más de 20 cuencas diferentes alrededor del mundo y puede ser usado en escalas que van desde 5 a 500 km² y sobre escalas de tiempo de inundaciones individuales hasta 10 000 años (T. Coulthard & Van De Wiel, 2006).

2.6.2 Modelos autómatas celular

Los Autómatas Celulares (AC) toman su nombre basándose en los principios de que su unidad de modelamiento son las celdas, células, o tésales (regularmente pixeles), los cuales tienen conectividad local, y de que su estado es dinámico y puede cambiar en una simple transición de acuerdo a determinadas reglas (reglas de transición), estos cambios individuales y continuos, que evolucionan en tiempos y espacios discretos le dan su condición de autómatas (Padilla, 2005). Lo fundamental de este tipo de modelos radica en que puede representar fenómenos en los que las variables cambien en forma discreta dependiendo de su estado y no en forma continua en dependencia de una función matemática (Padilla, 2005).

2.6.2.1 Elementos básicos de un autómatas celular

Según Reyes (2011) establece que los compuestos básicos de un modelo autómatas celular son:

Arreglo Regular: “Ya sea un plano de 2 dimensiones o un espacio n-dimensional, definiéndose como un espacio euclidiano, este es el espacio de evoluciones, y cada división homogénea de arreglo es llamada célula” (Reyes, 2011)(ver Figura 9).

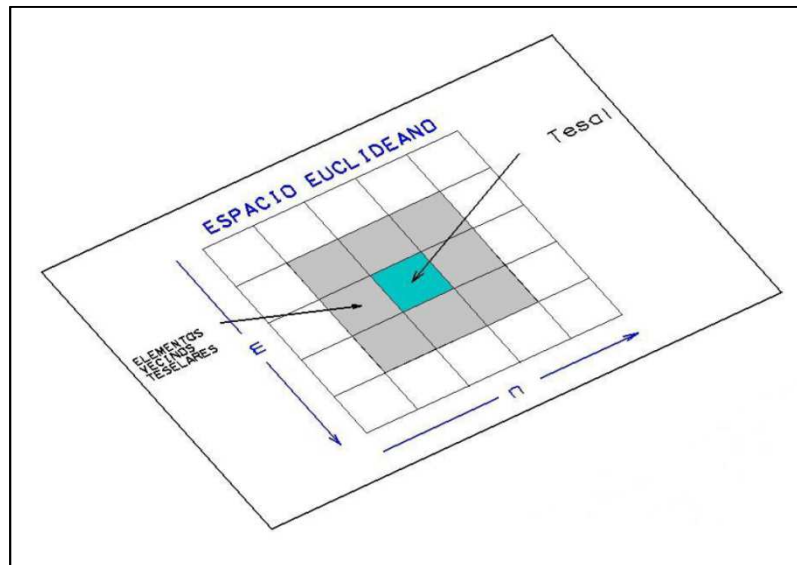


Figura 9 Espacio Euclidiano

Fuente: (Padilla, 2005).

Conjunto de Estados: “Es finito y cada célula del arreglo toma un valor de este conjunto de estados” (Reyes, 2011).

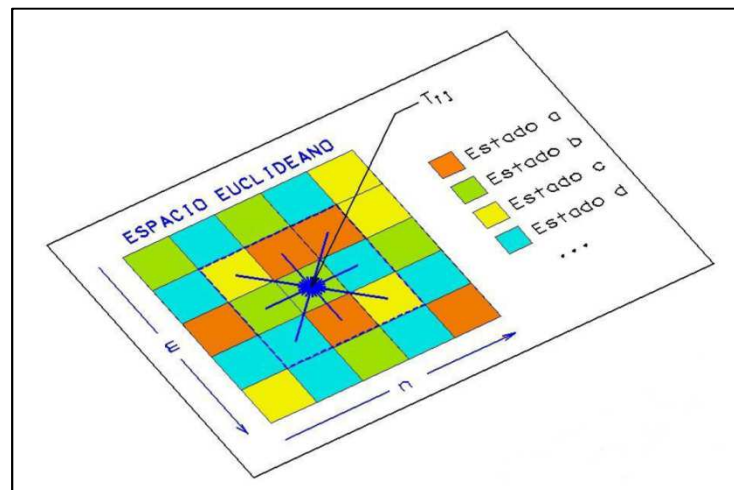


Figura 10 Conjunto de estados.

Fuente: (Padilla, 2005).

Vecindades: “Define el conjunto contiguo de células y posición relativa respecto a cada una de ellas. A cada vecindad diferente corresponde un elemento del conjunto de estados” (Reyes, 2011).

Para el caso de un autómata con grilla rectangular bidimensional, las vecindades se definen generalmente de dos maneras:

“Vecindad de Von Neumann, que consiste en la celda y los cuatro vecinos más cercanos, siendo estas la superior, inferior, derecha e izquierda” (Caligaris & Rodríguez, 2010).

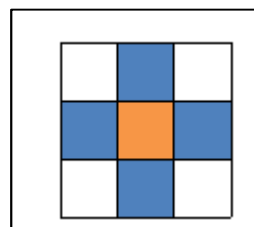


Figura 11 Vecindad de Von Neumann.

Fuente (Caligaris & Rodríguez, 2010).

“Vecindad de Moore, consiste en la celda y los ocho vecinos más cercanos” (Caligaris & Rodríguez, 2010).

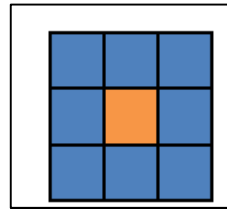


Figura 12 Vecindad de Moore.

Fuente: (Caligaris & Rodríguez, 2010).

Regla de transición: “El conjunto de células de un autómata, evoluciona de acuerdo a una determinada expresión matemática, que es sensible a los estados de las celdas vecinas, esta regla se conoce como regla de transición” (Valero, 2015).

Por lo tanto “el estado de un AC en un tiempo $t+1$ ($E_{p+1}T_{ij}$) está en función de su propio estado precedente (E_pT_{ij}) en el tiempo t y de todos los estados de los elementos localizados en su vecindad” (Padilla, 2005).

2.6.3 Antecedentes de modelos celulares para la evolución del paisaje e inundaciones pluviales

CAESAR es parte de una nueva generación de modelos fluviales celulares que también se los llama modelos de “complejidad reducida”. Estos se han desarrollado en parte, para llenar el vacío entre los modelos 2D y 3D de dinámica de fluidos computacional (CFD), que son demasiado complejos para ser aplicados a escalas de tiempo y áreas grandes, y los modelos de alta resolución de evolución paisaje que simulan el desarrollo de los paisajes más miles de años (T. J. Coulthard, 1999).

Los modelos celulares en geomorfología se pueden definir como la representación del paisaje modelado con una cuadrícula de células (grid), y que el desarrollo de este paisaje está determinado por las interacciones entre las células usando reglas de transición basadas en ecuaciones físicas simplificadas (Grenfell, 2015). En geomorfología fluvial, los modelos celulares utilizan versiones simplificadas de las ecuaciones de flujo complejas utilizadas en los modelos CFD (por ejemplo HEC-RAS). Esto permite un aumento sustancial de la velocidad de la operación, que a su vez les permite ser aplicadas a tramos largos y a grandes cuencas en escalas de tiempo útiles. Es importante destacar que, el aumento de la velocidad de cálculo y simplicidad también permite que estos modelos incluyan a los procesos de transporte de sedimentos entre las células, lo que significa que el cambio morfológico también puede ser modelado (T. J. Coulthard, 1999).

El primero de estos modelos celulares fue el modelo de río trenzado de Murray y Paola (1994). Este simula el desarrollo de un río trenzado mediante el enrutamiento de descarga de agua a través de una rejilla de células que representan el canal y el trenzado del río, de acuerdo a las variaciones locales en la pendiente del lecho. A continuación, la erosión de estas células se llevó a cabo de acuerdo con reglas simples de erosión de descarga-dependiente, y el material erosionado fue transportado a las células adyacentes de nuevo de acuerdo con la pendiente del lecho. Su modelo de flujo sencillo permitió modelar flujos divergentes y convergentes, y de manera importante la anchura de los canales se representa a través de una o más células. No hubo cálculos de profundidad, impulso o de la velocidad, sin embargo, el modelo produjo patrones trenzados cualitativamente realistas. Es de importancia destacar, que reproduce el comportamiento dinámico de un canal trenzado con la migración aguas abajo y de canales laterales. Al simplificar las leyes de la física, Murray y Paola (1994) vuelven a crear las condiciones básicas que hacen que un río trenzado: fluya lateralmente sin restricciones, tenga material de lecho móvil y bancos erosionables. Este sencillo modelo representó un cambio de paradigma tanto en la forma en que miramos a los ríos trenzados y cómo los modelamos. Para los modelos fluviales, se indicó que no se tiene necesariamente adoptar enfoques reduccionistas, para tratar de simular todos los procesos que operan dentro de un canal del río con gran detalle. Asimismo, planteó la posibilidad de simular el comportamiento general

de los sistemas fluviales utilizando un enfoque mucho más simple. Este enfoque hasta cierto punto experimental es importante para los investigadores, ya que a menudo una comprensión cualitativa de la dinámica de un sistema es más importante que una solución cuantitativa (T. J. Coulthard, 1999).

Después de su artículo de 1994, Murray y Paola (1997) llevaron a cabo una amplia revisión de su modelo y, posteriormente, integraron un modelo de crecimiento de la vegetación sencillo, para examinar cómo estabilizar los ríos trezados con vegetación, alterando el patrón de los canales (Murray y Paola, 2003). El modelo de Murray y Paola también inspiró el desarrollo de una serie de modelos de celulares similares. Coulthard et al. (1996, 1998) desarrolló un modelo basado en autómata celular de evolución de ríos de captación que se ha desarrollado más en el modelo de CAESAR se describe en más detalle más adelante (Coulthard et al., 2000, 2002, 2005). Este modelo construido sobre la metodología de enrutamiento de flujo desarrollado por Murray y Paola (1994, 1997) mediante la inclusión de un cálculo de profundidad de flujo, una representación más detallada de transporte de sedimentos utilizando múltiples tamaños de grano, y los procesos de vertiente (por ejemplo, deslizamientos y fluencia del suelo). CAESAR se ha aplicado a una amplia gama de las cuencas de los ríos y tramos (4 a 40 km²) con tamaños de celda de cuadrícula que van desde 2 m por 2 m a 50 m por 50 m. Thomas y Nicholas (2002) desarrollaron un modelo celular de ríos trezados (llamados CRS) que utiliza un modelo de flujo que construye sobre el método de Murray y Paola, aunque refino el proceso. Fue aplicado a una área de 470 por 230 m de alcance del río Aroca, Nueva Zelanda con células 1m cuadrícula y compararon favorablemente las extensiones de inundación simuladas y las velocidades de flujo de resultados de un modelo CFD 2D del mismo alcance (Hydro2de). Cox et al. (2005) también ha comparado y examinado las capacidades de enrutamiento de flujo del método de Murray y Paola, el CRS y los modelos de CAESAR. También hay una serie de modelos de inundación de complejidad reducida basado en el modelo LISFLOOD (Bates y De Roo, 2000), que utiliza ecuaciones de onda cinemática para enrutamiento, una ola de agua por el canal principal del río, entonces dónde se sobrepasaron los bancos utiliza un algoritmo celular para flujo de ruta a través de la llanura de inundación. Nicholas (2005) ha descrito los principios y cuestiones de modelado celular en geomorfología fluvial, al

comentar que los modelos de celulares representan uno de los avances más importantes en la geomorfología fluvial en la última década. Sin embargo, Nicholas (2005) señala que hay problemas técnicos, como los algoritmos de enrutamiento de flujo que tienden a concentrar el flujo de manera desproporcionada, y existen muchas dificultades con la validación. Sin embargo, Nicholas (2005) reconoce el potencial significativo para modelar varios tipos de escenarios, por su facilidad de aplicación y la capacidad para simular escalas de tiempo prolongados que pueden, por ejemplo, simular el cambio climático extremo sobre la geomorfología fluvial. Las cualidades que definen a estos modelos celulares son sus escalas de tiempo y espacio, la inclusión de la erosión, la deposición y el cambio morfológico y que dentro del modelo de la canal se trata como una o más células de ancho (T. Coulthard & Van De Wiel, 2006).

2.6.4 Descripción del Modelo

El concepto y la estructura de este modelo de autómeta celular es simple, pero de compleja operación y gran tiempo computacional.

Como se detalla en la figura 5, la zona de captación está representada por una matriz de células uniformes (raster). Cada celda de la cuadrícula se le asigna valores iniciales tanto de elevación, descarga de agua, profundidad del agua, área de drenaje y fracciones granulométricas. Para cada paso de tiempo (o iteración) del modelo celular, estos valores se actualizan en relación con los vecinos inmediatos de acuerdo con las reglas o leyes aplicadas a cada célula. Estas leyes se dividen en cuatro grupos que abarcan, la rutina hidrológica, hidráulica, fluvial con los procesos de erosión y deposición y, finalmente, la cuarta rutina donde se abarca procesos de pendiente, movimientos de masas y arrastre. Estos cuatro grupos se discuten en las siguientes secciones. Todas las unidades están en metros a menos que se especifique lo contrario (T. J. Coulthard, 1999).

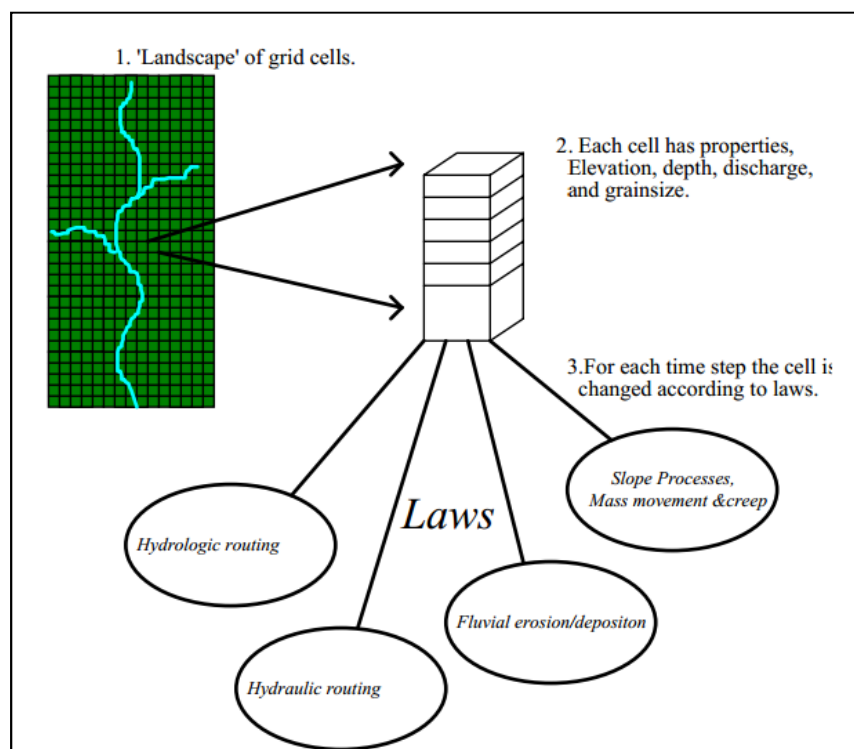


Figura 13 Diagrama de los procesos clave que operan en el modelo CA

Fuente: (T. J. Coulthard, 1999)

2.6.4.1 Modelo hidrológico

Al momento de diseñar se ha tomado en cuenta el modelo hidrológico más ampliamente aplicado e investigado TOPMODEL (Beven y Kirkby, 1979). Este modelo se basa en un sencillo índice topográfico $K = a / \beta$ donde “a” es el área de drenaje a través de un punto a partir de la pendiente y β es el ángulo de la pendiente local. La idea primordial de TOPMODEL es la suposición de que existe un vínculo fundamental entre este índice topográfico y la humedad del suelo. Cuando el gradiente desciende el índice K aumenta, la superficie de agua sube cerca de la superficie (ver Figura 14). A medida que sube el agua, sin embargo se transmite a través del flujo a una velocidad que aumenta de forma exponencial. Por lo tanto, como la superficie de agua sube, la tasa de pérdida de agua de un punto aumenta. De una forma simple de entender, el volumen de agua del suelo puede ser comparado

con un cubo con un pequeño agujero en la base. A medida que se añade más agua para el cubo, el agua es forzada a salir a través del agujero a un ritmo mayor. Dos variables clave controlan el comportamiento del modelo; la transmisividad o la tasa de movimiento (k), que es a su vez reducido por un parámetro m . Este parámetro m determina efectivamente la tasa de aumento o disminución de la capa freática, en otras palabras, se puede asumir la exageración del hidrograma, y se puede calcular a partir de curvas de recesión del hidrograma. La simplicidad de este enfoque ha sido la clave de su éxito. En particular, la derivación del índice topográfico de los DEM de un ejercicio es relativamente sencilla lo que significa que TOPMODEL o sus conceptos pueden aplicarse fácilmente y de forma automática a las áreas grandes (T. J. Coulthard, 1999)

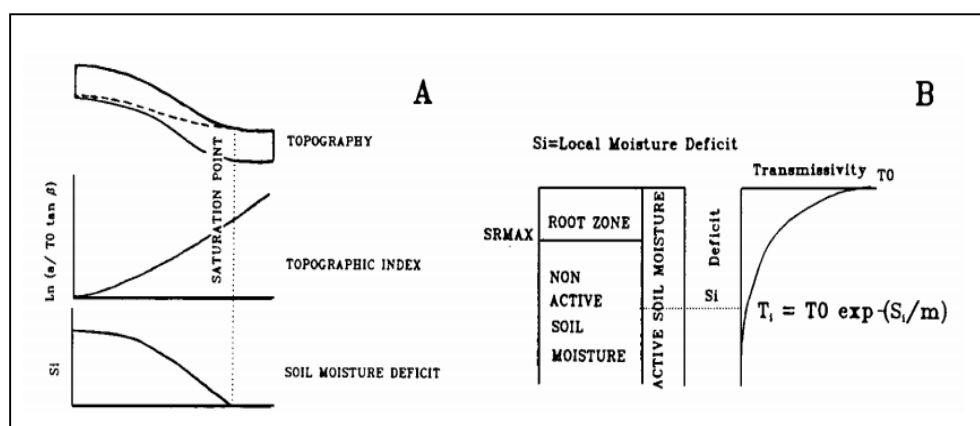


Figura 14 Las interacciones entre los parámetros topmodel

Fuente: Coulthard (1999) modificado de Quinn et al. (1991).

La técnica se ha aplicado al modelo CAESAR y posteriormente a CAESAR-Lisflood, a continuación se hace referencia a las ecuaciones usadas.

Por cada minuto de corrida del modelo, se calcula la saturación del suelo de una celda individual (J_t). La saturación para el próximo paso de tiempo (T , aquí 60 segundos) se calcula entonces ($J_t + 1$), pero para ello un parámetro adicional que se trasladará, j_t que antes de cada cálculo se establece en las iteraciones anteriores $j_t +$

1. Entonces, si la intensidad de lluvia (r) es igual a 0, J_{t+1} se calcula según la ecuación 28.

$$j_{t+1} = \frac{j_t}{1 + \frac{j_t T}{m}} \quad (28)$$

$$j_{t+1} = \frac{m}{T} \log \left(1 + \left(\frac{j_t T}{m} \right) \right) \quad (29)$$

Si la lluvia no es igual a 0, se utiliza la ecuación 30.

$$j_{t+1} = \frac{r}{\left(\frac{r - j_t}{j_t} \exp \left(\left(\frac{(0 - r)T}{m} \right) + 1 \right) \right)} \quad (30)$$

$$j_{t+1} = \frac{m}{T} \log \left(\frac{(r - j_t) + j_t \exp \left(\frac{rT}{m} \right)}{r} \right) \quad (31)$$

Dentro de estas expresiones, m es la variable relevante, puesta que esta controla de manera exponencial la subida y la caída del déficit de humedad del suelo, lo cual modela de manera efectiva el parámetro agua del suelo en TOPMODEL (Beven y Kirkby, 1979). El escurrimiento se multiplica por el tamaño de celda de la cuadrícula para obtener las descargas que se añade a cada célula o a los márgenes. Si se requieren cálculos de escorrentía entre estos dos pasos de tiempo son interpolados linealmente (T. J. Coulthard, 1999).

2.6.4.2 Enrutamiento de Flujo

Para cada celda de la cuadrícula, se calcula un umbral de escorrentía (Ecuación 30) que se basa en la cantidad de agua que se infiltra a través del suelo, un equilibrio de la conductividad hidráulica (K), la pendiente (S) y la separación horizontal (D_s) (T. J. Coulthard, 1999).

$$Treshold = KS(D_s)^2 \quad (32)$$

Según T. J. Coulthard (1999) esto se sustrae a continuación de la saturación del suelo producido a partir de las ecuaciones 28 y 30 y la proporción anterior se trata como escorrentía, y a continuación como flujo subsuperficial. Este flujo subsuperficial se encamina utilizando un algoritmo de flujo.

$$Q_i = Q_o \frac{S_n^x}{S_i^x} \quad (33)$$

Aquí Q_i es la fracción de la descarga suministrada a la celda vecina i de la descarga total de células (Q_o) en m^3/s , de acuerdo con la pendiente S entre la célula y sus vecinas relativas I , la numeración de $1-x$ (x oscila del 3 al 8 en función del número de vecinos). Con el flujo de superficie, la profundidad se calcula usando la ecuación de Manning (ecuación 34).

$$Q = \frac{A(R^{0,67}S^{0,5})}{n} \quad (34)$$

Donde A es el área de la sección transversal, R es el radio hidráulico, S es la pendiente y n es el coeficiente de Manning. Si se trata de una célula de 1m, esto puede ser reformulado para usar la ecuación 35, con una anchura (w) como 1, dejando la profundidad (d).

$$Q = d \left[\frac{R^{0,67}S^{0,5}}{n} \right] \quad (35)$$

Sin embargo, con el fin de calcular la profundidad, el radio hidráulico tiene que ser resuelto. Esta es una aproximación difícil, como lo es el radio hidráulico para una celda de cuadrícula o parte de un canal 1m de ancho. Sin embargo, para un canal rectangular / trapezoidal el radio hidráulico se puede simplificar como:

$$R = \frac{A}{P} = \frac{wd}{w + 2d} \quad (36)$$

Si w es mayor que d , entonces el $2d$ en el denominador se puede ignorar dejando d , como en la ecuación 35.

$$R \approx \frac{dw}{w} = d \quad (37)$$

Esto significa que la ecuación puede ser reescrita para calcular la profundidad como la ecuación:

$$d = \left(\frac{Q_n}{S^{0,5}} \right)^{3/5} \quad (38)$$

El problema se halla cuando las pendientes excesivamente bajas pueden resultar en profundidades excesivas calculadas. Para sanear esta cuestión, cuando la pendiente es inferior a 0.005, la profundidad se establece en el mismo valor que la descarga. Tres métodos diferentes para calcular la pendiente fueron juzgados, el de la pendiente media de los vecinos, el de la mayor pendiente de todos los vecinos y el promedio de todas las pendientes positivas (T. J. Coulthard, 1999)

Se halló que el método de la media de todas las pendientes positivas era el más estable, pero el modelo muestra sensibilidad al método de cálculo de la pendiente. El agua se encamina entonces, de acuerdo con la ecuación 39, donde la profundidad del agua, así como la elevación de la célula se considera (T.J. Coulthard, 1999).

$$Q_1 = Q_0 \frac{[(e + d) - e_i]^x}{\sum [(e + d) - e_i]^x} \quad (39)$$

Aquí Q_1 es la descarga encaminado a la celda i , Q_0 la descarga total de la célula, e es la elevación y d profundidad del agua (en metros) para cada celda vecina i . En ambas expresiones, las diferencias en la pendiente entre vecinos diagonales se contabilizan dividiendo por $\sqrt{2D_x^2}$. El cálculo de la profundidad es una

aproximación importante ya que permite el enrutamiento de las descargas que van través, así como alrededor de los obstáculos.

Tanto las secciones de las rutinas hidrológicas e hidráulicas se basan en gran medida en el uso de un algoritmo de exploración, desarrollados especialmente para este modelo y posteriormente adecuando e implementando al modelo Lissflood-FP 2D. Muchos de los modelos hidrológicos basados en modelos de elevación convencional se ven obligados a ordenar y clasificar las alturas para permitir el encaminamiento de flujo desde el más alto hasta el punto más bajo. En modelos hidrológicos convencionales esto no es un problema, puesto la clasificación sólo necesita hacerse una vez. Mas, como este modelo es dinámico, la superficie virtual se erosiona y sufre deposición de sedimentos constantemente, lo cual hace que el recorrido del agua desde la celda más alta a la más baja de la cuadrícula cambie constantemente. Esto da como resultado que para cada ciclo de la erosión y la deposición, las células tienen que ser reordenadas, que con algoritmos convencionales tomaría un inaceptable tiempo (T.J. Coulthard, 1999).

El algoritmo de escaneo ordena las altitudes para dirigir cada célula a la salida del modelo hidrológico. Los valores de altura son ordenados, como el agua a través del mapa, de izquierda a derecha, de derecha a izquierda y de arriba a abajo (Ver Figura 13).

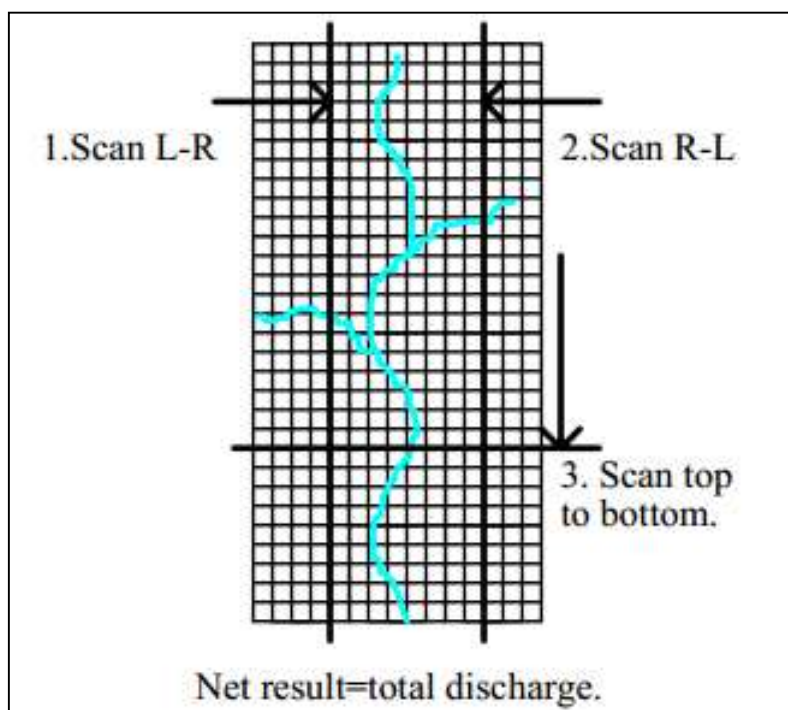


Figura 15 Diagrama que representa la exploración de la zona de captación mediante algoritmo de sacaneo.

Fuente: (T.J. Coulthard, 1999).

En cada ciclo de exploración, el valor se dirige únicamente a las tres células inmediatamente en frente. Si las tres células son más altas que la célula contribuyente, pero la profundidad y la elevación combinada del agua no la supera, el agua es retenida en la célula inicial contribuyente, esto quiere decir que tiene una obstrucción, y el resto opta por un enrutamiento diferente. Este proceso tiene el efecto de llenado de huecos que el modelo crea con agua. Estos huecos o sumideros con frecuencia son removidos de los datos del DEM, regularmente usando la herramienta Fill de ArcGIS.

Para conducir las reglas de transición del proceso de erosión, la profundidad máxima calculada después de todas estas cuatro exploraciones se registra. Este procedimiento le permite al flujo atrapado después de una iteración ser incorporado en la exploración de la siguiente iteración. Este almacenamiento en las esquinas y curvas mantiene un flujo en el canal incluso alrededor de los patrones de canal complejos y meandros. Un ejemplo de este hecho, es, con una secuencia de meandro,

el agua puede ser enrutado alrededor de la primera curva, pero ser atrapado por el segundo. Sin embargo, en la siguiente iteración, esta agua está todavía allí, que se notara en la siguiente exploración, y será reemplazada por más agua desde aguas arriba, lo que permite el continuo de flujo (T. J. Coulthard, 1999).

Este método da resultados muy similares a la del método convencional, incluso en áreas complejas tales como confluencias, sin embargo, proporciona un ahorro de tiempo considerable (T. J. Coulthard, 1999).

2.6.4.3 Erosión / deposición

Para representar la erosión y la deposición de diferentes grainsizes (tamaños de grano) y el desarrollo de una capa superficial blindada, se usa un sistema de capa activa. Este modelo, sin embargo, utiliza doce capas activas. Uno para carga de fondo, uno para la capa activa de superficie y otras diez capas del subsuelo. La capa de superficie activa se define como $2D_{90}$, siendo D el diámetro del grano en la curva granulométrica, con las diez capas por debajo en $4D_{90}$. Nueve tamaños de granos están representados desde 0.004 a 1.024m en clases phi enteros (- 2φ a -10φ). Además, la capa de superficie activa tiene dos categorías adicionales que representan una estera vegetativa de la superficie y la roca madre, a continuación se describe (T. J. Coulthard, 1999):

Según T. J. Coulthard (1999) cuando se añade material a la capa activa de la parte superior, el material se elimina de esta capa y se añade a la capa siguiente hacia abajo, como en la ecuación (40):

$$E_i = \left[\frac{F_i^x}{\sum F_{i-n}^x} \right] \left(\sum F_{i-n}^x - A \right) \quad (40)$$

Aquí E_i es la cantidad retirada de la capa superior (x) y se añadió a la capa siguiente hacia abajo (x + 1) de la fracción i granulométrico. A representa el espesor

correcto de la capa activa (2D₉₀ o 4D₉₀). Para la erosión o degradación, el material se mueve hacia arriba desde las capas más bajas de acuerdo con la ecuación (41).

$$E_i = \left[\frac{F_i^{x+1}}{\sum F_{i-n}^{x+1}} \right] \left(A - \sum F_{i-n}^x \right) \quad (41)$$

La cantidad erosionada por la acción fluvial de célula a célula, se determina usando la formulación de Einstein-Brown (1950). Esto se adapta bien a las nueve clases granulométricas y el sistema de capas activas utilizadas (Coulthard, 1999). Las fórmulas utilizan aquí toma la forma de la ecuación 42.

$$\psi = \frac{(\rho_s - \rho)D}{\rho d S} \quad (42)$$

Donde ψ es el equilibrio entre las fuerzas en movimiento y restricciones de las partículas, $\rho_s - \rho$ la densidad relativa de los sedimentos sumergidos, D es el tamaño de grano (metros), d la profundidad de flujo y S la pendiente de energía. A continuación se calcula una tasa de transporte de carga de fondo ϕ sin dimensiones.

$$\phi = q_x \sqrt{\frac{\rho}{(\rho_s - \rho)gD^3}} \quad (43)$$

ϕ es luego relacionada con ψ mediante la relación trazada por Einstein (1950),

$$\phi = 40 \left(\frac{1}{\psi} \right)^3 \quad (44)$$

Un reordenamiento de las dos ecuaciones anteriores permite entonces q_s , la carga de sedimentos volumétrico en m³/s. Para cada celda de la cuadrícula, se calcula la cantidad de cada clase granulométrico que puede ser erosionado, y se retira de la

capa activa de la célula en cuestión, y se deposita a la capa activa de la celda aguas abajo (T. J. Coulthard, 1999).

La capa de vegetación es tratada como un canto rodado de 0,26 m de diámetro. Esto se calcula a partir de mediciones de esfuerzo cortante de campo llevadas a cabo por Prosser (1996). Roca de fondo se trata de manera similar como una roca no erosionable de 100 metros de tamaño. Cuando el césped se erosiona sin embargo, no se deposita, el modelo supone que este es arrastrado por las aguas (T. J. Coulthard, 1999).

2.6.4.4 Los procesos de vertiente

Movimiento de masas

El Movimiento de masas es la representación de como un proceso de eliminación de masa instantánea en el modelo virtual. Cuando la pendiente entre las células adyacentes supera un umbral (actualmente 0,5) el material se desplaza desde la célula cuesta arriba a la de abajo hasta que el ángulo es menor que el umbral. Como un pequeño tobogán en una célula en la base de una pendiente puede desencadenar más movimiento cuesta arriba, el modelo continúa para comprobar las células adyacentes hasta que no haya más movimiento. Cuando las células bordean el canal principal, el material se transfiere desde la capa activa a la capa activa siguiente y las capas granulométricas. Si la cantidad retirada de la celda de pendiente ascendente es mayor que el espesor de la capa activa, también se añade material del subsuelo (T. J. Coulthard, 1999).

Fluencia del suelo

Fluencia del suelo se calcula entre cada célula de todos los meses del tiempo recorrido del modelo, de acuerdo con la ecuación 45.

$$Creep(yr^{-1}) = \frac{S0,01}{D_x} \quad (45)$$

Cuando se calcula, las células se actualizan simultáneamente y donde las células confinan el material de canal se transfiere a la capa activa de las células receptoras (T. J. Coulthard, 1999).

Crecimiento de Vegetación

El crecimiento de la vegetación está simplemente representado en el modelo. No tiene interacciones con el modelo hidrológico, su propósito es simplemente permitir una colchoneta protectora de césped para desarrollar más depósitos de inundaciones. Este proceso se consideró importante en la preservación de las unidades de inundación aluviales. Una fracción adicional se agrega a la capa de superficie activa para representar ésta cubierta de césped. Un modelo de crecimiento lineal simple suma a esta capa en pasos de tiempo mensuales si la célula no está bajo el agua y después de diez años de crecimiento ininterrumpido, una cubierta completa se desarrollará (T. J. Coulthard, 1999).

2.6.5 CAESAR-Lisflood

2.6.5.1 El Modelo de Flujo LISFLOOD-FP

LISFLOOD-FP es un modelo unidimensional inercial derivado de ecuaciones de aguas poco profundas que se aplica en las direcciones x e y para simular el flujo de dos dimensiones sobre una raster. El método es de segundo orden en el espacio y de primer orden en el tiempo, que utiliza un tratamiento semi-implícito para el término de fricción para ayudar a la estabilidad. Para calcular el flujo (Q) entre las células se utiliza (Tom J. Coulthard et al., 2013):

$$Q = \frac{q - gh_{flow}\Delta t \frac{h+z}{\Delta x}}{\left(1 + gh_{flow}\Delta tn^2|q|/h_{flow}^{10/3}\right)} \Delta x \quad (46)$$

Aquí q es el flujo entre las células de la iteración anterior (m^2s^{-1}), g es la aceleración debida a la gravedad (ms^{-2}), n es el coeficiente de rugosidad de Manning ($m^{1/3}S^{-1}$), h es la profundidad de agua (m), z es la elevación (m), h_{flow} es la profundidad máxima de flujo entre las células, x es el ancho de celda de la cuadrícula (m) y t es el tiempo (s). Después de haber establecido la descarga a través de los cuatro límites de una célula, la profundidad del agua celular (h) se actualiza utilizando la Ecuación 47:

$$\frac{\Delta h^{i,j}}{\Delta t} = \frac{Q_x^{i-1,j} - Q_x^{i,j} + Q_y^{i,j-1} - Q_y^{i,j}}{\Delta x^2} \quad (47)$$

Aquí i y j son coordenadas celulares. La parte final de la formulación LISFLOOD-FP es el paso de tiempo (t) que es controlado por la condición CFL aguas poco profundas:

$$\Delta t_{max} = \alpha \frac{\Delta x}{\sqrt{gh}} \quad (48)$$

Donde α es un coeficiente que se define típicamente entre 0,3 y 0,7. Este coeficiente mejora la robustez del modelo, como la condición CFL (número de Courant–Freidrichs–Lewy), la cual es una condición necesaria pero no suficiente para la estabilidad en sistemas no lineales. Como la Ecuación 46 muestra este está fuertemente influenciada por el tamaño de celda de cuadrícula y la profundidad del agua. LISFLOOD-FP ha sido ampliamente probado y comparado con otros modelos de flujo en estudios, con soluciones numéricas a baja fricción ($n < 0,03$), estas han mejorado sustancialmente en comparación con otros modelos, demostraron que el modelo era capaz de simular profundidades de flujo y velocidades dentro del 10% de un rango de códigos de aguas poco profundas completos de la industria (Tom J. Coulthard et al., 2013)

2.6.5.2 Integración de Modelos CAESAR y LISFLOOD-FP

La integración del modelo centrado en dos áreas principales: (a) añadir el modelo de flujo; (b) la integración del modelo de erosión y deposición de CAESAR con el nuevo modelo de flujo.

2.6.5.2.1 La integración del modelo de flujo LISFLOOD-FP dentro de CAESAR

En CAESAR-Lisflood el algoritmo de barrido flujo descrito anteriormente se sustituye en su totalidad por el modelo LISFLOOD-FP utilizando las ecuaciones en los anteriores apartados. Una diferencia importante entre los métodos es que CAESAR encamina flujo de una célula en ocho direcciones (D8) y LISFLOOD-FP en cuatro direcciones (D4). Cuando se ejecuta en grandes áreas y el uso de DEM (es decir, las dimensiones en píxeles de gran tamaño) grueso esto representa una limitación como D4 no permitirá que los canales individuales de hilo para desarrollar en diagonal, lo que obligó D4 utilizar un canal de 1-2 células de ancho. Por tanto, para algunas circunstancias puede ser necesario un grid de resolución más fina para representar canales diagonales estrechos. Se trató de adaptar la ecuación de flujo LISFLOOD-FP para operar en las ocho direcciones D8, pero esto fracasó porque el algoritmo de encaminamiento flujo múltiple D8 es incompatible con los modelos de conservación de la masa. Como todos los modelos conservacionistas LISFLOOD-FP tiene que calcular el flujo entre las células a través de una unidad de ancho (Δx en la ecuación 48). Para una celda cuadrada la anchura total de flujo, por lo tanto es exactamente $4\Delta x$, pero fluye en las diagonales como en D8, lo que conduce a una sobreestimación de la anchura de flujo total (Tom J. Coulthard et al., 2013), lo que sería:

$$4\Delta x + 4\sqrt{0.5\Delta x^2 \cdot 0.5} + 0.5\Delta x^2 \quad (49)$$

Y por lo tanto el flujo no respeta la conservación de masas. Una alternativa sería la de cambiar al uso de células hexagonales pero esto dificulta el fácil intercambio de datos entre los modelos y los paquetes GIS, presentación que comúnmente utilizan datos grid cuadrados (Coulthard, 1999).

2.6.5.2.2 Integración del transporte de sedimentos

CAESAR-LISFLOOD mantiene los múltiples tamaños de grano (grainsizes), capas activas y las ecuaciones de transporte de sedimentos utilizadas en CAESAR. La erosión de bancos se incorpora utilizando el método descrito por Coulthard y Van de Wiel (2006) y Van de Wiel et al. (2007). La masa de sedimentos está totalmente conservada y el transporte de carga sólida en el modelo de flujo se calcula para las direcciones D4 en lugar de D8 en CAESAR. Sin embargo, la combinación de los diferentes modelos de flujo y el flujo D4 de enrutamiento, llevó a los canales que evolucionaron a más estrechos hasta que llegaron a un solo píxel de ancho. Esta retroalimentación positiva es generada por un mayor flujo que se dirige a las células inferiores, causando más erosión en estas células y a su vez un mayor flujo que se dirige a estas células. En los sistemas naturales, cuando el lecho del río erosiona, las zonas adyacentes a la incisión pierden material en la zona que acaba de ser erosionada a través del colapso o movimiento lateral de sedimentos (Tom J. Coulthard et al., 2013).

Según T. J. Coulthard et al. (2013) el modelo CAESAR-LISFLOOD añadió un proceso de este tipo a través de una simple función de erosión de canal lateral (Ecuación 50) la cual controla el estrechamiento del canal.

$$\Delta Z_{i-1,j} = \Delta Z_{i,j} L \frac{(Z_{i-1,j} - Z_{i,j})}{\Delta x} \quad (50)$$

Aquí la cantidad de material se trasladó de una célula (por ejemplo $Z_{i-1,j}$) adyacente a una celda que erosiona, es proporcional a la cantidad erosionado de la célula ($\Delta z_i, j$), una constante (L) y la pendiente entre las células (siempre y cuando

ambas células están bajo el agua). Esto se toma en cuenta en la ecuación 48, la cual es similar a la función de movimientos de 'sedimentos lateral' de Murray y de Paola (1997) en su modelo de río trenzado y los utilizados en modelos morfodinámicos 2 y 3D para incluir el efecto de la gravedad sobre los sedimentos en una fondo inclinado, el parámetro L en (Ecuación 50), representa efectivamente la estabilidad/cohesión del sustrato modelado L, lo que conduce a canales más estrechos y más delgados. El aumento de la tasa de profundidad anchura (W / D), se traduce en canales más amplios (Tom J. Coulthard et al., 2013).

Según Tom J. Coulthard et al. (2013) los sedimentos en suspensión se arrastra usando las leyes de transporte de sedimentos (como en CAESAR), pero luego simplemente se mueve de acuerdo a las descargas en las direcciones i y j desde el modelo de flujo como en la ecuación 51.

$$Q_s = Q \left(S_{tot} / h \right) \quad (51)$$

donde Q_s es movimiento de sedimentos suspendidos entre las células en m^3s^{-1} , Q el flujo de agua, y la concentración de sedimentos (S_{tot} profundidad de sedimentos en suspensión en una célula y profundidad de flujo h) (Tom J. Coulthard et al., 2013). Entonces, según el modelo de flujo los cambios en flujo de sedimentos entre las células se suman (Ecuación 52).

$$\frac{\Delta S_{tot}^{i,j}}{\Delta t} = \frac{Q S_x^{i-1,j} - Q S_x^{i,j} + Q S_y^{i,j-1} - Q S_y^{i,j}}{\Delta x^2} \quad (52)$$

Los sedimentos en suspensión se deposita a continuación, por paso del tiempo de acuerdo a una velocidad de sedimentación determinado por el usuario) (Tom J. Coulthard et al., 2013).

En la anterior sección se habla del fundamento teórico general de los modelos autómatas celulares y la descripción teórica del modelo CAESAR y la posterior integración del modelo hidrológico LISFLOOD-FP.

2.7 HEC-RAS

2.7.1 Generalidades de HEC-RAS

Es un software, basado en un modelo enfocado en análisis hidráulico unidimensional, el cual es un Sistema de Análisis de río (RAS por sus siglas en inglés) desarrollado en Centro de Ingeniería Hidrológica (HEC por sus siglas en inglés) del cuerpo de ingenieros del ejército de Estados Unidos. El sistema se compone de una interfaz gráfica de usuario (GUI), componentes de análisis hidráulicos separados, almacenamiento de datos y las capacidades de gestión, gráficos y generación de informes (CARRILLO, 2013).

El sistema es capaz de realizar cálculos de perfiles de superficies de agua de flujos permanente y no permanente, además, incluye en sus últimas versiones, transporte de sedimentos y varios otros cálculos de diseño hidráulico. Además de los tres componentes de análisis hidráulicos, el modelo contiene varias opciones para simular diseño hidráulicos, los cuales pueden ser utilizados una vez que se calculan los perfiles básicos de la superficie del agua (CARRILLO, 2013)(CARRILLO GALLEGOS, 2013).

2.7.2 Fundamentos teóricos

2.7.2.1 Simulación hidráulica unidimensional de flujos en lámina libre en HEC-RAS

Según Cazcarra (2014):

Para modelar el flujo del agua en canales abiertos es necesario resolver las ecuaciones del flujo variable del agua en lámina libre o ecuaciones de Saint Venant. Éstas modelan la variación del caudal y del calado a lo largo de una superficie por donde transcurre el agua. Cuando el movimiento del flujo en canales presenta un marcado carácter unidimensional, se pueden obtener las ecuaciones de Saint Venant en una dimensión.

Lo que consiste fundamentalmente en la resolución de las ecuaciones que definen los principios de conservación de la masa y de conservación de la cantidad de movimiento en una dimensión, las cuales no toman en cuenta el término de fricción:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial A}{\partial x} = 0 \quad (53)$$

Ecuación de conservación de la masa

$$V \frac{\partial y}{\partial x} + y \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial t} = 0 \quad (54)$$

2.7.2.2 Ecuación de conservación de la cantidad de movimiento

Estas ecuaciones describen el movimiento transitorio en lámina libre en este tipo de vertientes. Se trata básicamente de derivadas parciales con respecto a la posición y con respecto al tiempo. En función de si se trata de estado estacionario o no estacionario, el término que depende del tiempo se elimina (Cazcarra, 2014).

2.7.2.3 Modelo de cálculo para régimen estacionario en HEC-RAS

2.7.2.3.1 Ecuaciones para el cálculo del perfil básico

Para el análisis hidráulico en régimen estacionario, también nombrado como permanente, HEC-RAS es capaz de efectuar cálculos de los perfiles de la superficie del agua en régimen subcrítico, supercrítico y mixto. Se computan los perfiles de la lámina de agua de toda sección individualmente solucionando las ecuaciones pertinentes de forma iterativa, por defecto hasta 20 iteraciones por sección (CARRILLO, 2013).

Para la realización del perfil básico y determinar la altura de la superficie de agua en una sección transversal, el programa lo realiza en base a la resolución de la ecuación de la energía. La ecuación señalada es la siguiente (Bladé et al., 2009):

$$Z_2 + Y_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + \Delta H = Z_1 + Y_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \quad (55)$$

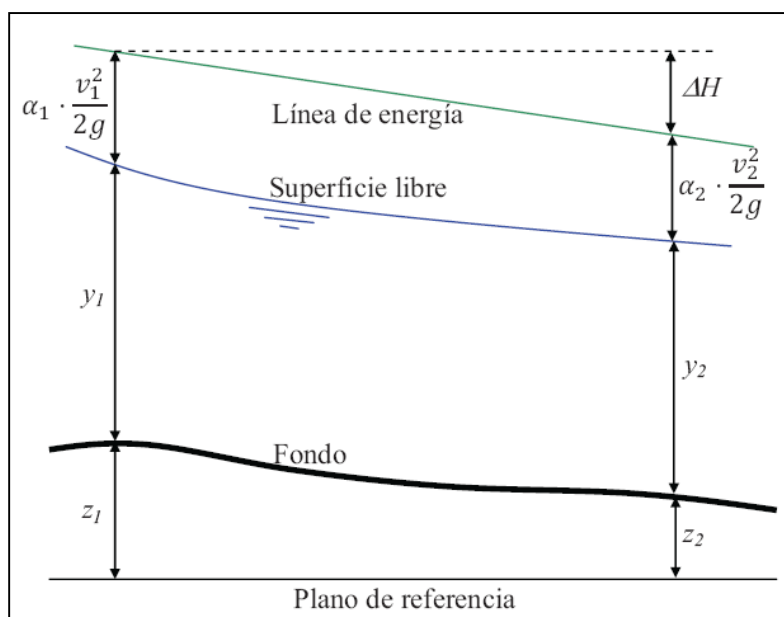


Figura 16 Representación de los términos del balance de energía.

Fuente:(Bladé et al., 2009).

Dónde:

– z_1 y z_2 son la cota de la sección respecto a un plano de referencia arbitrario. En un río generalmente se toma la cota del punto más bajo de la sección.

– y_1 e y_2 son los calados en cada una de las secciones consideradas. En un río generalmente se considera la profundidad respecto del punto más bajo de la sección.

– v_1 y v_2 son las velocidades medias en cada sección producto de la relación entre el caudal circulante y el área de la sección.

– α_1 y α_2 son los coeficientes de Coriolis estimados en cada sección, que permiten corregir el hecho de que la distribución de velocidad en la sección se aleja de una distribución uniforme.

– ΔH es el término que estima la energía por unidad de peso que se disipa entre las secciones 1 y 2. “Dicha energía debe incluir las pérdidas continuas por

rozamiento con el contorno, así como las pérdidas localizadas que se den entre ambas” (Bladé et al., 2009).

Para la resolución de las pérdidas de energía se debe tomar en cuenta las pérdidas por fricción principalmente y las provocadas por la contracción o expansión del canal, en la siguiente forma:

$$\Delta H = LS_f + \lambda \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right| \quad (56)$$

Donde L es la longitud de alcance de descarga ponderada; S_f es la pendiente de fricción representativa entre dos secciones; y λ es el coeficiente de pérdida que corresponde a la contracción o expansión. Por defecto HEC-RAS considera $\lambda=0.1$ si hay una contracción de sección y $\lambda=0.3$ en el caso de ensanchamiento en el sentido del flujo (G. W. Brunner, 2010). Del mismo modo, esta distancia ‘L’ se calcula mediante la fórmula:

$$L = \frac{L_{lob}Q_{lob} + L_{ch}Q_{ch} + L_{rob}Q_{rob}}{Q_{lob} + Q_{ch} + Q_{rob}} \quad (57)$$

Donde $Q_{lob}+Q_{ch}+Q_{rob}$ corresponde a la media aritmética a través del desbordamiento del canal izquierdo, derecho y principal; L_{lob} , L_{ch} , L_{rob} son las distancias o longitudes transversales para la sección de alcance particulares para el flujo en desbordamiento de la izquierda, derecho y principal (G. W. Brunner, 2010).

2.7.2.3.2 Subdivisión de las secciones transversales para los cálculos de transporte

La determinación del transporte total y del coeficiente de velocidad para una sección transversal demanda que el flujo sea dividido en unidades en las cuales la velocidad sea lo más uniforme posible. La aproximación que realiza HEC-RAS es la de dividir la sección en tres, los cuales son: cauce principal y cauces secundarios

(‘*overbank*’ izquierdo y derecho); en las cuales el coeficiente ‘n’ de Manning es diferente. El cálculo del transporte se realiza mediante la ecuación de Manning con unidades anglosajonas (CARRILLO, 2013):

$$Q = KS_f^{1/2} \quad (58)$$

$$K = \frac{1.486}{n} AR^{2/3} \quad (59)$$

Donde los elementos de las ecuaciones para cada subdivisión son: K es el transporte; n es el coeficiente de rugosidad de Manning; R es el radio hidráulico; y A es el área de flujo (G. Brunner, 2010).

El programa calcula todos los incrementos de la función *transporte* en cada unidad de sección. El cálculo del cauce principal se computa como un elemento aparte. Posteriormente se suma con las otras partes inundables izquierda y derecha. Por defecto el software considera subsecciones en donde existan variaciones del coeficiente de rugosidad de Manning (G. Brunner, 2010).

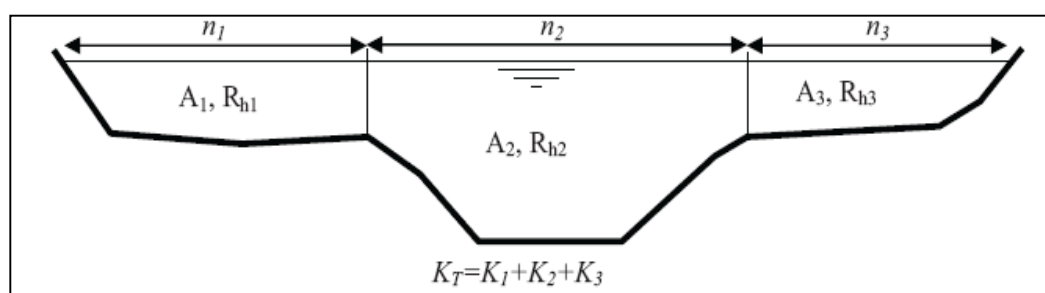


Figura 17 Distribución de la sección para obtener el factor de transporte KT.

Fuente: (Bladé et al., 2009).

2.7.2.3.3 Ponderación del coeficiente de Manning en el cauce central

Igualmente, el coeficiente de fricción de Manning se divide, por defecto, en las tres partes citadas de la sección (banco derecho e izquierdo y el canal principal), aunque se puede tener varios puntos de cambio dentro de la sección (opción *horizontal variation in n values*) (Bladé et al., 2009). El flujo en el cauce principal sólo se subdivide cuando el coeficiente de fricción cambia dentro del mismo. Según Bladé et al. (2009) “Sólo en dos casos el programa obtiene un valor equivalente del coeficiente de Manning dentro del cauce principal”:

- 1) Si la pendiente transversal del cauce principal es superior a 20%.
- 2) Si el coeficiente de fricción varía dentro del cauce principal.

“HEC-RAS debe calcular un valor global del coeficiente de Manning para toda la sección. Se utiliza la ponderación con el perímetro mojado” (Bladé et al., 2009):

$$n_{Total} = \left[\frac{\sum_{i=1}^N P_i n_i^{1.5}}{P_{Total}} \right]^{\frac{2}{3}} \quad (60)$$

Dónde:

- P_i es el perímetro mojado de la porción i de la sección.
- n_i es el coeficiente de Manning de la porción i de la sección.
- P_{Total} es el perímetro mojado de la sección completa.
- N es el número de partes en las que se divide el cauce central.

2.7.2.3.4 Pérdidas por fricción

“Las pérdidas por fricción se valoran como el producto de la variable S_f y la longitud L de cada tramo. Siendo Q el caudal y K un coeficiente que depende de la rugosidad” (G. Brunner, 2010). Entonces la pendiente de fricción o pendiente de la rasante de energía queda definido a partir de la ecuación de Manning según la ecuación (61):

$$S_f \left(\frac{Q}{K} \right)^2 \quad (61)$$

2.7.2.3.5 Coeficiente de contracción y expansión

Para este coeficiente el programa presume que se produce una contracción cuando la velocidad aguas abajo es mayor que la carga de velocidad aguas arriba. De la misma forma, se asume, cuando la velocidad aguas arriba es mayor que la velocidad de carga aguas abajo, se asume que está ocurriendo una expansión (CARRILLO, 2013).

$$h_{ce} = C \left| \frac{a_1 V_1^2}{2g} - \frac{a_2 V_2^2}{2g} \right| \quad (62)$$

Donde C es el coeficiente de expansión o contracción, cuyos valores se los puede obtener a partir de la siguiente tabla (tabla 2) (CARRILLO, 2013):

Tabla 2**Valores del coeficiente de contracción y expansión.**

CASOS	CONTRACCIÓN	EXPANSIÓN
SIN PÉRDIDA DE TRANSICIÓN	0,0	0,0
TRANSICIONES GRADUALES	0,1	0,3
SECCIONES PUENTE TÍPICAS	0,3	0,5
TRANSICIONES ABRUPTAS	0,6	0,8

Fuente: (CARRILLO, 2013)

2.7.3 HEC-GeoRAS

El programa HEC-GeoRAS es una extensión para ArcGis desarrollada conjuntamente por el *Hydrologic Engineering Center (HEC) del United States Army Corps of Engineers* y el *Environmental System Research Institute (ESRI)*. Se trata de un conjunto de herramientas diseñadas para procesar datos georreferenciados vectoriales y raster que permiten mediante SIG facilitar y complementar el trabajo del modelo HEC-RAS (Melgarejo, 2013).

Este modelo crea un archivo para importar a HEC-RAS, los cuales son datos del terreno, incluyendo cauce del río, secciones transversales, bancos, sobrecanos; adiciona parámetros y características hidráulicas preliminares; adicionalmente se les da atributos como el coeficiente de rugosidad de Manning e infraestructuras, presentes en cualquier sección transversal, de forma que facilita el trabajo en HEC-RAS. Posteriormente los resultados del modelamiento pueden ser interpretados como calados y para obtener mapas de inundación y zonas de riesgo. HEC-GeoRAS 4.1.0 está diseñado para utilizarse con ArcGis o inferiores, el cual debe incorporar la

extensión 3D Analyst y Spatial Analyst para su correcto funcionamiento (Melgarejo, 2013).

En la anterior sección se habla del fundamento teórico general del modelo de análisis hidráulico unidimensional, el cual es un Sistema de Análisis de río HEC-RAS, teniendo como herramienta para adaptarse a los SIG a la herramienta HEC-geoRAS, usado como patrón para determinar zonas de inundación, para comparar los resultados con modelos celulares.

3 CAPITULO III

METODOLOGÍA DE LA CARACTERIZACIÓN MORFOMÉTRICA DE LA MICROCUEENCA DEL RÍO CRISTAL E IMPLEMENTACIÓN DE MODELOS DE INUNDACIONES

3.0 Resumen

En el presente capítulo se resume la metodología realizada en el proyecto para, en primer lugar, realizar la caracterización morfométrica de la microcuenca hidrográfica del río Cristal, la cual es una de las herramientas más importantes en el análisis hídrico, y tiene como propósito determinar índices y parámetros que permiten conocer la respuesta hidrológica en esta unidad de análisis espacial (cuenca hidrográfica) que tiene gran aplicabilidad en el análisis de los diversos componentes de una cuenca hidrográfica, analizada como un sistema, y su relación con eventos hidroclimatológicos de condiciones regulares y extremas, para establecer el comportamiento general de la red de drenaje y la evolución topográfica e hipsométrica asociada a la morfodinámica, que nos ayude a entender el comportamiento del río; en segundo lugar, se describe, el uso de un modelo de evolución de paisaje (LEM), basado en autómatas celulares CAESAR-Lisflood, como herramienta válida para determinar zonas de inundación dinámica en la gestión de riesgos, comparando sus resultados con el modelo hidráulico HEC-RAS. El cual es usado como estándar para determinar zonas de inundaciones (Brewer, Coulthard, Davies, Macklin, & Jones, 2006).

3.1 Recopilación de información para la metodología

Tabla 3

Información recopilada

Información	Fuente
Fotografías aéreas.	FUENTE: SIGTIERRAS
Información temática: Cobertura Vegetal, Geología, Geopedología, Geomorfología.	FUENTE: IEE (Instituto Espacial Ecuatoriano)
Modelo Digital del Terreno (MDT)	FUENTE: IEE (Instituto Espacial Ecuatoriano)
Datos de estaciones hidrológicas y meteorológicas obtenidas de los anuarios publicados.	FUENTE: INAMHI

Toda la información geográfica recopilada se encontró en el sistema de coordenadas “Universal Transversal de Mercator” con proyección de coordenadas WGS84 UTM Zona 17 Sur.

3.2 Metodología de la caracterización morfométrica de la microcuenca e índices hidrológicos.

3.2.1 Delimitación de la cuenca hidrográfica

La delimitación de la cuenca es de importancia, puesto que, se determina como unidad territorial de análisis natural, siendo que en esta interactúan procesos hidrológicos. La delimitación de una cuenca hidrográfica se puede realizar a partir de fotografías aéreas, sin embargo, lo más común es utilizando los mapas topográficos (escala 1:25,000) que proporciona el Instituto Geográfico Militar (IGM) o en la actualidad de forma común es utilizar los modelos digitales de terreno (DTM).

Para delimitar la cuenca hidrográfica se utiliza el módulo *Hydrology* del Software ArcGis, procediendo de la siguiente manera:

Recordando que para delimitar una cuenca hidrográfica se procede a determinar el punto de desfogue o drenaje de la cuenca e ir dibujando el perímetro de acuerdo a la línea divisoria de aguas (previamente cargadas las curvas de nivel o relieve y la red hidrográfica).

En caso de no contar con un DTM, crear un **TIN** (Red irregular de triángulos) a partir de curvas de nivel y transformarlo en raster (de preferencia tipo GRID, formato compatible con ArcGis).

Se carga el DTM, desde al ArcToolbox se utilizan las siguientes herramientas ejecutando la siguiente secuencia:

Eliminar huecos y sumideros del raster con la herramienta **Fill**. (Ver Figura 18)

ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Hydrology > Fill

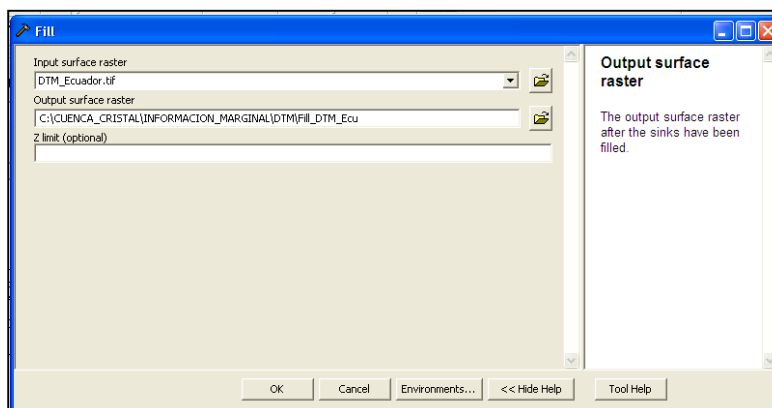


Figura 18 Herramienta fill ArcGis

Establecer la dirección del flujo hidrológico en función de la pendiente con la herramienta **Flow Direction**. (Ver Figura 19)

ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Hydrology > Flow Direction

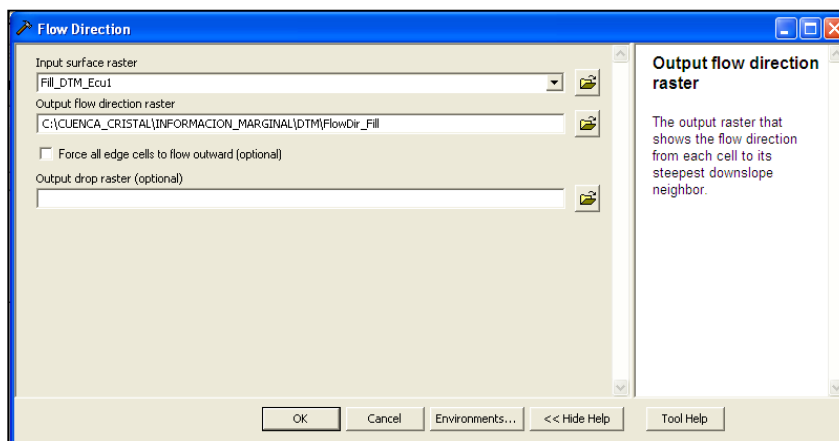


Figura 19 Herramienta Flow Direction ArcGis

Determinar la acumulación del flujo de las celdas que fluyen hacia cada celda descendiendo sobre la pendiente por medio de la herramienta **Flow Accumulation**. (Figura 20)

ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Hydrology > Flow Accumulation

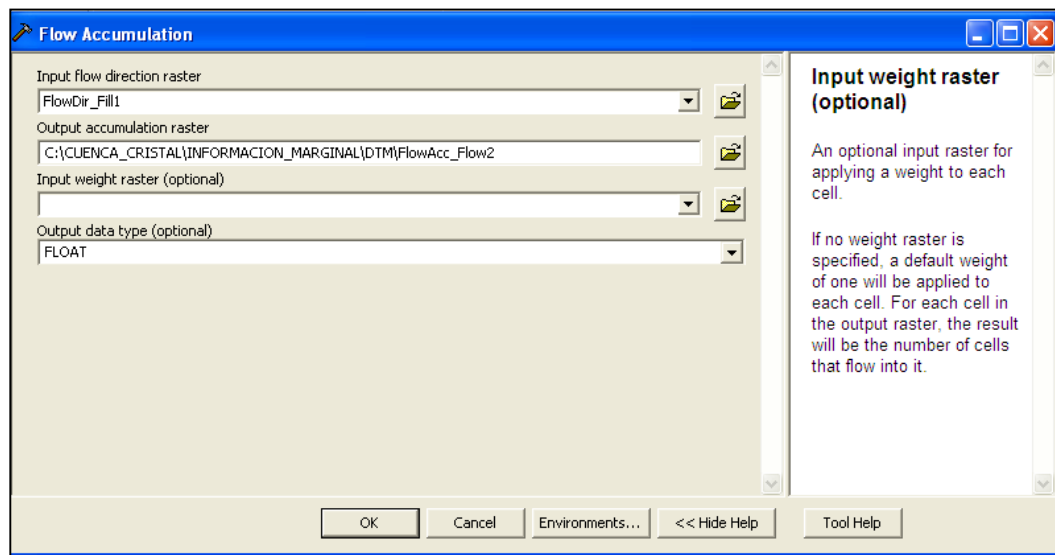


Figura 20 Herramienta Flow Accumulation ArcGis

Se obtiene un ráster como se muestra en la siguiente imagen. (Figura 21).

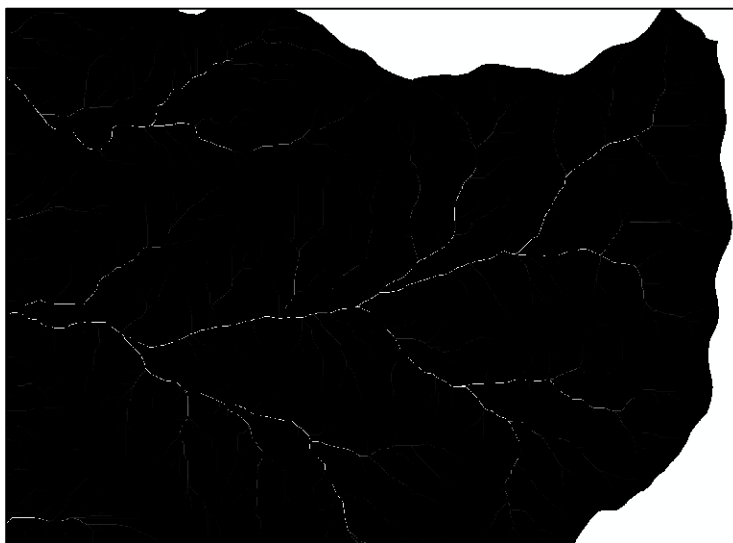


Figura 21 Obtención de raster ArcGis.

Ahora se precede a construir automáticamente la red hídrica por medio de un condicional con la herramienta **Con** (esto dependerá del tamaño del ráster en *Input true raster or constant value* colocar la unidad 1, posteriormente se señala una expresión numérica mediante el ítem *Expression* se utiliza la expresión “**value > 500**”, este valor depende del tamaño del pixel y del ráster), este condicional permite clasificar las celdas con acumulación de flujo superior a un umbral especificado por el usuario, como el raster tiene un resolución de 10m se determina el numero de 500. (Figura 22).

ArcToolbox > Spatial Analyst > Conditional > Con

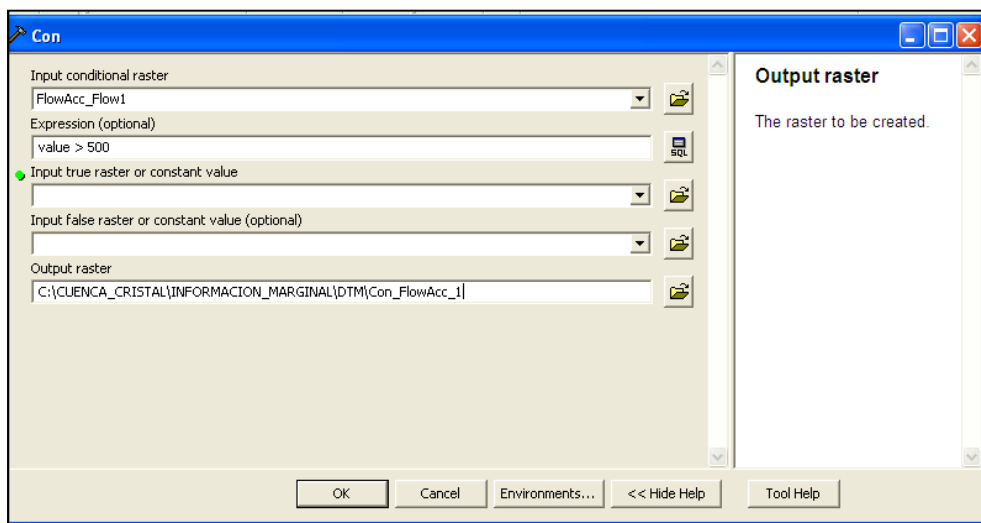


Figura 22 Herramienta Con ArcGis.

Como siguiente paso es generar un vector entre el resultado de los rásters de la de la dirección de acumulación de flujo y el condicional *con*, con ayuda de la herramienta *Stream to Feature*. (Figura 23)

ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Hydrology > Stream to Feature

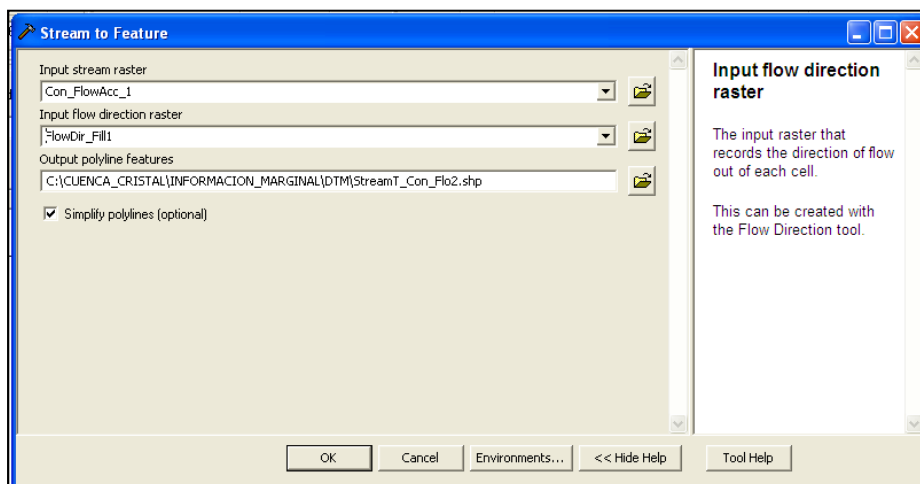


Figura 23 Herramienta Stream to Feature ArcGis.

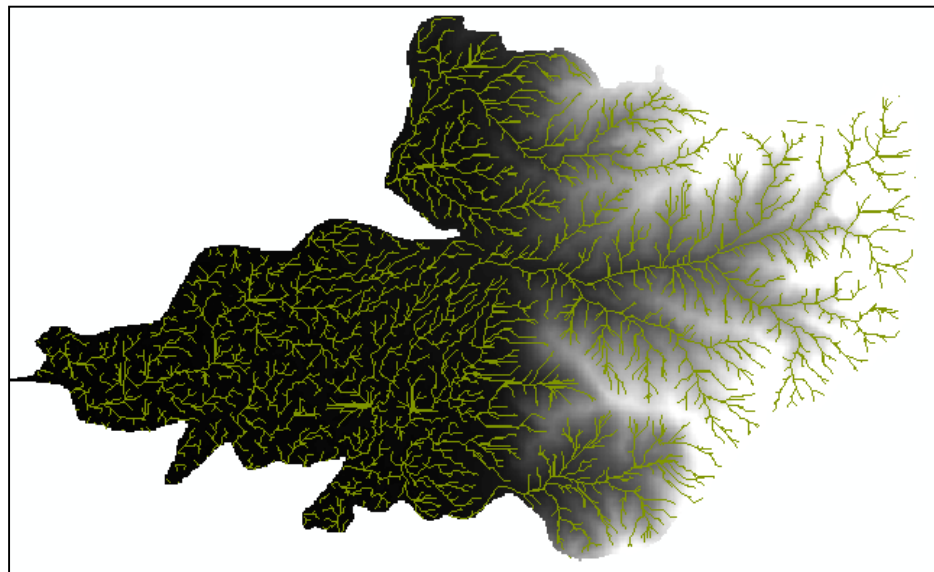


Figura 24 Generación de Vector ArcGIS.

El siguiente paso es determinar el punto de desfogue o drenaje de la microcuenca, esto se puede conseguir creando un vector tipo punto, luego interpolarlo con el modelo de elevación digital (TIN o DTM) para obtener sus coordenadas tridimensionales. (ver Figura 25)

ArcToolbox > 3D Analyst Tools > Functional Surface > Interpolate Shape

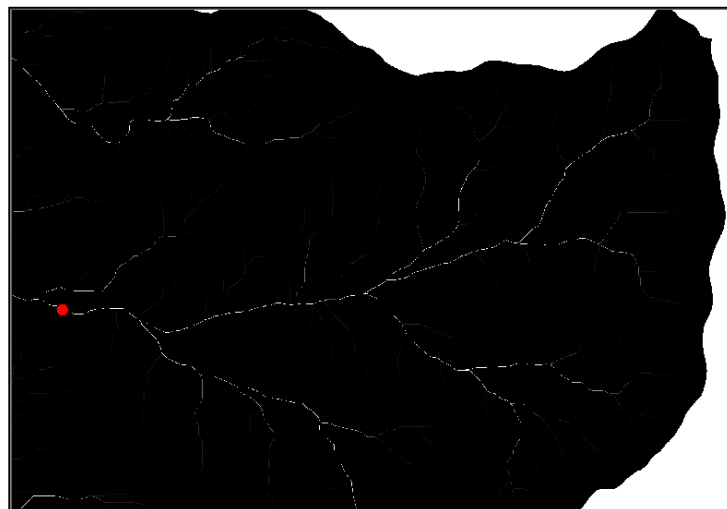


Figura 25 Punto de desfogue de la microcuenca ArcGis.

Para culminar con la herramienta **Watershed** usar el ráster creado con Flow Direction y el punto de desfogue interpolado. (ver Figura 26)

ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Hydrology > Watershed

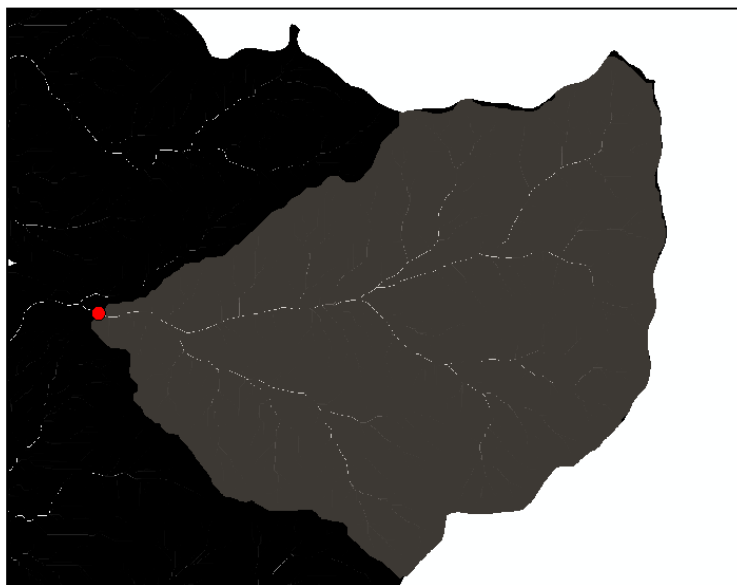


Figura 26 Punto de desfogue interpolado de la microcuenca ArcGis.

Se recorta el DTM original con base a la delimitación de la cuenca hidrográfica.
(Ver Figura 27).

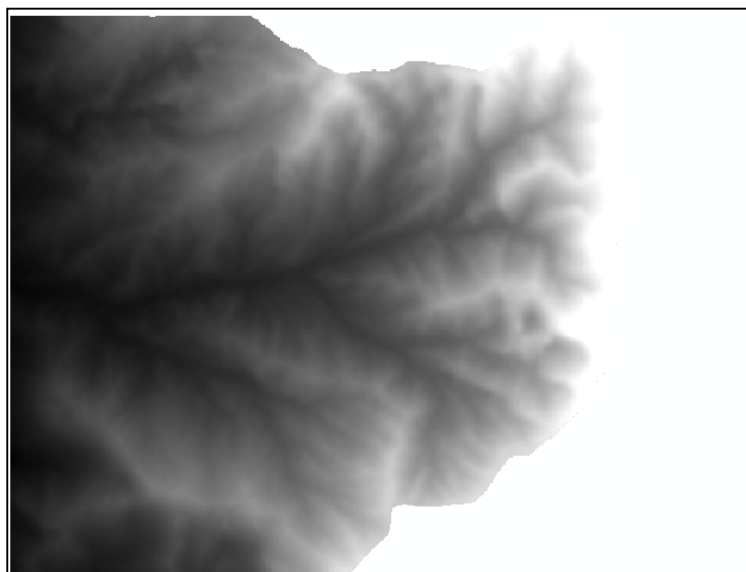


Figura 27 DTM Delimitación de la microcuenca ArcGis..

3.2.2 Forma de la cuenca

Los parámetros relacionados con las dimensiones planimétricas de la cuenca, que fueron generados mediante ArcGIS, son:

Tabla 4
Información de forma

Parámetro de forma	Valor
Área de la cuenca	169 km ²
Perímetro de la cuenca	56393 m
Longitud del cauce	11889,4 m
Longitud de la cuenca	18547,47 m
Altura Máxima	3172.45 m
Altura Mínima	241,96 m

3.2.3 Orientación de la cuenca

En el presente caso de estudio la orientación de la cuenca en Noreste-Oeste, con una orientación general de Este, Oeste, importante para determinar horas de incidencia de luz. (Figura 28).

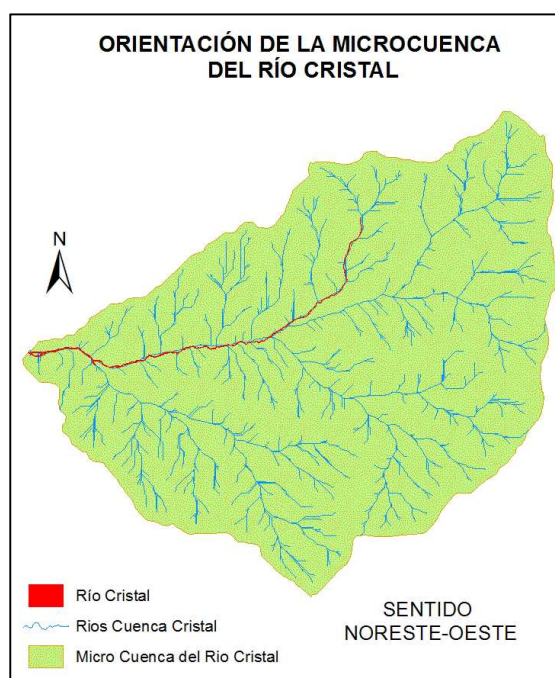


Figura 28 Orientación de la microcuenca ArcGis.

3.2.4 Elaboración de diagrama ombrotérmico

Los factores de temperatura y humedad han sido aproximadas mediante el trazo de diagramas ombrotérmicos, la estación utilizada para la realización del diagrama es la estación de BALZAPAMBA (1964-1998).

Tabla 5
Datos Generales estación BALZAPAMBA

Nombre Estación Meteorológica	BALSAPAMBA
Latitud	1° 46 ' 16 " S
Longitud	79 ° 10 ' 0 " W
Altitud	920 msnm
Código Red	M0132
Tipo	Climatológica Ordinaria
Estado Funcionamiento	Inactiva
Dpa despro	Bolivar
Dpa desca	San Miguel
Dpa despar	Balsapamba
Nom psf 2	Cuenca Río Guayas
Nom pfs 5	Cuenca Río Cristal
Cod zonas	Zona 5

Mediante los datos de la estación, se deduce lo visto en la Tabla 6 y 7, así como en la Figura 29 y 30.

Tabla 6
Precipitación Mensual de la estación BALZAPAMBA (1964-1998).

PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL (mm)													
MES	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Prom
BALZAPAMBA/ 1964-1998	231,1	290,9	300	256,9	97,4	31,7	16,2	11,9	23,6	31,7	51,1	120,7	121,9

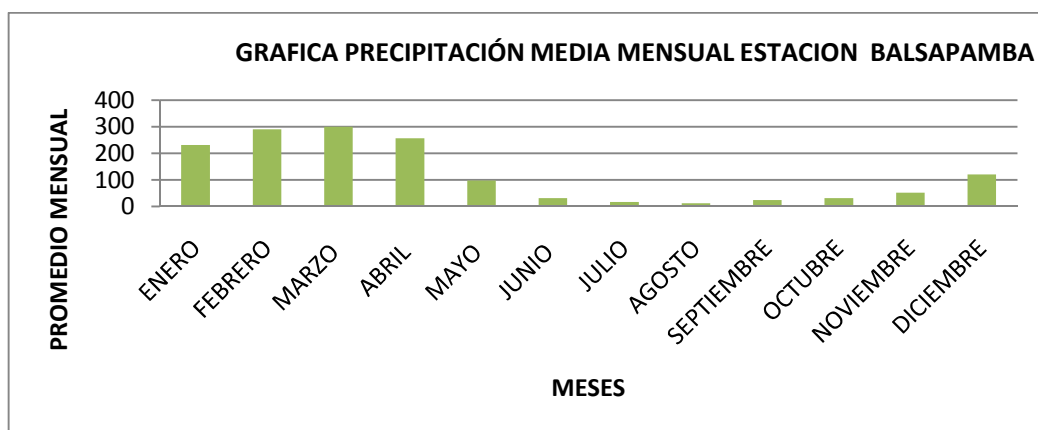


Figura 29 Precipitación Media Mensual para la estación Balsapamba (mm).

A continuación se observa la temperatura mensual obtenida mediante la estación.

Tabla 7
Temperatura Mensual de la estación BALZAPAMBA (1964-1998)

REGISTRO HISTÓRICO DE TEMPERATURA MEDIA MENSUAL (°C)													
MES	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Prom
BALZAPAMBA/ 1964-1998	20,9	22,0	21,3	22	20,8	20,4	19,8	20,3	20,5	20,5	20,7	20,7	20,7

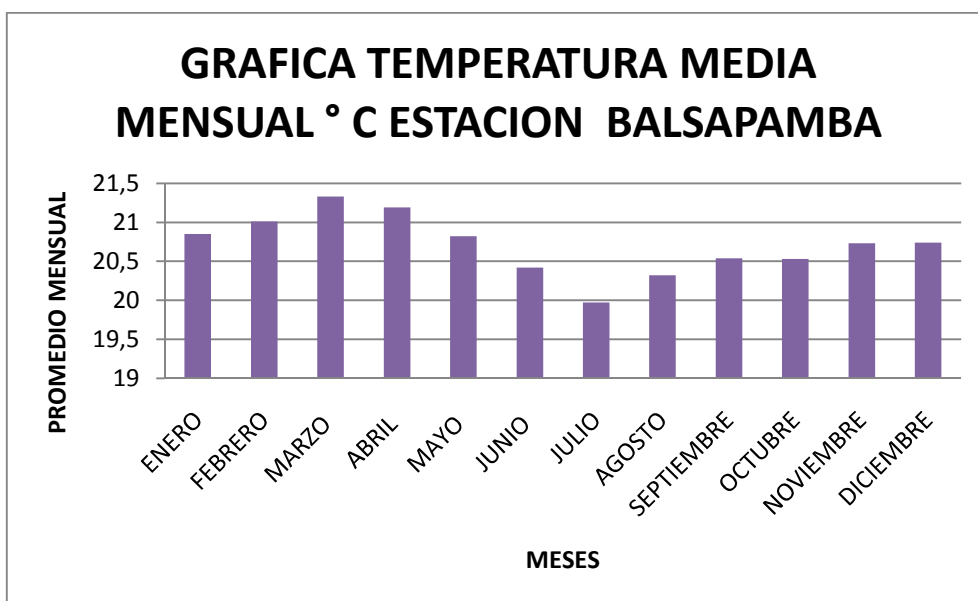


Figura 30 Temperatura Media Mensual para la estación Balsapamba (mm).

Mediante el Diagrama Ombrotermico se determina los meses a analizar, que principalmente son los meses de Enero, Febrero, Marzo, Abril y Mayo, donde se presenta la mayor cantidad de afectaciones por crecidas súbitas e inundaciones; Igualmente los meses de Junio, Julio, Agosto, Septiembre y Octubre, tienden a ser meses secos, donde las afectaciones relacionadas a crecidas e inundaciones son mínimas. Adicionalmente en el Climodiagrama de Walter y Gaussen donde se adiciona la temperatura anual al ombrotermico, se concluye que la microcuenca tiene una gran predisposición a picos y crecidas súbitas en los primeros meses del año (Ver Figura 31, Figura 32 y Figura 33).

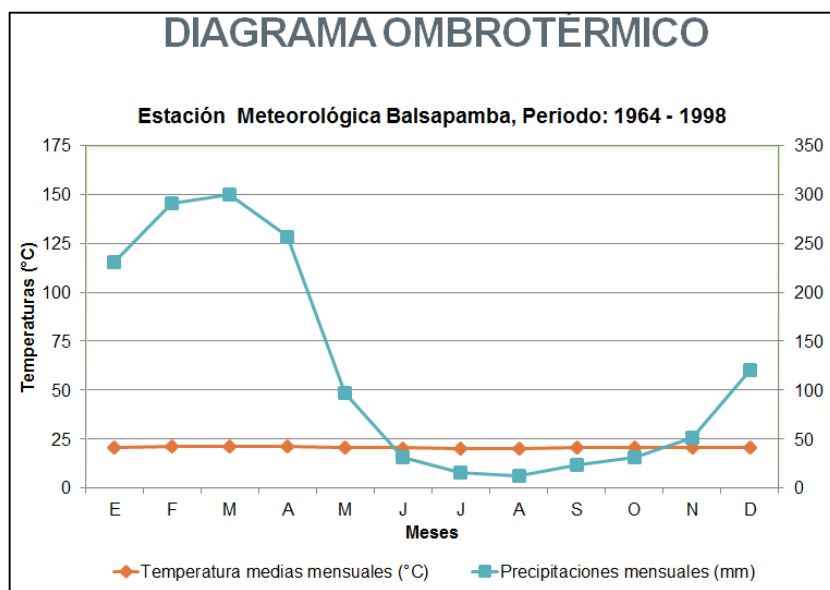


Figura 31 Diagrama Ombrotérmico de la estación Balsapamba periodo de 1964-1998.

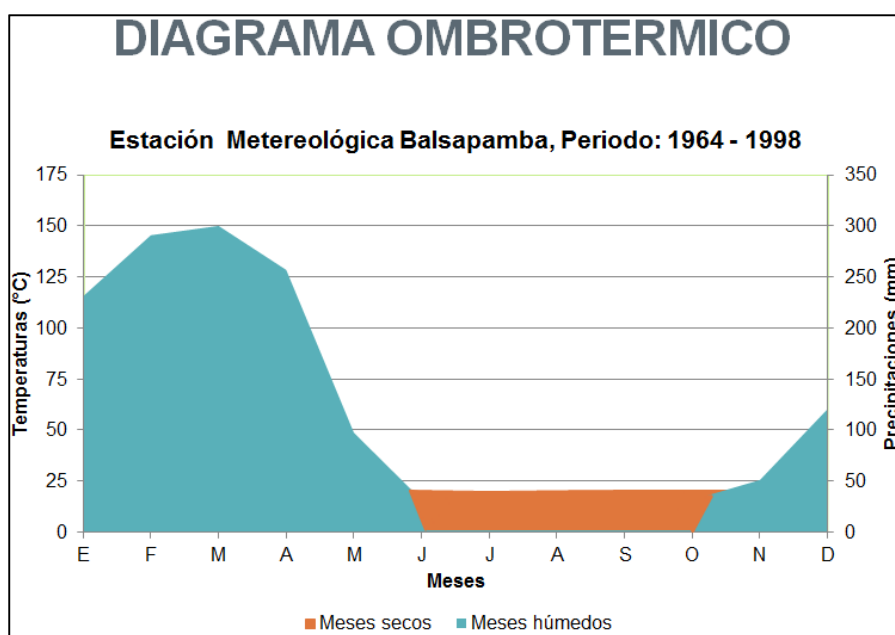


Figura 32 Diagrama Ombrotérmico de la estación Balsapamba periodo de 1964-1998.

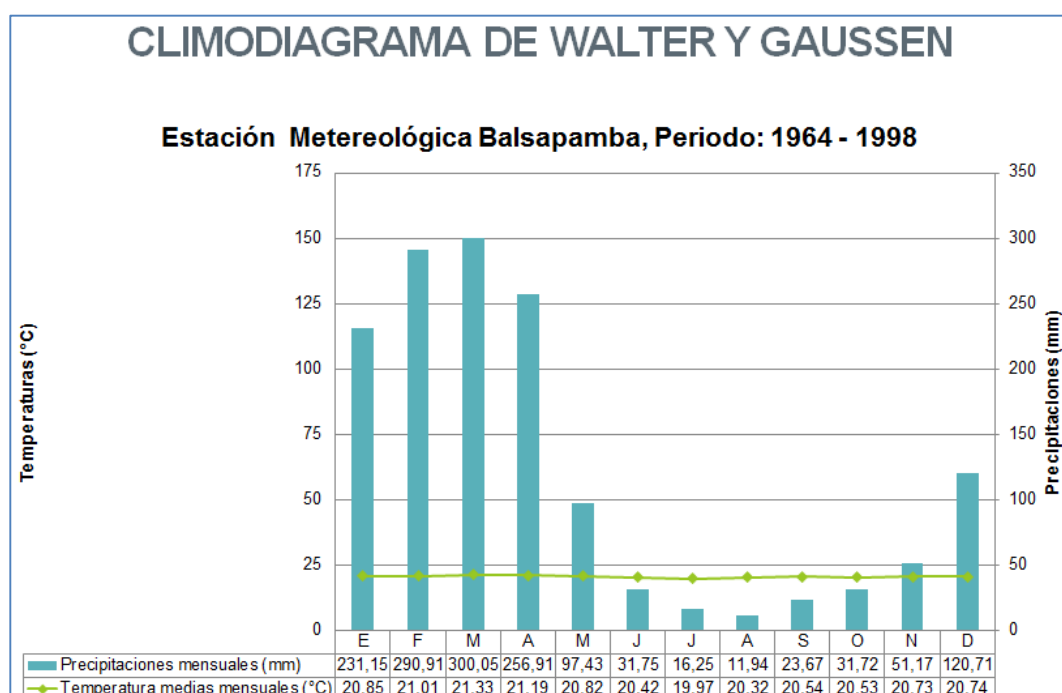


Figura 33 Climodiagrama de Walter y Gausson de la estación Balsapamba periodo de 1964-1998.

3.2.5 Determinación índice de Lang

Se calcula el Índice de Lang tomando la información hidrometeorológica de la estación Balsapamba.

Tabla 8
Datos usados para la determinación del índice de Lang.

ESTACIÓN	Precipitación anual (mm)	Temperatura anual (°C)	índice de Lang
BALZAPAMBA/ 1964-1998	1463,6	20,7	70,7

El índice de Lang obtenido para la microcuenca corresponde a la zona climática Húmeda de bosques claros. (Ver Figura 34)

I_L	Zonas climáticas
0-20	Desiertos
20-40	Zona árida
40-60	Zona húmeda de estepa y sabana
60-100	Zona húmeda de bosques claros
100-160	Zona húmeda de bosques densos
Más 160	Zona hiperhúmeda de prados y tundra

Figura 34 Tabla de índice de Lang

Fuente: Urbano Terrón, P (1995)

3.2.6 Determinación índice de aridez de Martone

Se calcula el Índice de Martone tomando la información hidrometeorológica de la estación Balzapamba.

Tabla 9

Tabla de datos usados para la determinación del índice de Aridez de Martone.

ESTACIÓN	Precipitación media anual (mm)	Temperatura anual (°C)	Índice de Martone
BALZAPA MBA/ 1964-1998	1463,6	20,7	47,6

Se puede observar que el área de estudio se determina como una zona Húmeda de bastante importancia.

Tabla 10
Índice de Aridez de Martone

La	CLIMA
>60	Perhumedo
60-30	Húmedo
30-20	Subhumedo
20-15	Semiárido
15-5	Árido
5-0	Desértico

Fuente: Urbano Terrón, P (1995)

3.2.7 Determinación del coeficiente pluviométrico de Emberger

Se calcula el Coeficiente Pluviométrico tomando la información Hidrometeorológica de la estación Balsapamba (Tabla 11) y posteriormente el tipo de clima (Tabla 12).

Tabla 11
Tabla de datos usados para la determinación del coeficiente pluviométrico de Emberger

ESTACIÓN	Precipitación total anual (mm)	Temperatura mensual(°C)	índice de Emberger
BALZAPAMBA/ 1964-1998	122	Más cálido 21,33 Más frío 19,97	217,21

El coeficiente pluviométrico de Emberger o índice de Emberger obtenido para la microcuenca corresponde a la zona climática Húmedo, reafirmando el clima estimado para la zona.

Tabla 12
Tabla coeficiente pluviométrico de Emberger

Q	CLIMA
>90	Húmedo
90-50	Subhúmedo
50-30	Semiarido
30-0	Árido

Fuente: Urbano Terrón, P (1995)

3.2.8 Cálculo del tiempo de concentración (tc)

Se usó diferentes propuestas de cálculo, como: Fórmula California Culvert Practice, la fórmula de Giandotti y la propuesta de J.R. Témez.

3.2.8.1 Tiempo de concentración California Culvert Practice

Se estima en base de algunos parámetros calculados en apartados anteriores

Tabla 13
Datos de Tc CCP

DATO	Valor
E _{max}	3172,45 m
E _{min}	241,96 m
L	18,54 Km

El tiempo de concentración CCP obtenido para la microcuenca es de 1,27 horas.

3.2.8.2 Tiempo de concentración GIANDOTTI

Se estima en base de algunos parámetros calculados en apartados anteriores

Tabla 14
Datos de Tc Giandotti

DATO	Valor
E _{max}	3172,45 m
E _{min}	241,96 m
L	18,547 Km
A	169 Km ²

El tiempo de concentración Giandotti obtenido para la microcuenca es de 1,097 horas.

3.2.8.3 Tiempo de concentración de Témez

Se estima en base de algunos parámetros calculados en apartados anteriores

Tabla 15
Tabla tiempo de concentración Témez

Pendiente(m)	Respecto a cotas	%	Tc Témez (h)
P1	Pendiente 0-5000m	5,0855	2,02
P2	Pendiente 5000-10000m	7,62	1,87
P3	Pendiente 10000-15000m	16,29	1,62
P4	Pendiente 15000-16323m	34,81	1,40
PT		11,70	1,72

El tiempo de concentración de Teméz obtenido para la microcuenca se visualiza en la Tabla N. 15, correspondientes a las diferentes pendientes en los respectivos intervalos de distancias de pendientes medias de la Microcuenca.

Estos tiempos obtenidos son relativamente breves, los cuales pueden ser interpretados como una susceptibilidad a crecidas por lluvias intensas, y acumulación rápida de agua en la cuenca baja.

3.2.9 Factor de forma de Horton (Rf)

Se estima en base de algunos parámetros calculados en apartados anteriores (Ver Tabla 16) y valores referencia (Figura 35).

Tabla 16
Datos de (Rf)

DATO	Valor
Lb	18,54 Km
A	169 Km ²

El factor de forma de Horton obtenido para la microcuenca es de 0,49053819, correspondiente a una forma de la cuenca LIGERAMENTE ENSANCHADA, con una susceptibilidad de originar crecidas con mayores.

Valores Aproximados	Forma de la Cuenca	Susceptibilidad de originar Crecidas con mayores picos
> 0,22	Muy Alargada	Baja
0,22 – 0,30	Alargada	Baja
0,31 – 0,37	Ligeramente Alargada	Medio -Baja
0,38 – 0,45	Ni alargada ni ensanchada	Media
0,46 – 0,60	Ligeramente ensanchada	Medio-Alta
0,61 – 0,80	Ensanchada	Alta
0,80 – 1,20	Muy Ensanchada	Muy Alta

Figura 35 Valores interpretativos del factor forma y susceptibilidad de crecidas.

FUENTE: Urbano Terrón, P (1995)

3.2.10 Índice de compacidad de Gravellius (Kc)

El índice de compacidad de Gravellius obtenido para la microcuenca es de 1,22.

El resultado obtenido es correspondiente a una forma de la cuenca circular, con una susceptibilidad alta de originar crecidas con mayores picos. (Ver Figura 36).

Valores Aproximados Kc	Forma de la Cuenca	Susceptibilidad de originar crecidas con mayores picos
1,00 – 1,25	Circular	Alta
1,26 – 1,50	Oval redonda a oval oblonga	Media
1,51 – 1,75	Oval oblonga a rectangular oblonga	Baja

Figura 36 Valores interpretativos del factor forma y susceptibilidad de crecidas Gravellius.

FUENTE: Urbano Terrón, P (1995)

3.2.11 Pendiente media

Se estima en base de algunos parámetros calculados en apartados anteriores

Tabla 17
Datos de Pm

DATO	Valor
Hmax	3172,45m
Hmin	241,96m
L	18,547 Km

La pendiente de la microcuenca es de 24,65%, al ser está pendiente demasiado alta en relación a toda la microcuenca del rio Cristal, se procedió a realizar un perfil de la microcuenca para dividirla por intervalos de distancia con sus respectivas cotas, para determinar la pendiente media por secciones.

Para la división de la microcuenca por tramos, se procedió a dividir esta en distancias de 5000 metros, cada una con su respectiva cota. (Ver Tabla 18)

Tabla 18
Intervalos para pendiente media

Cota(m)	Distancia (m)
261,32	0
515,6	5000
896,61	10000
1711,45	15000
2172,1952	16323

Se obtiene un perfil topográfico de la microcuenca (Figura 37), el cual fue realizado mediante un análisis SIG.

3.2.12 Perfil de la microcuenca

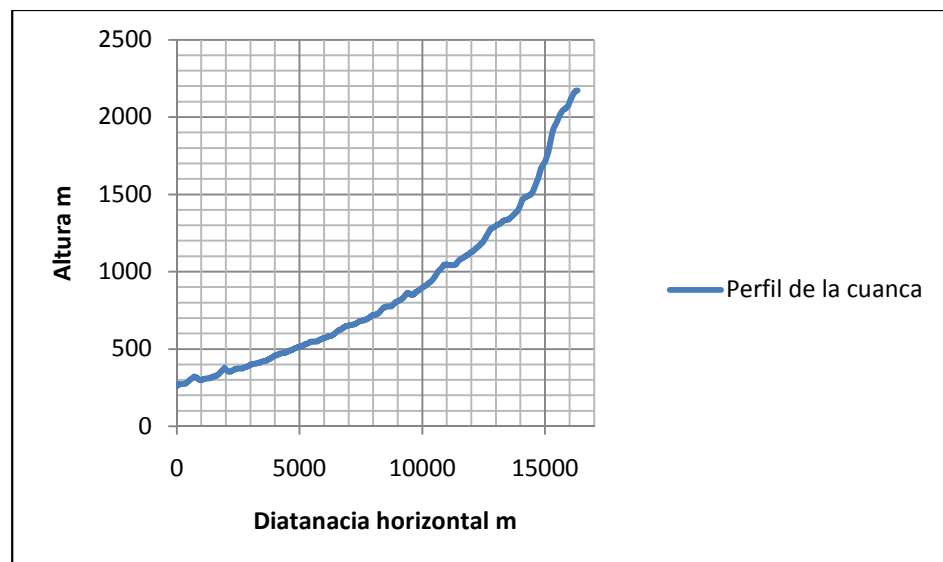


Figura 37 Perfil de la Microcuenca

Se obtienen las pendientes medias de los intervalos y la pendiente total, se detallan a continuación: (Tabla 19).

Tabla 19
Pendientes medias divididas por intervalos

Pendiente(m)		%
P1	Pendiente 0-5000m	5,085
P2	Pendiente 5000-10000m	7,620
P3	Pendiente 10000-15000m	16,296
P4	Pendiente 15000-16323m	34,816
PT		11,706

Dando como resultado que todos los intervalos excepto el tramo de 0-5000 tienen pendientes muy altas y pueden generar altas velocidades, que inducen erosión y acumulación en la cuenca baja.

3.2.13 Curva hipsométrica

La curva hipsométrica se construye llevando al eje de las abscisas los valores de la superficie drenada proyectada en km² o en porcentaje, obtenida hasta un determinado nivel, el cual se lleva al eje de las ordenadas, generalmente en metros. Los dos extremos de la curva tienen variaciones abruptas.

Luego de realizar una zonificación y clasificación por intervalos de pendientes, y el cálculo de áreas se obtuvo la siguiente tabla y gráfico: (Ver Tabla 20 y figura 38).

Tabla 20
Zonificación y clasificación por intervalos de pendientes.

Intervalo de cota					
Min	Max	Cota media (m)	Área parcial (m ²)	Área acumulada (m ²)	%de área
2854,00	3172,45	3013,23	344782,00	344782,00	0,20
2537,00	2853,00	2695,00	8272418,00	8617200,00	5,11
2220,00	2536,00	2378,00	19104998,00	27722198,00	16,44
1903,00	2219,00	2061,00	27477223,00	55199421,00	32,73
1586,00	1902,00	1744,00	32528016,00	87727437,00	52,01
1269,00	1585,00	1427,00	28663153,00	116390590,00	69,01
952,00	1268,00	1110,00	25202404,00	141592994,00	83,95
635,00	951,00	793,00	15276098,00	156869092,00	93,01
318,00	634,00	476,00	8336794,00	165205886,00	97,95
241,96	317,00	279,48	3456019,00	168661905,00	100,00

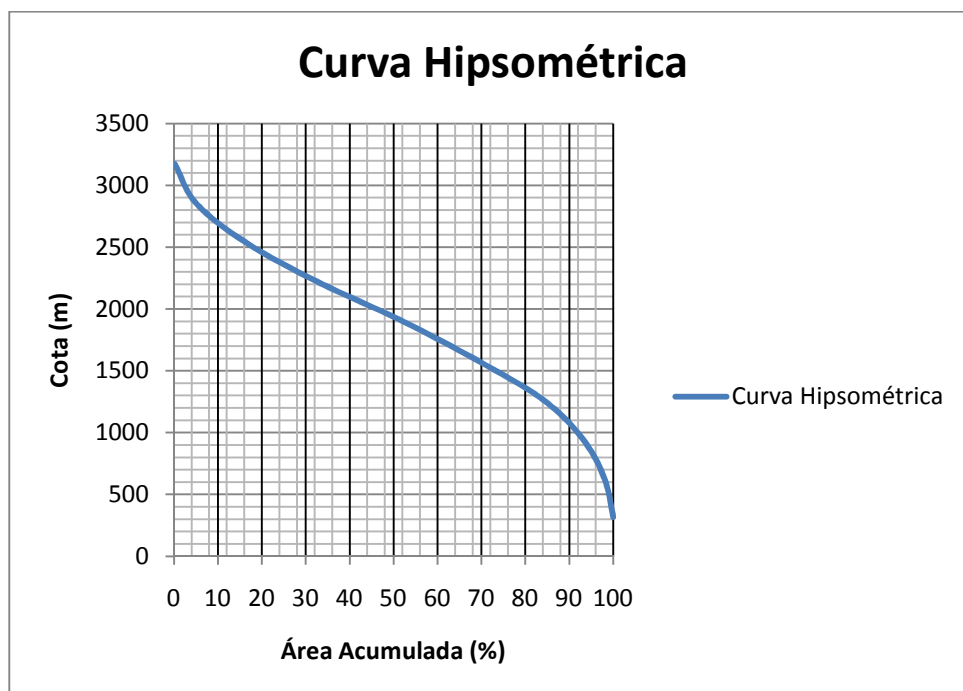


Figura 38 Curva hipsométrica de la microcuenca del Río Cristal.

Altura Media (Hm) es la ordenada media de la curva hipsométrica:

Altura media	1745
---------------------	-------------

Altura Promedio (H50); altura para la cual el 50% del área de la cuenca se encuentra por debajo de la misma

Altura Promedio (H50)	1920
----------------------------------	-------------

3.2.13.1 Fases de una Cuenca

Se convierte la curva hipsométrica en función adimensional usando en lugar de valores totales en los ejes, valores relativos: dividiendo la altura y el área por sus respectivos valores máximos. (Figura 39).

Si se compara la curva de la Figura 39 con la Figura 410 representa las fases de la microcuenca de Río Cristal se encontraría entre la fase A una cuenca con un gran potencial erosivo y fase B de Madurez, la cual sería una cuenca en equilibrio.

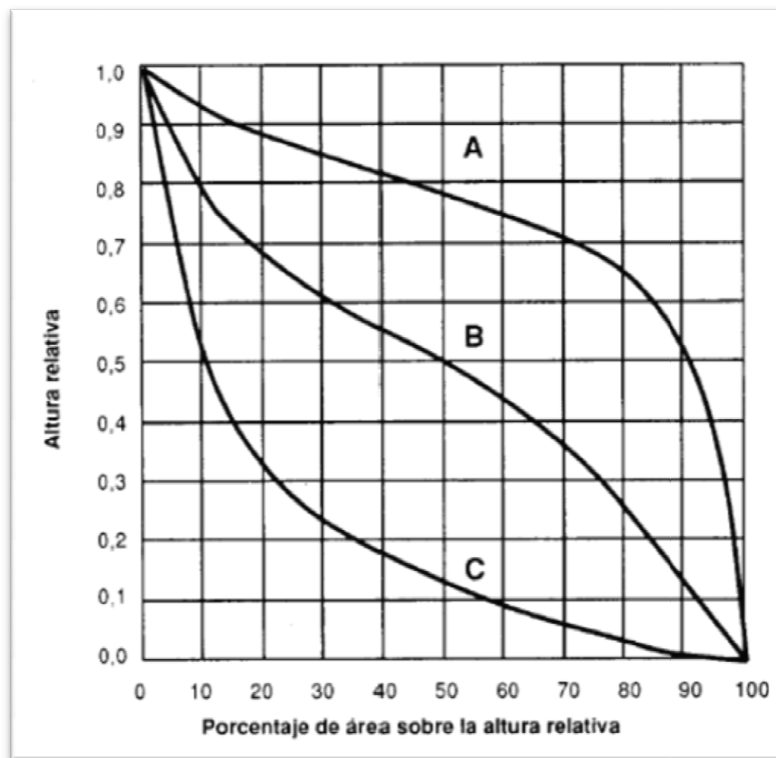


Figura 39 Curvas Hipsométricas características.

Fuente: Oñate. 2010

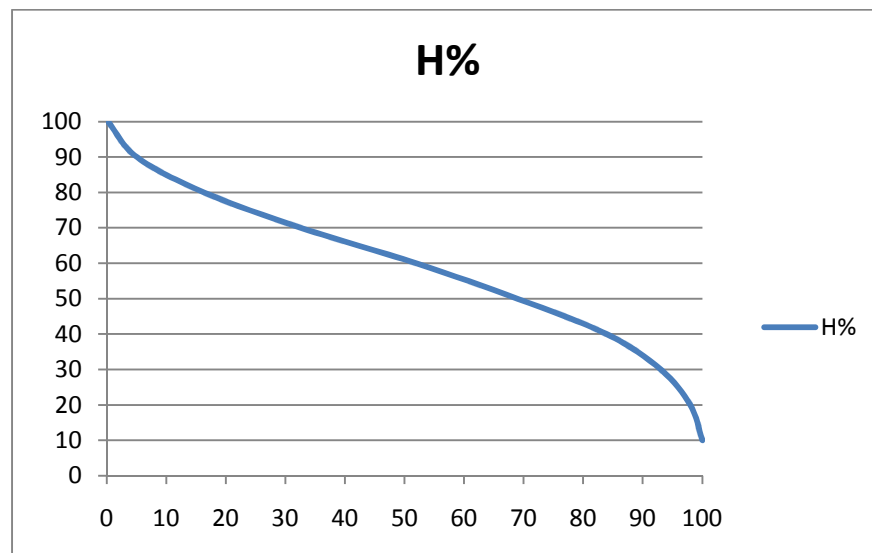


Figura 40 Curva hipsométrica de la microcuenca del río Cristal

3.2.14 Etapas de un río

Se dividió al río en varios tramos y se determinó la pendiente correspondiente a cada tramo, con el fin de analizar detalladamente las características del cauce del río, también se obtuvo la pendiente media, como se indica en la tabla a continuación:

Tabla 21
Intervalos de Pendientes

Pendiente (m)		Porcentaje (%)
P₁	Pendiente 0-5000m	5,08557615
P₂	Pendiente 5000-10000m	7,62017885
P₃	Pendiente 10000-15000m	16,2967673
P₄	Pendiente 15000-16323m	34,8160059
P_{Media}		11,7066179

Una vez determinadas las pendientes de cada tramo, se elaboró un perfil longitudinal del río donde se analizan las diferentes etapas que presenta el Río Cristal a lo largo de su cauce, como se puede apreciar en el siguiente gráfico:

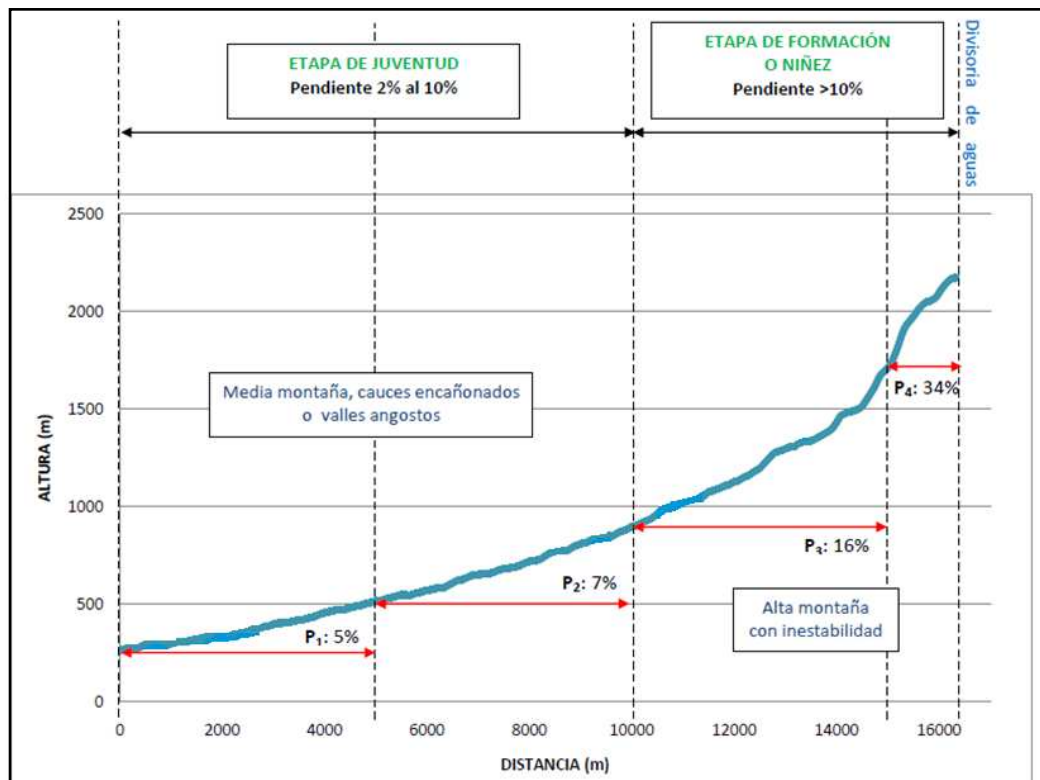


Figura 41 Diferentes etapas del Río Cristal.

Analizando las pendientes y etapas a lo largo del cauce del Río Cristal podemos apreciar que:

La P_1 (5,08%) y P_2 (7,62%) corresponden a una **etapa de juventud** (media montaña, cauces encañonados o valles angostos). En esta etapa la erosión vertical del Río Cristal va formando el valle, que es la zona excavada por la corriente. El valle comprende no sólo la zona longitudinal por donde se prolonga el cauce, sino también las laderas que lo separan de las tierras altas inmediatas. Los valles del Río Cristal en esta etapa tienen una forma de V muy estrecha porque la erosión no ha removido todavía una gran cantidad de rocas.

La P_3 (16,29%) y P_4 (34,81%) corresponden a una **etapa de formación o niñez** (alta montaña con inestabilidad). En esta etapa el Río Cristal se encuentra en proceso de formación, donde aparece primero un pequeño cauce, y a medida en que se van haciendo contribuciones de otras fuentes y nacimientos de agua en la montaña, se

forma el **cauce principal** que, con la suma de todos los aportes, resulta una formación concreta y definida para el nacimiento del Río Cristal.

En esta etapa la erosión es más activa en el fondo del cauce y se va intensificando según aumenta el caudal de las aguas.

Si tomamos en cuenta solo la P_{Media} (11,7%), la etapa del río correspondería a la etapa de **formación o niñez** (alta montaña con inestabilidad).

3.2.15 Red de drenaje

3.2.15.1 Calculo del orden del río

Se realiza la jerarquización de la microcuenca del río Cristal mediante las herramientas hidrológicas de ArcGIS utilizando la metodología de Strahler. Se obtuvo el orden de la cuenca y su jerarquización, a continuación se muestra los resultados obtenidos:

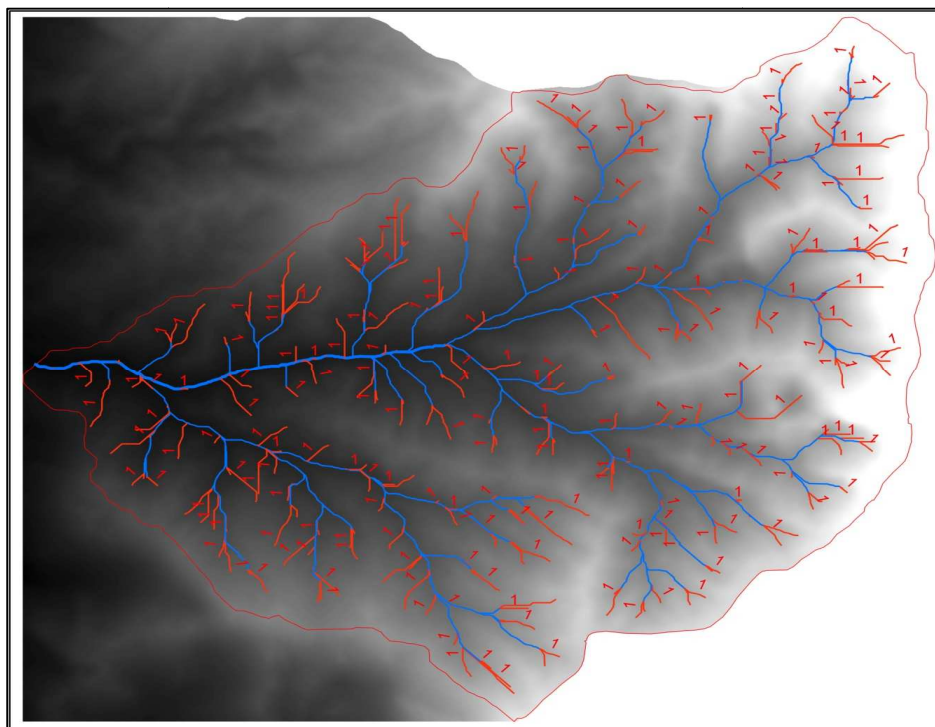


Figura 42 Orden 1 de la Jerarquización de la red de drenaje.

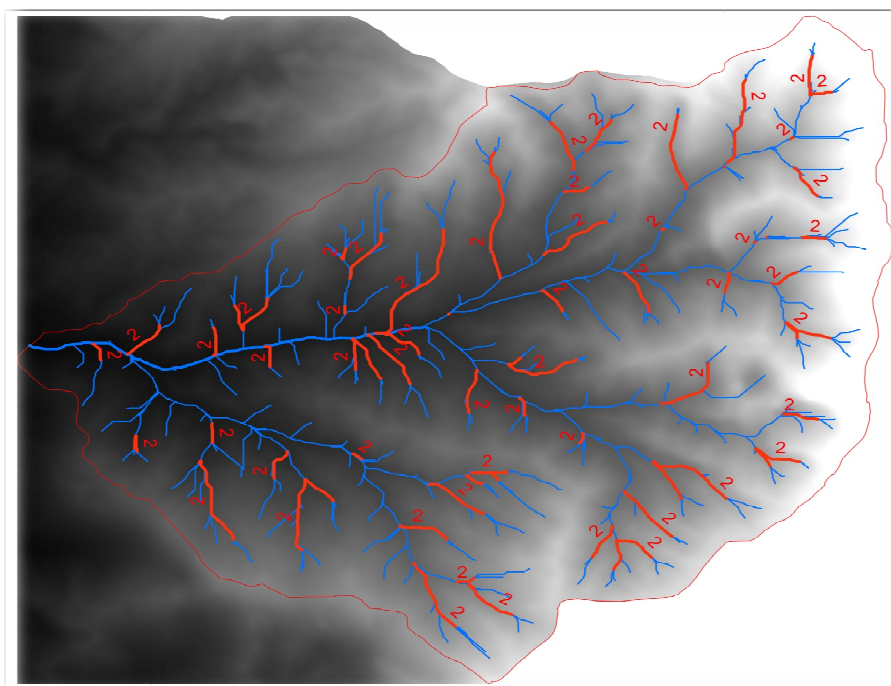


Figura 43 Orden 2 de la Jerarquización de la red de drenaje

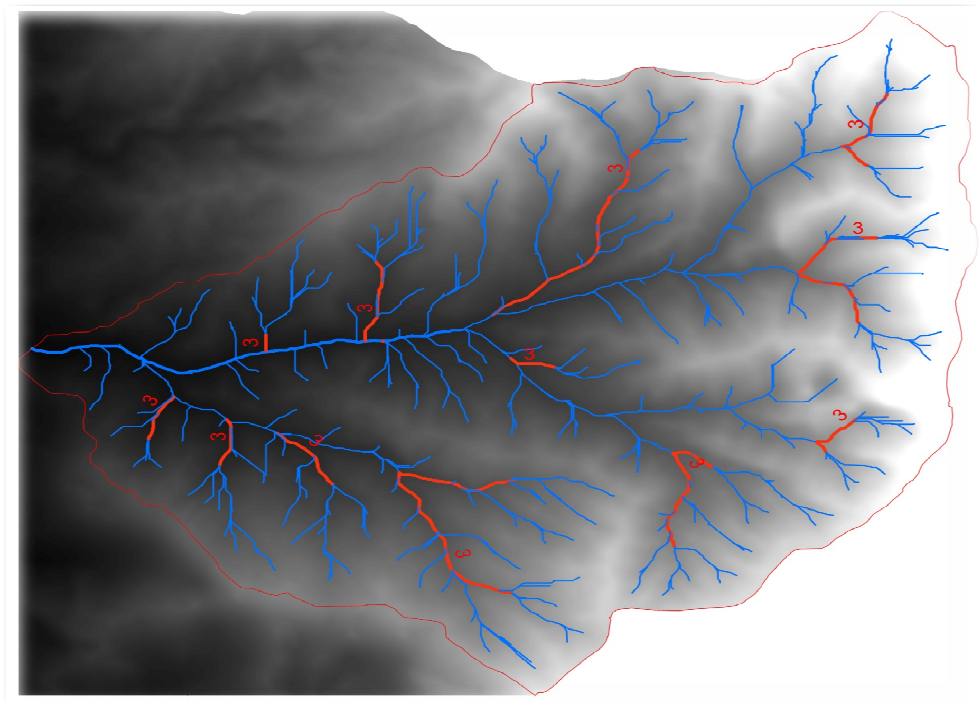


Figura 44: Orden 3 de la Jerarquización de la red de drenaje.

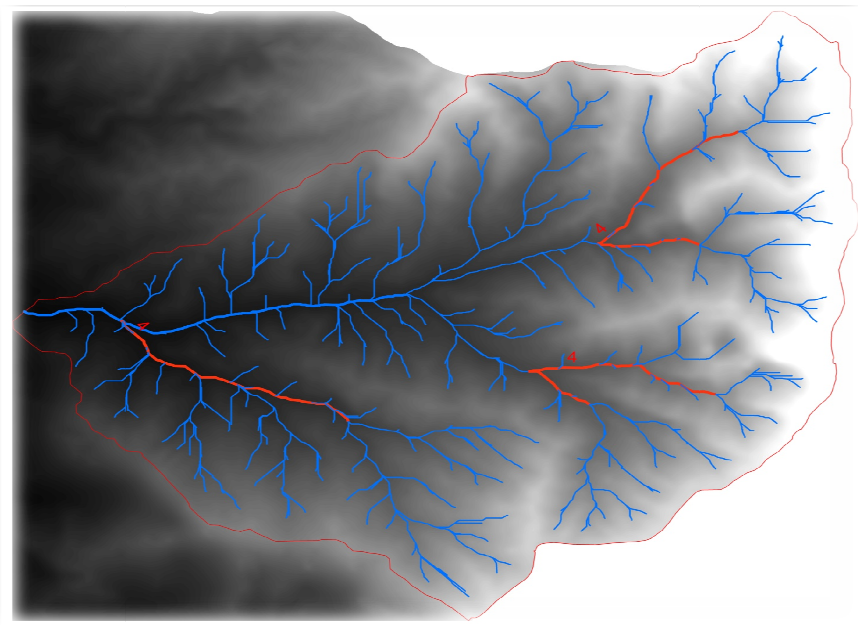


Figura 45: Orden 4 de la Jerarquización de la red de drenaje

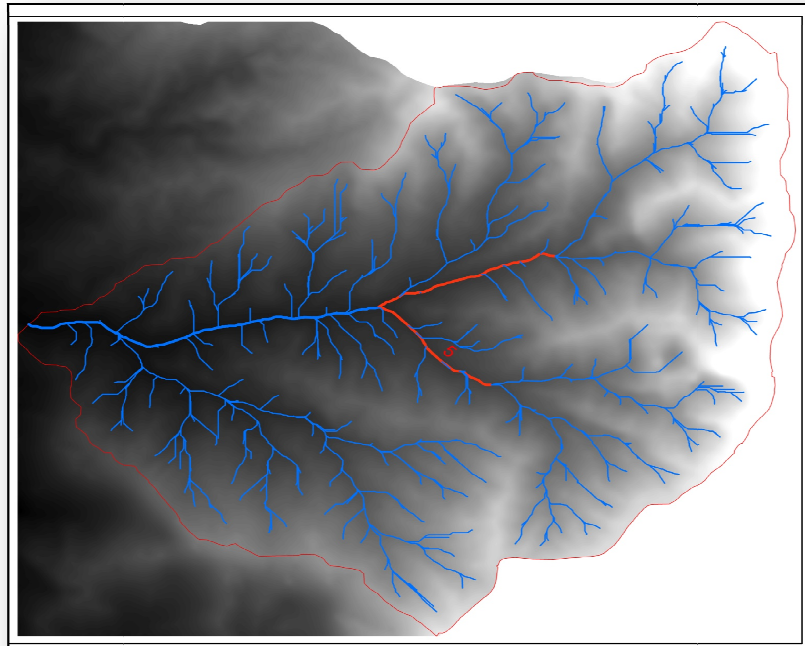


Figura 46 Orden 5 de la Jerarquización de la red de drenaje.

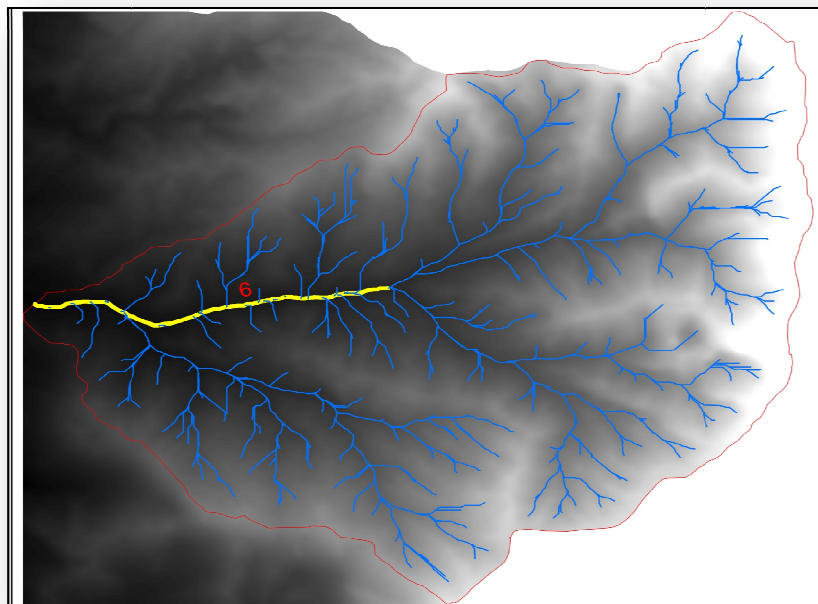


Figura 47 Orden 6 de la Jerarquización de la red de drenaje.

Se determina que la microcuenca del río Cristal tiene 6 niveles de jerarquía y es de orden 6, ya que su cauce principal es de orden 6

3.2.16 Patrón de drenaje

En el caso de la microcuenca del río Cristal se da que tiene un patrón dendrítico como se puede observar en la siguiente figura.

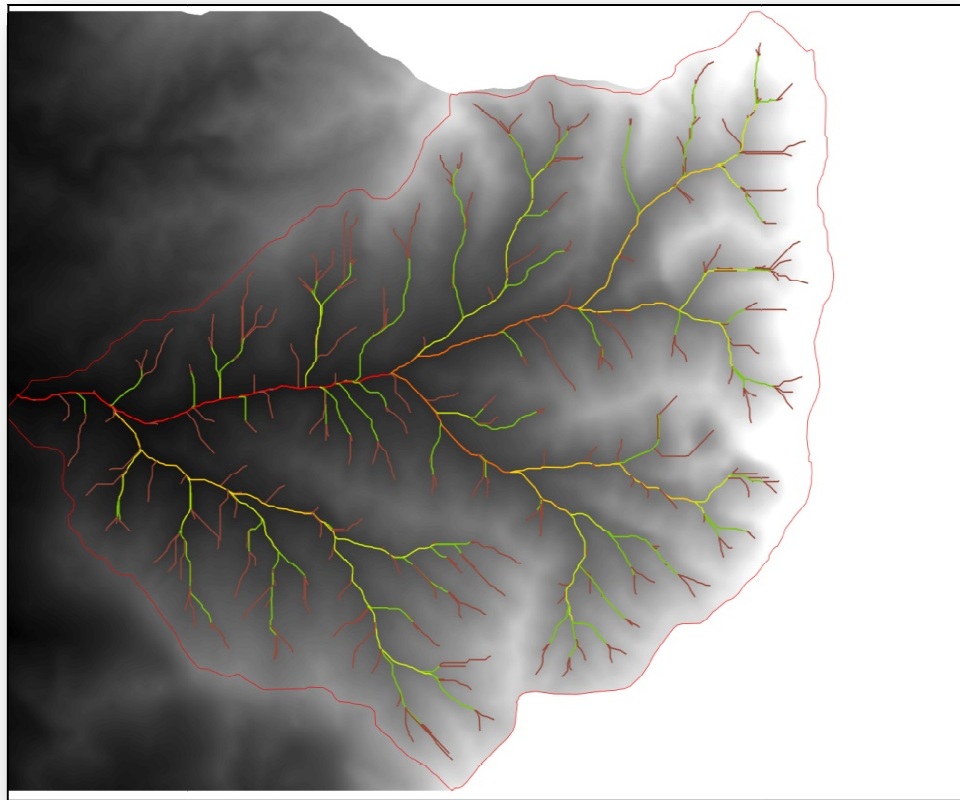


Figura 48 Patrones de drenaje Dendrítico de la microcuenca del río Cristal.

PATRÓN DE DRENAJE DENDRÍTICAS

Sistemas de drenaje dendríticos (del griego δένδριτης , dendritas , "de o perteneciente a un árbol") son la forma más común de sistema de drenaje. En un sistema dendrítico, hay muchas corrientes que contribuyen (análogas a las ramas de un árbol), que luego se unen entre sí en los afluentes del río principal (las ramas y el tronco del árbol, respectivamente). Desarrollan donde el cauce del río sigue la pendiente del terreno. Sistemas dendríticos forman en los valles en forma de V; como resultado, los tipos de roca ha de ser impermeable y no porosa (Lambert, 1998).

Se forman en áreas en las que interactúan algunos de los siguientes factores:

- Litotipos de baja permeabilidad
- Pluviosidad media
- Caudales bajos
- Baja cobertura vegetal
- Zonas de inicio de ladera
- Pendientes moderadas
- Laderas bajas
- Rocas de resistencia uniforme
- Zonas litológicamente muy alteradas.

En la microcuenca del río Cristal los parámetros que coinciden en la descripción general son:

- Zonas litológicamente muy alteradas.
- Zonas de inicio de ladera o de transición.
- Zonas con una gran acción erosiva y de depósito.

3.2.17 Drenaje de la cuenca

Es la mayor o menor capacidad que tiene una cuenca para evacuar las aguas que provenientes de la precipitación quedan sobre la superficie de la tierra.

3.2.17.1 Densidad de drenaje (Dd):

A continuación se determina la densidad de drenaje de la microcuenca del río Cristal.

Tabla 22
Datos y resultados de la determinación de Densidad de Drenaje

Área (Km²)	168,7493757
longitud total(Km)	269,8236
Densidad de Drenaje	1,59896084

Se determina el valor de densidad de drenaje que aproximadamente es 1,6, lo cual determina que la microcuenca del río Cristal tiene un buen drenaje, como se puede observar con la siguiente Figura.

CARACT. CUENCA	Dd
REGULAR DRENAJE	0 a 1
NORMAL DRENAJE	1 a 1.5
BUEN DRENAJE	> 1.5

Figura 49 Densidad de drenaje

Fuente: (Oñate, 2010).

Esta característica denota una capacidad de erosionabilidad alta, un área bien drenada y una susceptibilidad a la deposición en la cuenca baja.

3.3 Modelamiento de zonas de inundación con HEC-RAS y Hec-geoRAS

3.3.1 Información y datos

Análisis hidrológico para obtención de caudales máximos en diferentes tiempos de retorno.

Habiendo revisado las estaciones hidrométricas de la zona y no encontrar alguna con un historial de caudales dentro de la microcuenca del Río Cristal, se decide usar un coeficiente de transposición de caudales entre dos microcuencas, se usó el calculado en Bòsquez, Paredes, Vinueza, & Saavedra (2009), donde se deduce que la cuenca más conveniente para realizar el análisis hidrológico de transposición es la de Echeandía en Echeandía; principalmente porque el comportamiento estacional de la microcuenca del proyecto Echeandía es muy similar al de la microcuenca del proyecto Balsapamba (Río Cristal) como se puede observar en la siguiente (Ver figura 50).

Para obtener un historial de caudales en cada punto de captación se utiliza un coeficiente de transposición que se haya calculado en función de la Precipitación Media Ponderada y del área de drenaje. Para transponer los caudales máximos necesarios para el análisis de crecidas se utiliza un coeficiente de transposición calculado solamente en base a la relación de áreas de las cuencas de drenaje, ya que los máximos caudales no dependen de la Precipitación Media Ponderada. En la tabla 26 se presentan los coeficientes de transposición calculados en Bòsquez et al.(2009).

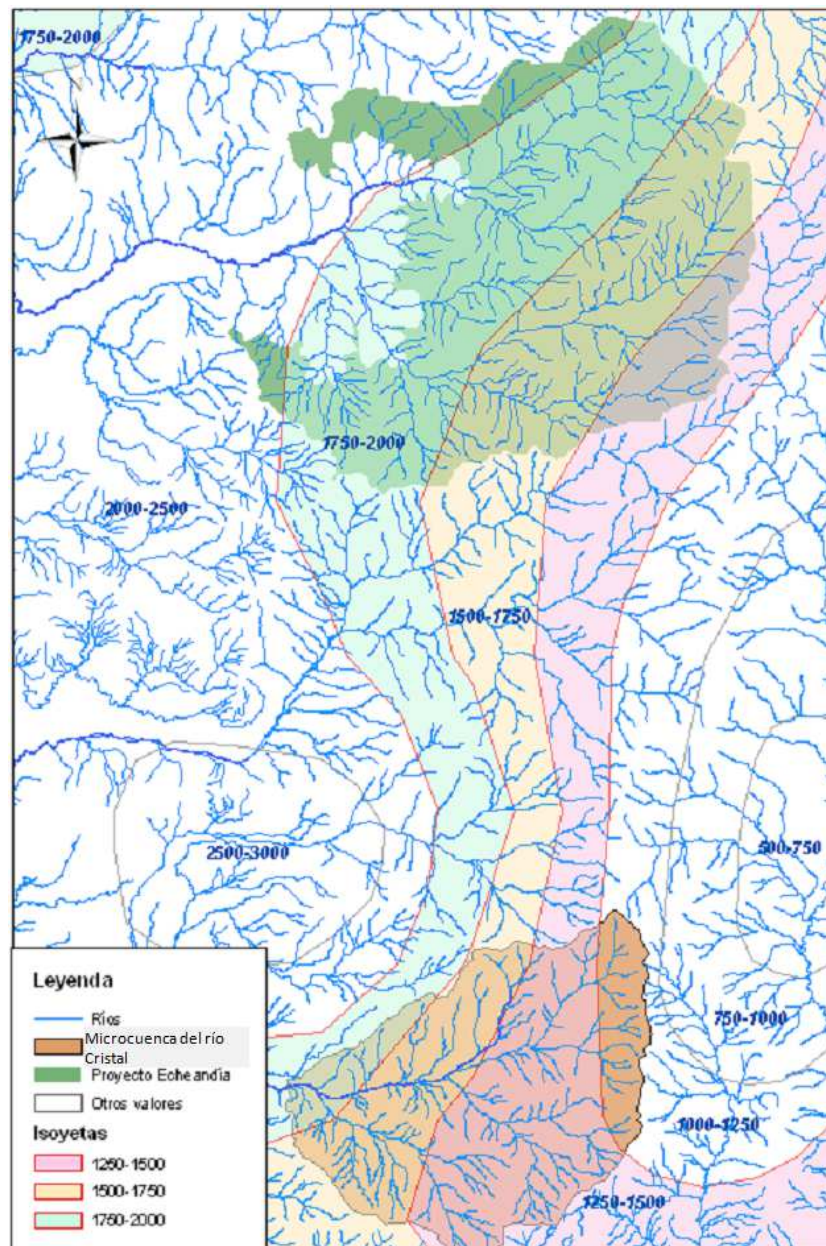


Figura 50 Isoyetas que atraviesan los ríos Soloma (Proyecto Echeandía) y Cristal (Proyecto Balsapamba).

Fuente: (Bòsquez et al., 2009).

Tabla 23
Coefficientes de transposición Echeandía – Río Cristal

	Ech320- Ech320	Ech320- Cristal_bajo	Ech320- Cristal_medio	Ech320- Cristal_alto
Sin incluir PMP	1	1 0.4643	0.4516	0.2635
Incluyend o PMP	1	0.1716	0.0513	0.1612

Fuente: Adaptado de Bòsquez et al., (2009).

3.3.2 Análisis de Crecidas

Al no contar con un historial de los caudales anuales máximos para el Río Cristal, se ha optado por transponer estos valores de la estación hidrometeorológica de Echeandía. En el presente proyecto se ha utilizado el método estadístico de Gumbel Tipo I para la determinación del máximo caudal esperado dentro de un período de retorno de 5 a 1000, cuyos cálculos y resultado son los que se muestra en el siguiente apartado.

3.3.2.1 Distribución de Gumbel aplicado al análisis de crecidas para el río Cristal

La distribución de Gumbel es la distribución estadística más utilizada en la actualidad para el cálculo de la precipitación para un periodo de retorno escogido (García, 2013).

En la siguiente tabla se describen los parámetros utilizados para las variables \bar{y}_N y S_N según el N:

Tabla 24

Coeficientes de las variables \bar{y}_N y S_N

N	Yn	Sn	N	Yn	Sn	N	Yn	Sn
1	0,36651	0,00000	35	0,54034	1,12847	69	0,55453	1,18440
2	0,40434	0,49838	36	0,54105	1,13126	70	0,55477	1,18535
3	0,42859	0,64348	37	0,54174	1,13394	71	0,55500	1,18629
4	0,44580	0,73147	38	0,54239	1,13650	72	0,55523	1,18720
5	0,45879	0,79278	39	0,54302	1,13896	73	0,55546	1,18809
6	0,46903	0,83877	40	0,54362	1,14131	74	0,55567	1,18896
7	0,47735	0,87493	41	0,54420	1,14358	75	0,55589	1,18982
8	0,48428	0,90432	42	0,54475	1,14576	76	0,55610	1,19065
9	0,49015	0,92882	43	0,54529	1,14787	77	0,55630	1,19147
10	0,49521	0,94963	44	0,54580	1,14989	78	0,55650	1,19227
11	0,49961	0,96758	45	0,54630	1,15184	79	0,55669	1,19306
12	0,50350	0,98327	46	0,54678	1,15373	80	0,55689	1,19382
13	0,50695	0,99713	47	0,54724	1,15555	81	0,55707	1,19458
14	0,51004	1,00948	48	0,54769	1,15731	82	0,55726	1,19531
15	0,51284	1,02057	49	0,54812	1,15901	83	0,55744	1,19604
16	0,51537	1,03060	50	0,54854	1,16066	84	0,55761	1,19675
17	0,51768	1,03973	51	0,54895	1,16226	85	0,55779	1,19744
18	0,51980	1,04808	52	0,54934	1,16380	86	0,55796	1,19813
19	0,52175	1,05575	53	0,54972	1,16530	87	0,55812	1,19880
20	0,52355	1,06282	54	0,55009	1,16676	88	0,55828	1,19945
21	0,52522	1,06938	55	0,55044	1,16817	89	0,55844	1,20010
22	0,52678	1,07547	56	0,55079	1,16955	90	0,55860	1,20073
23	0,52823	1,08115	57	0,55113	1,17088	91	0,55876	1,20135

sigue \Rightarrow

N	Yn	Sn	N	Yn	Sn	N	Yn	Sn
24	0,52959	1,08646	58	0,55146	1,17218	92	0,55891	1,20196
25	0,53086	1,09145	59	0,55177	1,17344	93	0,55905	1,20256
26	0,53206	1,09613	60	0,55208	1,17467	94	0,55920	1,20315
27	0,53319	1,10054	61	0,55238	1,17586	95	0,55934	1,20373
28	0,53426	1,10470	62	0,55268	1,17702	96	0,55948	1,20430
29	0,53527	1,10864	63	0,55296	1,17816	97	0,55962	1,20486
30	0,53622	1,11237	64	0,55324	1,17926	98	0,55976	1,20541
31	0,53713	1,11592	65	0,55351	1,18034	99	0,55989	1,20596
32	0,53799	1,11929	66	0,55378	1,18139	100	0,56002	1,20649
33	0,53881	1,12249	67	0,55403	1,18242	101	0,56015	1,20701
34	0,53959	1,12555	68	0,55429	1,18342			

Fuente: (García, 2013)

En la tabla 25 se muestran los caudales máximos registrados en la estación Echeandía y los caudales transpuestos al río Cristal, en donde se ha realizado una interpolación lineal de 6 datos (1982, 1986, 1987, 1988, 1993, 2011), para completar la serie

Tabla 25**Caudales máximos en los sitios de interés**

N	año	mes	Caudales (m³/s) Echeandia	Qi (720 msnm) Sector1	Qi (360 msnm) Sector2	Qi (200 msnm) Sector3
1	1965	Marzo	84.95	22.38	38.36	39.44
2	1966	Febrero	60.10	15.83	27.14	27.90
3	1967	Mayo	41.96	11.05	18.95	19.48
4	1968	Enero	61.75	16.27	27.89	28.67
5	1969	Febrero	21.42	5.64	9.67	9.94
6	1970	Enero	62.76	16.53	28.34	29.14
7	1971	Marzo	101.79	26.82	45.97	47.26
8	1972	Marzo	319.69	84.24	144.38	148.44
9	1973	Febrero	205.53	54.15	92.82	95.43
10	1974	Febrero	130.94	34.50	59.13	60.79
11	1975	Febrero	176.72	46.56	79.81	82.05
12	1976	Febrero	234.66	61.83	105.98	108.95
13	1977	Marzo	215.69	56.83	97.41	100.14
14	1978	Marzo	174.88	46.08	78.98	81.20
15	1979	Marzo	73.518	19.37	33.20	34.13
16	1980	Abril	236.82	62.40	106.95	109.96
17	1981	Abril	134.06	35.32	60.55	62.25
18	1982		174.87	46.08	78.98	81.19
19	1983	Mayo	215.69	56.83	97.41	100.14
20	1984	MArzo	215.69	56.83	97.41	100.14
21	1985	Febrero	88.932	23.43	40.16	41.29

sigue →

N	año	mes	Caudales (m ³ /s) Echeandia	Qi (720 msnm) Sector1	Qi (360 msnm) Sector2	Qi (200 msnm) Sector3
22	1986		44.466	11.71	20.08	20.64
23	1987		74.11	19.53	33.47	34.41
24	1988		103.77	27.34	46.86	48.18
25	1989	Enero	207.54	54.68	93.73	96.36
26	1990	Febrero	88.93	23.43	40.16	41.29
27	1991	Febrero	86.45	22.78	39.04	40.14
28	1992	Mayo	108.79	28.66	49.13	50.51
29	1993		92.288	24.31	41.68	42.85
30	1994	Enero	75.78	19.96	34.22	35.18
31	1995	Mayo	26.20	6.90	11.83	12.16
32	1996	Abril	53.54	14.10	24.18	24.85
33	1997	Mayo	129.83	34.21	58.63	60.28
34	1998	Enero	78.44	20.66	35.42	36.42
35	1999	Abril	80.66	21.25	36.43	37.45
36	2000	Febrero	82.92	21.85	37.45	38.50
37	2001	Enero	69.88	18.41	31.56	32.44
38	2002	Marzo	124.03	32.68	56.01	57.59
39	2003	Marzo	80.66	21.25	36.43	37.45
40	2004	Marzo	138.82	36.58	62.69	64.45
41	2005	Abril	107.52	28.33	48.56	49.92
42	2006	Abril	156.19	41.15	70.54	72.52
43	2007	Marzo	55.33	14.58	24.99	25.69
44	2008	Marzo	172.99	45.58	78.13	80.32

sigue →

N	año	mes	Caudales (m ³ /s) Echeandia	Qi (720 msnm) Sector1	Qi (360 msnm) Sector2	Qi (200 msnm) Sector3
45	2009	Febrero	172.99	45.58	78.13	80.32
46	2010	Febrero	190.78	50.27	86.16	88.58
47	2011		288.43	76.01	130.26	133.92
48	2012	Mayo	386.08	101.73	174.37	179.26
			Coefficiente de Transposición	0.2635	0.45163	0.4643
			CV	0.601621068	0.601621068	0.601621068

A partir de las ecuaciones y datos anteriores se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 26
Datos preliminares para realizar cálculos.

	(720 msnm) Sector1	(360 msnm) Sector2	(200 msnm) Sector3
Qm	34.63	59.37	61.04
SQ	20.8397803	35.7193246	36.7221898
YN	0.5481	0.5481	0.5481
SN	1.159	1.159	1.159

A partir de los valores estimados se puede determinar las crecidas máximas con diferentes tiempos de retorno, los cuales están ligados a una probabilidad a ocurrir en una variable cantidad de años.

Tabla 27
Máximas crecidas

TR(años)	Probabilidad (%)	Q(m ³ /s) (720 msnm) Sector1	Q(m ³ /s) (360 msnm) Sector2	Q(m ³ /s) (200 msnm) Sector3
5	20	53.72	92.081	94.66
10	10	66.18	113.44	116.62
25	4	82.66	141.68	145.66
50	2	95.12	163.04	167.62
100	1	107.58	184.40	189.58
1000	0.1	148.99	255.37	262.54

3.3.3 Coeficiente de rugosidad (n de Manning)

Para calcular el coeficiente de rugosidad de Manning, existen tablas y fotografías que muestran valores típicos para un determinado tipo de canal, así como numerosas fórmulas para expresar este coeficiente en función del diámetro de las partículas.

La metodología para establecer los coeficientes de rugosidad del río a modelar, está dada básicamente por el tipo de material, para lo cual se realizaron visitas a campo con el fin de obtener muestras de material que luego fueron procesadas en laboratorio.

3.3.3.1 Toma de muestras y ensayo en laboratorio

Para la caracterización básica del río Cristal se realizó una visita de campo, en donde se extrajeron muestras de aproximadamente 2 Kg de material sedimentario del río de los puntos accesibles a éste.

En total se recolectaron 4 muestras de sedimento en secciones representativas del río. Los puntos de donde se tomaron las muestras se indican en el siguiente mapa:

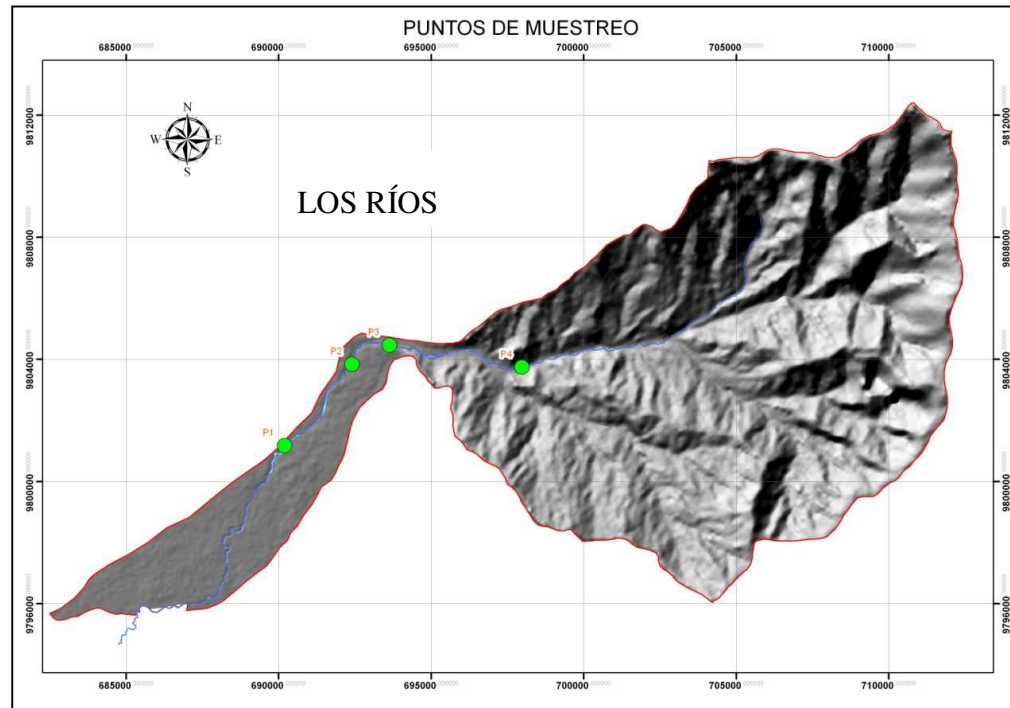


Figura 51 Mapa de ubicación de los puntos de recolección de sedimento



Figura 52 Toma de muestras en punto 1



Figura 53 Toma de muestras en punto 2

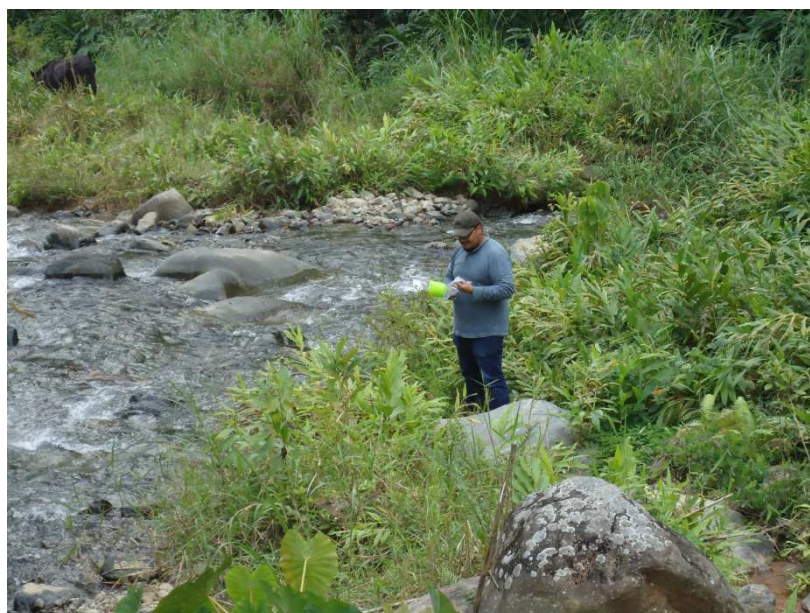


Figura 54 Toma de muestras en punto 3



Figura 55 Toma de muestras en punto 4

Para realizar el análisis granulométrico se siguió las indicaciones, materiales y equipos descritos en el Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil de Bowles (1981). A continuación se resume a breves rasgos el procedimiento:

- Del sedimento, se obtiene una muestra representativa, la cual se pesa y se anota el dato en el registro correspondiente.
- Se procede a pasar el material por las diferentes mallas (tamices), que van de mayor a menor abertura, tal y como se presentan en el registro propio para este ensayo.

El material retenido en cada malla se va pesando y anotando en la columna de peso retenido.

- Todo lo anterior se realiza hasta la malla No. 4 y con el material que pasa dicha malla se procede a obtener una porción de suelo que sea representativa, para ello habrá que pasar el material las veces necesarias por el fragmentador de muestras, hasta que se obtenga una muestra de entre 500 y 1000 grs.

- De las muestras anteriores, se toman dos porciones en bazos de aluminio de entre 100 y 200 gramos, primero se los pesa.
- Posteriormente se secan en la estufa a 105 °C por 24 horas, este procedimiento se realiza para obtener el porcentaje de humedad y posteriormente determinar el peso seco de las muestras del río, estos calculan mediante las siguientes ecuación (Bowles, 1981):

$$\%W = \frac{(PT + SH) - (PT + SS)}{(PT + SS) - PT} \quad (63)$$

Dónde:

%W es el porcentaje de humedad.

PT es el peso de la tara.

SH es el peso del suelo húmedo.

SS es el peso del suelo seco.

Recalcando que el anterior cálculo se realiza con la muestra de los bazos de aluminio. Y la ecuación de Peso Seco de la muestra original es:

$$Peso_{Seco} = \frac{Peso_{Humedo}}{1 - \left(\frac{\%W}{100}\right)} \quad (64)$$

Los resultados de este procedimiento se muestran en la Tabla 28

- Se realiza el Lavado del suelo, que consiste en agitar el suelo utilizando el alambrón con punta redondeada, haciendo figuras en forma de “ochos” durante 15 segundos.
- Se vacía el líquido a la malla No. 200, con el fin de eliminar los finos (que es el material que pasa dicha malla), posteriormente se vierte más agua al vaso y se agita de la forma antes descrita.

Tabla 28
Porcentaje de humedad (W%) y Peso Seco

	PT (g)	SH (g)	SS (g)	% W	% W _m
P1	14.4	131.82	115.64	0.13991698	0.13829854
	12.48	124.08	109.16	0.1366801	
P2	14.13	129.19	100.41	0.28662484	0.27323094
	20.01	126.79	100.64	0.25983704	
P3	13.52	125.15	105.51	0.18614349	0.18283905
	12.99	121.15	102.71	0.17953461	
P4	14.8	132.54	112.41	0.17907659	0.1770112
	14.31	124.65	106.09	0.1749458	
	P1	P2	P3	P4	
Peso Humedo (g)	612.3	392.5	436.1	775.4	
Peso seco (g)	611.454368	391.430491	435.304094	774.02988	

Fuente: Elaboración propia.

- Cuando en la malla se acumule mucho material (arena), se reintegra al vaso, vaciando agua sobre el reverso de la malla, siempre cuidando de no perder material; esto se hará cada 5 veces que se vacíe agua con finos a la malla No. 200. Esta operación se repite las veces necesarias para que el agua salga limpia o casi limpia. Luego se llenan de agua las taras donde se encuentran las muestras.
- El suelo es secado al horno o a la estufa, se deja enfriar.



Figura 56 Muestras antes de entrar al horno.



Figura 57 Muestras después de secar al horno.

Las muestra se pasan por mallas (tamices) predeterminados, para el análisis de sedimentos.



Figura 58 Tamices y fondos



Figura 59 material retenido por tamices

- Se procede a pesar el material retenido en cada malla.

- Posteriormente se realizan los cálculos de: % retenido parcial, % retenido acumulado, % que pasa; se dibuja la curva granulométrica.

Las tablas y graficas resultado se encuentran en el Anexo 2.

3.3.3.2 Estimación del n de Manning mediante el método de Cowan (Chow, 1959) complementado con método Strickler

En la Tabla 29 se presenta un resumen de los valores de coeficiente de rugosidad de Manning, obtenidos en cada punto de toma de muestras, en donde se puede observar la variación de este valor con cada uno de los métodos usados.

Tabla 29
Valores n de Manning de los puntos de toma de muestras.

Lugar de la muestra	Diámetros Característicos		Coef. De rugosidad n	
	D50	D90	Simons & Senturk, 1976	Strickler, 1948
P1	0.0033	0.015	0.015009582	0.018871169
P2	0.00078	0.0045	0.011802265	0.01544018
P3	0.00052	0.0073	0.011031049	0.016736735
P4	0.00075	0.0057	0.011725368	0.016060636

3.3.4 Desarrollo del modelo

3.3.4.1 Obtención del modelo digital de terreno para el río cristal

El Modelo Digital de Terreno “MDT” para el río Cristal fue entregado por el IEE (Instituto Espacial Ecuatoriano), el cual incluye el cauce caracterizado del río. Para el efecto se contó con información base del área de estudio en lo que se refiere a curvas de nivel, ríos, lagunas, uso de suelo, etc.

Se realizó un TIN (Triangular Irregular Network) de la microcuenca del Río Cristal mediante la extensión 3D_Analyst de ArcGIS.

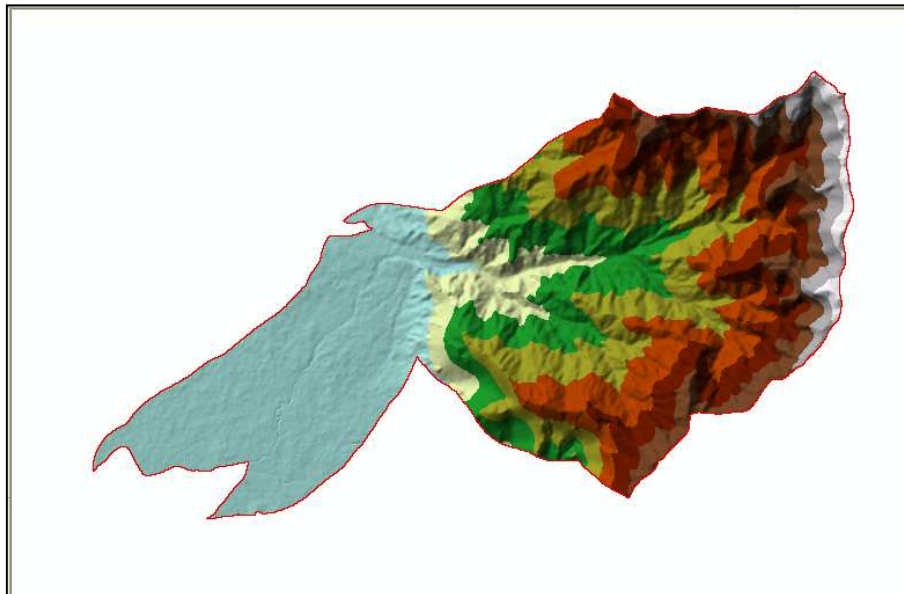


Figura 60 TIN en base a DTM de la microcuenca del Río Cristal

3.3.4.2 Proceso de modelación hidráulica aplicando la extensión HEC-GeoRAS y HEC-RAS

El proceso de modelación se realiza en tres fases las mismas que se denominan, Pre-proceso, Proceso y Pos-proceso de los cuales el primero y tercero se realizan en software GIS (ArcGIS) con la extensión HEC-GeoRAS y el Proceso que es el modelamiento hidráulico en HEC-RAS.

3.3.4.2.1 Pre-proceso

Se realiza en ArcGIS, con el Modelo Digital del Terreno o un TIN, se procede a utilizar la extensión HEC-GeoRAS (Figura 61).

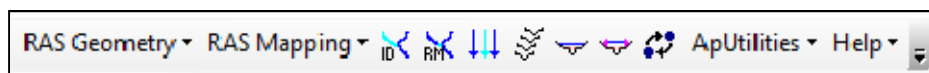


Figura 61 Extensión HEC-GeoRAS

Menú Ras Geometry: Las herramientas comprendidas en este menú se exhiben en el orden en el que se deben utilizar para crear las capas necesarias (Ver Figura 62).



Figura 62 Menú Crear Capas RAS

(Create RAS Layers): Crea las capas de la geometría, digitalizando manualmente de aguas arriba a aguas abajo. Para la aplicación del Modelo en estudio se crearon las siguientes capas:

- **Línea del Cauce (Stream Centerline):** Se digitaliza el cauce principal o tributario y se añade atributos al cauce del río. Se introduce el nombre o river. Con esto surge un fichero vectorial de líneas en una geodatabase en el que se realizará la digitalización.

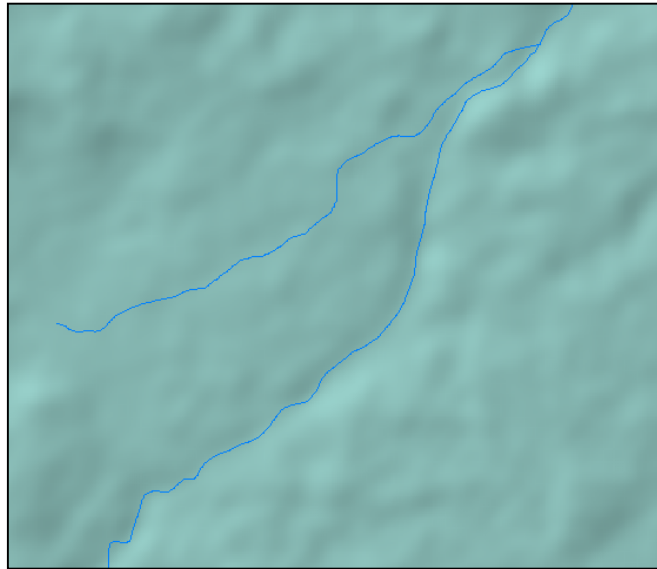


Figura 63 Edición de Center Line de zona baja (Montalvo)

- **Líneas de Banco (Bank Lines):** Añade límites y atributos a los bordes del río. Se genera la capa y se procede a digitalizarla de la misma forma que previamente se hizo con el eje del río (de aguas arriba hacia abajo).



Figura 64 Edición de Banks Line de zona baja (Montalvo)

- **Líneas de Centro del Sobreflujo (FlowPath Centerlines):** Estas líneas representan por donde se estima llega la crecida del río. El corte de estas líneas con las secciones transversales definen los puntos entre los que se medirá automáticamente, siguiendo esa línea, la distancia entre secciones por las márgenes.

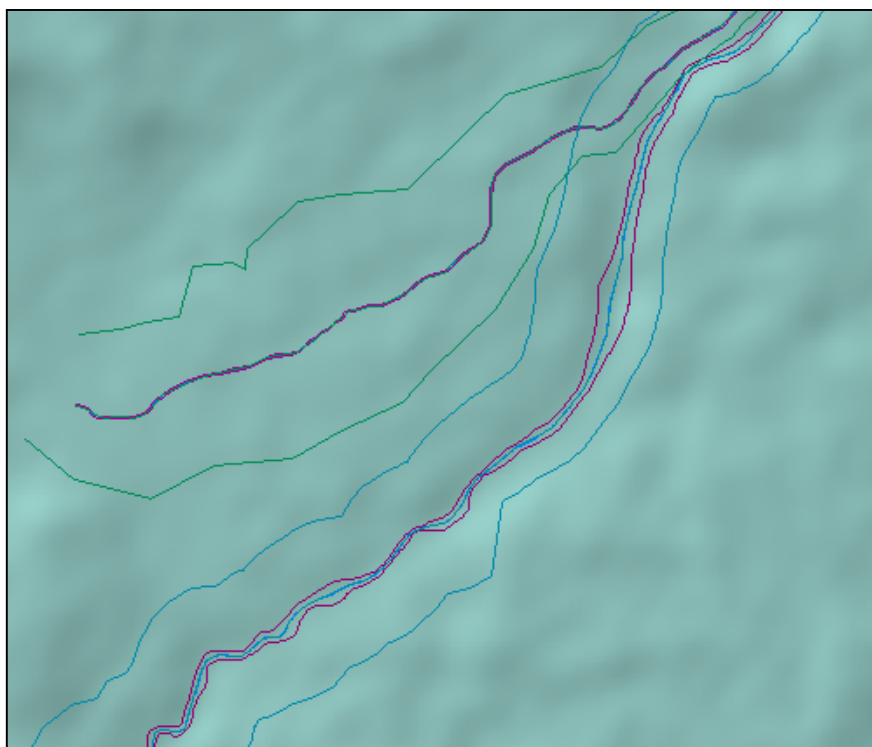



Figura 65 Edición de FlowPath Line de zona baja (Montalvo)

Es necesario caracterizar y clasificar a cada Flowpath, para definir su tipo, es decir, flujo del cauce principal, flujo en el banco izquierdo o flujo en el banco derecho. Para poder clasificar estos flujos se utiliza la herramienta Assing Line Type



Líneas de Corte de las Secciones Transversales (XS Cut Lines): Se genera atributos a coberturas llamadas secciones transversales XS Cut Lines. La edición se puede realizar utilizando la herramienta automática , una vez que se hayan creado las secciones se debe considerar que no deben intersectarse entre sí, en caso de realizar alguna sección en forma manual, se debe digitalizar de derecha a

izquierda, y cortar solo una vez tanto al eje, a los bordes y a las líneas de flujo. Se realizaron 292 secciones. La Figura 66 muestra las secciones transversales creadas en el modelo digital.



Figura 66 Edición de Secciones transversales de zona baja (Montalvo)

Hasta el momento toda la información generada se encuentra en dos dimensiones, en los subsiguientes pasos se debe implementar el eje de altura.

Añadir atributos y Elevación al Cauce (Stream Center Line Attributes): Añade información a cada elemento, generando capas en tres dimensiones. En el presente caso se aplicará directamente la opción “*Alt*”, entonces se obtiene la capa “*River 3D*”.

Añadir atributos y Elevación a las Secciones Transversales (XS Cut Line Attributes): Esta opción crea secciones transversales en 3 dimensiones, de igual forma que en el caso anterior se aplica “*Alt*” y se crea la capa XS CutLines3D.

Exportar a HE-RAS (Export RAS Data): Prepara el archivo que posteriormente será leído por HEC-RAS, existen dos opciones Clásico y Nuevo, que es la estructura informática del archivo, mas no cambia el resultado de los datos geométricos.

3.3.4.2.2 Proceso

Importar Geometría desde HEC-RAS

Una vez creada la digitalización de la geometría, se procede a extraer la información topográfica de las secciones y los bancos, así como de sus perfiles. Hecho esto se crea un archivo compatible con HEC-RAS.

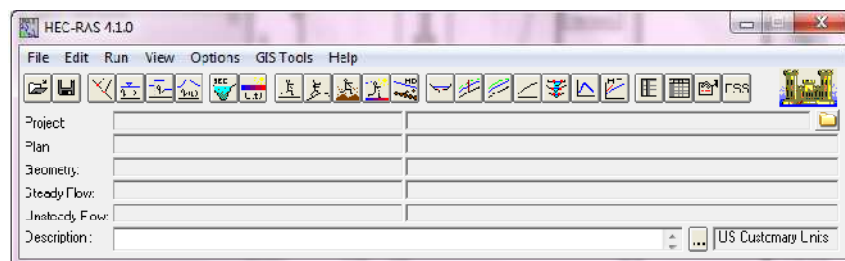


Figura 67 Ventano principal de HEC-RAS

El proceso se realiza en HEC-RAS 4.1.0, primero se crea un proyecto, se asegura que las unidades con las que se va a trabajar sean el S.I. (Sistema internacional), luego se abre la ventana “Geometric Data” y se importa el archivo generado anteriormente en HEC-geoRAS. Este archivo posee las secciones transversales y los bancos, además se muestra la dirección de flujo como se muestra en la Figura 68.

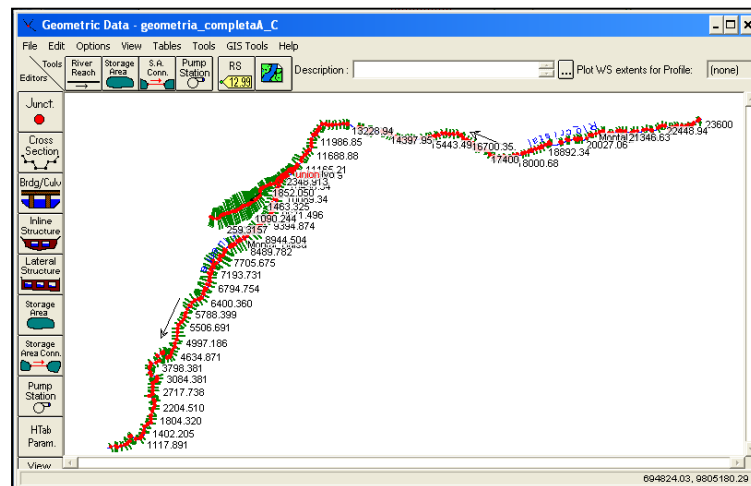


Figura 68 Geometría del río Cristal

Introducción de Coeficiente de rugosidad de Manning

Se genera un mapa de coeficientes de Manning en base al Mapa de Cobertura Suelo de Valero (2015):

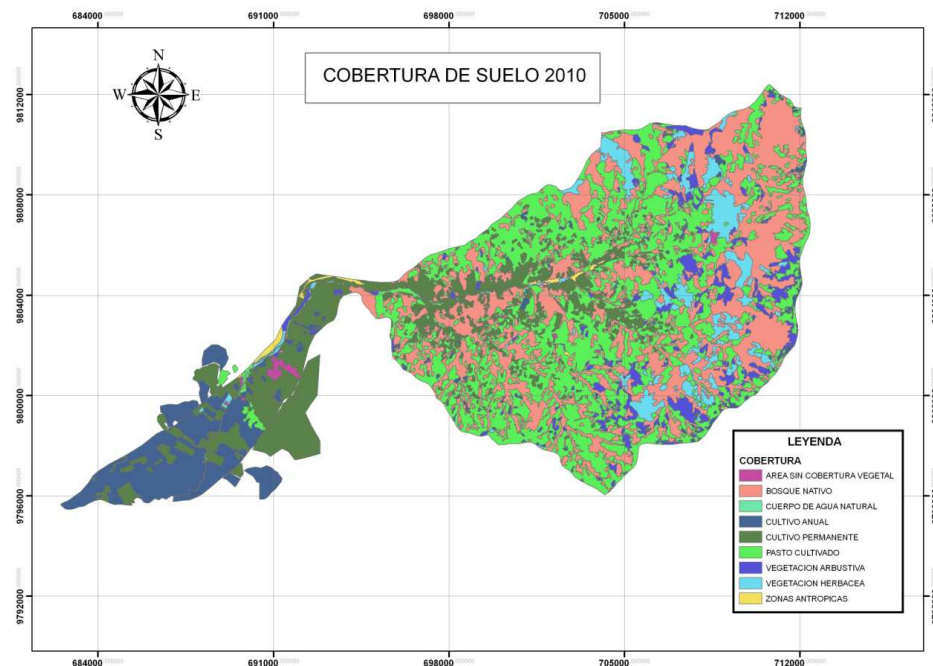


Figura 69 Cobertura de suelo 2010.

Fuente:(VALERO VALENZUELA, 2015)

Con base al mapa de uso de suelo y los coeficientes de Manning generados con la granulometría de los sedimentos del río, se desarrolló una tabla ingresada en el modelo. Estos datos son ingresados para cada sección en **Edit Manning's n or K Values**.

River	Reach	River Station	Frctn (n/K)	n #1	n #2	n #3
1 Afluente	Montal_Balsa	10966.19	n	0.04	0.0448	0.06
2 Afluente	Montal_Balsa	10899.06	n	0.04	0.0448	0.05
3 Afluente	Montal_Balsa	10745.54	n	0.04	0.0448	0.06
4 Afluente	Montal_Balsa	10679.94	n	0.04	0.0448	0.06
5 Afluente	Montal_Balsa	10577.78	n	0.04	0.0448	0.06
6 Afluente	Montal_Balsa	10498.34	n	0.04	0.0448	0.06
7 Afluente	Montal_Balsa	10400.36	n	0.04	0.0448	0.06
8 Afluente	Montal_Balsa	10294.28	n	0.04	0.0448	0.04
9 Afluente	Montal_Balsa	10197.91	n	0.04	0.0448	0.04725
10 Afluente	Montal_Balsa	10089.34	n	0.04	0.0448	0.043
11 Afluente	Montal_Balsa	9993.149	n	0.04	0.0448	0.043
12 Afluente	Montal_Balsa	9888.958	n	0.04	0.0448	0.043
13 Afluente	Montal_Balsa	9793.228	n	0.04	0.0448	0.043
14 Afluente	Montal_Balsa	9671.496	n	0.04	0.0448	0.0545
15 Afluente	Montal_Balsa	9585.828	n	0.04	0.0448	0.0545
16 Afluente	Montal_Balsa	9489.508	n	0.04	0.0448	0.0545
17 Afluente	Montal_Balsa	9394.874	n	0.04	0.0448	0.0545
18 Afluente	Montal_Balsa	9296.362	n	0.04	0.0448	0.0545

Figura 70 Ingreso de valores de Manning para todas las secciones

En el módulo **Cross Section** se puede ingresar directamente todos los valores relacionados a la geometría de las secciones. Este módulo tiene las siguientes partes:

Cross Section X-Y Coordinates: Esta opción contiene las cotas y distancias que definen cada punto del fondo de la sección transversal.

Downstream Reach Lenghs: Ingresar las distancias que existen entre cada sección. Hay tres casilleros (LOB, Channel, ROB), que corresponden al área

izquierda de la zona de inundación, el canal propiamente y al área derecha de la zona de inundación.

Manning's Values: Aquí se ingresan los valores del coeficiente de rugosidad de Manning para cada área (LOB, Channel, ROB).

Main Channel Banks Stations: Se Ingresa de cierta forma los bordes típicos del cauce.

Cont\Exp Coefficients: Son los coeficientes de expansión y contracción, por defecto se usan valores de 0.1 y 0.3 respectivamente.

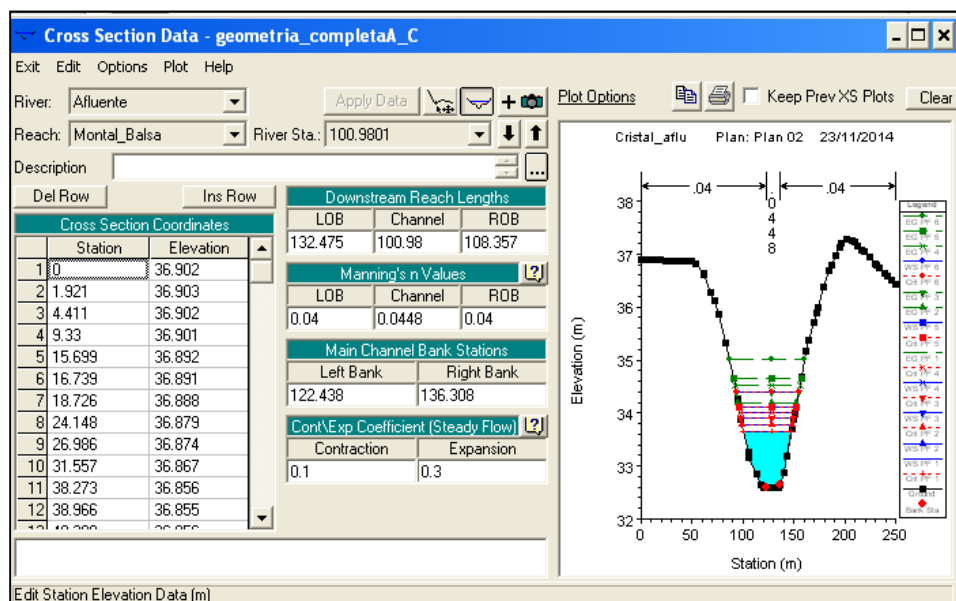



Figura 71 Cross Section Data, mostrando la sección 100.9801

Posteriormente se guarda todos los datos de la geometría, para seguir al siguiente paso del modelamiento en flujo permanente.

Datos de Flujo

Para poder ingresar los datos del caudal en flujo permanente se usará la opción

“Steady Flow Data”.  .

Flujo Permanente

En este caso se ingresaran los datos de caudales para los periodos de retorno de 5, 10, 25, 50,100, 1000 años calculados con el método Gumbel, y el Q máximo medio, para diferentes secciones de los tres sectores definidos.

Figura 72 Modulo donde se Ingresa los diferentes caudales

Luego se debe ingresar las condiciones límites que son necesarias en la simulación, para esto se elegirá la opción “Steady Flow Boundary Conditions”.

Como se usará flujo mixto se debe ingresar las condiciones en ambos casilleros y en este caso se seleccionó la condición de borde de profundidad normal (“Normal Depth”), los datos de entrada fueron 0,05085 y 0,34 que son pendiente aguas abajo y aguas arriba respectivamente del río Cristal y 0,01 aguas abajo de la sección de Montalvo, tomados del perfil topográfico realizado en la caracterización de la cuenca. Ver Figura 73.

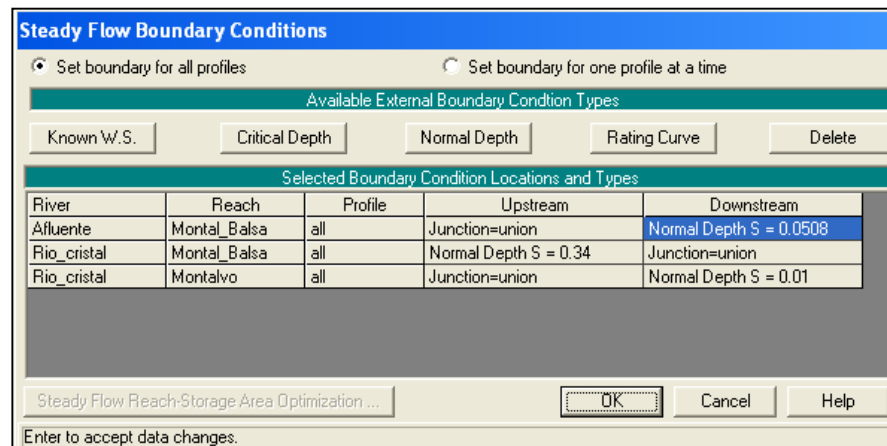


Figura 73 Modulo de entrada de condiciones de contorno

3.3.4.2.3 Postproceso

Exportar resultados de HEC-RAS a ArcGIS

Para crear el archivo de intercambio de datos entre HEC-RAS y ArcGIS se selecciona Export GIS Data del menú File en HEC-RAS. Una vez realizado el proceso descrito, entonces se a importar el archivo en ArcGIS, para ello lo primero es transformar el archivo de HECRAS en formato SDF (típico de HEC-RAS a formato XML (Formato de configuración típico de ArcGIS) con la opción que se ubica en la barra de HEC-GeoRAS (Ver Figura 74).

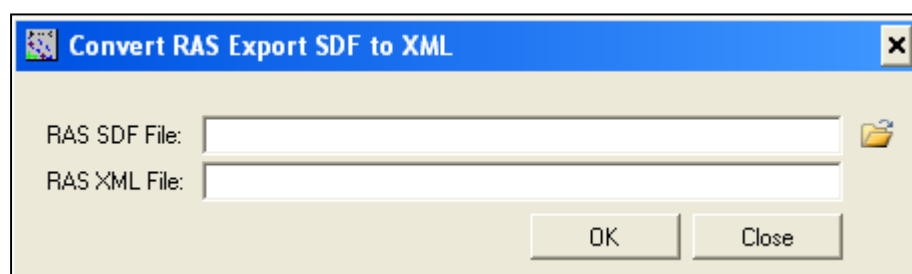


Figura 74 Conversión de Formato SDF a XML

Una vez cambiado el formato en la opción RAS Mapping primero se selecciona la opción Layer Setup en donde se ingresa el directorio del archivo creado anteriormente, además se carga el DEM, DTM o TIN que se disponga. En este caso se opta DEM (Grid) de la zona de estudio.

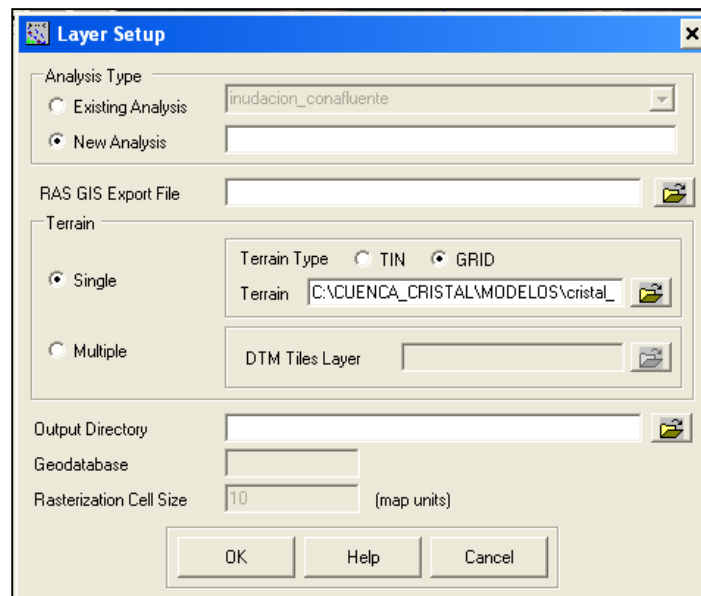


Figura 75 Ingreso de datos en Layer Setup

En segundo término escoger la opción “Import RAS Data” y aparecerá el archivo antes generado y se cargarán todos los archivos creados en HEC-RAS. Ver Figura 76

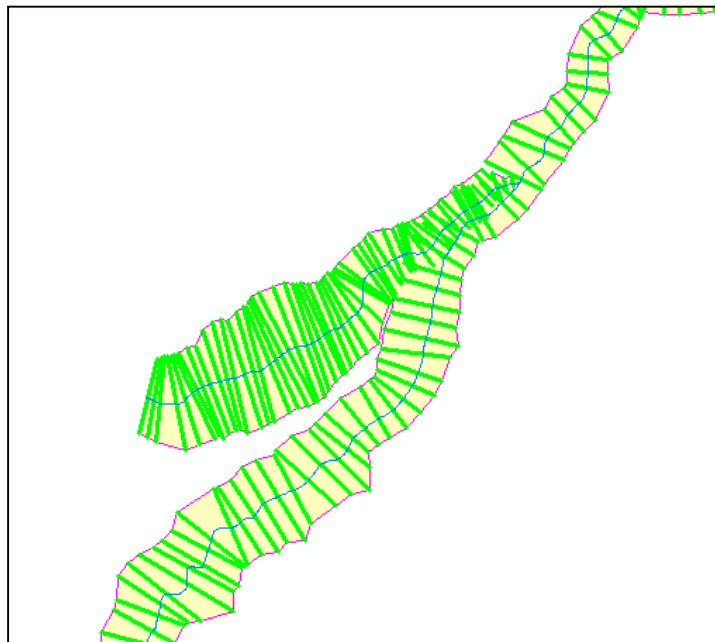


Figura 76 Río, polígonos creados a partir del Flowphat y Secciones Transversales de zona baja (Montalvo) en ArcGIS

Posteriormente se escoge la opción Inundation Mapping y se escoge la primera opción “Water Surface Generation”, aquí se interpola los perfiles en forma de TIN, creando así un TIN para cada tiempo de retorno, como se muestra en la Figura 77.

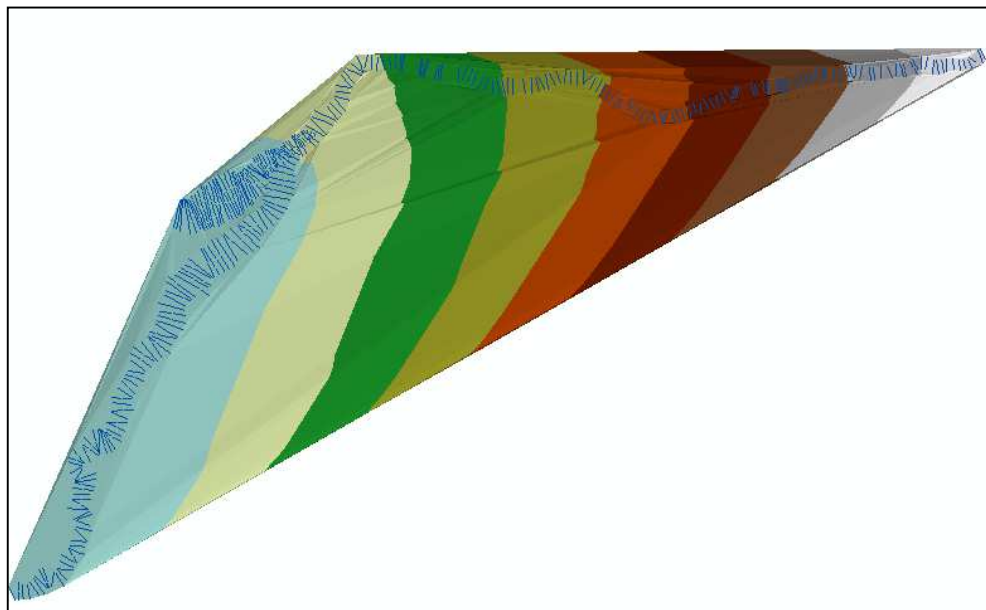


Figura 77 Creación del Archivo TIN de las secciones de un tiempo de retorno de 1000 años en ArcGIS.

Ahora se escogerá la segunda opción “Floodplain Delineation Using Rasters”, en la cual se seleccionan los mismos perfiles y se creará un GRID, en base del TIN de las áreas de inundación, en las cuales se determina varios niveles de profundidad por pixeles y polígonos de la extensión de las aguas.



Figura 78 Simulación de la inundación de un tramo del río Cristal cercano a Montalvo.

3.4 Modelamiento de zonas de inundación con CAESAR-Lisflood

3.4.1 Información y Datos

3.4.1.1 Preparación de DTM para CAESAR-Lisflood

Se delimitara nuevamente la cuenca pero esta vez de forma automática, ya que se necesita una mayor área de drenaje puntual para trabajar, por lo cual no es necesario especificar el punto de desfogue, este procedimiento lo realizaremos mediante ArcGIS.

3.4.1.1.1 Eliminar imperfecciones del DEM

Una vez definida la proyección usaremos la herramienta Fill, que permite rellenar vacíos en la superficie del raster para quitar imperfecciones en la información del DEM.

3.4.1.1.2 Definir la dirección de la red hídrica

Por medio de la herramienta Flow Direction, crea un ráster con la dirección de flujo de cada una de sus celdas hasta su vecina cuesta abajo, aquí seleccionamos el ráster generado con Fill.

3.4.1.1.3 Determinar la acumulación la red hídrica

Ahora con la herramienta Flow Accumulation, se crea un ráster del flujo acumulado para cada una de sus celdas, también se puede aplicar un factor de peso si es necesario, la entrada de esta herramienta es el archivo raster generado con la herramienta Flow Direction.

3.4.1.1.4 Delimitando automáticamente la cuenca hidrográfica

Para delimitar la cuenca hidrográfica se lo realiza apoyándose en las siguientes herramientas:

Basin, el cual elabora un ráster delineando todas las cuencas hidrográficas en base a la red de drenaje, el raster de entrada es el creado con la herramienta Flow Direction.

Como siguiente paso se transforma el raster que se generó con Basin a vector (shapefile), con la herramienta Raster to Polygon (Raster to Features, en versiones anteriores a ArcGIS).

Recortar la cuenca hidrográfica, aquí solo basta con usar la herramienta Clip de Geoprocessing.

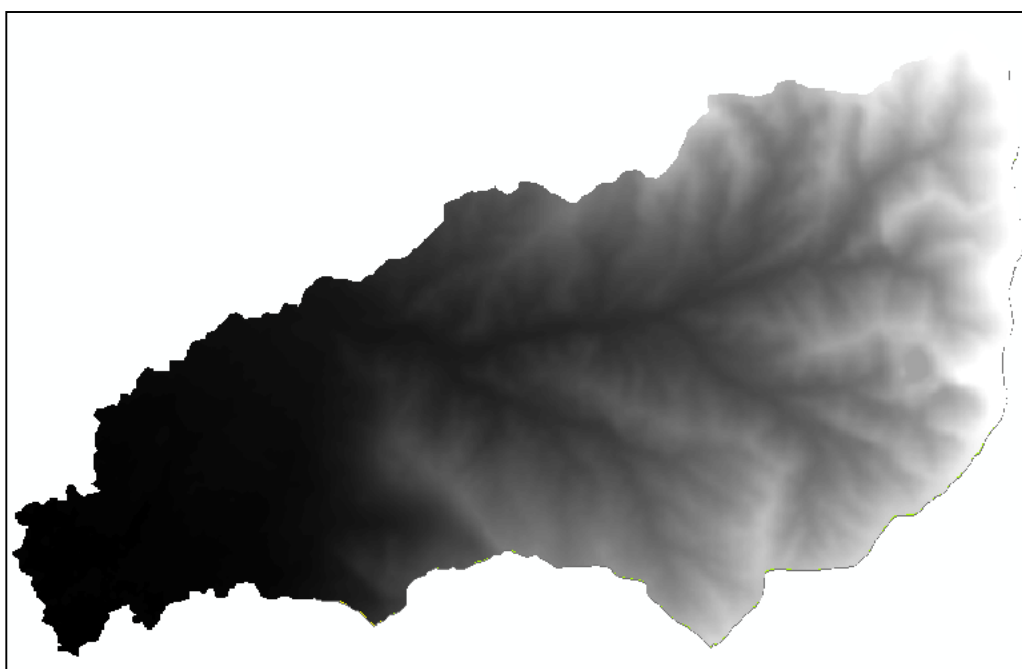


Figura 79 Cuenca del Río Cristal mediante método automático de delimitación de cuencas de ArcGis.

3.4.1.1.5 “Quema” del canal principal en el DTM

La capa de acumulación de flujo destacará la red de drenaje de la cuenca. Al visualizar el canal principal, se aísla el canal principal mediante una clasificación en 2 clases o mediante una clasificación basada en la desviación estándar (Ver Figura 80).

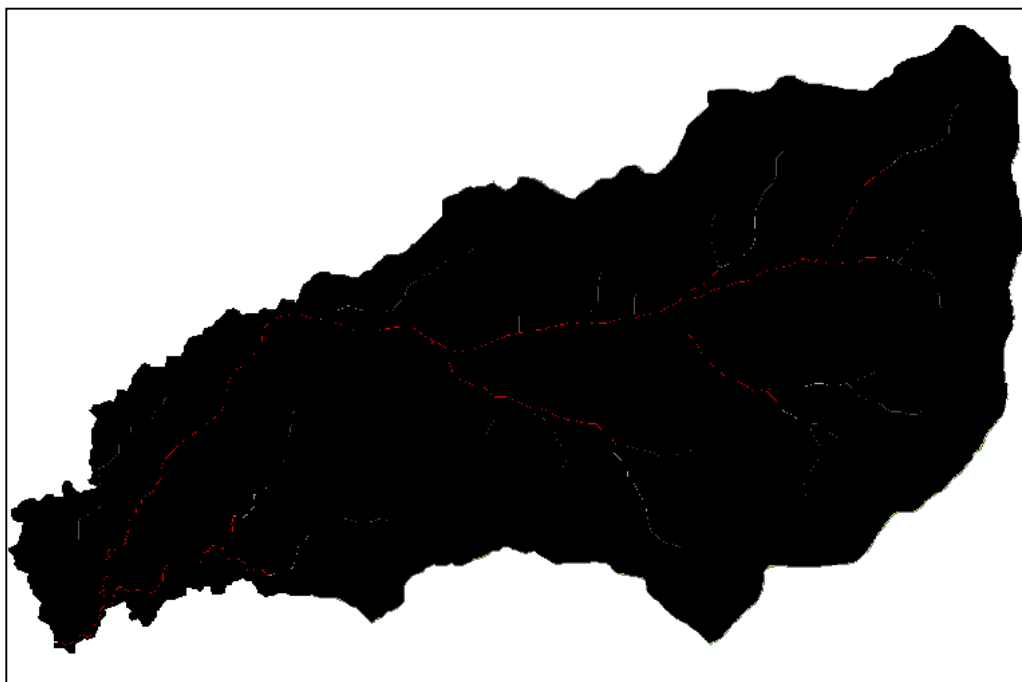


Figura 80 Clasificación de capa Accflow (flow accumulation), determinando canales principales

Para producir una capa del canal principal, abra la Calculadora Raster y ejecute la siguiente la expresión:

$$[\text{mainChannel}] = [\text{AccFlow}] > 500$$

Y para marcar este canal principal en el DEM resultado de la delimitación de la cuenca se debe ejecutar la siguiente expresión:

$$[\text{burnedDEM}] = [\text{DEM}] - [\text{mainChannel}]$$

3.4.1.1.6 Determinación de zona puntual de análisis

Ya que el análisis de inundaciones mediante el modelo Autómata Celular CAESAR-Lisflood implica enormes procesos computacionales, y una gran cantidad de memoria RAM, por lo cual se decidió tomar dos acciones:

- Realizar un remuestreo para aumentar el tamaño de pixel de 10m a 13m mediante la herramienta **Resample** de ArcGIS, teniendo una mejora considerable en tiempo de procesamiento, en pruebas posteriores.
- Determinar una zona representativa en donde realizar el análisis

Posteriormente de realizar el remuestreo, se divide la microcuenca en sectores en función de la cota, para utilizar los caudales respectivos en el modelamiento, así se determinó cuatro sectores, como se ve en la figura 81:

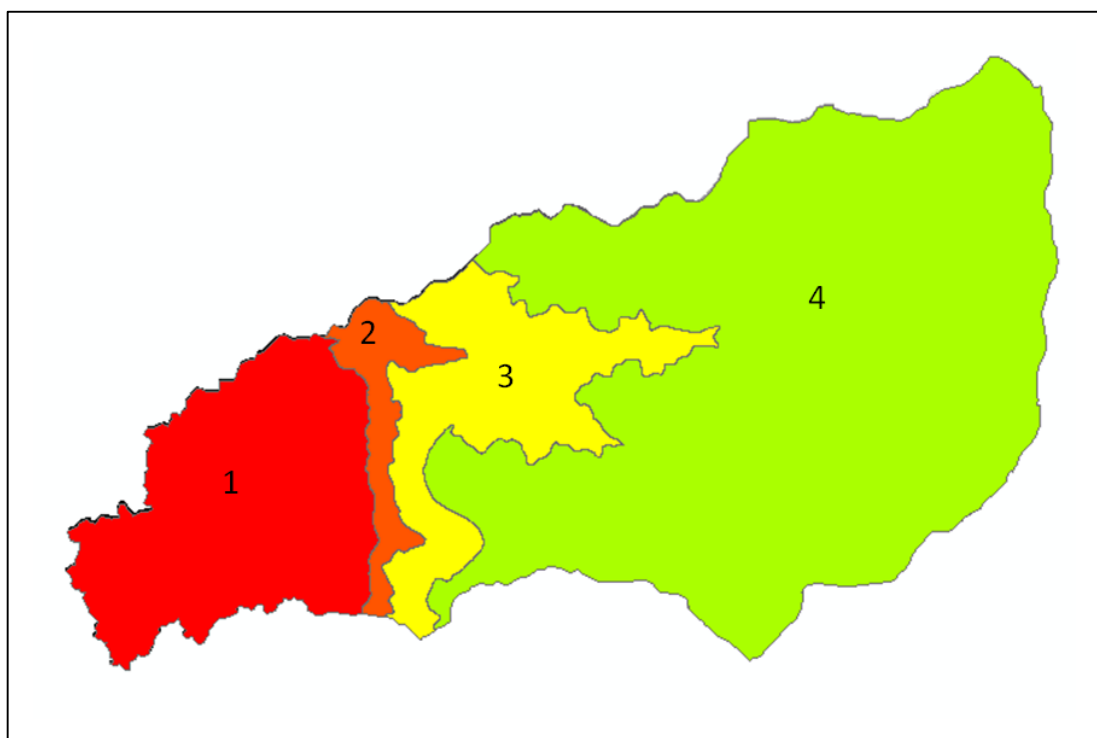


Figura 81 Sectores designados en función a cota

Se escoge el sector 1, que en parte es pie de monte y cono de deyección, en donde se sitúa el poblado de Montalvo, el cual recibe la mayor cantidad de inclemencias por el clima según (GARCIA POZO, 2015).

3.4.1.1.7 Eliminación del NoData

Una las especificaciones para poder trabajar con los DEM en CAESAR-Lisflood, es que tanto la entrada como la salida de flujo del DEM esté libre de NoData, para que el flujo de agua no se acumule, ya que el flujo no se mueve en celdas con valores de NoData que regularmente se configuran como -9999, para esto se utilizó el Software de procesamiento de imágenes PCI Geomática en su versión de prueba.

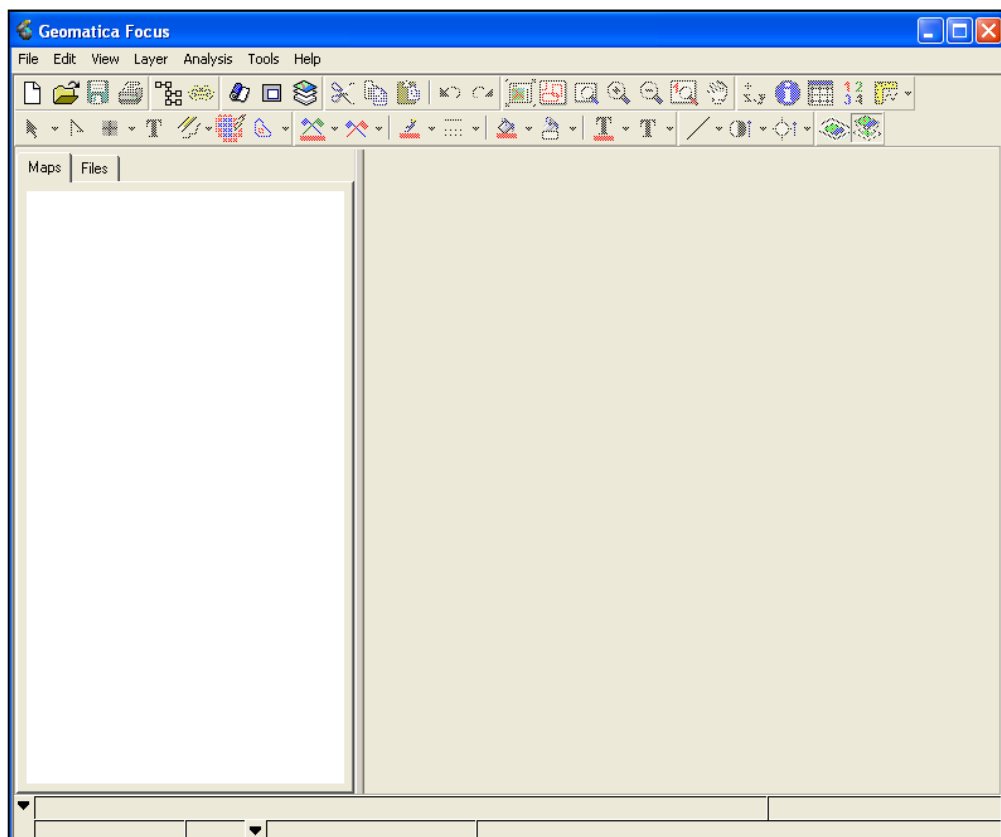


Figura 82 Ambiente PCI Geomatica

Posteriormente se realizó un “clipping” donde se pudo eliminar los NoData de la entrada y salida de flujo del DEM. En la siguiente figura se muestra la zona con NoData en azul, y su cambio luego del proceso en PCI Geomatica.

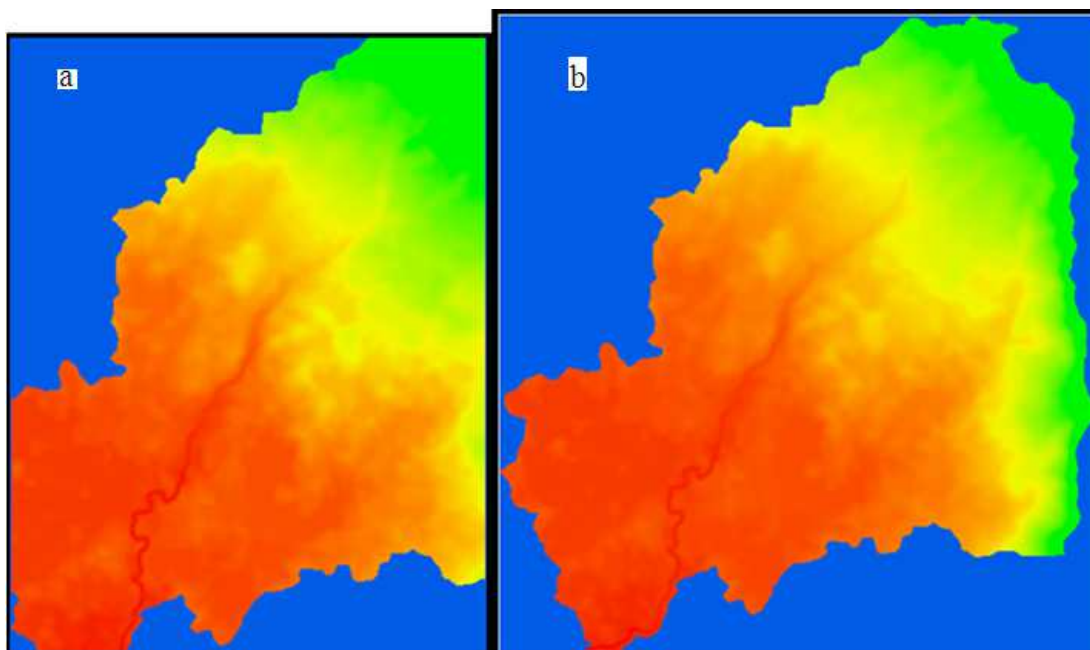


Figura 83 a) Sector 1 sin NoData, b) Sector 1 con NoData.

3.4.1.1.8 Generación del DEM de lecho y cambio a formato ASCII

Con el DEM principal ya procesado se requiere generar un DEM del lecho rocoso de la zona, para determinar el límite de erosión del modelamiento, para esto se debe contar con un estudio de lecho de la microcuenca, o en su defecto generarlo en base al DEM principal, asumiendo que el lecho de la microcuenca es uniforme y no se encuentra debajo de los 2 m de la superficie, y al uso de la siguiente expresión usada en **Calculator Raster** de ArcGIS:

$$[\text{lecho1}] = [\text{DEM}] - 2$$

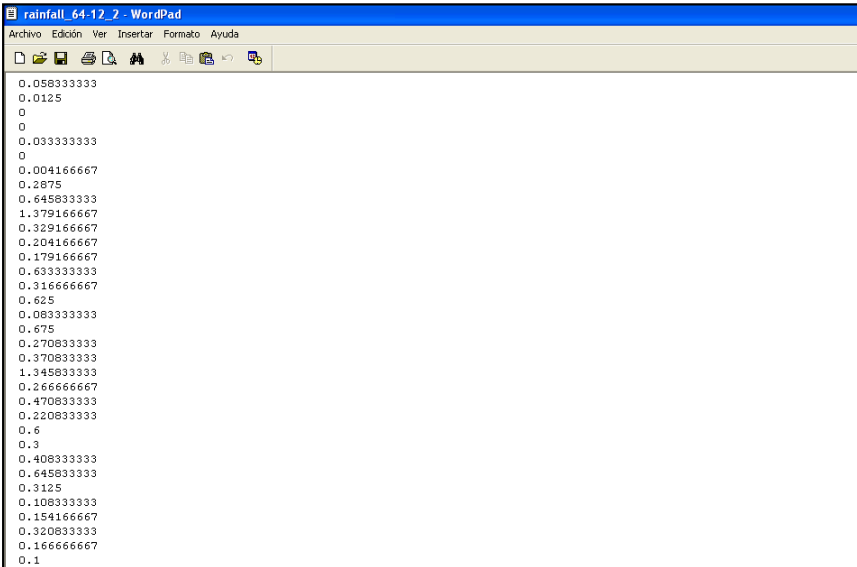
Dando como resultado un DEM de la misma extensión y dimensiones, pero con 2 metros menos, simulando una DEM del lecho rocoso. Posteriormente el DEM principal y “lecho1” se deben convertir a formato ASCII mediante la herramienta **Raster to ASCII** de ArcGIS, dando como resultado dos archivos, “mont15” y “lecho1”, los cuales son archivos .txt, y tienen la siguiente configuración:

3.4.1.2 Archivos hidrometeorológicos

3.4.1.2.1 Archivo de precipitación

Es un archivo que es usado en el modo de Captación “Catchment mode”, generado a partir de datos diarios de precipitación obtenidos de las estaciones M0132 (1964-1998) y la estación M0468 (1975-2012), los cuales fueron proporcionados por INAMHI, estas dos estaciones se encuentra a menos de 50Km por lo que cumplen con normas de la Guía de prácticas climatológicas de la WMO (World Meteorological Organization) en su edición 2011, lo cual hace posible rellenar datos faltantes entre las dos estaciones.

El archivo se genera con extensión .txt o .dat, consta de una columna en donde se coloca la precipitación por hora (mm/h), en la zona de estudio no se cuenta con esta precisión de datos, así que se toma la opción de dividir para 24 la precipitación diaria teniendo aproximadamente 17500 observaciones. El archivo resultado es “rainfall_64_12_2.txt”.



```
rainfall_64_12_2 - WordPad
Archivo Edición Ver Insertar Formato Ayuda
0,058333333
0,0125
0
0
0,033333333
0
0,004166667
0,2875
0,645833333
1,379166667
0,329166667
0,204166667
0,179166667
0,633333333
0,316666667
0,625
0,083333333
0,675
0,270833333
0,370833333
1,345833333
0,266666667
0,470833333
0,220833333
0,6
0,3
0,408333333
0,645833333
0,3125
0,100333333
0,154166667
0,320833333
0,166666667
0,1
```

Figura 85 Archivo de precipitación resultado.

3.4.1.2.2 Archivo de Descarga

En el modo de alcance “Reach mode” se requiere un archivo adicional que contiene las entradas de agua y sedimentos para el alcance. Estos se almacenan en un archivo ASCII con el paso de tiempo en la primera columna, la descarga de agua (caudal) en el segundo, y las entradas para las fracciones granulométricas separadas (en m3 para el paso de tiempo) en la 6ª a la columna 14ª. Pero también se puede trabajar con las dos primeras columnas sin tomar en cuenta las fracciones granulométricas de la descarga, en el caso del presente estudio se generó un archivo con nombre “Reach_mode_Q_diarios_200”.

Linea	Valor	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	2.163260222	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	2.431172038	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	2.260302804	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	2.260302804	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	2.131222241	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	1.990998032	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	2.190190699	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	2.316021032	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	2.81702077	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	3.260909324	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	4.869773173	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	4.222048766	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	3.699690374	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	7.507566974	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	3.910491005	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	3.657901702	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	3.577110271	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	3.285518208	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	3.403919444	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	3.227014068	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	3.041750959	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	2.801233939	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	2.855094893	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	2.907562892	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	2.962352483	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	3.071931666	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	2.960959527	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	2.853701937	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	3.941600349	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	4.809411758	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	5.183188208	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31	6.079787369	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
32	5.494745969	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 86 Archivo de descarga resultado.

Para la creación del archivo se obtuvieron los caudales diarios de la cota 200 de la microcuenca del río Cristal mediante los factores de transposición usados en el apartado 3.3.1, y la estación H343 (1964 - 2012) en Echeandia, puesto que, existen varios vacíos en la serie de tiempo, se decide rellenar mediante datos de la estación

H346, la cual se encuentra en una zona de comportamiento hidrológico similar. Posteriormente se realizó un análisis de correlación entre estas dos estaciones, dando como resultado, que las dos estaciones una alta correlación con un valor de R^2 de 0,8388, lo que se puede observar en la figura 88.

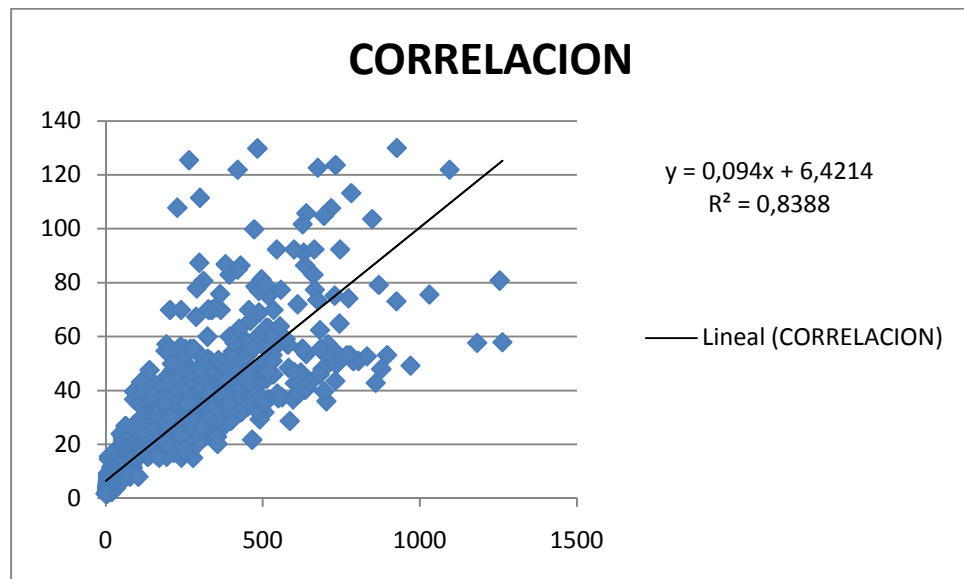


Figura 87 Grafica de correlación entre estación H343 y H346.

3.4.2 Descripción y uso del modelo CAESAR-Lisflood

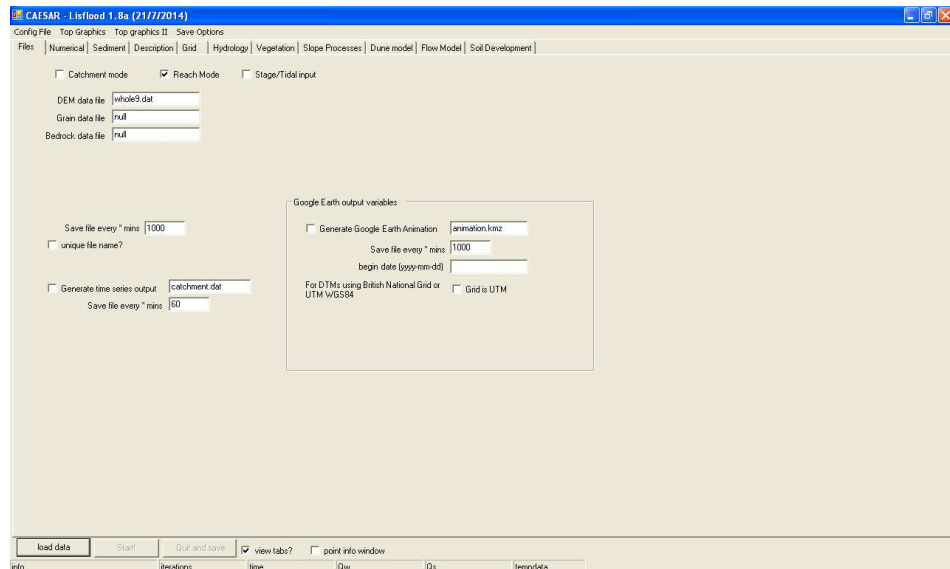


Figura 88 Pantalla principal de CAESAR-Lisflood

3.4.2.1 La barra de menú principal

Contiene cuatro ítems principales de menú que se utilizan para cargar y guardar los parámetros del modelo, por lo que se muestra y lo que se salva por CAESAR-LISFLOOD.



Figura 89 Barra de menú principal de CAESAR-Lisflood

Config File

Todos los valores que se introducen en las cajas en las pestañas que se ven por primera vez cuando CAESAR-LISFLOOD se cargan y se pueden guardar en un

archivo de configuración en formato .xml. Esto significa que luego puede cargar CAESAR-LISFLOOD con todos los parámetros que ha utilizado previamente en una simulación. También puede guardar o usar guardar como un nuevo nombre de archivo.

Top Gráficos y Top Gráficos II

De seleccionar lo que se muestra en la pantalla principal, estos menús simplemente actualizan las visualizaciones puesto que el modelo no actualiza simultáneamente el modelado por ahorro computacional.

Save Options

Este guarda el archivo de intervalo en la pestaña archivo, CAESAR-LISFLOOD salvará cualquiera de estos datos, que son parte del proceso general, si se activan. Ellos incluyen los datos elevación (elev.txt), granulométrico (grain.txt), distribución y profundidad de agua (waterdepth.dat) y también obtener información sobre otros parámetros no tan usados.

En el caso del modelamiento en el presente proyecto, se escogió distribución y profundidad de agua para determinar zonas con amenaza de inundación.

3.4.2.2 Pestaña Files

La pestaña archivo contiene los principales archivos de datos utilizados por CAESAR-LISFLOOD. El modelo asume que todos los archivos están en el mismo lugar o ruta de acceso donde se encuentra el ejecutable de extensión .exe del propio modelo. A menudo es mejor para localizar todos los archivos de simulación en la misma carpeta de CAESAR-LISFLOOD, en la (Ver figura 90) se especifica los casilleros que se usaran.

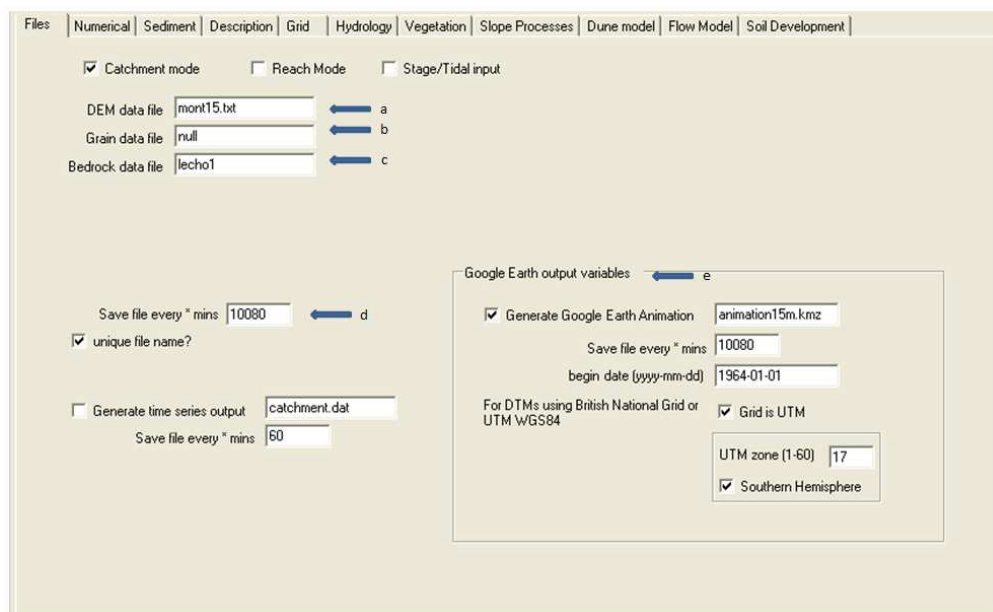


Figura 90 Pestaña de archivo

a) DEM data file

Este contiene la información del DEM, aunque si no se dispone de un DEM, se puede utilizar un DTM del área a modelar, pero debe encontrarse en formato ascii. En el proyecto se generó un archivo llamado “mont15” con un tamaño de pixel de 13 metros, de la zona del piedemonte que está constituido por el cono de deyección proveniente de la cuenca del Río Cristal, ya que esta llanura es muy susceptible a inundaciones provocadas por el fuerte invierno, más aún cuando se presenta el fenómeno de El Niño, y del resultado de varios procesos desarrollados en la cuenca alta.

b) Grain data file

Este contiene la información de la distribución granulométrica. Habitualmente esto se usa con un archivo granulométrico hilado al DEM, el cual se obtiene mediante el software GRAINFILEMAKER, si se tiene un muestreo de toda la cuenca con cientos de muestras. En el presente proyecto no se tiene muestras de toda la cuenca, por su gran extensión y su difícil acceso, por lo cual, se usó la distribución

predeterminada por el modelo enfocándose en la granulometría sedimentaria del caudal del río Cristal descrita en la pestaña “Sediment”.

c) Bedrock data file

Este es el archivo de un DEM de los lugares del lecho rocoso. Dentro CAESAR, lecho de roca es efectivamente una capa debajo de la cual la erosión no puede suceder (ni los deslizamientos de tierra). Este archivo debe estar en el mismo formato, y debe tener el mismo tamaño que el DEM principal cargado. En el proyecto se carga el archivo anteriormente generado con el nombre de “lecho1”.

d) Save file every min and unique file name

Si se marca esta casilla, CAESAR-LISFLOOD salvará (en el intervalo de tiempo especificado en el cuadro) lo que se haya seleccionado en “Save Options” (como se comprobó en el menú principal), lo cual hará que se genere datos con un nombre de archivo único. Donde el número al final del nombre de archivo son los días transcurridos. Esto le permite guardar una serie de datos para analizar más tarde. En el proyecto se definió guardar la distribución y profundidad de agua (waterdepth.dat), para determinar las zonas con amenaza de inundación.

Para el actual proyecto se escogió 10080 minutos, como tiempo de guardado.

e) Controles de salida de Google Earth

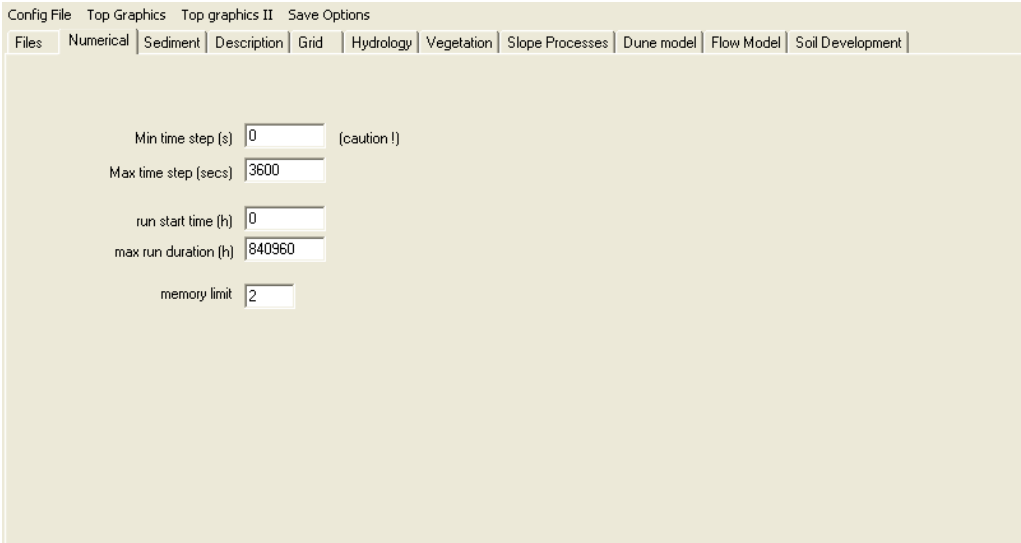
Esto controla la forma principal de almacenamiento de imágenes del modelo. En CAESAR-LISFLOOD, los gráficos operan mediante la creación de un archivo gráfico continuo que toma imágenes de la pantalla. Las opciones de Google Earth permiten que estos archivos se guarden en una carpeta llamada "animation", ubicada en la carpeta donde se encuentra el ejecutable de CAESAR-LISFLOOD. Esto se hará cada vez que se especifique en el cuadro (por defecto 1440 min - 1 día) y dará como resultado un archivo con un nombre diferente. Será también guardado un archivo .kml que tendrá la ubicación georreferenciada (de la cabecera en el DEM de entrada) y los detalles de la animación, por lo que en google earth esto puede ser cargado y

pondrá su conjunto de imágenes (como un tiempo de la secuencia/animación) sobre el mapa.

Para el presente proyecto se escogió 10080 minutos animación desde 1964-01-01, proyección UTM zona 17 (la cual corresponde a Ecuador).

3.4.2.3 Pestaña Numérica

En esta pestaña solo existen datos netamente de uso numérico para el modelo, que interviene con el paso de tiempo y memoria. En los siguientes apartados se especifica los casilleros y los parámetros que se van usar en esta pestaña.



Config File Top Graphics Top graphics II Save Options

Files Numerical Sediment Description Grid Hydrology Vegetation Slope Processes Dune model Flow Model Soil Development

Min time step (s) (caution !)

Max time step (secs)

run start time (h)

max run duration (h)

memory limit

Figura 91 Pestaña Numérica

a) Min time step

En anteriores versiones, esta opción servía para agilizar el proceso del modelo, pero teniendo el inconveniente de llegar a una inestabilidad numérica, en la versión actual se aconseja que el paso de tiempo sea siempre de “0”.

b) Max time step

Para evitar que CAESAR corra muy rápido y salte insumos (por ejemplo, un evento de lluvias extremas), se sugiere por el autor colocar en 3600. Este valor será automáticamente limitado al paso de tiempo de entrada (ya sea de lluvia o de archivo) para evitar que el modelo omita una entrada en la series de tiempo.

c) Run time start

El momento en que se iniciará la simulación, ajusta a 0, a menos que se requiera comenzar en un periodo de tiempo específico o en algún otro punto de la serie de datos.

d) Max run duration

Esto corresponde a la longitud de su archivo de precipitaciones (por ejemplo, 1000 hrs. de lluvia = 1,000 hrs. De tiempo simulado) o del caudal que se tenga en un tiempo determinado.

En el actual proyecto se escogió 300000 horas para que todos los archivos puedan ser corridos en el modelo.

e) Memory limit

Este valor es puramente computacional, pero puede afectar el tamaño del programa cuando se ejecuta primero. CAESAR almacena valores de elevación, distribución de agua, entre otros, que se descargan en una serie de datos de volúmenes considerablemente grandes (una matriz numérica). Esto significa que hay 10 números almacenados para cada celda de la cuadrícula, para cada capa activa. Así, 10 números, 10 capas activas, y en nuestro caso 228182 celdas de la cuadrícula = 22818200 puntos de datos. En un modelo de captación, la mayoría de las células son células de pendiente de la colina, por lo que requieren de los cálculos granulométrico llevados a cabo por los términos de erosión y deposición fluvial e igualmente la distribución de agua, lo que implica una enorme demanda de procesos

computacionales para los más de 22 millones de puntos de cálculo. El límite de memoria determina el tamaño de la matriz que contienen los valores granulométricos. Cuando se pone a 1, significa que hay tantos lugares en la matriz de tamaño de grano. Cuando se ajusta a $a > 1$ significa que la matriz no es lo suficientemente grande como para hacer frente a todas las células que tienen valores granulométricos.

Para el presente proyecto se toma el número 2 como límite de memoria, ya que por ser un DTM de resolución considerable, necesitará una mayor cantidad de memoria, este valor es recomendado por el autor para rasters demasiado grandes.

3.4.2.4 Pestaña Sedimentos

En esta sección se calibra los parámetros que intervienen en los procesos de deposición y erosión que tiene como función el simular el enrutamiento de las aguas, a través del tiempo, así como determinar un nivel de infiltración. No todos los parámetros son necesarios, todo depende de la información con la que se cuente.

	grain size (m)	proportion	suspended ?	fall velocity (m/s)
size1	0.000074	0.422	<input type="checkbox"/>	0.0033
size2	0.000425	0.414	<input type="checkbox"/>	
size3	0.002	0.008	<input type="checkbox"/>	
size4	0.00475	0.077	<input type="checkbox"/>	
size5	0.00952	0.038	<input type="checkbox"/>	
size6	0.0127	0.023	<input type="checkbox"/>	
size7	0.0191	0.006	<input type="checkbox"/>	
size8	0.0191	0.006	<input type="checkbox"/>	
size9	0.0191	0.006	<input type="checkbox"/>	

Wilcocks and Crowe
 Einstein

Bedrock erosion threshold (Pa): 0
 Bedrock erosion rate (m³Pa⁻¹y): 0

Max velocity used to calc Tau from vel.: 5
 Max erode limit: 0.01
 Active layer thickness (m) must be at least 4 times max erode limit: 0.1
 Proportion re-circulated if recirculate box is checked: 0.5
 in channel lateral erosion rate: 0.5
 Lateral Erosion
 Lat erosion rate: 0.01
 Number of passes for edge smoothing filter: 100
 Number of cells to shift lat erosion downstream: 5
 Max difference allowed in cross channel smooth: 0.0001

Figura 92 Tabla de Sedimentos

a) Grain size data y proportion

Estos cuadros de texto contienen las características de tamaño de granos utilizados por el modelo. Hay nueve tamaños de grano disponibles. Todas las unidades están en metros, y la primera columna contiene el tamaño de cada grano, la segunda columna contiene la proporción inicial en cada fracción de tamaño, como una fracción total de 1.

Estos datos se obtuvieron del análisis granulométrico P3 del Anexo 2 del porcentaje retenido, los cuales tienen 7 clases, repartiendo la última proporción para tres, y completar las 9 clases requeridas en CAESAR (ver Tabla 31).

Tabla 31
Tamaño y porcentaje de clases de grano.

m	1%
0,000074	0,422
0,000425	0,414
0,002	0,007
0,00475	0,077
0,00952	0,038
0,0127	0,023
0,0191	0,006
0,0191	0,006
0,0191	0,006
Total	1,000

b) Suspended sediment y fall velocity

Al marcar esta casilla tratará este tamaño de grano como de sedimentos en suspensión. Designar la velocidad de caída de esta fracción. Sólo se permite una fracción suspendida en la actualidad. En el proyecto no es de interés la velocidad de caída, así que no se toma en cuenta esta variable.

c) Wilcock y Crowe o Ley de transporte de sedimentos de Einstein

Para todas las celdas con una profundidad de flujo, la erosión fluvial y la deposición se calcula utilizando el método de Einstein-Brown o la formulación Wilcock y Crowe, y se aplica a los 9 tamaños de grano incrustados dentro de una serie de capas activas. Esto permite el efecto de blindaje de cama y el desarrollo de un límite estratigráfico.

d) Max velocity used to Calculate Tau

Tau es la tensión cortante es: “Aquella que según, fijado un plano, actúa tangente al mismo. La tensión cortante aparece en caso de aplicación de un esfuerzo cortante o bien de un momento torsor”(Ortiz Berracal, 1990).

Este valor se puede establecer, por defecto 5 (Pa), para el cálculo de velocidad máxima, que puede ser utilizado para el transporte de sedimentos calculado. Esto rara vez se utiliza, pero a veces se necesita en pendientes muy pronunciadas.

e) Max erode limit

Esto especifica la cantidad máxima de material que puede ser erosionado o depositado dentro de una célula. Este parámetro evita la inestabilidad numérica causada por grandes cantidades de material que se mueve de célula a célula. También controla el paso de tiempo, que se limita a permitir que este valor (como máximo) para ser movido desde una célula a otra. Establecer Max límite erosión a 0,01(m) para 10 a 15 m de tamaño de celda o menos, se puede ajustar un poco más alto para DEMs de mayor tamaño.

f) Active layer thickness

En CAESAR tiene una serie de capas activas que representan carga de fondo, capas de la superficie y las capas del subsuelo. El rango normal para este parámetro es de 0,1 a 0,2 (m) y que deberá ser de al menos 4 veces el máximo límite de erosión.

En el caso del proyecto se toma el valor de 0,1 por presentar mejores resultados en las pruebas.

g) Proportion to be recirculated

Cuando se opera en el modo de alcance esta es la proporción (0-1) de sedimento que sale del lado derecho de la DEM que se alimenta de nuevo a las entradas de alcance si la casilla de verificación re-circular está marcado en tiempo de ejecución. En el caso de este proyecto no se vio necesario hacer una recirculación de sedimentos.

h) In channel lateral erosion rate

Un nuevo parámetro para CAESAR-LISFLOOD. Este parámetro controla que tan grueso o delgado es el canal, lo cual representa que tan cohesiva o no es el sedimento. Si el sedimento es suelto e individual, entonces se erosiona fácilmente, transportado lateralmente (en el canal) y los resultados en un canal de ancho de poca profundidad. Si es más cohesiva, más difícil de mover lateralmente a continuación, más estrechos resultados de los canales más profundos. Los valores más altos de este parámetro resultan en canales anchos, más pequeño en estrechos. Otra analogía es que este parámetro es equivalente a los colapsos laterales de la cama cuando no hay socavación de material. En el corazón de la formulación, se plantea, la idea de que a medida que se erosiona una parte del canal, una pequeña cantidad del canal siguiente a esa parte se moverá o deslizará hacia la parte erosionada. Esta es una variable bastante difícil de estimar y modular porque requiere un vasto conocimiento de la geografía física del sector, por lo cual es muy poco usada.

i) Lateral erosion check box

Selecciona si puede producirse erosión de las orillas. La cual no será tomada en cuenta ya que la modelación de la erosión puntual no es parte de la investigación de este proyecto.

3.4.2.5 Pestaña Descripción

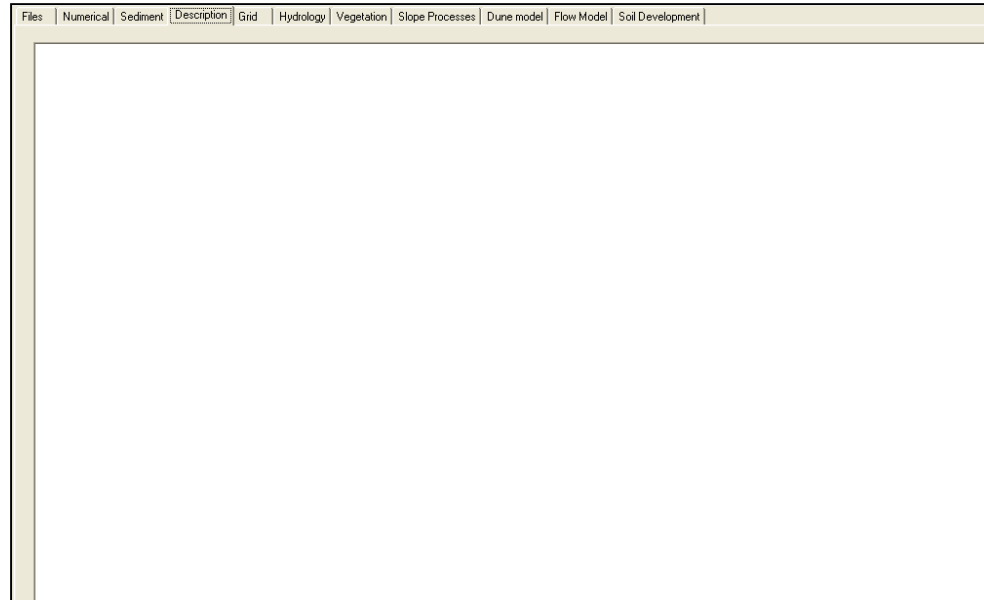


Figura 93 Pestaña descripción

Esto simplemente le permite introducir texto sobre la simulación que se almacena en el archivo de configuración. Esto es útil si está ejecutando varias versiones del modelo y desea hacer un seguimiento de lo que la simulación realiza.

3.4.2.6 Pestaña Cuadrícula



Figura 94 Pestaña Cuadrícula

Este contiene algunos parámetros que se utilizan para pasar por encima de la información de la cabecera en el archivo DTM sobre qué tamaño DTM se está utilizando.

a. Override header box

Si marca esta puede pasar por encima del tamaño de la DTM en lugar de que CAESAR lea los valores directos desde la cabecera del archivo.

b. X, Y and cell size

Introduzca diferentes tamaños x, y, celulares si quieres montar sobre el encabezado en el archivo DTM marcando la opción anterior.

3.4.2.7 Pestaña Hidrología

The screenshot shows the Hydrology tab in a software interface. It contains two main sections: 'Reach input variables' and 'Rainfall input variables'. The 'Reach input variables' section has a table with columns for X, Y, and File Name, and a checkbox for each of eight inputs. The 'Rainfall input variables' section has fields for Rainfall data file, time step, 'm' value, and Time varying M file, along with two checkboxes. The 'Stage/Tidal input variables' section has fields for X, Y, File Name, and input data time step.

	X	Y	File Name
<input checked="" type="checkbox"/> Input 1	404	6	mode_Q_diarios_200.txt
<input type="checkbox"/> Input 2			
<input type="checkbox"/> Input 3			
<input type="checkbox"/> Input 4			
<input type="checkbox"/> Input 5			
<input type="checkbox"/> Input 6			
<input type="checkbox"/> Input 7			
<input type="checkbox"/> Input 8			

input data time step (mins): 1440

Divide inputs by: 1

Rainfall data file: rainfall_64-12_2.txt

Rainfall data file time step (min): 1440

'm' value: 0.01

Time varying M file: null

if checked, discharge is read direct from rainfall file

Spatially variable rainfall

Stage/Tidal input variables

X: 0, Y: 0, File Name: , input data time step (mins): 1440

Figura 95 Pestaña Hidrología

Esta ficha se ocupa principalmente de los datos de entrada para fuentes puntuales cuando funcionan en “reach mode”, pero también contiene la caja para ajustar el valor de m para el modelo hidrológico dato para “catchment mode”.

a. Nombre de archivo x, y

Para las entradas del modo de alcance o “reach”: Esta entradas contiene las coordenadas x e y de los puntos de entrada del agua, así como el archivo que contiene los datos de entrada. La x e y van desde la esquina superior izquierda y están en celdas de la cuadrícula, estas coordenadas se puede extraer mediante el uso de la herramienta libre Rasterdit, la cual es un pequeña herramienta que sirve para editar de forma sencilla archivos formato raster.



Figura 96 Aplicación Rasteredit mostrando parte de la zona de estudio

Posteriormente se debe marcar la casilla de verificación si desea utilizar una entrada. El formato del archivo de entrada es el mismo generado por el archivo de salida, por lo que puede entrar agua y sedimentos en este punto, el archivo generado es el “Reach_mode_Q_diarios_200.txt”.

Un procedimiento similar, se realiza, con la entrada del archivo de precipitación usado para el modo de captación el cual se llama “rainfall_64_12_2.txt”.

b. Divide inputs by

Esto le permite dividir las entradas, así que si usted tiene un archivo de entrada que representa la descarga de una estación de medición (por ejemplo) es posible que desee difundir las entradas a lo largo de 3 o 4 celdas (para evitar que la incisión en un solo punto) y puede utilizar el mismo archivo para todas las entradas, pero se divide por el número de puntos de entrada.

c. Input data time step

El paso de tiempo de cada línea del archivo de entrada anteriormente cargado, se especifica el paso de tiempo de datos en segundos, lo que especifica el tiempo

equivalente en cada línea del archivo. Se trabaja con caudales diarios que equivale a 1440 segundos.

d. Valor 'm'

Para el “catchment mode” o modo de captación esta es una variable importante, explicada en el apartado 2.6.4.1, ya que controla el pico y la duración del hidrograma generado por un evento de lluvia. Es el mismo que el valor "m" usado en TOPMODEL, que es aplicado igualmente en el modelo hidrológico de CAESAR-lisfloods. Los valores típicos para m son de 0,02 (lo que significa las puntas de crecida son bajas e hidrogramas de larga duración) a 0,005 (superior, picos llamativos) y ejemplos de valores utilizados se pueden encontrar en el CAESAR y literatura TOPMODEL.

Se pudo determinar un valor medio de 0,01 recomendado por el autor del CAESAR-Lisflood, el cual puede ser utilizado para hidrogramas con picos llamativos, pero no muy regulares en el tiempo, deducción basada en el estudio morfométrico e índices hidrológicos realizados con antelación.

e. Rainfall data file

Este archivo es para el modo de captación, y es la entrada de la lluvia para el modelo hidrológico. Es un archivo de texto con un número en cada línea en la que el número corresponde a la intensidad de lluvia en mm en determinado tiempo. Un procedimiento similar, al apartado (a), pero esta vez con la entrada del archivo de precipitación usado para el modo de captación el cual se llama “rainfall_64_12_2.txt”.

f. Rainfall data file time step

Como el anterior, el paso de tiempo de los datos de entrada de la lluvia es en minutos.

g. Spatially Variable Rainfall

Haga clic en la casilla de verificación y aparecen dos opciones. En donde se solicita el Hydroindex, el cual es un archivo en el mismo formato que el DEM (archivo ascii ArcGIS) que contiene un número entero que corresponde a diferentes zonas de la lluvia. Si la cuenca tiene dos o más ámbitos diferentes de información pluviométrica, esto es especialmente útil si se tiene información de lluvias que se originaron en datos de radar.

h. Stage/Tidal input variable

Una sección en caja off contiene los valores necesarios para la etapa entradas / marea, la cual se utiliza para regiones costeras, el cual no se utilizó en el presente proyecto. Esta variable no es usada, puesto que estos parámetros son usados para modelar mareas extremas, mas, se describirán rápidamente.

3.4.2.8 Pestaña Vegetación

Esta ficha contiene parámetros relacionados con la parametrización de la vegetación dentro de CAESAR-LISFLOOD. Esto se basa en gran medida en torno a la restricción de la erosión, que la vegetación actúa para evitar o restringir la erosión que sucede. 'Vegetation' no es una planta, arbusto, hierba o árbol específico, pero tiene que ver con la forma en la vegetación, en general, tendrá un impacto en la erosión y deposición dentro del canal y cómo afecta a los procesos fluviales.

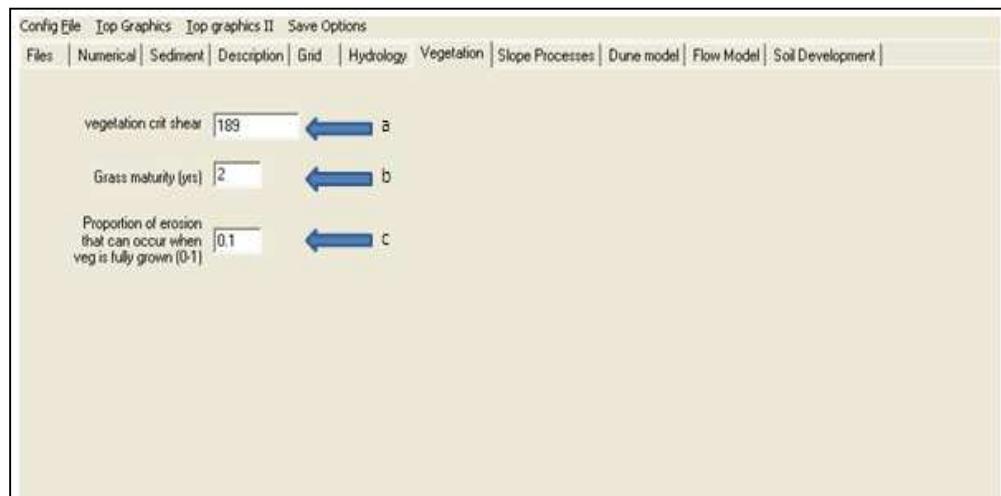


Figura 97 Pestaña Vegetación

a. Vegetation crit shear

Para la erosión de lecho, este es el valor por encima del cual la vegetación se elimina por la erosión fluvial. Así que si se coloca una cifra baja, la vegetación es fácilmente arrastrada, si es más alta, la vegetación es más resistente. Este parámetro es determinado por la tracción necesaria para “arrancar” la vegetación. El valor encontrado es un promedio de 189 (dato recomendado por Prof. Coulthard, autor del CAESAR-Lisflood), puesto que la vegetación es bastante variada en la zona.

b. Grass maturity (tasa de crecimiento)

Esta es la velocidad en la que la vegetación alcanza su plena madurez en años. Madurez varía, si se coloca 0 a 1, se entiende que en 1 año se alcanza la maduración. En el caso del presente estudio se determinó un promedio de tasa de crecimiento de 2 años, para llegar a una madurez completa, ya que en la zona se encuentra una gran variedad de vegetación, desde bosque nativo a vegetación agrícola anual.

c. Proportion of erosion that can occur when veg grown

Este parámetro determina proporción de la erosión que puede ocurrir cuando la vegetación llega a la madurez, en palabras simples es la erosión que puede llegar a ser, en función del crecimiento de la vegetación, lo que afecta a la velocidad de erosión lateral y su tasa. Si se establece en 0, cuando están bien desarrollados no puede haber una erosión con estos dos métodos. Si se establece en 1, entonces la vegetación no tendrá ningún efecto y la erosión ocurrirá. Si se define como (por ejemplo) 0.5, esto significa que cuando la vegetación primero madura completamente y luego se efectuara un el 50% de la erosión normal. Del mismo modo, si se establece en 0,1 entonces la cantidad de erosión permitido variará de 1 a 0,1 siendo muy variable, por tanto se estableció este último parámetro, siendo que se desconoce el comportamiento singular del área.

3.4.2.9 Pestaña Procesos de Pendiente

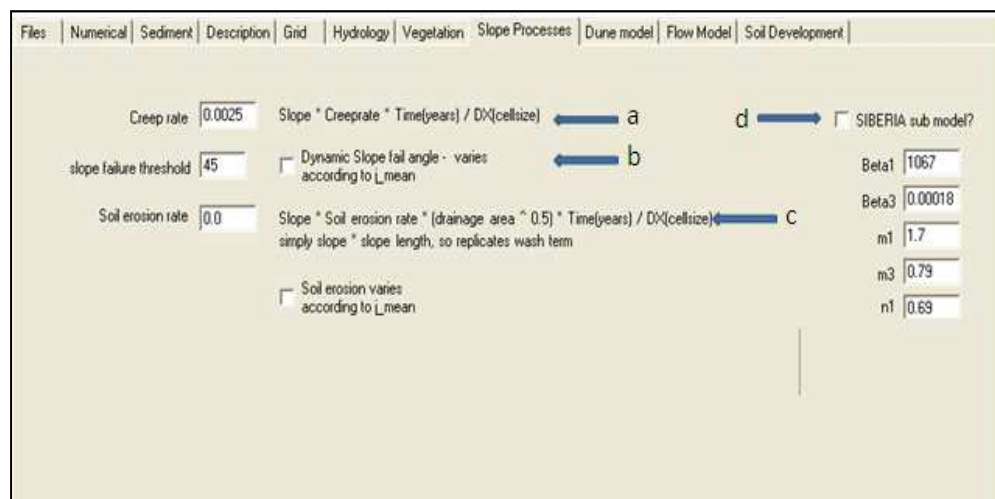


Figura 98 Pestaña Procesos de Pendiente

Esta ficha contiene los parámetros utilizados para el control de procesos de ladera dentro de CAESAR-LISFLOOD.

a. Creep rate

Llamada velocidad de fluencia, siendo que es la deformación de materiales cuando estos son sujetos a cargas constantes en función del tiempo, interpretada como una simple desviación del suelo, por difusión utilizando la siguiente ecuación: Pendiente * velocidad de fluencia * Tiempo (años) / tamaño de celda. Esto influirá a que se produzca erosión en pendientes, y que se redondeen las características más agudas en el terreno. El valores típico recomendado por el autor del modelo es 0,0025.

b. Slope failure threshold

El ángulo en grados por encima del cual los deslizamientos suceden. También hay una casilla de verificación aquí para un umbral de fallo pendiente dinámica, que varía de acuerdo a j_{mean} (una variable CAESAR que corresponde a la saturación del suelo). Esto está todavía en desarrollo por Katharine Galés y Richard Chiverrell según el autor del modelo. Se toma como referente común el ángulo de 45° equivalente a una pendiente del 100%.

c. Soil erosion rate

Esta función es una adaptación de un enfoque del tipo USLE, donde la erosión del suelo es una función de la longitud de la pendiente, la pendiente y una serie de coeficientes. El valor en el cuadro es una variable que forma parte de la ecuación se muestra en la ficha. Cabe destacar que la longitud de la pendiente se deriva de la raíz cuadrada del área de drenaje en un punto. No hay valores sugeridos para esta función, pero no ha sido calibrada o probada con datos de campo hasta la fecha según el autor del modelo. Así que se asume una tasa equivalente a 0, para no afectar los cálculos restantes.

d. SIBERIA Sub Model

Esto permite que el LEM Siberia se ejecute ya sea en lugar de CAESAR o junto a él. Si desea ejecutar únicamente el modelo SIBERIA luego anular la selección de

las casillas de verificación, tanto para alcanzar y modelo de captación en la pestaña archivo. De nuevo, no probado, se debe consultar la literatura SIBERIA, para determinar valores probables. Como no existe un punto de partida como referencia no se toma en cuenta, siendo que el presente estudio se enfoca en el uso de autómatas celulares para determinar zonas de inundación

3.4.2.10 Pestaña Modelo Duna

Files	Numerical	Sediment	Description	Grid	Hydrology	Vegetation	Slope Processes	Dune model	Flow Model	Soil Development
<input type="checkbox"/> Run with Dunes?										
4		how many slabs added per col per iter					144		time step (min) between dune calls	
0.5		Maximum slab thickness (m)					2		Grid size of dunes	
15		Shadow angle (deg)					1			
30		Dune landslip angle								
40		Shadow check distance (cells) - number of cells Upstream it checks for shadow								
50		Deposition probability (%)								
1		Downstream offset (travel distance automatically added)								

Figura 99 Pestaña Modelo Duna

Esta pestaña es útil para algunos trabajos de desarrollo en la integración de procesos eólicos, en zonas desérticas, como no es el caso, tanto de la zona de estudio, como de los objetivos de la investigación, no se toma en cuenta.

3.4.2.11 Pestaña del modelo de flujo

Files	Numerical	Sediment	Description	Grid	Hydrology	Vegetation	Slope Processes	Dune model	Flow Model	Soil Development			
									input/output difference allowed	2	a		
									b	Min Q for depth calc	0.15	1000.0	c
									d	Water depth threshold above which erosion will happen (m)	0.01		
									e	Slope for edge cells	0.01		
									f	Evaporation rate (m/day)	0.000258		
									g	Courant Number	0.5		
										hflow threshold	0.000		h
									i	froude # flow limit	0.8		
									j	Mannings n	0.044		

Figura 100 Pestaña del modelo de flujo

A continuación se explicaran los parámetros de la figura 100, para determinar el movimiento de aguas y zonas de acumulación de flujo.

a. Input/output difference allowed

Es un valor (en cumecs) que se utiliza para acelerar la operación de modelo. Ya sea que se ejecuta en modo de alcance o de captación, CAESAR-LISFLOOD calculará la descarga de agua que debe salir del modelo. Si la cantidad de agua que sale es igual a la que se añade, a continuación, se asume el que el modelo de flujo está funcionando en un estado estacionario. Si es así, entonces podemos separar el paso de tiempo del modelo de flujo, de la del modelo de erosión y deposición, para permitir los pasos de tiempo determinados por la erosión y la deposición. Esto permite que el paso de tiempo aumente de 10 segundos a un máximo de 30 min durante los tiempos de flujo bajo, agilitando el proceso. El valor de la “diferencia permitida de entrada/salida” es la diferencia en cumecs entre la entrada y la salida que es aceptable para permitir el modelo funcione de forma más rápida en estos pasos de tiempo. Como regla general, se podría ajustar para que sea próximo a un

valor bajo flujo o flujo medio anual. CAESAR-LISFLOOD cambiará automáticamente entre estos dos modos de funcionamiento y que se traduce en un funcionamiento mucho más rápido, especialmente durante los caudales bajos o estáticas.

En el estudio actual se determinó que se asuma tiempo estacionario cuando la diferencia sea de 2 cumecs, que es un valor que se genera en los meses de poca lluvia en el área de estudio como se determinó en el apartado 3.2.4.

b. Min Q for depth calc

Este es un umbral por encima del cual CAESAR calculará una profundidad de flujo cuando se ejecuta en modo de captación “catchment mode”. Si esto no está establecido, entonces se pierde el tiempo calculando profundidades de flujo de fracciones de milímetros que no causará ninguna erosión o deposición. Esto depende del tamaño de celda de la cuadrícula variable y como guía el autor del modelo establece este parámetro en 0,1 por tamaño de celda metros. Por ejemplo un DEM con tamaño de celda de 10 metros tendrá un Q Min de 0,1, y un DEM con tamaño de celda 50m tendrá un Q Min de 0.5. Aunque se puede variar un poco.

Para el presente trabajo se utilizó 0,15 por el tamaño semejante de pixel de nuestro DEM, al cual se le aumento el tamaño de 10 a 13, por falta de potencia computacional.

c. Cuadro derecho respecto a Min Q

Este cuadro inmediatamente a la derecha de Min Q, es el Q máximo para calcular profundidad. Esto puede ser importante para el modelo hidrológico ya que agrega agua para cada célula mayor que Min Q, pero menos que el límite establecido aquí. En otras palabras, reducir este valor forzará a añadir más agua en las cabeceras de forma progresiva a lo largo de la cuenca, para lo cual se debe tomar un valor grande.

d. Water depth threshold over which erosion will happen

Flujo profundidad a la que CAESAR comienza a calcular la erosión en m, normalmente esto se ajusta a 0,01, el valor es recomendado como estándar por el autor del modelo. Los valores más bajos se han utilizado en resoluciones muy altas del DEM y más grandes en grandes celdas de la cuadrícula (por ejemplo, por encima de 50 metros).

e. Slope for edge cells


Pendiente de células de borde, es la pendiente de las células de salida en el extremo derecho. LISFLOOD-FP requiere una pendiente para estas células con el fin de calcular una profundidad de agua y por lo tanto fluir hacia fuera a partir del modelo. Esto es en realidad muy importante en el control de la erosión y sedimentación que se produce a lo largo de la parte derecha de la DEM. Demasiado bajo y obtendrá deposición, demasiado alto y socavación de regresar río arriba. Para establecer este valor, calcule el fondo del valle medio (cerca del canal) pendiente para el canal cerca de donde sale.

Se toma un valor de 0.01, con referencia en al perfil longitudinal realizado en la caracterización morfométrica ubicado en el apartado 3.1.1.2, se determina que la zona del cono de eyección de la cuenca del río Cristal tiene una pendiente bastante baja por lo que se promedia un valor como el que se ha tomado.

f. Evaporation rate

Tasa de evaporación en m /día. Ya que la tasa de evaporación no se puede estimar mediante los datos con los que contamos, se ha decidido calcular la evapotranspiración que es la evaporación más la transpiración de la vegetación, para esto se tomara el método Thornthwaite, el cual se basa en caculos mediante meses, latitud de la zona de estudio y temperatura media (ya calculada en parte del apartado 3.1), para esto nos ayudamos de una aplicación sencilla encontrada en la página de La Universidad Estatal de San Diego en su sección de hidrología en línea:

enlinea_thornthwaite: Evapotranspiración potencial por el método de Thornthwaite



Fórmulas

$$I_1 = (T_1/5)^{1.514}$$

$$J = \sum_{i=1}^{12} (I_i)$$

$$c = 0.000000675J^3 - 0.0000771J^2 + 0.01792J + 0.49239$$

$$PET_1(0) = 1.6(10T_1/J)^c$$

$$PET_1(L) = K PET_1(0)$$

DATOS DE ENTRADA:

[Descripción]	[Ejemplo]
Mes: <input type="text" value="Enero"/>	Latitud L (grados): <input type="text"/>
	Hemisferio: <input type="text" value="Norte"/>
Doce (12) valores de temperatura media mensual (T_i °C), de Enero a Diciembre (separe cada valor con una coma; el número máximo de caracteres es 200):	
<input type="text"/>	

Figura 101 Captura de la aplicación online de la Universidad Estatal de San Diego.

El resultado de estos cálculos es 0,00258 m/d, el cual fue ingresado en el modelo.

g. Number Courant

Número de Courant es un valor que controla la estabilidad numérica y la velocidad de funcionamiento del modelo de flujo. Sólo debe oscilar entre 0,2 y 0,7, termino adimensional. Los valores más altos aumentan el paso de tiempo del modelo, pero son más inestables. Valores de estabilidad, y por lo tanto, también depende del tamaño de celda de cuadrícula. Según el autor del modelo, las células más grandes (por ejemplo, 20m, 50m) puede tomar valores de 0.7, células pequeñas (por ejemplo, 2 m) pueden necesitar un valor más pequeño (0,2). La estabilidad también está relacionada con el valor de límite de erodabilidad ya mencionado anteriormente (pestaña sedimentos) que controla la cantidad de sedimento que puede ser erosionada o deposita a partir de una célula. Valores recomendados son 0,5 para DEM 50m, 0,2 para 10m o menos. Para ganar potencia computacional se determinó usar un numero de Courant de 0,5, luego de realizar una serie de pruebas con el valor de 0,3 que sería

el recomendado con relaciona al tamaño del pixel (15m), siendo los resultados muy similares con la ventaja del aumento de la velocidad de proceso.

h. Umbral hflow

Se trata de un parámetro en el modelo de flujo de LISFLOOD FP. Se relaciona directamente con el parámetro hflow, en documentos que describen el modelo LISFLOOD FP. El parámetro hflow es la elevación de la superficie del agua entre dos células. Este umbral, por lo general, se utiliza para prevenir que el modelo de flujo se modifique cuando hay muy pequeños gradientes entre las células. Un buen valor por defecto según Coulthard (2005) es 0,00001 (las unidades están en m).

i. Froude number flow limit

Si se deja demasiado flujo entre las células por paso de tiempo, entonces esto puede conducir a un efecto cuadriculado, que también se pueden controlar mediante la reducción del número de Courant anteriormente mencionado. Además CAESAR-LISFLOOD se puede configurar para evitar que los flujos que excedan el número de Froude determinado, que pasa entre las células. El valor predeterminado es 0,8 como resultado un flujo subcrítico, puede ser mayor si se desea y en muchas circunstancias funciona bien en 1 a 0,8 según el autor del modelo. Por supuesto la restricción del flujo de acuerdo al número de Froude tiene como consecuencia la reducción de la velocidad de la onda de avenida, también puede causar profundidades de agua excesivas y puede reducir las tasas de erosión.

j. Manning n

El coeficiente de rugosidad que utiliza el modelo de flujo de CAESAR-LISFLOOD se puede observar en la Tabla 32.

Tabla 32
Tabla del valor de manning generado en el P1.

Strickler, 1948,D90	
Cowan (1956)	
P1	
nb=	0,01887117
n1=	0,011
n2=	0,003
n3	0,01
n4	0,002
m	1
n=	0,04487117

Para el presente estudio se toma el valor de Mannig ya calculado para el punto P1 que se encuentra aledaño a la zona de estudio de esta sección del río.

3.4.3 Carga de Archivos e inicio de Modelamiento.

Por último se cargan los archivos generados con los que CAESAR-Lisflood iniciara el modelamiento mediante autómatas celulares y sus reglas de transición, esto se hace mediante el botón **load data**.



Figura 102 Botón Load Data

Posteriormente para iniciar el modelamiento se presiona el botón **Start!**

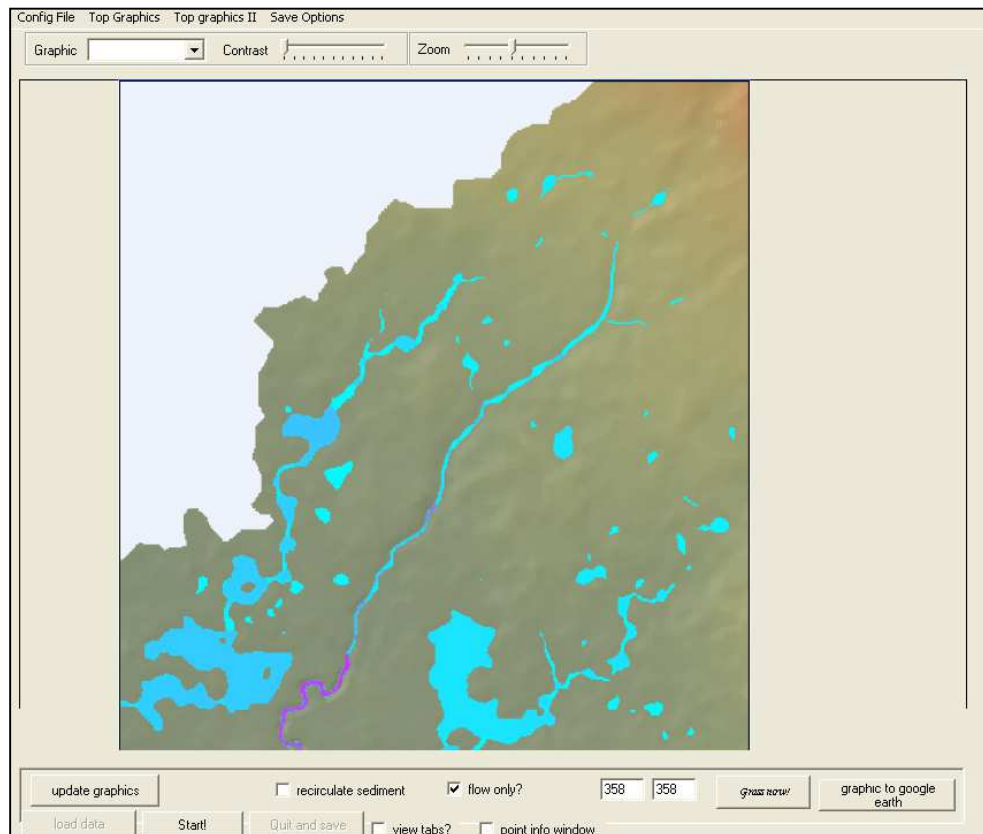


Figura 103 Modelamiento en curso en CAEAR- Lisflood

Se realiza un video acelerado de la simulación planteada, la cual se encuentra en el ANEXO 4.

En la anterior sección se trató la metodología de la implementación y calibración del modelo CAESAR- LISFLOOD, así como de todos los parámetros necesarios y sus datos de entrada. Siendo compendio bastante complejo por el dinamismo del modelo.

4 CAPITULO IV

RESULTADOS DEL MODELAMIENTO DE ZONAS DE INUNDACIÓN MEDIANTE EL MODELO CAESAR-LISFLOOD Y SU COMPARACIÓN CON HEC-RAS

4.0 Resumen

En este apartado se presentan los resultados obtenidos una vez aplicada la metodología antes descrita, se plantea el análisis de pérdidas de coberturas, se analiza posible pérdida o daños de infraestructura por eventos de inundación, la generación de mapas de inundación mediante dos modelos y finalmente se analiza el modelo generado utilizando CAESAR-Lisflood frente al modelo HEC-RAS, comparando su área de afectación, tanto en Montalvo como en su zona rural.

4.1 Análisis de Resultados

4.1.1 Afectación a la zona urbana de Montalvo

Se realiza un análisis del poblado, con su afectación a los distintos sectores delimitados por la administración del GAD Montalvo, al igual que su infraestructura (Ver Figura 104). En el siguiente apartado se mencionara los sectores de acuerdo a la afectación, según los resultados de cada simulación de cada modelo, nombrando a las estructuras de importancia del GAD, que en el caso de un evento se verían perturbadas.

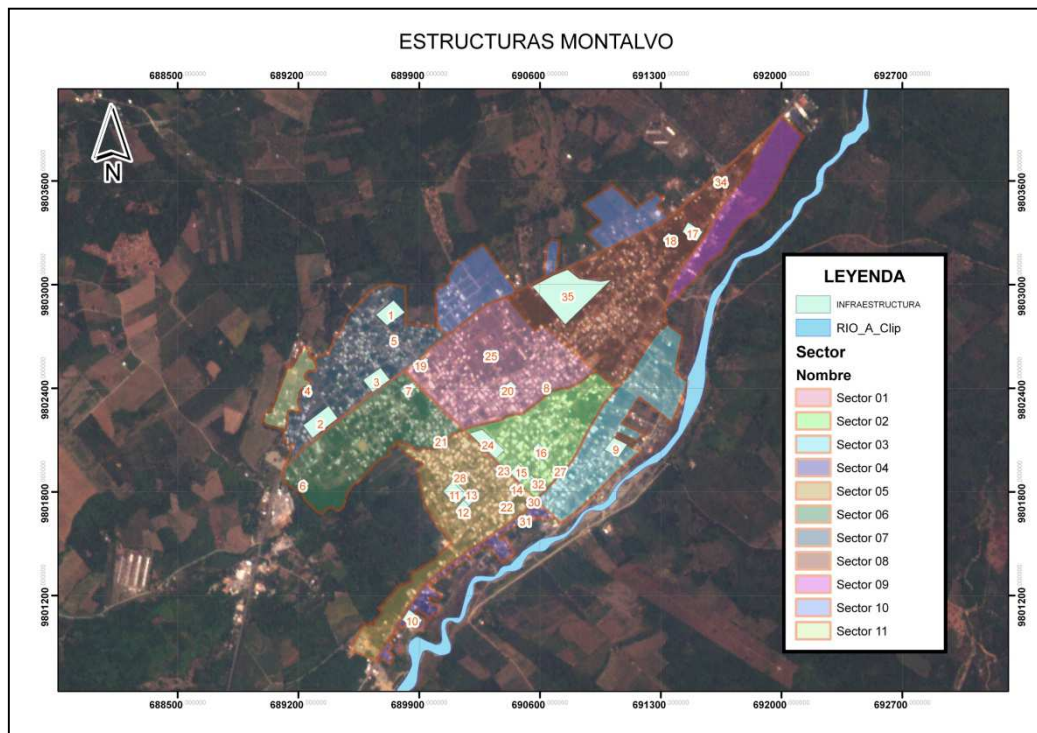


Figura 104 Estructuras principales de Montalvo

Fuente: (García, 2015)

4.1.1.1 Resultados Hec-Ras

Con el modelo hidráulico Hec-Ras se usó 6 caudales, en base al análisis de crecidas realizado en el apartado 3.3.2, generados en con sus respectivos tiempos de retorno, más el modelamiento del caudal máximo medio, dando 7 resultados a estudiar por su facilidad de implementación y corto tiempo computacional para calcular las planicies y alturas de inundación, con su afectación de la infraestructura de importancia.

Caudal Máximo Medio (Montalvo)

Se realiza la simulación en base a la media de los caudales máximos, de la serie 1965 hasta 2012, la tabla resultado del análisis de afectación por sector se puede apreciar en la Tabla 33.

Tabla 33
Resumen de áreas afectadas en Montalvo con Hec- Ras con Caudal Máximo Medio

Caudal Máximo Medio			
Sector	Existe afectación por inundación	Infraestructura afectadas	Área de inundación (%)
SECTOR 1	Si	No afecta	2,19
SECTOR 2	Si	Escuela "La Inmaculada". Escuela "Federico Gonzalez Suarez". Colegio Nacional "10 de Agosto". "Cruz Roja Ecuatoriana"	22,23
SECTOR 3	Si	No afecta	11,54
SECTOR 4	Si	No afecta	0,23
SECTOR 5	Si	Estadio "Nelson Valdez".	4,60
SECTOR 6	Si	No afecta	5,64
SECTOR 7	No	No afecta	0,00
SECTOR 8	Si	No afecta	6,79
SECTOR 9	Si	No afecta	11,71
SECTOR 10	No	No afecta	0,00
SECTOR 11	No	No afecta	0,00

A continuación se puede observar el detalle de alturas y porcentajes específicos del área inundada.

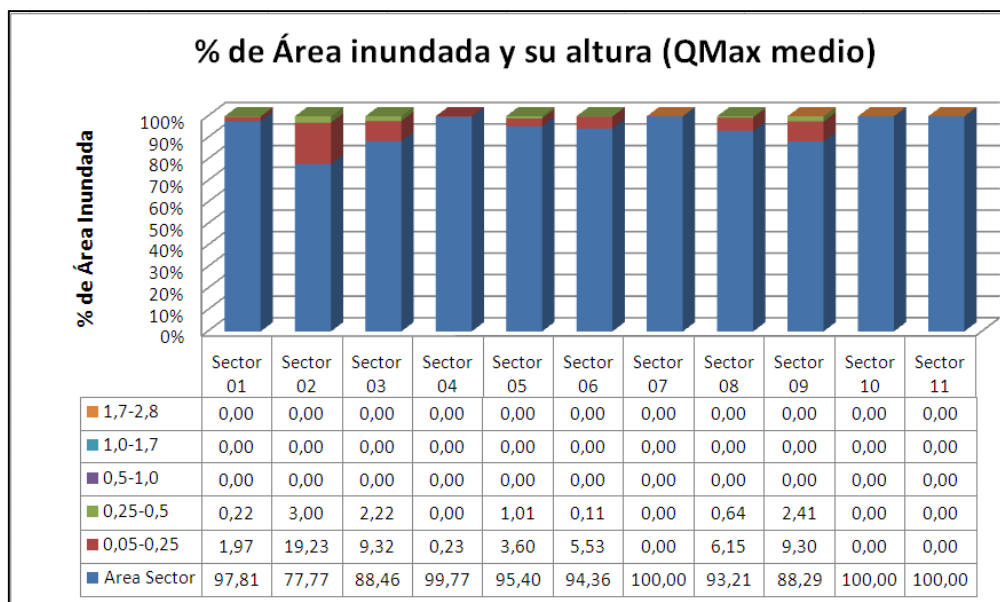


Figura 105 Porcentaje de áreas inundadas y su altura para un Caudal Máximo Medio.

TR 5 años (Montalvo)

Se realiza la simulación en base a un caudal máximo en un tiempo de retorno de 5 años, la tabla resultado del análisis de afectación por sector se puede apreciar en la Tabla 34.

Tabla 34
Resumen de áreas afectadas en Montalvo con Hec- Ras en un TR= 5 años.

Tiempo de Retorno 5 años			
Sector	Existe afectación por inundación	Infraestructura afectadas	Área de inundación (%)
SECTOR 1	Si	No afecta	2,15
SECTOR 2	Si	Escuela "La Inmaculada". Escuela "Federico Gonzalez Suarez". Colegio Nacional "10 de Agosto". "Cruz Roja Ecuatoriana" Escuela "Juan León Mera"	22,72
SECTOR 3	Si	No afecta	11,70
SECTOR 4	Si	No afecta	0,23
SECTOR 5	Si	Estadio "Nelson Valdez".	5,04
SECTOR 6	Si	No afecta	5,58
SECTOR 7	No	No afecta	0,00
SECTOR 8	Si	No afecta	7,22
SECTOR 9	Si	No afecta	13,03
SECTOR 10	No	No afecta	0,00
SECTOR 11	No	No afecta	0,00

A continuación se puede observar el detalle de alturas y porcentajes específicos del área inundada.

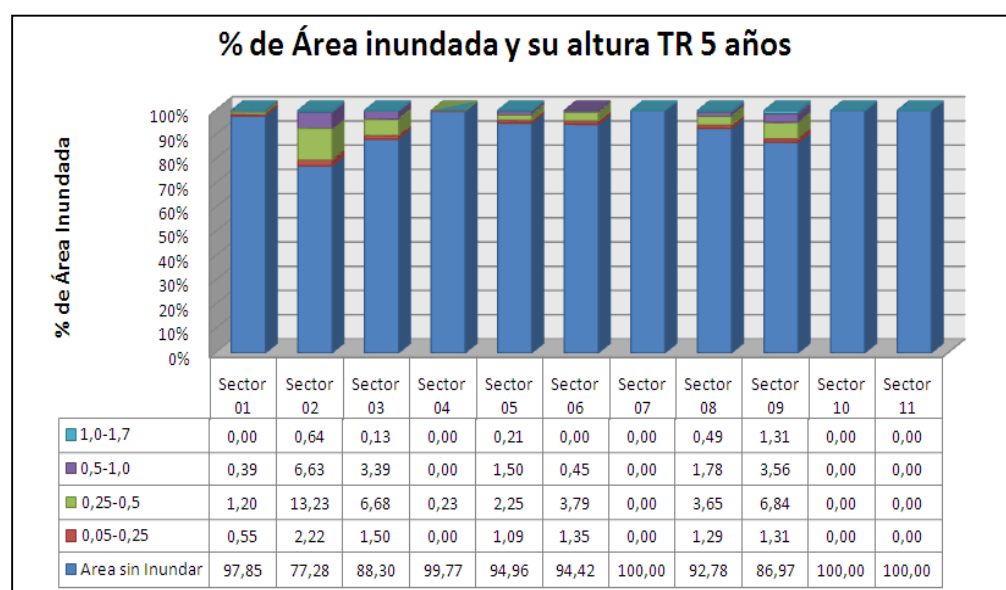


Figura 106 Porcentaje de áreas inundadas y su altura para un tiempo de retorno de 5 años

TR 10 años (Montalvo)

Se realiza la simulación en base a un caudal máximo en un tiempo de retorno de 10 años, la tabla resultado del análisis de afectación por sector se puede apreciar en la Tabla 35.

Tabla 35
Resumen de áreas afectadas en Montalvo con Hec- Ras en un TR= 10 años.

Tiempo de Retorno 10 años			
Sector	Existe afectación por inundación	Infraestructura afectadas	Área de inundación (%)
SECTOR 1	Si	No afecta	2,50
SECTOR 2	Si	Escuela "La Inmaculada". Escuela "Federico Gonzalez Suarez". Colegio Nacional "10 de Agosto". "Cruz Roja Ecuatoriana" Escuela "Juan León Mera"	24,35

sigue ⇒

Tiempo de Retorno 10 años			
Sector	Existe afectación por inundación	Infraestructura afectadas	Área de inundación (%)
SECTOR 3	Si	No afecta	12,65
SECTOR 4	Si	No afecta	1,49
SECTOR 5	Si	Estadio “Nelson Valdez”.	4,35
SECTOR 6	Si	No afecta	5,55
SECTOR 7	No	No afecta	0,00
SECTOR 8	Si	No afecta	10,60
SECTOR 9	Si	No afecta	13,96
SECTOR 10	No	No afecta	0,00
SECTOR 11	No	No afecta	0,00

A continuación se puede observar el detalle de alturas y porcentajes específicos del área inundada.

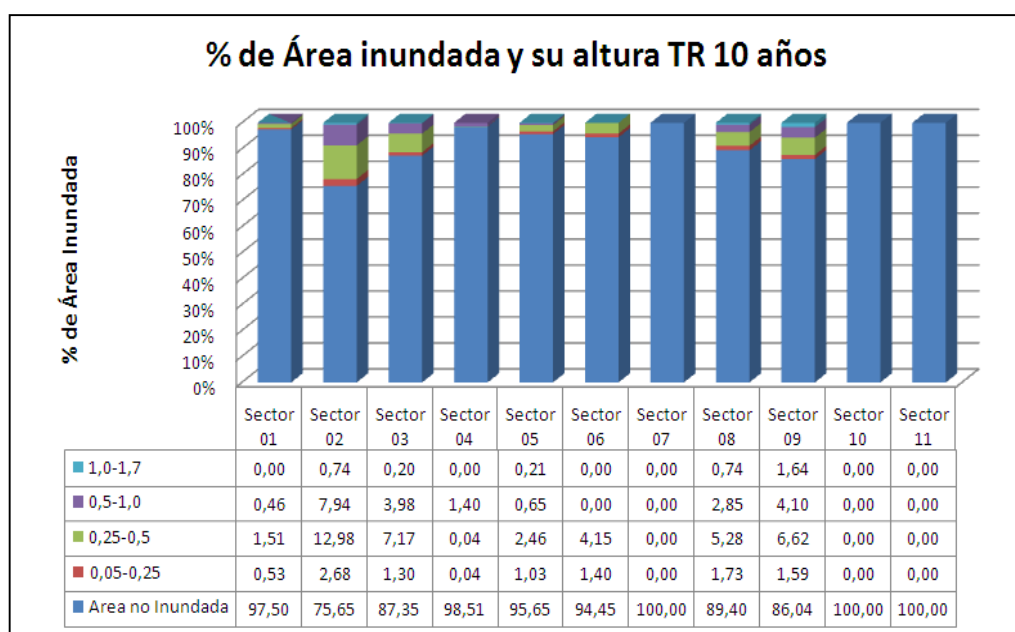


Figura 107 Porcentaje de áreas inundadas y su altura para un tiempo de retorno de 10 años

TR 25 años (Montalvo)

Se realiza la simulación en base a un caudal máximo en un tiempo de retorno de 25 años, la tabla resultado del análisis de afectación por sector se puede apreciar en la Tabla 36.

Tabla 36
Resumen de áreas afectadas en Montalvo con Hec- Ras en un TR= 25 años.

Tiempo de Retorno 25 años			
Sector	Existe afectación por inundación	Infraestructura afectadas	Área de inundación (%)
SECTOR 1	Si	No afecta	2,83
SECTOR 2	Si	Escuela "La Inmaculada". Escuela "Federico Gonzalez Suarez". Colegio Nacional "10 de Agosto". "Cruz Roja Ecuatoriana" Escuela "Juan León Mera"	25,97
SECTOR 3	Si	No afecta	13,76
SECTOR 4	Si	No afecta	0,13
SECTOR 5	Si	Estadio "Nelson Valdez".	6,16
SECTOR 6	Si	No afecta	7,01
SECTOR 7	No	No afecta	0,00
SECTOR 8	Si	No afecta	8,59
SECTOR 9	Si	No afecta	14,72
SECTOR 10	No	No afecta	0,00
SECTOR 11	No	No afecta	0,00

A continuación se puede observar el detalle de alturas y porcentajes específicos del área inundada.

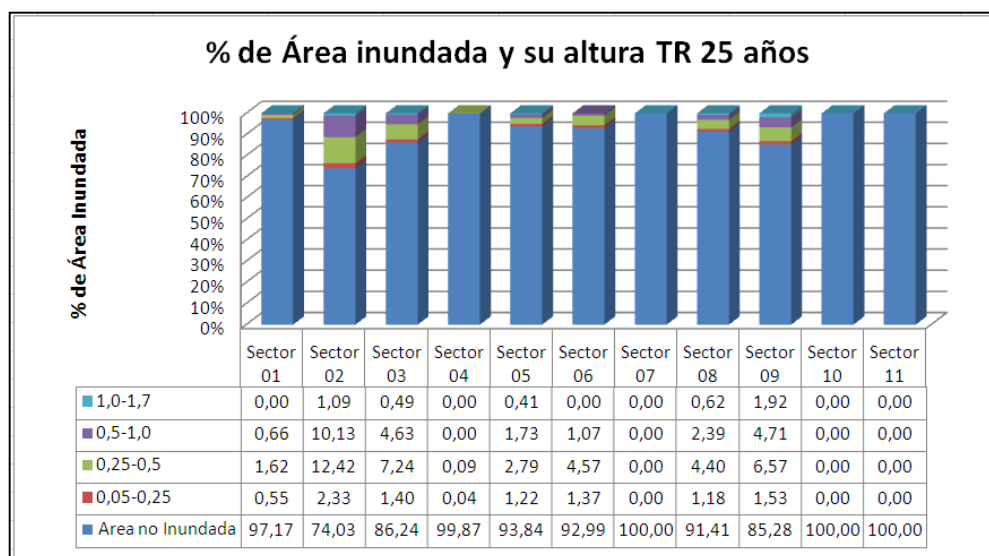


Figura 108 Porcentaje de áreas inundadas y su altura para un tiempo de retorno de 25 años.

TR 50 años (Montalvo)

Se realiza la simulación en base a un caudal máximo en un tiempo de retorno de 50 años, la tabla resultado del análisis de afectación por sector se puede apreciar en la Tabla 37.

Tabla 37
Resumen de áreas afectadas en Montalvo con Hec- Ras en un TR=50 años.

Tiempo de Retorno 50 años			
Sector	Existe afectación por inundación	Infraestructura afectadas	Área de inundación (%)
SECTOR 1	Si	No afecta	3,02
SECTOR 2	Si	Escuela "La Inmaculada". Escuela "Federico Gonzalez Suarez". Colegio Nacional "10 de Agosto". "Cruz Roja Ecuatoriana" Escuela "Juan León Mera"	25,97
SECTOR 3	Si	No afecta	13,93
SECTOR 4	Si	No afecta	0,65
SECTOR 5	Si	Estadio "Nelson Valdez".	5,94
SECTOR 6	Si	No afecta	6,70
SECTOR 7	No	No afecta	0,00
SECTOR 8	Si	No afecta	8,78

sigue ⇒

Tiempo de Retorno 50 años			
Sector	Existe afectación por inundación	Infraestructura afectadas	Área de inundación (%)
SECTOR 9	Si	No afecta	14,66
SECTOR 10	No	No afecta	0,00
SECTOR 11	No	No afecta	0,00

A continuación se puede observar el detalle de alturas y porcentajes específicos del área inundada.

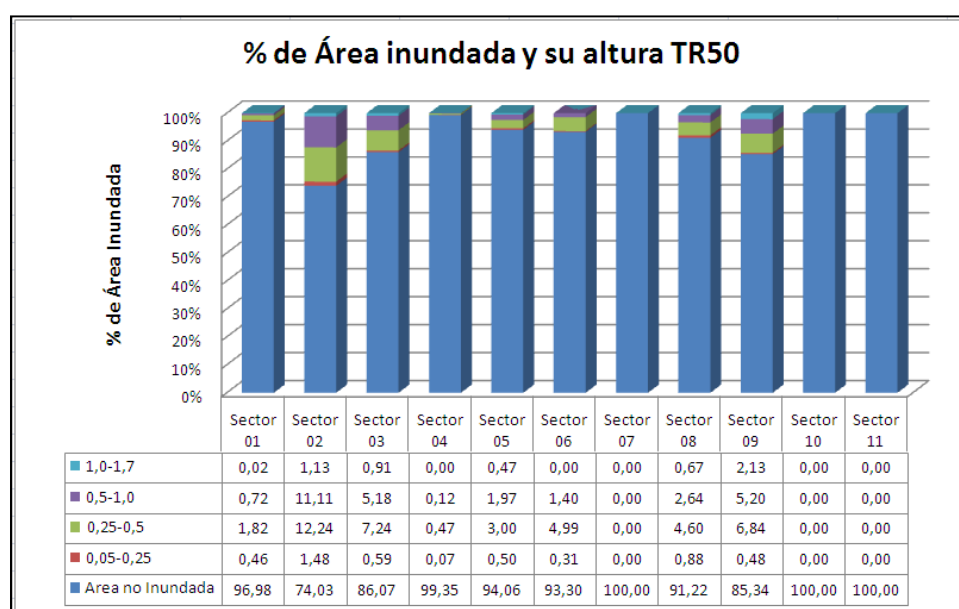


Figura 109 Porcentaje de áreas inundadas y su altura para un tiempo de retorno de 50 años.

TR 100 años (Montalvo)

Se realiza la simulación en base a un caudal máximo en un tiempo de retorno de 100 años, la tabla resultado del análisis de afectación por sector se puede apreciar en la Tabla 38.

Tabla 38
Resumen de áreas afectadas en Montalvo con Hec- Ras en un TR= 100 años.

Tiempo de Retorno 100 años			
Sector	Existe afectación por inundación	Infraestructura afectadas	Área de inundación (%)
SECTOR 1	Si	No afecta	3,44
SECTOR 2	Si	Escuela "La Inmaculada". Escuela "Federico Gonzalez Suarez". Colegio Nacional "10 de Agosto". "Cruz Roja Ecuatoriana" Escuela "Juan León Mera"	28,33
SECTOR 3	Si	No afecta	15,10
SECTOR 4	Si	No afecta	1,05
SECTOR 5	Si	Estadio "Nelson Valdez".	7,22
SECTOR 6	Si	No afecta	7,85
SECTOR 7	No	No afecta	0,00
SECTOR 8	Si	No afecta	9,49
SECTOR 9	Si	No afecta	15,38
SECTOR 10	No	No afecta	0,00
SECTOR 11	No	No afecta	0,00

A continuación se puede observar el detalle de alturas y porcentajes específicos del área inundada.

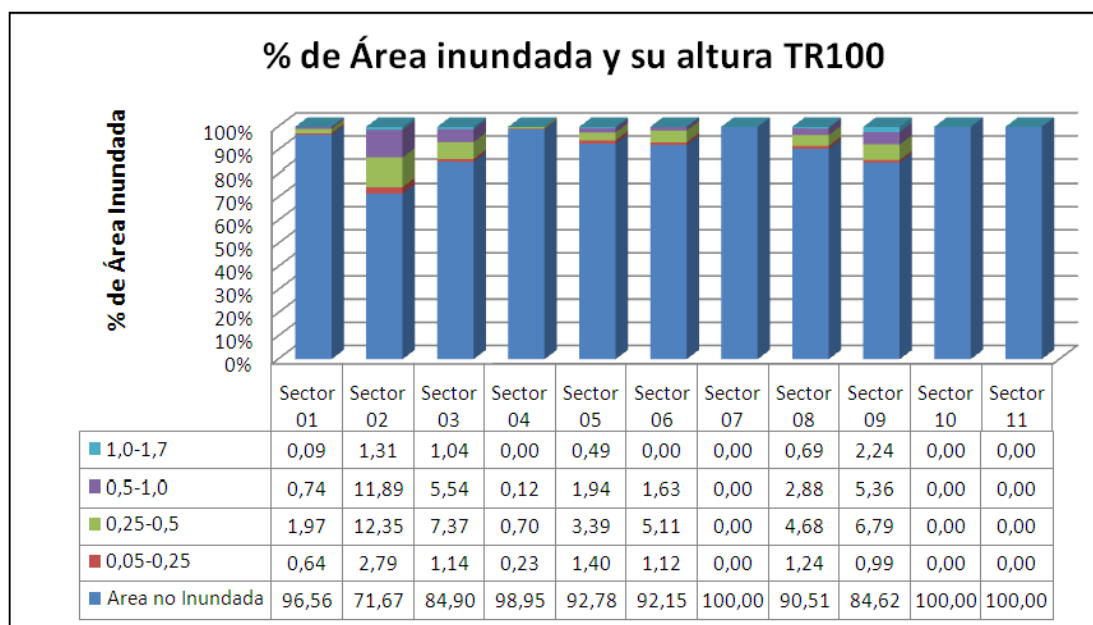


Figura 110 Porcentaje de áreas inundadas y su altura para un tiempo de retorno de 100 años.

Tabla 39
Resumen de áreas afectadas en Montalvo con Hec- Ras en un TR= 1000 años.

Tiempo de Retorno 1000 años			
Sector	Existe afectación por inundación	Infraestructura afectadas	Área de inundación (%)
SECTOR 1	Si	No afecta	4,23
SECTOR 2	Si	Escuela "La Inmaculada". Escuela "Federico Gonzalez Suarez". Colegio Nacional "10 de Agosto". "Cruz Roja Ecuatoriana" Escuela "Juan León Mera"	31,05
SECTOR 3	Si	No afecta	16,76
SECTOR 4	Si	No afecta	3,97
SECTOR 5	Si	Estadio "Nelson Valdez".	8,33
SECTOR 6	Si	No afecta	8,56
SECTOR 7	No	No afecta	0,00
SECTOR 8	Si	No afecta	11,09
SECTOR 9	Si	No afecta	16,97
SECTOR 10	No	No afecta	0,00

sigue →

SECTOR 11	No	No afecta	0,00
------------------	----	-----------	------

A continuación se puede observar el detalle de alturas y porcentajes específicos del área inundada.

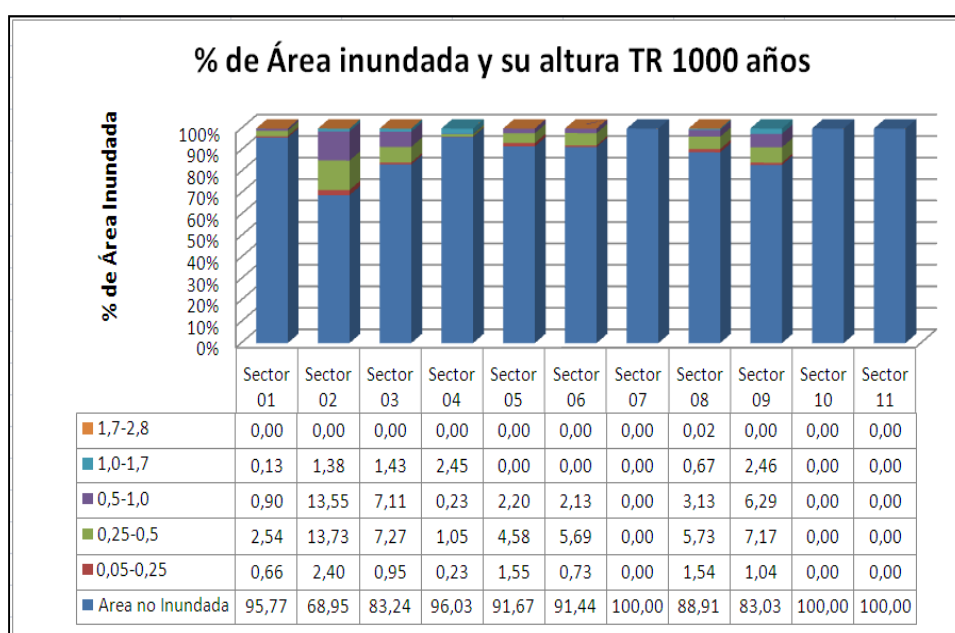


Figura 111 Porcentaje de áreas inundadas y su altura para un tiempo de retorno de 1000 años.

En los resultados se puede observar, que se ven afectadas cinco infraestructuras, siendo el SECTOR 2 el que tendría los mayores pérdidas, en los diferentes escenarios, con un 31% de área inundada, para el tiempo de retorno de 1000 años, con una afectación de 5 infraestructuras, en total se incidió en nueve sectores.

Cabe destacar que la zona más afectada tiene una mayor área de inundación, igualmente con una altura de 0,25 a 1 metros en la simulación del calado. La representación gráfica de los modelos de inundación por sectores de la zona urbana de Montalvo se presenta en el ANEXO3.

4.1.1.2 Resultados CAESAR-Lisflood


Con CAESAR-Lisflood se usó los dos modos en el que puede realizar el modelamiento, el modo Captación (Catchment mode) y el modo alcance “Reach mode”, usando series de tiempo de datos máximos hidrometeorológicos, los cuales pueden simular eventos extremos basados en series de tiempo como insumo, dando 2 resultados a analizar, por su complejidad su uso implica una gran cantidad de tiempo computacional, calculando las planicies y alturas de inundación en Montalvo, con su respectivo análisis de afectación de la infraestructura.

4.1.1.2.1 Modo Captación (Catchment)

Se realiza la simulación en base del Archivo de precipitación el cual es un archivo que es usado en el modo de Captación “Catchment mode”, generado a partir de datos diarios de precipitación obtenidos de las estaciones M0132 (1964-1998) y la estación M0468 (1975-2012), los cuales fueron proporcionados por INAMHI, la tabla resultado del análisis de afectación por sector se puede apreciar en la Tabla 40.

Tabla 40
Resumen de áreas afectadas en Montalvo con CL en Modo Captación.

Modo Captación (Catchment)			
Sector	Existe afectación por inundación	Infraestructura afectadas	Área de inundación (%)
SECTOR 1	Si	Escuela "Ciudad de Montalvo". Cancha Deportiva. Escuela "Gualverto García Ponce". Escuela "Alverto Lemus".	90,72
SECTOR 2	Si	Escuela "La Inmaculada". Escuela "Federico Gonzalez Suarez". Colegio Nacional "10 de Agosto". Escuela "Juan León Mera"	32,25
SECTOR 3	Si	Escuela Juan Celio Secaria	37,43

sigue 

SECTOR 4	Si	Cementerio General	29,33
SECTOR 5	Si	Estadio "Nelson Valdez". Jardin "Coralia Aguirre de Villacres". Subcentro de Salud. UPC "Montalvo"	51,52
SECTOR 6	Si	Colegio "Jaime Roldos Aguilera"	63,31
SECTOR 7	Si	Gasolinera Almeida Gasolinera Sindicato de Choferes Areas Verdes	8,98
SECTOR 8	Si	Incubandina S.A.	18,27
SECTOR 9	Si	No afecta	13,96
SECTOR 10	Si	No afecta	44,70
SECTOR 11	Si	No afecta	7,19

A continuación se puede observar el detalle de alturas y porcentajes específicos del área inundada.

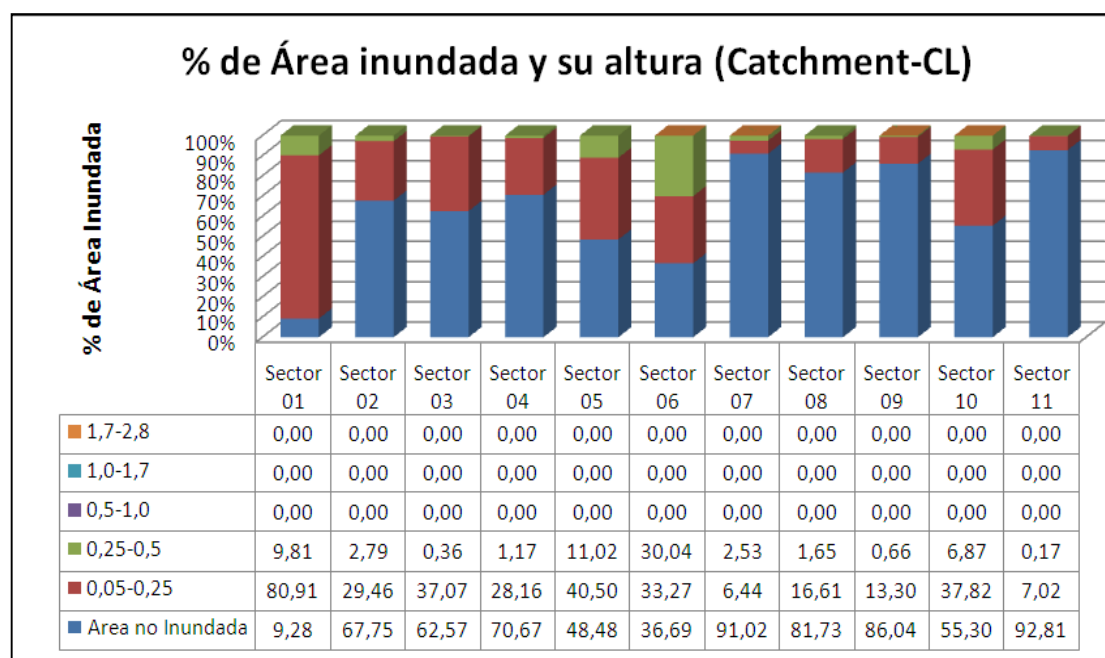


Figura 112 Porcentaje de áreas inundadas y su altura resultado mediante Modo Captación (Catchment).


En este modo se puede ver una mayor distribución de la lámina de agua, afectando a los once sectores, siendo los sectores más afectados, el sector 1 inundado en un 90,72 %, con la altura de inundación de 0,05 a 0,25 metros, y el sector 6 inundado en un 63,31% con alturas de inundación de 0,25 a 0,50. También hubo 19 infraestructura afectadas.

4.1.1.2.2 Modo Alcance (Reach)

Se realiza la simulación en base del Archivo de descarga el cual es un archivo que es usado en el modo de Alcance “Reach mode”, generado a partir de datos diarios de caudales diarios de la cota 200 de la microcuenca del río Cristal mediante los factores de transposición usados en el Capítulo 3, y la estación H343 (1964 - 2012) en Echeandia, ya que existen varios faltantes en la serie de tiempo, se decide rellenar mediante datos de la estación H346, los datos crudos fueron proporcionados por INAMHI, la tabla resultado del análisis de afectación por sector se puede apreciar en la Tabla 41 .

Tabla 41
Resumen de áreas afectadas en Montalvo con CL en Modo Alcance.

Modo Alcance (Reach)			
Sector	Existe afectación por inundación	Infraestructura afectadas	Área de inundación (%)
SECTOR 1	Si	Escuela "Ciudad de Montalvo". Cancha Deportiva. Escuela "Gualverto García Ponce".	55,82

sigue 

SECTOR 2	Si	Escuela "La Inmaculada". Escuela "Federico Gonzalez Suarez". Colegio Nacional "10 de Agosto". Iglesia Montalvo. Escuela Juan León Mera Cruz Roja Ecuatoriana Bomberos	75,31
SECTOR 3	Si	Escuela Juan Celio Secaria	79,39
SECTOR 4	Si	Cementerio General Industria Piladora de Café	52,33
SECTOR 5	Si	Estadio "Nelson Valdez". Jardin "Coralia Aguirre de Villacres". Subcentro de Salud. UPC "Montalvo Banco del Pichincha	62,94
SECTOR 6	Si	Colegio "Jaime Roldos Aguilera". Área verde. Iglesia Buena Fé Cancha Deportiva	44,89
SECTOR 7	No	No afecta	0,00
SECTOR 8	Si	Incubandina S.A.	36,03
SECTOR 9	Si	No afecta	30,17
SECTOR 10	Si	No afecta	4,44
SECTOR 11	No	No afecta	0,00

A continuación se puede observar el detalle de alturas y porcentajes específicos del área inundada.

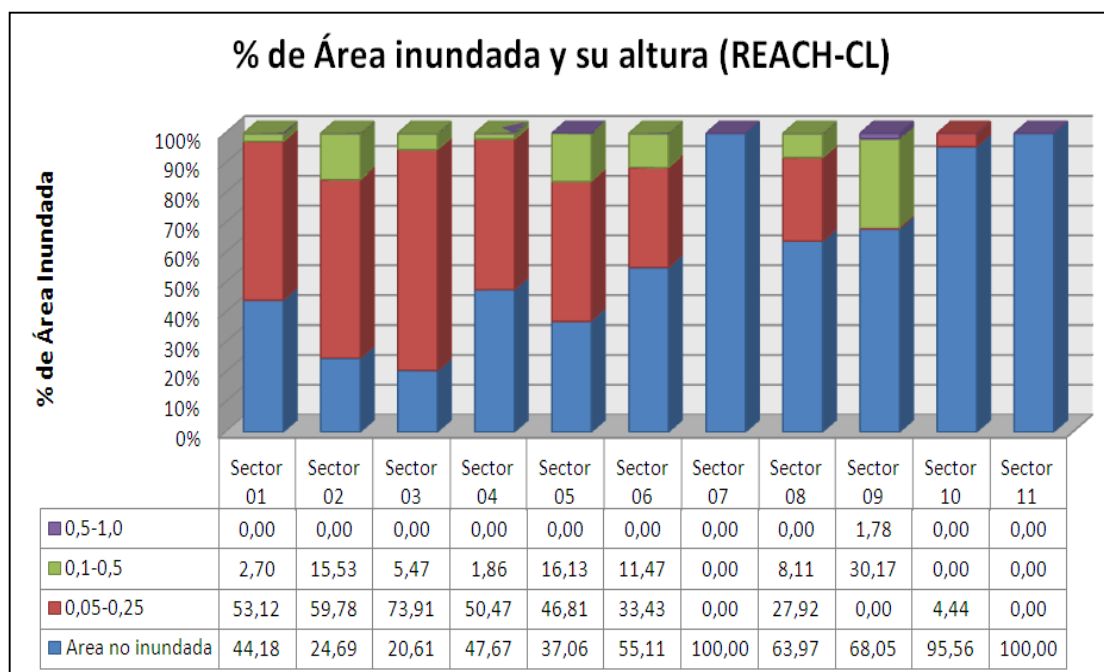


Figura 113 Porcentaje de áreas inundadas y su altura resultado mediante Modo Captación (REACH).

En este modo se puede ver una mayor distribución de la lámina de agua, afectando a nueve sectores, siendo los sectores más quebrantados, el sector 3 inundado en un 79,39 %, con altura de inundación de 0,05 a 0,25 metros, situaciones similares ocurren en los sectores 1,2, 4 y 5. El sector 9 representa una zona con inundaciones de 0,05 a 1 metro, inundado en un 30,17, siendo una zona con más probabilidad de daños muy graves. Existen Afectaciones de 23 infraestructuras de la zona.

4.1.2 Afectación al uso y cobertura de suelo

En el siguiente apartado se realiza un análisis de la pérdida económica aproximadas que las inundaciones provocan anualmente, en las planicies de inundación del área de estudio, enfocándonos en la zona rural y no amanzanada, para esto se tomó como referencia el mapa de cobertura de suelo del 2010 realizado por

Valero (2015), en el cual se representa la cobertura de suelo de la microcuenca del río cristal.

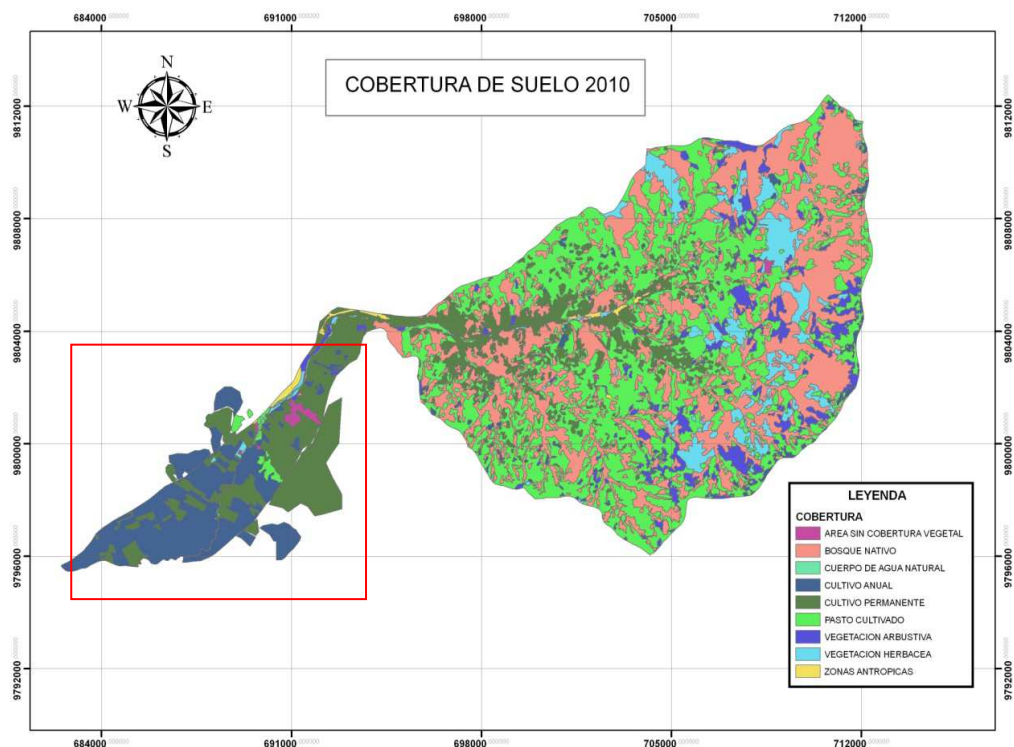


Figura 114 Cobertura de suelo 2010, señalando área de estudio del presente trabajo.

Fuente: (VALERO VALENZUELA, 2015)

En el presente apartado se ha calculado las áreas de cada tipo de cobertura en la zona de estudio, en la cuenca baja del río Cristal, para posteriormente determinar el área del uso de suelo y cuantificar la afectación económica que conllevan las inundaciones, usando como herramienta de estimación de inundaciones los diferentes resultados obtenidos de los modelos ejecutados en el capítulo 3.

Según Valero (2015), el uso de suelo corresponde a las actividades que desarrolla el hombre sobre el territorio, es así que en su análisis, se definió a las coberturas naturales (bosque, vegetación arbustiva y vegetación herbácea) como tierras sin uso alguno. El bosque, podría ser utilizado para fines de recreación; sin embargo, la fisiografía irregular del territorio y la difícil accesibilidad no ha

permitido que desarrollen estas actividades. Además, las áreas sin cobertura vegetal fueron incluidas en esta categoría de uso de suelo debido a que son áreas erosionadas y localizadas en zonas de fuertes pendientes o de inestabilidad, lo que no ha permitido al hombre aprovecharse de esta. Utilizando este criterio las coberturas de suelo y sus respectivos usos de suelo se asociaron de la siguiente manera con una codificación específica para la cobertura: (ver Tabla 42)

Tabla 42
Codificación de coberturas de suelo

<i>Uso de suelo</i>	<i>Cobertura de suelo</i>	<i>Código de Cobertura de Suelo</i>
Agrícola	Cultivo Permanente	CP
	Cultivo Anual	CA
Pecuario	Pastizal	PS
	Cuerpo de agua natural	AG
Recreación	Área poblada	AP
	Bosque	BN
Residencial rural	Vegetación Herbácea	VH
	Vegetación Arbustiva	VA
	Área sin cobertura vegetal	SC

Fuente: (VALERO VALENZUELA, 2015)

Los mapas de afectación de cada modelo, sobre el área rural de la cuenca baja, se encuentran en el ANEXO 3.

Los cálculos se realizaron mediante las premisas de costo de Hectárea en función de cobertura de suelo, se tomó en cuenta el costo de producción de la tierra y pérdida.

Se calculó que el costo de producción de tierra agrícola en el Área es de 1300 año, el valor fue estimado mediante el “REPORTE DE COYUNTURA SECTOR AGROPECUARIO”, realizado por el Banco Central del Ecuador en 2014.

Igualmente se puede estimar el costo de la tierra pecuaria asumiendo el costo de producción de pastizales 700 dólares por Hectárea y la pérdida de la producción de leche en los 3 meses de afectación de la época lluviosa (BCE, 2014).

El estimado del valor de construcción de una vivienda sencilla, tomando como referencia el costo una vivienda rural tipo A-2 del MIDUVI, siendo un aproximado de 130 USD por m².

4.1.2.1 Resultados HEC-RAS

Caudal Medio

Tabla 43
Afectación económica de áreas de uso y cobertura de suelo con Qm

Afectación económica de áreas de uso y cobertura de suelo			
<i>Uso de suelo</i>	<i>Cobertura de suelo</i>	<i>Área Afectada</i>	<i>Costo de pérdida (USD)</i>
		<i>(Ha)</i>	
Agrícola		32,19	41844,50
	CP	13,87	18036,61
	CA	18,31	23807,89
Pecuario		3,18	7955,89
	PS	3,18	7955,89
Recreación		0,00	0,00
	AG	0,00	0,00
Residencial rural		0,47	613577,72
	AP	0,47	613577,72
Sin uso		20,95	
	BN	0,32	
	VH	10,79	
	VA	9,77	
	SC	0,07	
Total uso		56,79	663378,11
	Total cobertura	56,79	663378,11

TR5

Tabla 44
Afectación económica de áreas de uso y cobertura de suelo con TR5

Afectación económica de áreas de uso y cobertura de suelo			
<i>Uso de suelo</i>	<i>Cobertura de suelo</i>	<i>Área</i>	<i>Costo de pérdida (USD)</i>
		<i>Afectada (Ha)</i>	
Agrícola		32,96	42847,04
	CP	14,31	18601,17
	CA	18,65	24245,87
Pecuario		3,22	8053,87
	PS	3,22	8053,87
Recreación		0,00	0,00
	AG	0,00	0,00
Residencial rural		0,46	593371,81
	AP	0,46	593371,81
Sin uso		20,26	
	BN	0,32	
	VH	10,53	
	VA	9,37	
	SC	0,04	
Total uso		56,90	644272,72
	Total cobertura	56,90	644272,72

TR10

Tabla 45
Afectación económica de áreas de uso y cobertura de suelo con TR10

Afectación económica de áreas de uso y cobertura de suelo			
<i>Uso de suelo</i>	<i>Cobertura de suelo</i>	<i>Área</i>	<i>Costo de pérdida (USD)</i>
		<i>Afectada (Ha)</i>	
Agrícola		36,22	47080,08
	CP	15,42	20052,46
	CA	20,79	27027,62
Pecuario		3,44	8591,69
	PS	3,44	8591,69
Recreación		0,00	0,00

sigue →

	AG	0,00	0,00
Residencial rural		0,49	634188,81
	AP	0,49	634188,81
Sin uso		0,53	
	BN	0,32	
	VH	0,11	
	VA	0,10	
	SC	0,00	
Total uso		40,67	689860,59
	Total cobertura	40,67	689860,59

TR 25

Tabla 46
Afectación económica de áreas de uso y cobertura de suelo con TR25

Afectación económica de áreas de uso y cobertura de suelo			
Uso de suelo	Cobertura de suelo	Área	Costo de pérdida (USD)
		Afectada (Ha)	
Agrícola		40,25	52320,42
	CP	16,78	21811,27
	CA	23,47	30509,15
Pecuario		3,79	9464,35
	PS	3,79	9464,35
Recreación		0,00	0,00
	AG	0,00	0,00
Residencial rural		0,52	679149,74
	AP	0,52	679149,74
Sin uso		22,73	
	BN	0,32	
	VH	12,07	
	VA	10,23	
	SC	0,11	
Total uso		67,28	740934,51
	Total cobertura	67,28	740934,51

TR50


Tabla 47
Afectación económica de áreas de uso y cobertura de suelo con TR50

Afectación económica de áreas de uso y cobertura de suelo			
Uso de suelo	Cobertura de suelo	Área	Costo de pérdida (USD)
		Afectada (Ha)	
Agrícola		43,54	56597,05
	CP	17,92	23293,71
	CA	25,62	33303,34
Pecuario		3,94	9838,72
	PS	3,94	9838,72
Recreación		0,00	0,00
	AG	0,00	0,00
Residencial rural		0,56	732410,38
	AP	0,56	732410,38
Sin uso		23,48	
	BN	0,32	
	VH	12,41	
	VA	10,63	
	SC	0,12	
Total uso		71,52	798846,15
	Total cobertura	71,52	798846,15

TR100

Tabla 48
Afectación económica de áreas de uso y cobertura de suelo con TR100

Afectación económica de áreas de uso y cobertura de suelo			
Uso de suelo	Cobertura de suelo	Área	Costo de pérdida (USD)
		Afectada (Ha)	
Agrícola		46,33	60223,46
	CP	18,72	24333,57
	CA	27,61	35889,89
Pecuario		4,15	10386,52
	PS	4,15	10386,52
Recreación		0,00	0,00
	AG	0,00	0,00

sigue 

Afectación económica de áreas de uso y cobertura de suelo			
<i>Uso de suelo</i>	<i>Cobertura de suelo</i>	<i>Área</i>	<i>Costo de pérdida (USD)</i>
		<i>Afectada</i> (Ha)	
Residencial rural		0,58	752747,52
	AP	0,58	752747,52
Sin uso		0,56	
	BN	0,32	
	VH	0,13	
	VA	0,11	
	SC	0,00	
Total uso		51,62	823357,49
	Total cobertura	51,62	823357,49

TR1000

Tabla 49
Afectación económica de áreas de uso y cobertura de suelo con TR1000

Afectación económica de áreas de uso y cobertura de suelo			
<i>Uso de suelo</i>	<i>Cobertura de suelo</i>	<i>Área</i>	<i>Costo de pérdida (USD)</i>
		<i>Afectada</i> (Ha)	
Agrícola		55,60	72280,73
	CP	21,80	28341,52
	CA	33,80	43939,21
Pecuario		4,64	11610,60
	PS	4,64	11610,60
Recreación		0,00	0,00
	AG	0,00	0,00
Residencial rural		0,77	1000963,13
	AP	0,77	1000963,13
Sin uso		26,41	
	BN	0,32	
	VH	14,27	
	VA	11,62	
	SC	0,19	
Total uso		87,42	1084854,47
	Total cobertura	87,42	1084854,47

Se puede observar que las pérdidas son significativas principalmente, en el daño de la residencia rural, siendo este en cualquiera de los escenarios la pérdida más cuantiosa, en segundo lugar se encuentra el sector agrícola, teniendo en pérdidas un promedio de 800000 USD anuales.

4.1.2.2 Resultados CAESAR-Lisflood

Modo captación (catchment)

Tabla 50
Afectación económica de áreas de uso y cobertura de suelo en modo de captación.

Afectación económica de áreas de uso y cobertura de suelo			
Uso de suelo	Cobertura de suelo	Área Afectada	Costo de pérdida
		(Ha)	(USD)
Agrícola		577,88	751238,23
	CP	317,94	413324,66
	CA	259,93	337913,57
Pecuario		27,38	68453,72
	PS	27,38	68453,72
Recreación		0,00	0,00
	AG	0,00	0,00
Residencial rural		1,27	1648752,84
	AP	1,27	1648752,84
Sin uso		40,12	
	BN	0,32	
	VH	8,52	
	VA	9,81	
	SC	21,46	
Total uso		646,64	2468444,79
	Total cobertura	646,64	2468444,79

Modo Alcance (Reach)

Tabla 51
Afectación económica de áreas de uso y cobertura de suelo en modo de alcance.

Afectación económica de áreas de uso y cobertura de suelo			
Uso de suelo	Cobertura de suelo	Área Afectada	Costo de pérdida
		(Ha)	(USD)
Agrícola		190,16	247206,75
	CP	61,11	79438,42
	CA	129,05	167768,33
Pecuario		7,19	17962,64
	PS	7,19	17962,64
Recreación		0,00	0,00
	AG	0,00	0,00
Residencial rural		3,88	5038601,29
	AP	3,88	5038601,29
Sin uso		33,30	
	BN	0,32	
	VH	15,64	
	VA	17,20	
	SC	0,14	
Total uso		234,52	5303770,68
	Total cobertura	234,52	5303770,68

Se puede observar que las pérdidas son significativas, principalmente en el daño de la residencia rural, siendo este en cualquiera de los escenarios la pérdida más cuantiosa, en segundo lugar se encuentra el sector agrícola, dando en pérdidas totales 5303770,68 USD anuales. Siendo el modo de alcance el que simula pérdidas superiores.

4.1.3 Mapa de amenaza por inundación

Según García (2015), en la zona urbana de Montalvo, de su sistema de construcción de vivienda en su mayoría con un 67% son mixtas (Hormigón armado o

madera/hormigón), las cuales tiene baja probabilidad a que sufran daños graves ante una amenaza de inundaciones; no obstante, un 12% tiene un sistema estructural de caña, siendo susceptible a sufrir graves daños en caso de una inundación, siendo en los dos casos anteriores vulnerables por el hecho de un ineficiente o casi inexistente sistema de alcantarillado para sopesar las crecidas y el anegamiento por el temporal. Igualmente la pérdida de grandes áreas de uso agropecuario, que tiene como efecto pérdida de millones de dólares en inversión individual, privada y pública.

La prevención de la erosión, sedimentación en la cuenca baja y la deforestación en la cuenca alta, junto con la adecuada estructuración de un sistema de drenaje, debe tener como finalidad proteger las vidas humanas, la infraestructura y la economía de la zona. Para esto se planteó el uso de modelos dinámicos, como el CAESAR-Lisflood, que simulen factores reales como la erosión y deposición de sedimentos, como los fenómenos hidrometeorológicos e hidráulicos, y plasmarlos en un producto cartográfico como los mapas resultados del proyecto (ver Anexo 3).

4.2 Discusión

Una vez expuestos los resultados obtenidos en las sucesivas fases que componen los análisis hidrológicos y de crecidas, así como la implementación de los modelos CAESAR.Lisflood y HEC-RAS, se procede a su discusión para valorar si la metodología usada ha sido adecuada, justificando los métodos empleados, de igual manera se podrá determinar en qué escenarios modelados se produce una afectación de consideración en la cuenca baja del río Cristal.

Para el caso de los análisis morfométricos, hidrológico y de crecidas, se han utilizados métodos estándar, utilizados en la mayoría de los análisis de inundaciones. Sin embargo en el momento de la obtención de caudales máximos, habiendo revisado las estaciones hidrométricas de la zona y no encontrar alguna con un historial de caudales dentro de la microcuenca, se decide usar un coeficiente de transposición de caudales entre dos microcuencas, se usó coeficiente calculado y validado en Bòsquez et al (2009), elaborado especialmente para transponer el caudal

del proyecto Echeandía y el Balsapamba (cuenca media del Río Cristal), con el fin de tener una serie temporal de datos, para utilizar CAESAR-Lisflood, de igual manera para calcular los caudales máximos esperados en diferentes tiempos de retorno (TR), utilizados por HEC-RAS, mediante el método de Gumbel tipo I, el más confiable según García (2013). De este modo se consiguió datos de caudales bastante fiables y ajustados, ya que ningún valor de caudal parece exagerado y va en consonancia con la zona de estudio. El factor de precipitación, parámetro importante para el uso de CAESAR-Lisflood en modo captación, se obtuvo de las estaciones meteorológicas M0132 (1964-1998) y M0468 (1975-2012), estas dos estaciones se encuentran a menos de 50Km, entre sí, por lo que cumplen con normas de la Guía de prácticas climatológicas de la WMO (World Meteorological Organization) en su edición 2016, lo cual hace posible rellenar datos faltantes entre las dos estaciones.

Para el caso de la determinación de zonas de inundación en la microcuenca del río Cristal, se han usado dos métodos diferentes, uno bidimensional basado en autómatas celular (CAESAR-Lisflood), siendo el principal objetivo de este estudio, y otro basado en el análisis unidimensional de la microcuenca (HEC-RAS). En un principio se planteó usar solamente el CAESAR-Lisflood, por su dinamismo respecto al sistema de la microcuenca, y sus complejas variables de comportamiento, mas también se decidió realizar un análisis unidimensional HEC-RAS, ya que es el habitual en la mayoría de los estudios de inundación, y es el estándar según la FEMA (Flood Map Service Center) de Estados Unidos. Sin embargo, el modelo HEC-RAS no ha dado buenos resultados para varios tiempos de retorno (5, 10, 25, 50), puesto que apenas se reflejan las zonas susceptibles a inundación en el área rural de Montalvo, hecho causado por, según Díaz de la Cruz (2012) al realizar un análisis de peligrosidad de inundaciones utilizando el modelo IBER2D y HEC-RAS, la pendiente casi inexistente en la zona rural de la cuenca baja, de misma manera en el estudio de Ayala (2014), que compara IBER2D con HEC-RAS, se determina mejores resultados al comparar el modelo bidimensional con HEC-RAS, al momento de calcular la planicie de inundación. Igualmente los inconvenientes se suscitan en la zona amanzanada (Montalvo), en la que se puede advertir, que la lámina de agua aparece poco dispersa y demasiado puntual, también no se observa una lámina de agua homogénea, siendo que con CAESAR-Lisflood, las zonas inundadas son

homogéneas y se distribuyen de una forma lógica, como se observa en la investigación de Nwilo, P. C, et al (2012), donde se obtiene una distribución de agua homogénea, y encausada por medio de calles, puesto que se usa, en aquel estudio, un DEM de mayor resolución, y más interesante aun, el trabajo de Ramirez, J.A. et al (2016) que realiza un mapeamiento regional de Hyper-resolution incorporando el módulo de mareas. Como en el presente trabajo es de interés determinar zonas con amenaza de inundación, tanto en el área rural y la amanzanada (Montalvo), del río Cristal, se considera que CAESAR-Lisflood, ha funcionado mucho mejor que HEC-RAS, dando unos resultados mucho más realistas.

Así mismo en el análisis de afectación, no difiere en gran medida esta tendencia, se tiene que para el TR 1000 años en HEC-RAS, se ven afectadas cinco infraestructuras, siendo el SECTOR 2 el que tendría los mayores pérdidas, en los diferentes escenarios producidos por HEC-RAS, con un 31% de área inundada, 0,25 a 1 metros de calado, con una afectación de 5 infraestructuras, entre los cuales se encuentra la Cruz Roja, en total se incidió en nueve sectores, y respecto al uso de suelo y cobertura, se afecta a 87,42 Ha. Sin embargo, los resultados de CAESAR-Lisflood son superiores, respecto a la distribución de lámina de agua y su afectación. En su modo de captación afecta a los once sectores de Montalvo, siendo los sectores más afectados, el sector 1 inundado en un 90,72 %, con la altura de inundación de 0,05 a 0,25 metros, y el sector 6 inundado en un 63,31% con alturas de inundación de 0,25 a 0,50. También hubo 19 infraestructura afectadas, y respecto al uso de suelo y cobertura, se afecta a 646,64 Ha. De igual forma CAESAR-Lisflood, en su modo alcance, se tiene que son afectados nueve sectores, siendo los sectores más quebrantados, el sector 3 inundado en un 79,39 %, con altura de inundación de 0,05 a 0,25 metros, situaciones similares ocurren en los sectores 1, 2, 4 y 5. El sector 9 representa una zona con inundaciones de 0,05 a 1 metro, inundado en un 30,17%, siendo una zona con más probabilidad de daños muy graves. Existen Afectaciones de 23 infraestructuras de la zona, y respecto al uso de suelo y cobertura, se afecta a 234,52 Ha. Determinándose en los dos casos, resultados muy diferentes a HES-RAS.

Se plantea que el principal problema que se presentó respecto CAESAR-Lisflood, fue la calibración de los parámetros, puesto que la cantidad de estas

variables, que simulan la realidad, es bastante considerable, y se debe tener un grado importante de conocimientos de geografía física, así como de hidrología. Otro factor fue el cálculo computacional que lleva el modelo, una vez empezada la simulación, puede llegar a tardar semanas, en el presente proyecto fueron 27 días, puesto que los cálculos se realizan de célula en célula.

5 CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.0 Resumen

El proyecto de investigación tiene como finalidad de la determinación de zonas de inundación mediante el modelo autómatas celular de evolución del paisaje CAESAR-Lisflood, se infirió las siguientes conclusiones y recomendaciones a las que se llegó con base en los objetivos planteados en el Capítulo I y la metodología descrita del proyecto en el Capítulo III, siendo estas el fin último del proyecto de titulación realizado.

5.1 Conclusiones

En el presente trabajo se ha realizado la aplicación del modelo Autómata Celular de evolución de Paisaje CAESAR-Lisflood, para efectos de identificar planicies de inundación, lo cual va acorde con la determinación de zonas de inundaciones en la microcuenca del río Cristal, considerado objetivo general del proyecto. Con este fin para implementar el modelo, se recolectó una serie de información, que tuvo que ser procesada con antelación, siendo que la preparación la información de entrada para los modelos, requirió de una cantidad tiempo considerable, ascendiendo al 10% del tiempo total, por el hecho de que la información hidrometeorológica del Ecuador es reducida y requiere de técnicas de rellenado de series de tiempo (ver apartado 3.4.1.2.2), como también la transposición de caudales (ver apartado 3.3.1).

Posteriormente, con la implementación de la metodología planteada para el modelamiento, se infiere que la simulación con los diferentes modelos dio como resultado, que se estimen las planicies de inundación y sus patrones de flujo dinámicos (CAESAR-Lisflood) y Puntuales (HEC-RAS) (ver Anexo3).

Determinando, que los resultados del modelado y los mapas de inundación (ver capítulo 4 y Anexo 3), de los diferentes escenarios, nos permiten identificar zonas amenazadas, en las cuales se plantearían acciones con el objetivo de disminuir o mitigar el riesgo de inundación.

Así mismo, el estudio realizado se constituye en un aporte a las diferentes metodologías de mapamiento de inundaciones en Ecuador, por el uso de la tecnología autómatas celulares, más para llegar a las metas trazadas, se sirvió del planteamiento de objetivos específicos del proyecto, con sus respectivas herramientas metodológicas. Como es el caso de la caracterización morfométrica de la microcuenca del Río Cristal, uno de los elementos importantes, para estimar la situación real de la microcuenca, primer objetivo específico del proyecto, lo que nos permite concluir que la caracterización morfométrica e índices hidrológicos del río Cristal (ver apartado 3.2), son herramientas útiles para determinar el comportamiento hidrológico de una cuenca hidrográfica, dando énfasis en los picos de crecidas y sus tiempos de concentración, estimando la situación real de la cuenca y enfocándose en los meses de mayor impacto (ver apartado 3.2.4). Con base en la premisa de que la caracterización morfométrica es un elemento para estimar la situación real de la microcuenca, se deduce que, la microcuenca del río Cristal presenta una susceptibilidad alta a inundaciones de acuerdo a los índices hidrológicos y la caracterización antes mencionados (ver apartado 3.2), debido a que su estructura promueve la sedimentación en la cuenca baja y su tendencia a crecidas por lluvias intensas. De forma adicional se concluye que tanto los índices hidrológicos como la caracterización morfométrica del río Cristal (ver apartado 3.2), que estiman la situación real de la cuenca, con respecto a la precipitación y generación de caudales, ayudan a la calibración del modelo CAESAR-Lisflood.

Entre los instrumentos metodológicos de campo utilizados en el proyecto, se aplicó el análisis granulométrico de parte del cauce principal de la microcuenca del río Cristal, acorde al segundo objetivo específico, siendo este un procedimiento necesario para hallar el coeficiente de rugosidad de Manning, variable importante para el modelamiento. Se determinó que la campaña de recolección de muestras para realizar el análisis granulométrico y su proceso en laboratorio, es una actividad que

implica un 50% más de tiempo de lo planificado, y que adicionalmente requiere de un conocimiento mínimo de trabajo de campo y laboratorio.

Uno de los propósitos fundamentales del proyecto, en el cual se centra, es la simulación de canales y patrones de flujo de planicies de inundación, mediante CAESAR-Lisflood, y posteriormente compararlo con HEC-RAS, siendo este último el estándar de la FAME (Flood Map Service Center) de Estados Unidos, todo lo mencionado se encuentra enmarcado en el tercer objetivo específico del trabajo de titulación. Sin embargo en cuanto al Modelado hidráulico 1D (HEC-RAS) que considera fondos de valle como eventos puntales, aunque hidráulicamente correctos, no proporciona datos tan realistas de los patrones y canales de flujo (ver Anexo 3), puesto que este tipo de modelos resulta apropiado para la simulación hidráulica de ríos donde no se tienen llanuras aluviales grandes y no existen diques a lo largo de las márgenes (Bladé, E. & Cea, L., 2008), por tanto, sería más adecuado el uso de un modelo 2D o cuasi-2D. Por medio de los planteamientos antes mencionado, se concluye, que los modelos (LEMs) como CAESAR-Lisflood, son una alternativa idónea, visto que cuentan con una característica destacable, la cual es, tomar en cuenta los cambios en el paisaje mediante un fundamento teórico a nivel macro, tanto en la superficie y el lecho del río (ver apartado 2.6), por lo tanto, proporciona una estimación realista, de la dinámica de una cuenca. Por ende, se evidencio que CAESAR-Lisflood tiene un enrutamiento y distribución del flujo de la planicie de inundación, mucho más fino y mejor distribuido, respecto a HEC-RAS, por ser un modelo 2D basado en autómatas celulares (AC), que trabaja con la cuenca hidrográfica como un cumulo de células dinámicas entrelazadas, donde en cada una de ellas se realiza cálculos, como se explica en el apartado 2.6.4, tanto: hidrológicos, hidráulicos, de erosión, deposición, movimiento de masas y pendiente. Según los modelamientos realizados, se determina que los resultados obtenidos de CAESAR-Lisflood y HEC-RAS, difieren en gran medida en superficie afectada en hectáreas de la zona rural de Montalvo, puesto que en los dos modos de CAESAR-Lisflood se estima una incidencia de 646,64 y 234,52 hectáreas, mientras el HEC-RAS 87,42 hectáreas (ver apartado 4.4.). Finalmente, en la comparación de los dos modelos, se enfatiza también la variable de tiempo de procesamiento, puesto que, CAESAR-Lisflood, es cuantiosamente mayor al realizado por HEC-RAS, en este último, tan

solo tomo pocos minutos; mientras tanto el primero tomo un aproximado de 27 días, para generar 1660 resultados consecutivos.

Mediante la metodología aplicada, se infiere, que la cuenca baja del río Cristal fue la zona idónea, para realizar el modelamiento y simulación propuesta en el cuarto objetivo específico del proyecto, puesto que, es donde se presentan principalmente las acciones de los eventos hidrometeorológicos extremos y donde se ubica el principal centro poblacional de la microcuenca (Montalvo). Posteriormente de aplicar el procedimiento, se establecieron áreas de inundación, implementando CAESAR-Lisflood, en Montalvo (ver ANEXO 3), lo cual determino una incidencia en la gran mayoría de infraestructuras de importancia del poblado, como se puede analizar en el apartado 4.3.2.

Mediante el análisis íntegro del proyecto, se aduce, que durante los períodos pico que influyen en el aumento de las inundaciones, combinado con el cambio de uso de suelo en la cuenca alta del Cristal, tiene por resultado la modificación significativa de la cuenca baja y su afectación. Conllevando según los resultados de los modelamientos realizados, tanto en CAESAR-Lisflood y HEC-RAS, a que existe afectación económica en la zona rural de Montalvo, y que los resultados difieren en gran medida, mas, se concluye, según el apartado 4.4, que la pérdida económica estimada en los diferentes escenarios, puede ir de un aproximado de 800 mil dólares a más de 5 millones de dólares, lo que conlleva una perdida cuantiosa, tanto al estado, como a los pobladores, siendo el componente humano el más perjudicado. Lo anteriormente mencionado atiende a los fines del quinto objetivo específico planteado del presente proyecto.

Finalmente se puede concluir que la aplicación de modelos dinámicos del paisaje como CAESAR-Lisflood, con énfasis en los procesos de forma del relieve y el análisis de inundaciones, que trabaja con autómatas celulares, es una herramienta necesaria para el desarrollar estrategias de protección contra inundaciones y políticas de planificación relacionadas con amenazas naturales en Ecuador.

5.2 Recomendaciones

- Implementar metodologías de evaluación de inundaciones mediante modelado dinámico, para la producción de mapas de riesgo de inundación, para su uso en planificación territorial.
- Asegurar utilización de datos LIDAR estén disponibles para todas las cuencas hidrográficas que tengan problemas con fenómenos naturales, para apoyar futuras investigaciones relacionadas con el riesgo de inundación.
- Contar con estaciones de trabajo con una arquitectura robusta idónea para realizar modelamientos que necesiten grandes tiempos computacionales.
- Instar un mejoramiento de la red hidrometeorológica, como insumo de un sistema de alerta temprana, para zonas regularmente afectadas por estos fenómenos naturales.
- Realizar una comparación entre el CAESAR-Lisflood (LEM) y modelos hidráulicos 2D (p.e. IBER).

6 BIBLIOGRAFIA

- AHMED, M. (2008). *APLICACIONES DEL MODELO HEC-RAS PARA EL ANALISIS DEL FLUJO NO PERMANENTE CON SUPERFICIE LIBRE*. Escuela Politecnica Nacional del Ecuador.
- Alcaraz, F. (2013). Bioclimatología. *Universidad de Murcia*, 2, 16.
- Almorox Alonso, J. (2003). Climodiagramas. *Climatología Aplicada Al Medio Ambiente Y Agricultura*, 201.
- Arcement Jr, G. J., & Schneider, V. R. (1989). *Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains. Technical Report, Geological Survey Water-Supply, United States Government Printing Office, Washington, U.S.A.* [https://doi.org/Report No. FHWA-TS-84-204](https://doi.org/Report%20No.%20FHWA-TS-84-204)
- Aristizabal Murillo, V. M. (2013). Modelos hidrológicos e hidráulicos de zonificación de la amenaza por inundación en el municipio de La Dorada Caldas, (6), 1–134.
- ASOCARS, REINO DE LOS PAISES BAJOS, & UNIVERSIDAD DE MAGDALENA. (2011). *AJUSTE DEL PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DEL COMPLEJO DE HUMEDALES DE LA VERTIENTE OCCIDENTAL DEL RÍO MAGDALENA EN EL DEPARTAMENTO DEL ATLÁNTICO Y DETERMINACIÓN DE LA RONDA HÍDRICA DE LOS HUMEDALES DE SABANAGRANDE, SANTO TOMAS Y PALMAR DE VÁRELA: Identifica. Ajuste del Plan de Ordenación y Manejo del Complejo de humedales de la Vertiente Occidental del Río Magdalena en el Departamento del Atlántico y determinación de la ronda hídrica de los humedales de Sabanagrande, Santo Tomás y Palmar de Várela.* Retrieved from http://protejete.wordpress.com/gdr_principal/amenazas_vulnerabilidades/
- Barrera, J. (2003). Tema 9□: Fundamentos Del Movimiento De Fluidos. In *Mecánica de fluidos* (pp. 1–10).
- Bladé, E., Sánchez, M., Juny, Sánchez, H. P., Niñerola, D., & Gómez, M. (2009). *Modelación numérica en ríos en régimen permanente y variable Modelación numérica en ríos en régimen permanente y variable.*
- Bòsquez, H., Paredes, C., Vinuesa, J., & Saavedra, J. (2009). Análisis en cascada de los Proyecto Balsapamba Alto , Balsapamba Medio y Balsapamba Bajo en el Río Cristal.
- Brewer, P., Coulthard, T. J., Davies, J., Macklin, M., & Jones, A. F. (2006). *Predictive and investigative modelling of flood hazard in Welsh river catchments. Final report to WAG, BGS, CCW and EA.*
- Brunner, G. (2010). *HEC-RBrunner, G. (2010). HEC-RAS River Analysis System. DAVIS.AS River Analysis System.* DAVIS.
- Brunner, G. W. (2010). River Analysis System - HEC-RAS, (January). Retrieved from <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>
- Caligaris, M. G., & Rodríguez, G. B. (2010). Simulaciones Computacionales□: Autómatas Celulares. In *Los métodos numéricos en la enseñanza, la ingeniería*

y las ciencias (pp. 2–10).

- CAPRADE. (2009). *Estrategia Andina para la Prevencion y Atencion de Desastres, Primera Ed*, 40.
- Cardona A., O. D. (1993). *EVALUACIÓN DE LA AMENAZA, LA VULNERABILIDAD Y EL RIESGO: “Elementos para el Ordenamiento y la Planeación del Desarrollo.”*
- CARRILLO, L. R. (2013). “ *Simulación De Lahares Del Volcán Cotopaxi En Sus Drenajes Del Lado Norte Con El Uso Del Programa Hec-Ras .”*
- CARRILLO GALLEGOS, L. R. (2013). “ *SIMULACIÓN DE LAHARES DEL VOLCÁN COTOPAXI EN SUS DRENAJES DEL LADO NORTE CON EL USO DEL PROGRAMA HEC-RAS .”* Sangolqui.
- Cazcarra, Á. M. (2014). Proyecto Fin de Carrera Título del proyecto □: *Simulación hidráulica esquematizada de los canales principales de la Comunidad General de Riegos del Alto Aragón mediante el programa informático HEC-RAS Índice.*
- Constantino, L., Gil, Z. N., Jaramillo, A., Benavides, M. P., & Bustillo, A. E. (2011). *Efecto del cambio y la variabilidad climática en la dinámica de infestación de la broca del café , Hypothenemus hampei en la zona central cafetera de Colombia ., 121(Ipcc 2007), 106–119.*
- Coulthard, T. J. (1999). *Modelling Upland Catchment Response to Holocene Environmental Change*. University of Leeds.
- Coulthard, T. J., Lewin, J., & Macklin, M. G. (2005). *Modelling differential catchment response to environmental change. Geomorphology, 69(1–4), 222–241.* <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.01.008>
- Coulthard, T. J., Macklin, M. G., & Kirkby, M. J. (2002). *A cellular model of Holocene upland river basin and alluvial fan evolution. Earth Surface Processes and Landforms, 27(3), 269–288.* <https://doi.org/10.1002/esp.318>
- Coulthard, T. J., Neal, J. C., Bates, P. D., Ramirez, J., de Almeida, G. A. M., & Hancock, G. R. (2013). *Integrating the LISFLOOD-FP 2D hydrodynamic model with the CAESAR model: Implications for modelling landscape evolution. Earth Surface Processes and Landforms, 38(15), 1897–1906.* <https://doi.org/10.1002/esp.3478>
- Coulthard, T. J., & Van De Wiel, M. J. (2012). *Modelling river history and evolution. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 370(1966), 2123–2142.* <https://doi.org/10.1098/rsta.2011.0597>
- Coulthard, T., & Van De Wiel, M. J. (2006). *The Cellular Automaton Evolutionary Slope And River Model (CAESAR). Accounting for Sediment in Rivers, (2003), 101–119.* Retrieved from <http://ir.lib.uwo.ca/geographypub/227/>
- Delgadillo, A., & Moreno, A. (2012). *Morfometría de cuencas. Revista de La Asociacion Geologica Argentina, 13(1945), 16–22.* Retrieved from http://tycho.escuelaing.edu.co/contenido/encuentros-suelosyestructuras/documentos/tercer_ent/estudio_causas_colapso_algunos_puentes.pdf%5Cnhttp://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/25777

- Delgadillo, A., & Moreno, A. (2012). *Caracterización de las cuencas*. *Revista de La Asociación Geológica Argentina*, 13(1945), 16–22. Retrieved from http://tycho.escuelaing.edu.co/contenido/encuentros-suelosyestructuras/documentos/tercer_ent/estudio_causas_colapso_algunos_puentes.pdf%5Cnhttp://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/25777
- Félix, F. B. (2009). *Caracterización fisiográfica de una cuenca*. Universidad de Sonora.
- Fonsêca, D. N. (2012). *Reconstrução da Paisagem Geomorfológica através da Assinatura Geoquímica dos eventos deposicionais da bacia do rio Capibaribe-Mirim*, Pernambuco, 0–167.
- García, F. J. M. (2013). *Análisis De Distribuciones Estadísticas Alternativas a Las Tradicionales Para La Optimización De Los Caudales De Cálculo Empleados En Los Estudios Hidrológicos*, 222.
- GARCIA POZO, J. A. (2015). *ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD FÍSICA, POLÍTICA, SOCIO-ECONÓMICA, AMBIENTAL Y CULTURAL, MEDIANTE EL USO DE TÉCNICAS DE EVALUACIÓN MULTICRITERIO (EMC), EN LA PARROQUIA JUAN MONTALVO, PROVINCIA DE LOS RÍOS*. UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS- ESPE.
- Gaudiani, A. A., Giusti, A. De, Luque, E., & Naiouf, M. (2008). *Simulación paramétrica paralela. Aplicación a modelos de predicción de inundaciones*.
- González -Toro, C. (2005). *Sedimentación. Conservando Nuestro Suelo*.
- Grenfell, M. C. (2015). *Modelling Geomorphic Systems*: Fluvial Virtual rivers, 4, 1–12.
- Ibáñez, S., Moreno, H., & Gisbert, J. (2010). Morfología de las cuencas hidrográficas. *Universidad Politécnica de Valencia*, 12.
- Ibáñez, S., Moreno, H., & Gisbert, J. (2011). Morfología de las cuencas hidrográficas.
- Icochea Salas, L. (2015). *EL NIÑO OSCILACIÓN SUR*.
- INDECI. (2011). *Manual de estimación del riesgo ante inundaciones fluviales*.
- INHAMI. (2010). *Proyecto “Fortalecimiento Del Inamhi En Apoyo a La Gestión Integral Del Riesgo De Desastres Naturales Y Del Cambio Climatico En Ecuador.”* Retrieved from <http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/uploads/2013/04/PROYECTO-GESTION-DE-RIESGOS-INAMHI.pdf>
- LONDOÑO ARANGO, C. H. (2001). *CUENCAS HIDROGRÁFICAS: BASES CONCEPTUALES – CARACTERIZACIÓN PLANIFICACIÓN-ADMINISTRACIÓN*. Ibagué.
- Marín, G. (2002). *Hidráulica Fluvial. Conceptos generales sobre morfología, dinámica y el transporte de sedimentos en ríos aluviales. Ecuaciones y métodos de uso más extendido para su evaluación y cálculo*.
- Melgarejo, E. M. (2013). *Manual Básico de HEC - GeoRAS 10*, 10, 1–25.
- Micaeli, A., dos Santos, M., Teixeira, G., & Wellausen, N. (2012). Análise morfométrica das sub-bacias hidrográficas Perdizes e Fojo no município de

- Campos do Jordão, SP, Brasil. *Revista Ambiente E Agua*, 9(3), 445–458. <https://doi.org/10.4136/1980-993X>
- Moreno Aguirre, B. (2015). *RENDIMIENTOS DE ARROZ EN CÁSCARA EN EL ECUADOR, PRIMER CUATRIMESTRE DEL 2015*.
- ONU, & FAO. (2016). *El Ecuador: un país con elevada vulnerabilidad*, 1.
- Oñate, F. (2010). Hidrología, 1–114.
- Ordóñez, J. (2011). *¿ Qué Es Cuenca Hidrológica? Sociedad Geológica de Lima*, 1, 1–44. Retrieved from http://www.gwp.org/Global/GWP-SAm_Files/Publicaciones/Varios/Cuenca_hidrologica.pdf
- Orellana, H., Robalino, J., & Paguay, D. (2015). *GESTIÓN INTEGRAL DE RIESGOS EN LA REGIÓN AMAZONICA - RAE, APLICADO AL SECTOR HIDROCARBURÍFERO*.
- Ortiz Berracal, L. (1990). *RESISTENCIA DE MATERIALES*.pdf. (McGraw-Hill, Ed.) (3rd ed.). Madrid.
- Padilla, O. (2005). *AUTÓMATAS CELULARES: UNA SOLUCIÓN A LA GEOSIMULACIÓN*. *Revista Geoespacial-ESPE*, (Figura 1).
- Pidwirny, M., & Jones, S. (2006). “*The Drainage Basin Concept*”. *Fundamentals of Physical Geography*. Retrieved from <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/10aa.html>
- Ponce, E. (2008). *Comportamiento Hidraulico Y Sedimentologico De La Bocatoma Independiente De Aguas Andinas En El Rio Maipo.*, 55. Retrieved from file:///C:/Users/HP/Desktop/investigacion II/descgara para inves 2/COMPORTAMIENTO HIDRAULICO Y SEDIMENTOLOGICO DE.pdf
- RAMOS, G., & RECALDE, V. (2013). *GENERACIÓN DE MAPAS DE VULNERABILIDAD PARA DESLIZAMIENTOS, INUNDACIONES Y TSUNAMIS A ESCALA 1:10.000 EN LA ZONA URBANA SAN VICENTE DEL CANTÓN SAN VICENTE, PROVINCIA DE MANABÍ, UTILIZANDO HERRAMIENTAS GEOINFORMÁTICAS Y PROPUESTA DE DISEÑO DE UN PLAN DE GES*.
- Reyes, D. (2011). *Descripción y Aplicaciones de los Automatas Celulares*. U.N.a.M., 1–26.
- SANCHEZ, J. (2015). *RIESGO POR INUNDACIÓN DE LA ZONA NORTE DEL DISTRITO DE LUYANDO – PROVINCIA DE LEONCIO PRADO – DEPARTAMENTO DE HUÁNUCO MEDIANTE LA METODOLOGÍA DEL CENEPRED*.
- Solano, T., & Vintimilla, N. (2013). *ESTUDIO FLUVIOMORFOLÓGICO DEL RÍO VINCES Y DETERMINACIÓN DE LAS ÁREAS DE INUNDACIÓN DE LA ZONA DE INFLUENCIA DEL PROYECTO PACALORI APLICANDO HEC-GEORA*. Universidad de Cuenca.
- U.S. Army Corps of Engineers. (1991). *Hydraulic design of flood control channels. Engineer Manual 1110-2-1601*, 183.
- Valero, L. (2015). *Estudio Multitemporal Y Análisis Prospectivo Del Cambio De Uso De Suelo Y Cobertura Vegetal En La Microcuenca Del Río Cristal*

Mediante El Uso De Automatas Celulares. Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE.

- VALERO VALENZUELA, J. L. (2015). *Estudio Multitemporal Y Análisis Prospectivo Del Cambio De Uso De Suelo Y Cobertura Vegetal En La Microcuenca Del Río Cristal Mediante El Uso De Automatas Celulares*.
- Valtierra, J. G., & Domínguez, M. Á. (2006). *Herramienta para la Caracterización Geomorfológica de Cuencas Hidrográficas*.
- Van De Wiel, M. J., Coulthard, T. J., Macklin, M. G., & Lewin, J. (2011). *Modelling the response of river systems to environmental change: Progress, problems and prospects for palaeo-environmental reconstructions*. *Earth-Science Reviews*, 104(1–3), 167–185. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2010.10.004>
- VILLAGOMEZ, H., MENDOZA, E., & BOWEN, E. (2008). *Estudios De Prefactibilidad Para La Construcción De Una Mediana Central Hidroeléctrica Aprovechando Las Aguas Del Río Toachi*. Retrieved from <http://www.cib.espol.edu.ec/catalogo/73674/detallesCatalogo.aspx>
- Villegas, P. (2013). *Análisis Morfométrico de una cuenca*. Retrieved from <http://www.aguaysig.com/2013/10/analisis-morfometrico-de-una-cuenca.html>
- Zonas inundables ya fueron determinadas por la SNGR*. (2013, January). *LA HORA*. Quito.

