

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



**PROYECCIONES DE LOS IMPACTOS HIDROLÓGICOS  
BASADOS EN EL PLAN DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL  
VIGENTE: ESQUEMA DIRECTOR, EN EL ÁREA  
METROPOLITANA DE SAN SALVADOR (AMSS)**

PRESENTADO POR:

**JOSUÉ RODRIGO ESTRADA PONCE**

**LIDIA YANET LÓPEZ RECINOS**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

**INGENIERO CIVIL**

CIUDAD UNIVERSITARIA, ABRIL 2021

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

**RECTOR :**

**MSC. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO**

**SECRETARIO GENERAL:**

**ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

**DECANO :**

**Ph.D. EDGAR ARMANDO PEÑA FIGUEROA**

**SECRETARIO :**

**ING. JULIO ALBERTO PORTILLO**

**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

**DIRECTOR :**

**ING. ANÍBAL RODOLFO ORTIZ**

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

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

**INGENIERO CIVIL**

Título :

**PROYECCIONES DE LOS IMPACTOS HIDROLÓGICOS  
BASADOS EN EL PLAN DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL  
VIGENTE: ESQUEMA DIRECTOR, EN EL ÁREA  
METROPOLITANA DE SAN SALVADOR (AMSS)**

Presentado por :

**JOSUÉ RODRIGO ESTRADA PONCE**

**LIDIA YANET LÓPEZ RECINOS**

Trabajo de Graduación Aprobado por :

Docentes Asesores :

**ING. EDWIN SANTIAGO ESCOBAR RIVAS  
ING. MSc. INGRID ALTAGRACIA ALFARO LOPEZ  
(Asesora Externa)**

San Salvador, abril 2021

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Asesores :

**ING. EDWIN SANTIAGO ESCOBAR RIVAS**

**ING. MSc. INGRID ALTAGRACIA ALFARO LÓPEZ**  
**(Asesora Externa)**

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por protegerme durante todo el camino que he trascendido hasta este punto en mi vida, por darme la fortaleza para superar cada obstáculo en mi camino.

A mi madre quien ha sido mi apoyo a lo largo de mi vida, agradezco su ejemplo en todos los ámbitos de mi vida y ha sido mi soporte para jamás rendirme y siempre seguir adelante.

A los ingenieros docentes de la Universidad de El Salvador, quienes compartieron sus conocimientos y experiencias.

A Alejandra Lazo por darme ánimos en el momento los más cruciales y por su importante apoyo en los tramos finales de realización de este trabajo.

A Janet López, por su compañía y ayuda en la realización de esta tesis y por compartir este camino.

A los ingenieros Ingrid Alfaro y Santiago Escobar, quienes asesoraron la tesis, gracias por valiosa guía en la realización de este trabajo de graduación.

***Josué Rodrigo Estrada Ponce***

## AGRADECIMIENTOS

Quiero tomarme este espacio para agradecer a Dios por permitirme comenzar y terminar mi sueño, sostuvo mi fe cuando pensé dejar de luchar, a Él sea la gloria y la honra.

Agradezco a una de las personas más importante en mi vida, mi madre **Rosa Lidia Recinos**, quien creyó en mí y me alentó con su apoyo y amor, a seguir hasta el final.

Agradezco a mis hermanas que siempre estuvieron presentes dándome ánimos, **Claudia Lizeth Recinos** y **Brenda Patricia Recinos**, al igual, agradezco a mi hermano **Walter Alexander Recinos**, muchas gracias por tu apoyo.

A mi familia, mi amado **Cristian Gomez** por su amor y apoyo incondicional, y a la luz de mi vida mi **Cristian Jared** que en momentos difíciles estuvo siempre a mi lado.

A mi compañero y amigo **Rodrigo Ponce**, quien no escatimó tiempo, esfuerzo y paciencia invertido en esta investigación, le deseo muchos éxitos y bendiciones.

A todos mis amigos haciendo mención especial a **Josefina de León, David Serrano, Natalia Portand, Alma Cristina Gómez, Leonel González**.

A nuestros asesores ingeniera **Ingrid Alfaro** e ingeniero **Santiago Escobar** infinitas gracias.

*Lidia Yanet López Recinos*

## DEDICATORIAS

Dedico este trabajo a Dios que me acompaña siempre y me da la sabiduría e inteligencia para obtener cada logro en mi carrera y vida.

A mi madre Reyna Elizabeth Ponce quien ha estado conmigo en los buenos y malos momentos en el camino a mi culminación de mis estudios universitarios, me ha dado su apoyo en todos los aspectos.

A mi abuela Matilde Pérez y toda mi familia, quienes me han apoyado toda mi vida para seguir adelante en todas mis metas, y quienes me han dado los consejos de vida más valiosos.

Y finalmente a todos mis amigos que han estado ahí para brindarme su amistad

***Josué Rodrigo Estrada Ponce***

## DEDICATORIAS

Dedico este trabajo a **Dios**, él es el que ha provisto sabiduría y recursos para terminar esta investigación.

A mi madre **Rosa Lidia Recinos** quien me apoyo incansablemente para que juntas alcanzáramos la culminación de esta carrera.

A mi familia y amigos quienes en momentos difíciles siempre obtuve ánimos de parte de cada uno de ellos. Especialmente a **Cristian Gomez**.

A todas las personas que tienen un sueño y están rodeados de muchos obstáculos, nada es imposible siempre hay que creer.

A mi hijo **Cristian Jared Gomez** al cual espero ayudar a crecer en conocimiento y sabiduría y espero pueda leer esta investigación en un futuro próximo.

***Lidia Yanet Lopez Recinos***

## INDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS .....	xvii
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	xxi
CAPITULO 1- GENERALIDADES .....	1
1.1 INTRODUCCIÓN .....	2
1.2 ANTECEDENTES .....	3
1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	13
1.4 OBJETIVOS .....	15
1.4.1 OBJETIVO GENERAL .....	15
1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
1.5 ALCANCES .....	17
1.6 LIMITACIONES .....	19
1.7 JUSTIFICACIÓN .....	20
CAPITULO 2- MARCO TEORICO .....	22
2.1 INTRODUCCIÓN .....	23
2.2 GENERALIDADES .....	24
2.2.1 DESCRIPCION.....	24
2.2.2 POBLACIÓN.....	24

2.2.3 DENSIDAD POBLACIONAL .....	26
2.2.4 ÁREAS ABIERTAS .....	29
2.3 ASPECTOS SOCIO-ECONÓMICOS DEL AMSS .....	31
2.3.1 DISPONIBILIDAD DE SERVICIOS.....	31
2.3.2 ESTADO DE SUELO URBANO.....	31
2.4 CLIMA .....	33
2.4.1 PRECIPITACIONES .....	35
2.4.2 TEMPERATURA.....	37
2.5 GEOMORFOLOGIA .....	39
2.6 ESTRATIGRAFÍA.....	42
2.7 USO DE SUELO DEL AMSS .....	45
2.8 CRECIMIENTO URBANO .....	46
2.9 QUE ES EL CAMBIO CLIMÁTICO.....	51
2.9.1 CONCEPTO .....	51
2.10 CAUSAS Y CONSECUENCIAS DEL CAMBIO CLIMATICO.....	51
2.10.1 CAUSAS .....	51
2.10.2 CONSECUENCIAS DEL CAMBIO CLIMATICO EN EL MUNDO ....	55
2.11 ACUERDOS INTERNACIONALES .....	57

2.12 EL SALVADOR, UNO DE LOS PAÍSES MÁS VULNERABLES FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO .....	59
CAPITULO 3- CARACTERIZACION DE LA CUENCA DEL RIO ACELHUATE.	63
3.1 INTRODUCCIÓN .....	64
3.2 CONCEPTOS.....	65
3.3 UBICACIÓN .....	67
3.4 GEOLOGÍA DE LA CUENCA .....	70
3.5 TIPOS DE CUENCAS .....	74
3.6 TIPOS DE SUELO EN LA CUENCA .....	77
3.7 EVAPOTRANSPIRACIÓN.....	82
3.8 HIDROGRAFÍA .....	88
3.9 PARÁMETROS FÍSICOS DE LA CUENCA.....	90
3.9.1 ÁREA Y SUPERFICIE DE DRENAJE.....	90
3.9.2 PERÍMETRO DE LA CUENCA .....	93
3.9.3 LONGITUD DE CAUCE PRINCIPAL .....	94
3.9.4 LONGITUD AXIAL DE LA CUENCA DEL RIO ACELHUATE .....	96
3.9.5 ANCHO PROMEDIO DE LA CUENCA.....	97
3.9.6 PENDIENTE MEDIA DEL CAUCE PRINCIPAL.....	97
3.9.7 PENDIENTE MEDIA DE LA CUENCA.....	102

3.9.8 ELEVACIÓN DE LA CUENCA.....	106
3.9.9 LA CURVA HIPSOMÉTRICA.....	108
3.9.10 HISTOGRAMA DE FRECUENCIA ALTIMÉTRICA.....	112
3.10 PARÁMETROS DE FORMA DE LA CUENCA.....	114
3.10.1 ORDEN DE LAS CORRIENTES.....	114
3.10.2 DENSIDAD DE DRENAJE.....	119
3.10.3 ÍNDICE DE COMPACIDAD O COEFICIENTE DE GRAVELIUS ...	121
3.10.4 FACTOR DE FORMA .....	122
3.10.5 RELACIÓN DE ELONGACIÓN.....	124
3.10.6 TIEMPO DE CONCENTRACIÓN.....	125
3.10.7 RELACIÓN DE CIRCULARIDAD.....	127
3.11 TABLA RESUMEN DE LA CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA .....	128
3.12 RELACION PRECIPITACIÓN Y ESCURRIMIENTO A TRAVES DEL METODO SCS .....	131
3.12.1 NÚMERO DE CURVA .....	134
3.13 INFORMACION PLUVIOMÉTRICA.....	155
CAPITULO 4- MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA MEDIA Y ALTA DEL RIO ACELHUATE .....	161
4.1 INTRODUCCIÓN .....	162

4.2 GENERALIDADES DEL PROGRAMA HEC-HMS .....	163
4.3 COMPONENTES DEL PROGRAMA HEC HMS .....	166
4.4 HERRAMIENTAS PARA EL MODELO DE UNA CUENCA EN PROGRAMA HEC-HMS.....	167
4.5 MODELO DE LA CUENCA DEL RIO ACELHUATE.....	168
4.5.1 SUB CUENCAS (SUBBASIN) .....	168
4.5.2 MÉTODO DE PÉRDIDAS INICIALES (LOSS METHOD) .....	174
4.5.3 MÉTODO DE TRANSFORMACIÓN DE LLUVIA (TRANSFORM)...	177
4.5.4 MÉTODO DE FLUJO BASE (BASEFLOW) .....	180
4.5.5 MODELO DE TRANSITO DE AVENIDA.....	185
4.6 DATOS DE PRECIPITACIÓN (TIME SERIES DATA).....	191
4.6.1 GENERALIDADES DE LA PRECIPITACIÓN .....	191
4.6.2 INTENSIDAD DE LA PRECIPITACIÓN .....	192
4.6.3 ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS DENTRO DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	193
4.6.4 DESCRIPCIÓN DEL EVENTO METEOROLÓGICO (TORMENTA IDA) .....	195
4.6.5 HIETOGRAMA.....	197
4.6.6 POLÍGONOS DE THIESSEN .....	202

4.6.7 DISTRIBUCIÓN DE LA LLUVIA .....	208
4.7 MODELO METEOROLÓGICO .....	213
4.8 ESPECIFICACIÓN DE CONTROL.....	218
4.9 RESULTADOS DE MODELACIÓN .....	219
4.10 PROCESO DE CALIBRACIÓN DE LA MODELACIÓN .....	221
4.10.1 PROCESO PARA CONSTRUIR LA CURVA DE CALIBRACIÓN ..	229
4.10.2 PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DE HIDROGRAMA DE CALIBRACIÓN .....	247
4.10.3 CAMBIO DE NUMERO DE CURVA (DEL AÑO 2016 AL AÑO 2009) .....	251
4.10.4 CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO EN BASE A LA CURVA DE CALIBRACIÓN .....	254
CAPITULO 5- MODELACIONES HIDRÁULICAS DE LA CUENCA DEL RIO ACELHUATE PARA ESCENARIOS DE IMPERMEABILIZACIÓN BASE Y AMPLIADA.....	257
5.1 INTRODUCCIÓN .....	258
5.2 CLASIFICACIÓN DE SUELOS SEGÚN EL ESQUEMA DIRECTOR .....	259
5.2.1 SUELOS RURALES .....	259
5.2.2 SUELOS NO URBANIZABLES.....	260

5.2.3 SUELOS URBANIZABLES.....	260
5.2.4 SUELOS URBANOS.....	261
5.3 IMPERMEABILIZACIÓN DEL SUELO .....	264
5.4 TRATAMIENTOS URBANÍSTICOS .....	265
5.4.1 TRATAMIENTOS DE REVITALIZACIÓN DE CORREDORES .....	265
5.4.2 TRATAMIENTO DE ESTABILIZACIÓN .....	267
5.4.3 TRATAMIENTOS DE MITIGACIÓN EN BORDES URBANOS .....	268
5.4.4 TRATAMIENTO DE RECUPERACIÓN DE CENTROS HISTÓRICOS .....	269
5.4.5 TRATAMIENTO DE CONSOLIDACIÓN .....	269
5.4.6 TRATAMIENTO DE RECUPERACIÓN AMBIENTAL .....	270
5.4.7 TRATAMIENTO DE CONSOLIDACIÓN EN ASENTAMIENTOS RURALES.....	270
5.4.8 TRATAMIENTO DE DESARROLLO AGRÍCOLA .....	272
5.4.9 TRATAMIENTO DE EXPANSIÓN .....	272
5.4.10 TRATAMIENTO DE CONSERVACIÓN AMBIENTAL.....	272
5.5 CÁLCULO DEL NÚMERO DE CURVA DE ESCENARIOS DE IMPERMEABILIZACIÓN .....	275

5.6 ANÁLISIS PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL HIETOGRAMA DE DISEÑO .....	284
5.6.1 EL PERIODO DE RETORNO .....	286
5.6.2 CURVAS INTENSIDAD-DURACIÓN-FRECUENCIA (I-D-F) .....	289
5.6.3 TORMENTA DE DISEÑO .....	290
5.6.4 HIETOGRAMA DE DISEÑO UTILIZANDO LAS CURVAS IDF .....	291
5.7 MODELACION DE ESCENARIO BASE Y AMPLIADO EN HEC-HMS ..	301
5.8 MODELACION HIDRÁULICA.....	308
5.8.1 PROCESO DE MODELACIÓN EN HEC-RAS.....	311
5.9 RESULTADO DE MODELACION HIDRÁULICA.....	318
5.10 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	332
CAPITULO 6- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	343
6.1 CONCLUSIONES.....	344
6.2 RECOMENDACIONES .....	348
SIGLAS.....	351
ABREVIATURAS .....	353
UNIDADES DE MEDIDA .....	355
BIBLIOGRAFIA.....	356
ANEXOS.....	361

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Demografía de los municipios que conforman.....	25
Tabla 2-2: Demografía y proyecciones poblacionales del AMSS.....	27
Tabla 2-3: Informe 2015 sobre renta de suelo de las viviendas en el AMSS....	32
Tabla 2-4: Informe 2011 sobre renta de suelo de las viviendas en el AMSS....	33
Tabla 2-5: Ranking de vulnerabilidad.....	59
Tabla 3-1: Área de tipo de suelo dentro de la cuenca.....	80
Tabla 3-2: Afluentes que aportan agua al río Acelhuate .....	88
Tabla 3-3. Clasificación de cuenca en función del área.....	93
Tabla 3-4. Cuadro de parámetros para aplicación de ecuación de pendiente de Taylor y Schwartz en el río Acelhuate.....	101
Tabla 3-5. Clasificación de Tipos de terrenos en función de la pendiente .....	103
Tabla 3-6. Cuadro de pendiente promedio .....	105
Tabla 3-7. Valores de curva hipsométrica.....	109
Tabla 3-8: Clasificación de diferentes valores de Densidad de Drenaje .....	120
Tabla 3-9. Resumen de parámetros físicos y de forma de la cuenca Rio Acelhuate .....	131
Tabla 3-10: Numero de curva de escorrentía .....	135
Tabla 3-11. Tabla de asignación de número de curva SBC2.....	144
Tabla 3-12: Tabla de asignación de número de curva SBC3.....	145
Tabla 3-13: Tabla de asignación de número de curva SBC4.....	147

Tabla 3-14: Tabla de asignación de número de curva SBC5.....	148
Tabla 3-15: Tabla de asignación de número de curva SBC6.....	149
Tabla 3-16: Tabla de asignación de número de curva SBC7.....	150
Tabla 3-17: Tabla de asignación de número de curva SBC8.....	151
Tabla 3-18: Tabla de asignación de número de curva SBC9.....	152
Tabla 3-19: Tabla de asignación de número de curva SBC10.....	154
Tabla 3-20: Número de curva ponderado .....	155
Tabla 3-21: Coordenadas de estaciones pluviométricas. ....	159
Tabla 4-1: Herramientas de programa HEC-HMS. ....	168
Tabla 4-2: Área de las sub cuencas que conforman la cuenca del Rio Acelhuate. .....	169
Tabla 4-3 : Tabla de número de curva de cada sub cuencas. ....	175
Tabla 4-4 : Tiempo de retardo para cada sub cuenca. ....	179
Tabla 4-5: Valores de Muskingum. ....	189
Tabla 4-6 : Estaciones pluviométricas. ....	194
Tabla 4-7 : Lluvia registrada por las estacione en tormenta Ida. ....	197
Tabla 4-8 : Áreas de influencia de estaciones en subcuencas, según el método de los Polígonos de Thiessen.....	210
Tabla 4-9: ejemplo de registro de lluvia de estaciones .....	211
Tabla 4-10: Cálculo de caudal en la sección Málaga.....	233
Tabla 4-11: Caudales para diferentes alturas .....	234

Tabla 4-12: Datos para determinación de la ecuación de calibración de caudales. .....	241
Tabla 4-13: Cuadro de datos para coeficiente de correlación.....	244
Tabla 4-14: Estimación de porcentaje de crecimiento de área urbana del AMSS, entre el año 2009 al año 2016. ....	253
Tabla 4-15: Número de curva corregido para SBC 7 y SBC 8.....	254
Tabla 5-1: Clasificación del suelo según normativa vigente del Esquema Director. .....	261
Tabla 5-2: Determinación del área con el tipo de tratamiento definido por el Esquema Director de la cuenca media y alta del río Acelhuate .....	273
Tabla 5-3: Rangos de impermeabilización que se utilizaran para nuestra cuenca, tomados de los criterios del Esquema Director.....	277
Tabla 5-4: CN en los tres escenarios de impermeabilización .....	284
Tabla 5-5: Criterios de diseño generalizados para estructuras hidráulicas.....	288
Tabla 5-6: Valores de lluvia obtenidos para una curva I-D-F de la estación Observatorio S.S.....	298
Tabla 5-7: Valores de lluvia obtenidos para una curva I-D-F de la estación Procafé .....	298
Tabla 5-8: Valores de lluvia obtenidos para una curva I-D-F de la estación Ilopango .....	299
Tabla 5-9: Caudales picos de cada sub cuenca en los tres escenarios de análisis. .....	307

Tabla 5-10: Resumen de caudales pico obtenidos en la salida de la cuenca por medio de la modelación en HEC HMS.....	308
Tabla 5-11: Herramientas disponibles en HEC RAS.....	311
Tabla 5-12: Resultados del análisis en los tres escenarios en sub cuenca 1.	320
Tabla 5-13: Porcentajes de área de los tratamientos urbanísticos en la sub cuenca 7 .....	323
Tabla 5-14: Caudales resultantes en la sub cuenca 7 .....	325
Tabla 5-15: Porcentajes de área de los tratamientos urbanísticos en la sub cuenca 7. ....	327
Tabla 5-16: Resultados del análisis en los tres escenarios en sub cuenca 1.	329
Tabla 5-17: Porcentajes de impermeabilización de toda la cuenca. ....	333
Tabla 5-18: resultados de sub cuenca 1, correspondiente a la zona de la Colonia La Málaga .....	337
Tabla 5-19: Resultados del punto de salida de la cuenca.....	339

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 2-1: Tendencia de incremento poblacional. ....	26
Ilustración 2-2: Tendencia de densidad poblacional. ....	28
Ilustración 2-3: Mapa de relieve del Área Metropolitana de San Salvador (AMSS, OPAMSS, 2008) .....	42
Ilustración 2-4 Crecimiento urbano del AMSS en los años 1900 hasta 2014 ....	50
Ilustración 2-5: Variaciones de la temperatura, años 1951-1980.....	52
Ilustración 2-6 Proceso del calentamiento por gases de efecto invernadero en el planeta Tierra.....	54
Ilustración 3-1: Mapa geológico simplificado que muestra el perfil estratigráfico que constituye el territorio salvadoreño .....	71
Ilustración 3-2: Tipos de cuenca y su comportamiento de drenaje y ejemplos de tipo de cuenca.....	77
Ilustración 3-3:Trazado de la divisoria topográfica de la cuenca (Parteaguas). .	91
Ilustración 3-4: Mapa de Red de puntos representando alturas en m.s.n.m. sobre el mapa de la cuenca.....	107
Ilustración 3-5: Curva hipsométrica de la cuenca del Rio Acelhuate. ....	110
Ilustración 3-6: Curvas hipsométricas característico del ciclo de erosión .....	111
Ilustración 3-7: Distribución de porcentaje de área de la cuenca.....	112
Ilustración 3-8: Jerarquización de red de drenaje mediante uso del Criterio de Horton .....	115

Ilustración 3-9: Jerarquización de red de drenaje mediante el uso del Criterio Strahler..	116
Ilustración 4-1: Interfaz de programa HEC-HMS.....	164
Ilustración 4-2: Estructura básica de un proyecto en HEC-HMS.....	166
Ilustración 4-3:Distribución de los Componentes de la cuenca en HEC-HMS.	173
Ilustración 4-4 : Representación gráfica del tiempo de retraso. ....	178
Ilustración 4-5: División del hidrograma .....	183
Ilustración 4-6 : Comportamiento de un hidrograma a lo largo de un canal.....	186
Ilustración 4-7: Almacenamiento prismático y almacenamiento en curva. ....	188
Ilustración 4-8: Ubicación de las estaciones pluviométricas sobre la cuenca en estudio .....	195
Ilustración 4-9: Hietograma de lluvia en tormenta Ida registrada en estación Ilopango .....	199
Ilustración 4-10: Hietograma de lluvia en tormenta Ida registrada en estación Procafé .....	200
Ilustración 4-11: Hietograma de lluvia en tormenta Ida registrada en estación Belloso .....	201
Ilustración 4-12: Representación de método de los polígonos de Thiessen ....	203
Ilustración 4-13: Izquierda. Ejemplo de área de influencia de estación Procafé y Belloso en sub cuenca SBC1. Derecha. Representación de polígono de Thiessen en subcuenca1.....	208
Ilustración 4-14: Sección de cauce en punto Málaga.....	232

Ilustración 4-15: Gráfica de caudal y altura en escala logarítmica.....	236
Ilustración 4-16: Nivel cero de un cauce .....	237
Ilustración 4-17: Curva de caudal obtenida por curva de calibración.....	246
Ilustración 4-18: Curva de caudal obtenida por Manning.....	247
Ilustración 5-1: Porcentaje de impermeabilización.....	264
Ilustración 5-2: Aplicación de porcentajes de impermeabilidad a la cuenca de estudio, unión de capa uso de suelo y tipo de suelo.....	280
Ilustración 5-3: Tratamientos urbanísticos de la cuenca alta y media del río Acelhuate.....	281
Ilustración 5-4: Ejemplo de la introducción de valores para la obtención de las áreas urbanísticas de la cuenca, en base a los criterios del Esquema Director .....	282
Ilustración 5-5: Ejemplo de cálculo de los CN en base al Esquema Director y los porcentajes de impermeabilidad .....	283
Ilustración 5-6: Curva I-D-F de estación Santa Tecla. ....	293
Ilustración 5-7: Curva I-D-F de estación Observatorio S.S. ....	294
Ilustración 5-8: Curva I-D-F de estación Ilopango.....	294
Ilustración 5-9: Ejemplo de lectura de la intensidad de lluvia en la estación Observatorio S.S.....	297
Ilustración 5-10 : Hietograma de diseño de estación Observatorio S.S. ....	300
Ilustración 5-11: Hietograma de diseño de estación Procafé.....	300
Ilustración 5-12: Hietograma de diseño de estación Ilopango. ....	301

Ilustración 5-13: Curva de caudal pico de escenario Actual en la Sub cuenca 1. .....	302
Ilustración 5-14: Curva de caudal pico de escenario de impermeabilización Base en la sub cuenca 1 .....	303
Ilustración 5-15: Curva de caudal pico de escenario de impermeabilización Ampliada en la sub cuenca 1 .....	303
Ilustración 5-16: Curva de caudal pico de escenario Actual en punto de salida. .....	305
Ilustración 5-17: Curva de caudal pico de escenario de impermeabilización base en punto de salida.....	305
Ilustración 5-18: Curva de caudal pico de escenario de impermeabilización ampliada en punto de salida. ....	306
Ilustración 5-19: Interfaz de usuario de programa HEC RAS.....	309
Ilustración 5-20: Resultado de modelación HEC RAS para escenario de impermeabilidad actual en la sub cuenca 1. ....	320
Ilustración 5-21: Resultado de modelación HEC-RAS para escenario de impermeabilidad Base en la sub cuenca 1. ....	321
Ilustración 5-22: Resultado de modelación HEC-RAS para escenario de impermeabilidad ampliada en la sub cuenca 1 .....	321
Ilustración 5-23: Hidrograma de sub cuenca 1 para tres escenarios de análisis, Actual Base y Ampliado. ....	322
Ilustración 5-24: Grafica de velocidades en sub cuenca 1.....	322

Ilustración 5-25: Representación de los porcentajes de áreas de tratamiento urbanístico de sub cuenca 1 .....	324
Ilustración 5-26: Hidrograma de sub cuenca 7 para tres escenarios de análisis, Actual Base y Ampliado .....	326
Ilustración 5-27: Representación de los porcentajes de áreas de tratamiento urbanístico de la sub cuenca 7 .....	327
Ilustración 5-28: Resultado de modelación HEC RAS para escenario de impermeabilidad Actual en la salida de la cuenca .....	329
Ilustración 5-29: Resultado de modelación HEC RAS para escenario de impermeabilidad Base en la salida de la cuenca .....	330
Ilustración 5-30: Resultado de modelación HEC RAS para escenario de impermeabilidad Ampliada en la salida de la cuenca. ....	330
Ilustración 5-31: Hidrograma de análisis para punto de salida para tres escenarios de análisis, Actual. Base y Ampliado. ....	331
Ilustración 5-32: Grafica de velocidades en punto de salida de la cuenca.....	332
Ilustración 5-33: Representación de los cambios en caudal en los diferentes escenarios de impermeabilización. ....	335

## ÍNDICE DE IMAGENES

Imagen 3-1: cálculo de área de la cuenca usando QGis. ....	92
Imagen 3-2: Calculo de perímetro usando QGis.....	94
Imagen 3-3: Longitud de cauce principal utilizando QGis. ....	95
Imagen 3-4: Longitud de la cuenca del rio Acelhuate. ....	96
Imagen 3-5: Perfil de rio principal de la cuenca del río Acelhuate .....	100
Imagen 3-6. Captura de QGis proceso de subdivisión de cuenca .....	136
Imagen 3-7. Resultado de la división de la cuenca en subcuencas en QGis..	137
Imagen 3-8. Uso de suelo de cada subcuenca.....	138
Imagen 3-9. Unión de capas en QGis.....	139
Imagen 3-10. Capas unidas de uso y tipo de suelo. ....	140
Imagen 4-1: Editor de componentes .....	170
Imagen 4-2: Interfaz de Mapa layer .....	172
Imagen 4-3: Interfaz de usuario de número de curva. ....	176
Imagen 4-4: Interfaz de usuario de método Transform .....	180
Imagen 4-5: Interfaz de usuario de método baseflow .....	185
Imagen 4-6: Interfaz de usuario de método Muskingum .....	190
Imagen 4-7: interfaz de carga de capa vector de puntos en QGis.....	204
Imagen 4-8: Generación de polígonos de Thiessen en QGis .....	205
Imagen 4-9: Registro de lluvia e histograma en HEC HMS .....	213
Imagen 4-10: Interfaz de creación de una tormenta en HEC HMS.....	215
Imagen 4-11: Interfaz de editor de componentes de modelo meteorológico ..	216

Imagen 4-12: Definición de cuencas en la modelación en HEC HMS .....	217
Imagen 4-13: Asignación de tormenta a cada sub cuenca .....	218
Imagen 4-14: captura tomada de programa HEC-HMS .....	219
Imagen 4-15: Resultados de la modelación en la cuenca del rio Acelhuate... ..	221
Imagen 4-16: Creación de registro de caudales observados .....	222
Imagen 4-17: Atribución de caudales registrados a un punto .....	223
Imagen 4-18: Resultado de modelación en HEC HMS .....	224
Imagen 4-19: Ensayo de optimización .....	225
Imagen 4-20: Creación y asignación de parámetros para optimización.....	226
Imagen 4-21: Parámetros optimizados. ....	227
Imagen 4-22: Gráfica de caudal optimizado .....	228
Imagen 4-23: Captura de Google Earth .....	229
Imagen 4-24: Resultado hidrológico de una modelación en HEC RAS .....	249
Imagen 4-25: Hidrograma de calibración .....	250
Imagen 4-26: Sub cuenca del rio Acelhuate en condiciones del año 2016.....	251
Imagen 4-27: Sub cuenca del rio Acelhuate en condiciones del año 2009.....	252
Imagen 4-28: Parámetros modificados para la modelación en HEC HMS.....	255
Imagen 4-29: Hidrograma resultante de la calibración del modelo .....	256
Imagen 5-1: Creación de modelación hidráulica en HEC RAS .....	311
Imagen 5-2: Editor geométrico de HEC RAS .....	312
Imagen 5-3: Creación de tramo de análisis en HEC RAS.....	313
Imagen 5-4: Creación de canal simétrico en HEC RAS.....	314

Imagen 5-5: Introducción de datos de flujo en HEC RAS .....	316
Imagen 5-6: Determinación de las condiciones de frontera en HEC RAS .....	317
Imagen 5-7: Simulación de modelo hidráulico en HEC RAS .....	318

## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de Graduación tiene como objetivo evaluar los impactos hidrológicos en el Área Metropolitana de San Salvador (AMSS); a través, de la medición del caudal que esta área aporta a la cuenca del río Acelhuate, haciendo proyecciones de estos impactos hidrológicos, tomando como criterio los porcentajes de impermeabilización especificados en el Instrumento Vigente para la Planificación del Área Metropolitana de San Salvador, el Marco Normativo actual llamado **Esquema Director**, que fue elaborado por la Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador (OPAMSS) y que es un instrumento de regulación de uso de suelo, vigente a partir del año 2017.

En este Marco Normativo, la evaluación y medición de los impactos hidrológicos se realizan con base a los escenarios siguientes:

1. Evaluación de la respuesta de la cuenca al considerar las condiciones actuales en un escenario llamado Base.
2. Evaluación basada en lineamientos de porcentaje Base de impermeabilización.
3. Evaluación basada en lineamientos de porcentajes ampliados de impermeabilización.

Para la evaluación de cada escenario, se realizó un estudio hidrológico con el que se han obtenido resultados de caudales de respuesta en la salida de la cuenca y en puntos de control; así también se elaboró, un estudio hidráulico para

conocer los niveles que alcanzó el agua de escorrentía para dichos escenarios, en ambos estudios se ha tenido presente la normativa de impermeabilización contenida en el Esquema Director de forma cartográfica.

El desarrollo del documento contiene seis capítulos, el capítulo I contiene los objetivos generales y específicos a alcanzar, los antecedentes, la problemática y las implicaciones del aumento de áreas con actividad urbana del área de estudio; además las justificaciones para la realización de la presente investigación.

En el capítulo II se describen de manera general, las características del Área Metropolitana de San Salvador, además se tomó un apartado que aborda el tema del cambio climático y sus afectaciones

En el capítulo III, se analizaron de manera específica, las características físicas y de forma de la cuenca del río Acelhuate en su parte alta y media; datos que se utilizaron en los capítulos siguientes

En el capítulo IV y V se realizaron las modelaciones hidrológica e hidráulica de la cuenca del río Acelhuate obteniendo como resultados caudales y tirantes máximos de la cuenca

Para la realización de los estudios hidrológicos se utiliza el programa de software libre HEC-HMS, y para los estudios hidráulicos el programa de software libre HEC-RAS.

Como parte de los productos finales del Trabajo de Graduación, se elaboraron guías cortas que describen paso a paso el proceso de obtención de resultados obtenidos en los programas de software libre HEC-HMS y HEC-RAS

# **CAPITULO 1- GENERALIDADES**

## 1.1 INTRODUCCIÓN

El Área Metropolitana de San Salvador (AMSS), se extiende en una superficie que cubre 610 Km<sup>2</sup>, con cerca de 1.5 millones de habitantes, que representan el 27% de la población total del país. El AMSS constituye el principal centro urbano direccional político, financiero y productivo del país, la cual ha sido duramente azotada por fenómenos hidrológicos, los cuales en cada estación lluviosa dejan a su paso afectaciones profundas.

El río Acelhuate es parte de la red hídrica del AMSS y su cuenca, es una de las que más problemas presentan en época lluviosa, muchas zonas son vulnerables ante el crecimiento de su cauce y en parte se debe al crecimiento urbano acelerado que ha experimentado en las últimas décadas dicha zona.

En el presente capítulo contiene las generalidades de la investigación, objetivos propuestos a alcanzar, los antecedentes del área de la cuenca en estudio, descripción de las afectaciones lluviosas en las últimas décadas, los problemas con los que ha lidiado el AMSS y las implicaciones del aumento de áreas con actividad urbana; además se presentan las justificaciones con las que se desarrolla la investigación, alcances y limitaciones de la misma.

## 1.2 ANTECEDENTES

Desde el punto de vista hidrológico e hidráulico, el AMSS se vuelve un territorio complejo a causa de los recurrentes problemas de inundaciones, deslizamientos, erosión-sedimentación que ocurren en los diferentes ríos y quebradas que componen su sistema de drenaje lo cual combinado al incremento de episodios extremos de precipitación y cuencas de respuesta rápida, propicia un aumento de estos fenómenos.

En El Salvador y en especial en el AMSS, en las últimas 2 décadas, se han registrado eventos con gran incidencia a nivel económico, social y ambiental, como se muestra a continuación:

**31 DE OCTUBRE DE 1998**: Inundaciones en varias zonas de San Salvador, y en las bocanas de los ríos, especialmente en la zona baja del Río Lempa producto del paso del huracán Mitch.

**01 DE SEPTIEMBRE DE 2002**: Lluvias torrenciales provocan el colapso de las tuberías de aguas lluvias lo que dio paso a la socavación y hundimiento de la calle principal de la comunidad Tutunichapa III, San Salvador.

**15 DE AGOSTO DE 2003**: Cerca de 5,000 familias que residen en las 25 comunidades del sector del Cantón San Luis Mariona, fueron afectadas por el derrumbe del puente Siete Pilas que permitía el acceso de las comunidades a la carretera Troncal del Norte.

**5 DE JUNIO DE 2004:** Debido a las lluvias torrenciales el río Acelhuate sobrepasó su cauce inundando los siguientes lugares: Boulevard Venezuela, colonia Nicaragua y Barrio La Vega, en San Salvador.

**19 DE MAYO DE 2005:** El huracán Adrián al tocar las costas Pacíficas salvadoreñas se convierte en tormenta tropical, lo cual genera Inundaciones en algunos puntos de la capital: Barrios La Vega, Candelaria y Modelo; debido a las intensas lluvias 13,000 personas son evacuadas en todo el país.

**4 DE JULIO 2008:** Al menos 31 feligreses de la iglesia Elim fallecieron luego de que el autobús en que se transportaban fue arrastrado por la corriente provocada por la inundación y desbordamiento del río Acelhuate, en las inmediaciones de la Colonia La Málaga, ubicada al sur de la capital; producto de un sistema de baja presión que afecto el país.

**8 DE NOVIEMBRE DE 2009:** La Tormenta Tropical Ida dejó a su paso más de 150 muertos, miles de casas con daños severos y cinco departamentos del país con problemas de movilidad por las graves inundaciones: La Paz, La Libertad, San Vicente, San Salvador y Cabañas. Estas pérdidas humanas, así como la magnitud de los daños, se vieron multiplicados por la situación de precariedad en la que ha sufrido durante años gran parte de la población salvadoreña

**24 DE MAYO DE 2010:** Agatha, un pequeño sistema ciclónico originado en el Océano Pacífico, pero con un gran potencial destructivo produjo desbordamientos e inundaciones afectando grandes extensiones de cultivos.

**13 DE OCTUBRE DE 2011:** La Depresión Tropical 12-E, golpeo fuertemente la Región Centroamericana en especial a El Salvador; debido a sus efectos se evacuaron a 43,222 personas y se reubicaron en albergues temporales, el 10% del territorio nacional fue inundado y 181 de los 262 municipios del país resultaron afectados. Hasta la fecha, el recuento oficial de daños aún no ha sido cuantificado.

**12 DE JULIO DE 2017:** El país se vio afectado por la Tormenta Tropical Nate, que dejó en San Salvador severas inundaciones y dificultades de tráfico en sus principales calles y avenidas<sup>1</sup>.

**El año 2020,** Centro América y México fueron víctimas de 2 fenómenos hídricos devastadores, en los meses de mayo y junio se recibió el azote de la tormenta tropical Amanda y Cristóbal.

En estado de crisis sanitaria originada por la pandemia del COVID-19, estos fenómenos destacaron por la gran afectación territorial y humana. Las tormentas tropicales Amanda y Cristóbal golpearon a El Salvador en rápida sucesión entre el 31 de mayo y el 6 de junio, causando lluvias, vientos fuertes y daños

---

<sup>1</sup> inundaciones: un fenómeno recurrente en la ciudad de San Salvador. FUNDASAL (2005). Páginas.4

provocados por las inundaciones. Muchas zonas recibieron más de 500 mm de lluvia, y algunas zonas registraron hasta 800 mm, casi el equivalente a las precipitaciones registradas en las Bahamas durante el huracán Dorian en 2019. (Ver anexo 14)

Entre las principales causas de los eventos antes mencionados, se tienen:

- ✓ La vulnerabilidad de muchas viviendas construidas en las planicies de inundación de los ríos y quebradas.
- ✓ La alta demanda poblacional de espacios para vivienda (suelos y servicios)
- ✓ Condiciones geomorfológicas propias del territorio en donde se han desarrollado colonias y urbanizaciones
- ✓ La construcción expansiva de viviendas y edificios

A lo anterior se une la poca preocupación por el tema de drenaje en el país, que pudiera ser aliviado en parte con la aprobación de una Ley de Aguas, un sistema sostenible de tratamiento de desechos sólidos y la creación de un ente regulador encargado de gestionar los sistemas de aguas lluvias en el AMSS.

La problemática anterior, se ha venido agravando en los últimos 10 años por el crecimiento de forma exponencial de las colonias y urbanizaciones populares en las partes altas y medias de las micro cuencas, la invasión o acomodo cada vez más frecuentes de comunidades ilegales en las zonas de protección de los ríos y quebradas y en algunos casos incluso, dentro de la planicie de inundación.

La necesidad e importancia de contar con un instrumento de planificación territorial en el principal conglomerado de ciudades del país, se debe a que se requiere fortalecer la capacidad de las Municipalidades y el Estado para atender, mediante el aprovechamiento racional de los recursos, las verdaderas y priorizadas necesidades de la población y los requerimientos para sus diversas actividades socio-económicas. En este sentido, el Estado debería de iniciar las investigaciones para la creación de un Marco de estatutos que ayuden a generar una mayor inclusión, vitalidad, compacidad, seguridad, acercamiento de servicios; y en general, disponer de procesos eficientes para apoyar el desarrollo de inversiones que dinamicen la competitividad económica, pero que además contribuyan con el desarrollo y la dignificación de sus ciudades.

Con lo anterior, el Consejo de Alcaldes del Área Metropolitana de San Salvador (COAMSS) y la Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador (OPAMSS), asumieron la tarea de desarrollar y elaborar el instrumento necesario y adecuado para una mejor planificación del AMSS (Esquema Director), lo cual implicó un desafío importante, dada la complejidad de situaciones que se desencadenan en este importante sector territorial; por lo que fue necesario incluir los esquemas de planificación participativa, abordados con apoyo de FUNDAUNGO y de la Universidad Centroamericana José Simeón Cañas (UCA), desde sus diferentes experiencias y especialidades, que ayudaron a obtener las valoraciones reales advertidas, desde la natural y lógica vinculación con el territorio y sus ciudadanos y a posibilitar la construcción de un instrumento con

respuestas apegadas a las necesidades institucionales, empresariales, de las organizaciones civiles articuladas y de las municipalidades miembro.

El Esquema Director fue formulado durante un interesante proceso, que tuvo una duración de un poco más de tres años (2013-2016), y que por ahora se constituye como un instrumento de escala metropolitana a través del cual se ha dado lectura al conjunto de municipios del AMSS, a partir de una línea base contrastada con diferentes escenarios de futuro, para llegar a propuestas de clasificación y tratamientos del suelo, soportadas con lineamientos normativos y complementadas con propuestas de iniciativas para una Estrategia de Desarrollo Económico Territorial, que abstraen las fortalezas del territorio y resaltan y potencian sus dinámicas en los ámbitos urbano, socioeconómico y ambiental<sup>2</sup>.

El instrumento incluye en su desarrollo y como marco legal los puntos siguientes:

- ✓ Diagnóstico de usos de suelo y la red vial de circulación mayor.
- ✓ La organización de los usos de suelo, especifica suelos urbanos, urbanizables, no urbanizables y rurales
- ✓ Zonificación de los suelos urbanizables y no urbanizables y las normas de usos del suelo determinando

---

<sup>2</sup> Esquema Director del Área Metropolitana de San Salvador, OPAMSS, 2013, Primera Edición, Páginas 4 y 5.

- ✓ Los usos permitidos, condicionados y prohibidos de las diferentes zonas
- ✓ Organización de las vías de circulación mayor, la cual donde especifica la red vial y la jerarquía de sus vías; y
- ✓ Los criterios y lineamiento para la conservación del medio ambiente y el uso racional de los recursos naturales.

Ante la problemática también se han realizado investigaciones, modelando diferentes eventos lluviosos registrados en las últimas décadas, por ejemplo:

**Evento del 3 de Julio de 2008**, los resultados de modelación hidrológica indican que en la colonia Málaga, el volumen de agua para el periodo 1992 a 2008 tuvo un incremento de 1.84 millones de metros cúbicos y un aumento de caudal punta de 83.1 m<sup>3</sup>/seg.

**Evento del 7 de noviembre de 2009**, la modelación refleja que para el sector de la colonia Málaga el incremento de volumen debido a los cambios de uso de suelo en el periodo analizado, fue de 1.02 millones de metros cúbicos, con un aumento del caudal punta de 42.8 m<sup>3</sup>/seg. En promedio los caudales punta incrementaron en un 10% al comprar 1992 con 2009.<sup>3</sup>

---

<sup>3</sup> Impactos de cambios de uso de suelo en la escorrentía superficial en la cuenca del Arenal Montserrat en la ciudad de San Salvador en el periodo 1992-2009, Ing. Msc. Adriana María Erazo Chica, 2010, 1ª Edición.

En el año 2010 se realizó el análisis de los impactos en la escorrentía superficial debido a cambios de uso de suelo desde 1992 hasta el 2009 en la cuenca del Arenal Montserrat, la cual es un afluente del río Acelhuate; a este río, se le une en la zona del barrio La Vega, tres afluentes más: Ilohuapa, Matalapa y El Garrobo. El 60% de esta cuenca es eminentemente urbana, hasta el sitio del Mercado Belloso, la cual abarca la ciudad de San Salvador. Los resultados de la modelación hidrológica en las sub cuencas, reflejan que para un evento con condiciones normales de humedad antecedente y lluvia con periodo de retorno de 1 y 2 años (caso analizado del 17 de septiembre de 2009), el incremento de 5.53 Km<sup>2</sup> en el periodo de 1992 a 2009 en área Urbanizada, ha incrementado en un 70% la caudal punta específico y ha reducido en un 40% en el tiempo de llegada de la creciente. Así mismo han aumentado el nivel y la velocidad del agua en las secciones transversales del río en promedio en un 20% y 15% respectivamente.

En el año 2012, la Dirección General del Observatorio Ambiental, teniendo presente la problemática existente en los alrededores de la cuenca, realizó un análisis de amenaza por inundación de la cuenca alta de río Acelhuate, tomando como primer análisis, los escenarios de riesgos, el cual incluyó la caracterización física y los estudios hidrológicos e hidráulicos de la zona para la generación de mapas de amenaza por inundación de la parte alta de la cuenca del río Acelhuate, quebrada El Piro, quebrada La Lechuza y Arenal Montserrat, así como de las quebradas El Garrobo, Arenal Mejicanos y Arenal Tutunichapa dando como

resultados mapas en donde se muestra una alta susceptibilidad de inundación en los alrededores de la cuenca, otro dato importante se ve reflejado en los niveles de caudal generados en la cuenca, ya que es de gran aporte en momentos de intensas precipitaciones.<sup>4</sup>

En el año 2014, el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) con el apoyo del Banco Interamericano de Desarrollo (BID), presentó la evaluación del riesgo por inundaciones de las cuencas del río Arenal Monserrat y río Sensunapán. Para el caso del Arenal Monserrat que es afluente del río Acelhuate, mostró un rápido incremento en el desarrollo urbano de los municipios de Santa Tecla, Nuevo Cuscatlán, San Salvador y San Marcos durante los últimos años, al igual que los asentamientos en zonas susceptibles a inundación.

En el cauce del río se han realizado diferentes obras para aumentar la capacidad hidráulica del mismo, ocasionando a su vez el incremento de la velocidad del flujo y trasladando los problemas de inundaciones hacia otros tramos del río aguas abajo.

En el análisis, se identificaron tres tramos críticos: el primero incluye la zona de la 25 avenida sur y la zona del barrio Modelo, mientras que en el tramo número

---

<sup>4</sup> Escenarios de Riesgos y Amenazas por inundación, cuenca alta del Río Acelhuate, Arenal Monserrat, Arenal Mejicanos, Arenal Tutunichapa, quebrada El Garrobo, MARN, 2012, 1º Edición.

dos se ha considerado la colonia La Málaga y el tramo tres comprende la zona de Los Granjeros, Gallegos y San Luis Portales finalizando en el puente del boulevard del Ejército.

Según el estudio:

Área potencialmente inundable: 0.21 km<sup>2</sup> Pérdida anual esperada: \$ USD 2.1 millones con población afectada en escenario crítico: 1,500 personas predios afectados en escenario crítico: 352 (36%) Edificaciones destruidas en escenario crítico: 51 (5,3%)

Dado que la cuenca de este río vierte directamente al río Acelhuate, los problemas que presenta cada sub cuenca son acumulados en la toda la cuenca

### 1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Muchos son los problemas hidrológicos que históricamente presenta el AMSS, las causas son muchas, tanto complejas como variadas. El crecimiento urbano ha causado en las últimas décadas efectos irreversibles como lo son: insuficiente capacidad hidráulica de los cauces en algunos lugares debido al encausamiento forzoso de ríos y quebradas, la ubicación de construcciones en lugares propensos a la inundación; las obras hidráulicas sin capacidad de respuesta ante un evento lluvioso y el incremento de la escorrentía especialmente en la última década por los cambios de uso de suelo que se han producido en la parte alta y media de la cuenca.

Esta diversidad de problemáticas que presenta el multivariado territorio del AMSS, ha incidido para que en el instrumento de planificación Esquema Director, se tome en cuenta como Marco de regulación del uso del suelo, ejemplo de ello es, que las zonas en donde el suelo cuente con un alto grado de impermeabilización, le sea permitido crecer habitacionalmente en altura, y de esta manera se pueda asegurar una mayor optimización del uso de suelo y aumento en la calidad de vida de la población.

Por otra parte, si en el tiempo, el crecimiento poblacional y las migraciones hacia el AMSS no decrecen ni se estancan, se pueda normar que zonas aún conservadas, se consideren como urbanizables, principalmente para responder a la necesidad de vivienda de las nuevas familias en un lapso de 30 años.

En este sentido, el problema se enmarca en conocer las afectaciones a largo plazo que se generarán por factores hidrológicos, los cuales podrían causar aumento de caudales y de niveles de agua en ríos y quebradas de la cuenca de Rio Acelhuate en su parte media y baja; por la aplicación de los lineamientos establecidos en las Normativas de zonificación del uso del suelo, plasmadas en el instrumento (Esquema Director) y los porcentajes de impermeabilización que contempla.

Como se ha descrito anteriormente, un aumento en la impermeabilización del suelo, cambia directamente la escorrentía superficial en una cuenca, es por ello que se necesita hacer una comparación de los parámetros de la cuenca en tres condiciones diferentes, la situación actual (escenario sin aplicación de la Normativa) y con los establecidos en la Normativa, teniendo en cuenta las condiciones de un escenario base y un escenario ampliado, que se basan en porcentajes normados de impermeabilización del suelo que se verán afectados según el uso de suelo que estos tengan actualmente y los tratamientos que se designen según los lineamientos dispuestos en el Esquema Director.

## **1.4 OBJETIVOS**

### **1.4.1 OBJETIVO GENERAL**

Generar proyecciones de los impactos hidrológicos basados en el Plan de Ordenamiento Territorial Vigente: Esquema director, en el Área Metropolitana de San Salvador (AMSS)

### **1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Analizar los impactos hidrológicos según los lineamientos de impermeabilización establecidos en el Instrumento de planificación territorial del Área Metropolitana Esquema Director, enfocados en las Normativas de impermeabilización del suelo, en la cuenca del Río Acelhuate dentro del Área Metropolitana de San Salvador.
- Medir los impactos hidrológicos a través de datos de caudal y niveles de agua, en secciones y puntos de interés para los escenarios: 1. Un escenario con las condiciones actuales; 2. Con lineamientos base de impermeabilización; 3. Con lineamientos ampliados de impermeabilización.
- Proponer medidas preliminares de atenuación, en sectores con posibles afectaciones de los impactos hidrológicos obtenidos con la aplicación de

los lineamientos de impermeabilización establecidos en el Esquema Director

- Elaborar una guía de uso práctico para los programas de software libres HEC-HMS y HEC-RAS.

### 1.5 ALCANCES

- Se realizará una caracterización de la zona en que se encuentra la cuenca del Río Acelhuate en su parte alta y media, como también se recopilará información general sobre el AMSS.
- Se realizará un análisis Hidrológico con base en los resultados obtenidos en la caracterización de la cuenca de estudio y se analizará en el programa de software de uso libre HEC-HMS, con el fin de conocer los niveles de agua que podrá alcanzar.
- Se realizará un Estudio Hidráulico con el programa de software libre HEC-RAS, con base en los resultados obtenidos en las modelaciones con el software HEC-HMS
- Se calculará de acuerdo a las proyecciones en el tiempo, de la cantidad de área urbanizada y no urbanizada del AMSS, en diferentes etapas, con el fin de tener una idea de cuánto es el porcentaje de impermeabilización para hacer una comparación con lo establecido en el Esquema Director
- Se hará una cuantificación de los impactos hidrológicos, tanto en escenario de Normativa Base, como en Normativa Ampliada y se plantearán propuestas de atenuación de los efectos
- Los períodos de retorno a evaluar serán en base al Reglamento vigente, Reglamento a la Ley de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Área Metropolitana de San Salvador.

- De acuerdo a los resultados de las modelaciones, análisis y proyecciones que se realizaran en esta investigación, generar propuestas de solución.

## 1.6 LIMITACIONES

- No se puede conocer con certeza la impermeabilización real que se logrará durante la implementación del Esquema Director, ya que en este se establecen rangos y no cantidades puntuales.
- Para la modelación hidrológica e hidráulica no se contará con datos actualizados a la fecha de realización de la investigación, para ello se tomarán los datos más recientes que sean factibles obtener, sin embargo, para la modelación se tomarán los valores máximos de los rangos establecidos en los lineamientos de la normativa.
- Para la simulación Hidráulica, se realizarán análisis utilizando la topografía que pueda obtenerse de las diversas instituciones acreditadas, dado que, por motivos de la seguridad social, esta investigación no contempla la obtención de la topografía real en campo.

## 1.7 JUSTIFICACIÓN

En las últimas décadas las cifras de desastres naturales ocurridos sobre el territorio nacional se han incrementado, especialmente en época lluviosa, afectando en gran medida a muchas zonas vulnerables del país, particularmente en el AMSS, debido a la generación de desbordes e inundaciones de las principales quebradas dentro de esta zonal Área Metropolitana.

El Instrumento de planificación territorial del Área Metropolitana de San Salvador responde al mandato de la Ley de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del AMSS y de los Municipios Aledaños la cual busca reducir la expansión urbana, a partir de procesos de densificación en altura, así como regular las actividades que se desarrollan en el AMSS, incorporando estándares urbanísticos como uso de suelo, control de altura de edificaciones, porcentaje de impermeabilización y edificabilidad.

En este sentido, es importante conocer el porcentaje de áreas impermeables del territorio del AMSS, estableciendo su estado actual y conociendo lo Normado a futuro por el instrumento Esquema Director, ya que, hidrológicamente hablando un cambio en la impermeabilidad, incrementaría la cantidad de escorrentía superficial que está y/o estaría llegando a las sub cuencas del Río Acelhuate.

Lo anterior permitirá determinar áreas susceptibles a las afectaciones por eventos hidro-meteorológicos extremos; así como diseñar obras de infraestructuras hidráulicas conociendo las condiciones en los suelos

potencialmente urbanizables y cuanto aumento de caudal producirán en las condiciones cambiantes en el tiempo.

Desde la perspectiva de las micro cuencas del AMSS, es necesario calcular el impacto hidrológico generado por la propuesta de áreas con proyección a ser urbanizables de acuerdo con la Normativa vigente en el Esquema Director, ya que esto ayudará en la búsqueda de soluciones a los problemas de inundación y a la vez menor capacidad hidráulica de obras de paso existentes dentro de los ríos y quebradas que componen los drenajes del AMSS, siendo vital el cálculo de los tirantes y caudales para determinar mecanismos de mitigación de impactos y obras de protección presentes y futuras.

## **CAPITULO 2- MARCO TEORICO**

## 2.1 INTRODUCCIÓN

El presente capítulo recopila la descripción de características generales de la zona de estudio, estas características describen lo que comprende la cuenca hidrográfica media y alta del río Acelhuate ubicada en la zona central de la república de El Salvador entre los departamentos de San Salvador y La Libertad.

Dichas características generales abarcan datos poblacionales de los 14 municipios que conforman el AMSS, también la densidad poblacional en función de la extensión territorial de cada municipio.

Se presentarán datos estadísticos, económicos que abarcan la situación del AMSS en los años recientes en cuanto a la disposición de servicios básicos, el estado de la utilidad del suelo y el ritmo de expansión que históricamente ha tenido el AMSS; Se describirán aspectos relacionados al clima, como lo es la naturaleza de las precipitaciones sucedidas y las temperaturas que ocurren en la zona; además la geología, estratigrafía y el efecto que ha tenido el cambio climático en El Salvador.

## **2.2 GENERALIDADES**

### **2.2.1 DESCRIPCION**

La cuenca hidrográfica media-alta del Río Acelhuate, se ubica en la Zona Central de la República de El Salvador, entre los Departamentos de San Salvador y La Libertad y comprende la Ciudad Capital y Cabecera Departamental de San Salvador y sus alrededores, conocida como Área Metropolitana de San Salvador (AMSS), conformada por 14 Municipios, de los cuales 12 pertenecen al Departamento de San Salvador y 2 al Departamento de La Libertad.

Los 14 municipios que el AMSS comprende son: San Salvador, Mejicanos, San Marcos, Ayutuxtepeque, Cuscatancingo, Ciudad Delgado, Ilopango, Soyapango, Antiguo Cuscatlán, Santa Tecla, Apopa, Nejapa, Tonacatepeque y San Martín.

### **2.2.2 POBLACIÓN**

La dinámica poblacional del Área de estudio depende de múltiples factores que determinan sus características de crecimiento y está establecida, por factores asociados a las condiciones particulares de reproducción biológica, la mortalidad y la movilidad territorial factores determinantes fundamentales del crecimiento poblacional, así como su distribución por sexo y edad. (Tabla 2.1)

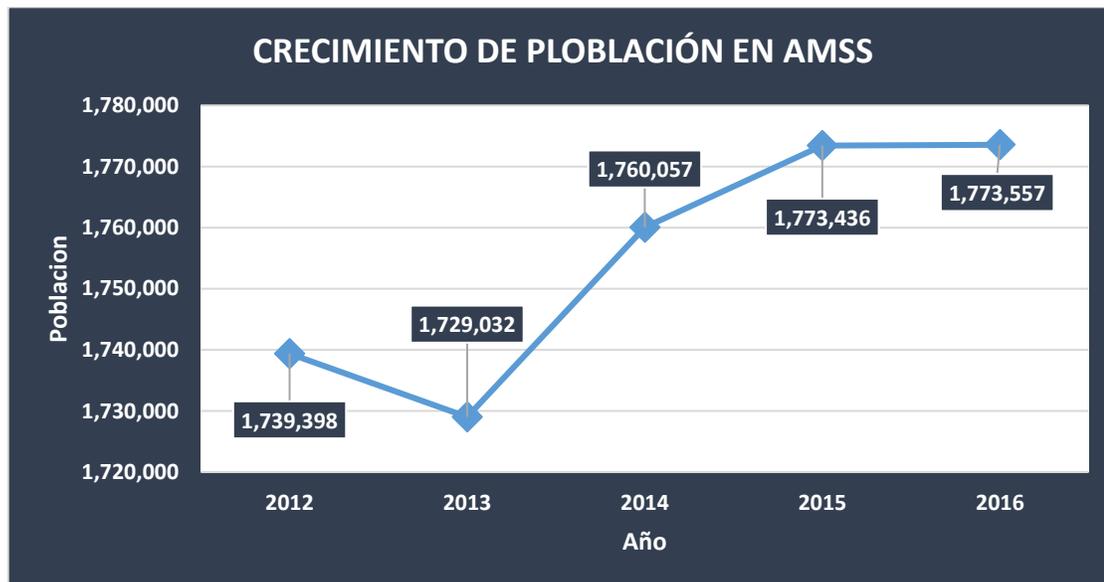
En el Área Metropolitana de San Salvador, se concentra el 27.2% de la población total del país; al revisar la distribución de la población por los municipios que la forman se observa que sólo San Salvador y Soyapango concentran el 36.1% de

un total de 1,773,557 de habitantes reportados para el AMSS<sup>5</sup>, y que dicha población ha mantenido una tasa de aumento desde el año 2012 con el que se cuenta registro (ver Tabla 2-1 e Ilustración 2-1).

DEMOGRAFÍA (PROYECCIONES Y ESTIMACIONES)	POBLACIÓN HABITANTES				
	2012	2013	2014	2015	2016
<b>ANTIGUO CUSCATLÁN</b>	35,000	32,855	37,236	37,161	37,320
<b>APOPA</b>	146,033	143,718	147,006	145,111	147,056
<b>AYUTUXTEPEQUE</b>	35,937	37,358	37,980	39,043	39,076
<b>CIUDAD DELGADO</b>	138,998	129,965	133,552	127,448	135,944
<b>CUSCATANCINGO</b>	75,362	74,414	76,188	73,241	73,484
<b>ILOPANGO</b>	112,589	113,032	111,548	115,133	117,059
<b>MEJICANOS</b>	152,973	157,188	156,178	162,410	152,453
<b>NEJAPA</b>	33,478	32,332	31,742	33,314	33,801
<b>SAN MARCOS</b>	65,107	67,286	67,912	72,209	72,990
<b>SAN MARTÍN</b>	82,774	82,566	87,130	91,624	86,286
<b>SAN SALVADOR</b>	344,992	354,174	352,737	340,830	362,799
<b>SANTA TECLA</b>	133,601	126,353	136,945	142,924	131,404
<b>SOYAPANGO</b>	274,851	268,228	268,192	277,483	278,118
<b>TONACATEPEQUE</b>	107,703	109,563	115,711	115,505	105,767
<b>AMSS</b>	1,739,398	1,729,032	1,760,057	1,773,436	1,773,557
<b>EL SALVADOR</b>	6,249,262	6,290,420	6,401,415	6,459,911	6,522,419

**Tabla 2-1: Demografía de los municipios que conforman EL AMSS. Fuente: DIGESTYC 2016.**

<sup>5</sup> Encuesta de Hogares de Propósitos Múltiples EHPM, DIGESTYC (2016). Encuesta de Hogares de Propósitos Múltiples EHPM. (Dirección General de Estadística y Censos), Ministerio de Economía, 2016.



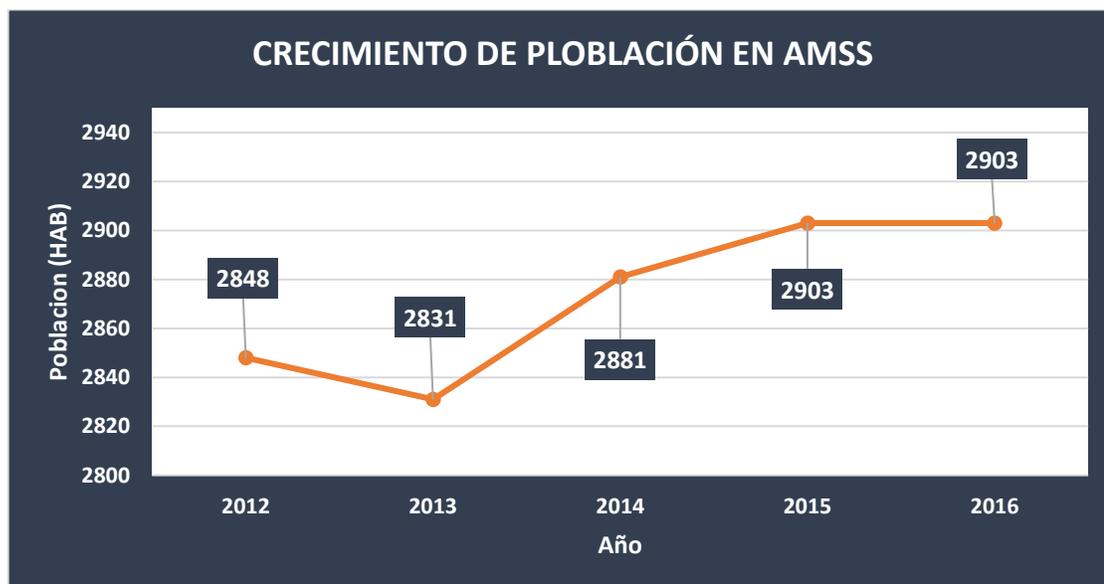
**Ilustración 2-1: Tendencia de incremento poblacional. Fuente: DIGESTYC (2016).**

### 2.2.3 DENSIDAD POBLACIONAL

La densidad poblacional del Área Metropolitana de San Salvador (AMSS), se estimó en 2,903 habitantes por km<sup>2</sup> para el 2016 (Tabla 2-2).; siendo el municipio de Cuscatancingo el más densamente poblado en todo el AMSS, seguido por Soyapango, Mejicanos y San Salvador. En el extremo se ubican Nejapa, con el más bajo nivel de densidad poblacional, le siguen los municipios de Santa Tecla, San Martín, Tonacatepeque y Antigua Cuscatlán

DEMOGRAFÍA (PROYECCIONES Y ESTIMACIONES)	EXTENSIÓN (Km <sup>2</sup> )	DENSIDAD POBLACIONAL (HAB/Km <sup>2</sup> )				
	2012 - 2016	2012	2013	2014	2015	2016
ANTIGUO CUSCATLÁN	19.41	1,803	1,693	1,918	1,915	1,923
APOPA	51.84	2,817	2,772	2,836	2,799	2,837
AYUTUXTEPEQUE	8.41	4,273	4,442	4,516	4,642	4,646
CIUDAD DELGADO	33.4	4,162	3,891	3,999	3,816	4,070
CUSCATANCINGO	5.4	13,956	1,3780	14,109	13,563	13,608
ILOPANGO	34.63	3,251	3,264	3,221	3,325	3,380
MEJICANOS	22.12	6,916	7,106	7,060	7,342	6,892
NEJAPA	83.36	402	388	381	400	405
SAN MARCOS	14.71	4,426	4,574	4,617	4,909	4,962
SAN MARTÍN	55.84	1,482	1,479	1,560	1,641	1,545
SAN SALVADOR	72.25	4,775	4,902	4,882	4,717	5021
SANTA TECLA	112.2	1,191	1,126	1,221	1,274	1,171
SOYAPANGO	29.72	9,248	9,025	9,024	9,337	9,358
TONACATEPEQUE	67.55	1,594	1,622	1,713	1,710	1,566
AMSS	610.84	2,848	2,831	2,881	2,903	2,903
EL SALVADOR	2.1040.79	297	299	304	307	310

**Tabla 2-2: Demografía y proyecciones poblacionales del AMSS. Fuente: DIGESTYC 2016.**



**Ilustración 2-2: Tendencia de densidad poblacional. Fuente: DIGESTYC (2016).**

De acuerdo con la clasificación oficial de la DIGESTYC, el 97% de la población vive en áreas clasificadas como urbana, el restante 3% habita en áreas rurales. Únicamente 5 municipios del AMSS, cuentan con población rural (Santa Tecla, Nejapa, Delgado, San Martín y Tonacatepeque), coincidentemente son los municipios con mayor superficie de la zona metropolitana.<sup>6</sup>

<sup>6</sup> Esquema Director del Área Metropolitana de San Salvador, OPAMSS, 2013, Primera Edición, página OPAMSS, 2013. Presentación. Esquema Director Área Metropolitana de San Salvador. 1° edición, pág. 36.

La población del AMSS ha ido en crecimiento en los últimos años y a su vez es mayoritariamente femenina, con un 54%, mientras que un 46% se constituye como población masculina.

#### **2.2.4 ÁREAS ABIERTAS**

Son conocidas como zonas verdes debido a su cobertura vegetal y son una parte estructurante del territorio metropolitano de la que depende en muy buena medida, el bienestar de los ciudadanos por el papel que tienen en el mantenimiento y mejora de la calidad del aire, la absorción de CO<sub>2</sub>, la recarga de los acuíferos y la biodiversidad, por mencionar algunos.

En el caso de las áreas naturales protegidas y las áreas con alto valor ecológico como el Volcán de San Salvador, Cordillera El Bálsamo, Cerros San Jacinto y Guaycume y la cuenca del Lago de Ilopango, son elementos necesarios para mantener aquellos ámbitos territoriales que acogen conjuntos de elementos y procesos ecológicos estratégicos para la sostenibilidad del territorio metropolitano. También es importante considerar los conectores ecológicos, necesarios para asegurar la funcionalidad ecológica de los espacios protegidos y de los elementos con alto valor ecológico, ya que los hacen más eficientes y permiten el intercambio genético de sus comunidades, además de albergar actividades antrópicas.

En el esquema director se realizó una caracterización de las principales zonas naturales presentes en el área metropolitana de San Salvador según sus

características, elementos y funciones más importantes, dicha tipología es la siguiente:

**Área Natural Protegida (ANP):** estas áreas forman parte del Sistema Nacional de Áreas Naturales Protegidas, debido a que poseen una riqueza de biodiversidad para el Patrimonio nacional y porque contribuyen al desarrollo sostenible del país.

**Área de Conservación (AC):** las características ambientales de las áreas de conservación son similares a las de las ANP, por cuanto las primeras contienen a las segundas, pero además contienen las zonas de Amortiguamiento, los corredores biológicos y las zonas de influencia.

**Área Ecológica (AE):** lugares con potencial para formar parte de las áreas naturales protegidas, o en su defecto, para darles un carácter de conservación, a partir de los valores naturales, ecológicos y los servicios que prestan, no solo ambientales sino paisajísticos, recreativos, turísticos y eco turísticos.

**Zona de Protección de Ríos (ZPR):** se trata de zonas que corresponden a cauces de los principales ríos (Las Cañas, Tomayate, Acelhuate y otros), los cuales se ven amenazados por inundaciones relacionadas con aspectos geológicos e hidrometeorológicos.

**Áreas Abiertas Urbanas (AAU):** suelos no urbanizados con cobertura vegetal existentes dentro del área urbana.

**Áreas Abiertas Exteriores (AAE):** se trata de áreas que no están urbanizadas pero que tampoco juegan un papel clave dentro de estrategias de conservación o de restauración ambiental. Generalmente estos suelos se encuentran con una cobertura vegetal de media a alta y/o cultivados para fines de producción agropecuaria.

## **2.3 ASPECTOS SOCIO-ECONÓMICOS DEL AMSS**

### **2.3.1 DISPONIBILIDAD DE SERVICIOS**

En cuanto a los servicios básicos, según el último censo, el 93% de la población cuenta con energía eléctrica, siendo los municipios menos servidos Nejapa y Ciudad delgado y el 91% cuenta con cañerías de agua potable, ya sea dentro de la vivienda o en la propiedad, el resto debe hacerlo a través de otros medios. La zona urbana atiende con cañería domiciliar, a un 93.78% de su población, a diferencia de la zona rural, donde únicamente alcanza el 29.45%; es decir que el 70.55% de la población rural, tiene que usar otros medios para abastecerse. San Martín es el municipio más deficiente en acceso a agua potable domiciliar.

### **2.3.2 ESTADO DE SUELO URBANO**

En el AMSS sobresale la casa independiente, seguido de apartamentos, más que todo en San Salvador, la mayoría de la población posee vivienda propia o propia en pagos. El número de viviendas registrada en el área metropolitana se presenta a continuación en la tabla 2-3.

RENDA DEL SUELO URBANO (DÉFICIT DE VIVIENDA)	TOTAL DE PERSONAS, VIVIENDAS Y HOGARES		
	2015		
	VIVIENDAS	PERSONAS	HOGARES
ANTIGUO CUSCATLÁN	10,413	37,161	11,155
APOPA	39,032	145,111	41,421
AYUTUXTEPEQUE	10,335	39,043	10,790
CIUDAD DELGADO	33,937	127,448	38,591
CUSCATANCINGO	19,537	73,241	21,183
ILOPANGO	31,768	115,133	33,369
MEJICANOS	42,200	162,410	46,239
NEJAPA	8,458	33,314	9,609
SAN MARCOS	16,301	72,209	19,540
SAN MARTÍN	21,687	91,624	22,743
SAN SALVADOR	100,815	340,830	102,786
SANTA TECLA	35,982	142,924	37,244
SOYAPANGO	72,923	277,483	77,889
TONACATEPEQUE	30,835	115,505	31,567
AMSS	474,223	1,773,436	504,126
EL SALVADOR	1,668,227	6,459,911	1,761,772

**Tabla 2-3: Informe 2015 sobre renta de suelo de las viviendas en el AMSS. Fuente: DIGESTYC (2016)**

La estructura familiar indica que las familias en promedio están constituidas por 4 personas. El índice de mujeres como jefas de hogar es del 36%, señalando este grupo como prioritario para incluir en actividades económicas que benefician a sus familias. (Tabla 2-4)

RENTA DEL SUELO URBANO (DÉFICIT DE VIVIENDA)	PROPORCIÓN DEL NÚMERO DE PERSONAS POR HOGAR
	2016
ANTIGUO CUSCATLÁN	3.32
APOPA	3.51
AYUTUXTEPEQUE	3.61
CIUDAD DELGADO	3.55
CUSCATANCINGO	3.45
ILOPANGO	3.49
MEJICANOS	3.37
NEJAPA	3.52
SAN MARCOS	3.74
SAN MARTÍN	3.75
SAN SALVADOR	3.59
SANTA TECLA	3.49
SOYAPANGO	3.54
TONACATEPEQUE	3.35
AMSS	3.52
EL SALVADOR	3.65

Tabla 2-4: Informe 2011 sobre renta de suelo de las viviendas en el AMSS. Fuente: DIGESTYC (2016)

## 2.4 CLIMA

El Salvador está situado en la parte Norte del cinturón tropical de la Tierra, de tal modo que en noviembre y octubre se ve influenciado principalmente por vientos del Nor-Este y, ocasionalmente, por vientos con fuertes ráfagas que nos traen

aire fresco originado en regiones polares de Norteamérica, pero calentado en gran medida al atravesar el Golfo de México en su camino a Centroamérica.

El área metropolitana de San Salvador se encuentra en la zona climática tropical, que presenta condiciones térmicas similares durante todo el año. Debido a la posición en la franja costera de Océano Pacífico en el que se encuentra el país tiene oscilaciones anuales importantes, debido a la brisa marina que transporta humedad y calor. El Salvador, así como el AMSS recibe el impacto frecuente de los huracanes que se generan en el Atlántico y las sequías provocadas por el fenómeno de El Niño Oscilación del Sur (ENOS). La franja climática de la parte alta de la cuenca del río Acelhuate, situada entre los 570 y 1950 metros sobre el nivel del mar (msnm), representa con sus 124.6 km<sup>2</sup> un 17.3% de los 717 km<sup>2</sup> del área total de la subcuenca del río Acelhuate a la cual pertenece. De acuerdo al documento del Consejo Nacional de Planificación y Coordinación Económica de El Salvador, 1974, (CONAPLAN), esta zona está clasificada, según Koppen, como Sabana Tropical Caliente hasta los 800 msnm y arriba de los 800 metros como Sabana Tropical Calurosa.

En la zona entre los 800 a 1,200 msnm clasificada como Sabana Tropical Calurosa (Tierra Templada) la temperatura media oscila entre los 17 y 21°C. En la zona arriba de 1,800 m.s.n.m. está clasificada como Clima Tropical de las Alturas o Tierra fría, la variación anual de la temperatura oscila entre los 10 Y 15°C (en la cima sur del cráter de El Boquerón alcanza 1,820 m.s.n.m. y 1,950

m.s.n.m. en la cima del Cerro El Picacho). En el área clasificada como Sabana Tropical Caliente, entre 0 y 800 m.s.n.m. (Tierra Caliente o Zona Tropical Árida Baja) la temperatura media oscila entre los 22 y 28°C; la humedad relativa es de 70% en la estación seca y 84% en la estación lluviosa.<sup>7</sup>

#### 2.4.1 PRECIPITACIONES

El área geográfica de la parte alta de la cuenca del río Acelhuate, a pesar de ser relativamente pequeña (12,437 hectáreas), tiene significativas diferencias en la cantidad de lluvia que recibe. Así en las proximidades del cráter del volcán de San Salvador, se dan precipitaciones con promedios anuales en el rango de 2,000 a 2,100 mm/año y en las zonas bajas, en áreas cercanas al Boulevard del Ejército se tienen de 1,700 mm/año o menores<sup>8</sup>.

En los meses de noviembre, diciembre, enero, febrero, marzo y abril por pertenecer a la época seca se presenta una situación de poca precipitación en el AMSS, esto cambia al entrar al mes de mayo donde ocurre una transición,

---

<sup>7</sup> Escenarios de Riesgo: Amenaza por inundación Cuenca alta del río Acelhuate: Arenal Monserrat, Arenal Mejicanos, Arenal Tutunichapa, Quebrada El Garrobo Caracterización física, Modelación hidrológica, Modelación hidráulica, Dirección General del Observatorio Ambiental, MARN, 2012

<sup>8</sup> Propuesta de espacios públicos como medio para la rehabilitación de la cuenca alta del río Acelhuate, en la quebrada el piro, Antiguo Cuscatlán. Universidad Centroamericana, Antiguo Cuscatlán, El Salvador, Arias A. & Contreras B. & Hernández E., 2015.

pasando de un clima seco a un clima húmedo y propicio para mayor cantidad de lluvia (5-50 mm de lluvia); en junio, julio agosto, septiembre y octubre se tiene la mayor cantidad de lluvia en el área ya que se está en la época lluviosa en el país (150-350 mm de lluvia), La diferencia en la precipitación entre el mes más seco y el mes más lluvioso puede superar los 345 mm de lluvia.

Además, el país se ve afectado por la estación de huracanes del Caribe (junio-noviembre). Las frecuentes tormentas tropicales y huracanes aumentan el caudal de los ríos y quebradas locales, inundando algunas de las afectando algunas de las áreas adyacentes. Los huracanes más destructivos que han afectado a El Salvador han sido:

Fifí(1974), Gilbert (1988), Andrew (1992), Mitch (1998), Stan(2005),y Félix (2007)<sup>9</sup>.

El Huracán Ida y una baja presión en noviembre de 2009 registró una lluvia de 522mm en solo cuatro horas, en el año 2010 Agatha afectó en el mes de mayo y

---

<sup>9</sup> Clima Tecno y más. 2013. ¿Cómo es el clima de El Salvador? Clima medio ambiente y tecnología. Recuperado de: <http://www.elclima-enelmundo.com/2013/04/clima-el-salvador.html>

acumuló 574 mm. Y en el año 2011 la Depresión tropical 12E alcanzó promedios de acumulación de agua de 747 mm.<sup>10</sup>.

Además, la lluvia anual de 2016 alcanzó los 1,510 mm, muy por debajo del promedio de 1,867 mm, aunque no se registraron sequías meteorológicas fuertes, 2016 se ubica entre los tres años más deficitarios de los registros, y que podría convertirse, incluso, en el año más seco históricamente registrado<sup>11</sup>.

#### **2.4.2 TEMPERATURA**

Hay diferencias de altura entre sectores del AMSS, por ejemplo, La sub zona de San Salvador es más alta que la de Quezaltepeque teniendo un cambio de altura de aproximadamente 325 m.s.n.m. Estas diferencias también se manifiestan en la precipitación y en la temperatura de las zonas, aunque en forma ligera. Las áreas situadas hasta los 800 metros tienen un clima determinado como Sabana Tropical Caliente (Koppen), mientras que las que se encuentran a una altura mayor de 800 metros se consideran Sabanas Tropicales Calurosas.

---

<sup>10</sup> Evaluación de daños y pérdidas en El Salvador ocasionados por la Depresión tropical 12E, CEPAL, 2011, pág. 6.

<sup>11</sup> Clima y condiciones hidrológicas 2016 Perspectiva diciembre 2016 – marzo 2017. Recuperado de: <https://reliefweb.int/report/el-salvador/clima-y-condiciones-hidrol-gicas-2016-perspectiva-diciembre-2016-marzo-2017> MARN (2016).

En enero se presentan valores inferiores a 29°C. Posteriormente, comienza un gradual calentamiento con un diferencial de 1°C, el cual persiste hasta la primera semana de febrero, cuando se alcanzan los 31°C. Durante los últimos días de febrero, la temperatura normalmente comienza a ascender gradualmente, iniciando un segundo tipo de estación seca debido al comportamiento de dicho elemento climático, situación que se extiende hasta los siguientes meses de marzo y abril o hasta la primera quincena de mayo en algunos casos.

Es importante señalar que, a partir de la primera semana de marzo hasta el final de este mes, se observa un incremento en temperatura potencial, la cual alcanza valores superiores a los 32°C, pero inferiores a 35°C. El resto del año se presenta una variabilidad baja en este parámetro. En general, la temperatura media anual es de unos 25°C. Los meses más fríos son diciembre y enero (24°C), mientras que el mes más cálido es abril (32°C). Con 7°C de oscilación térmica.

El Servicio Nacional de Estudios Territoriales distingue tres zonas térmicas. De 0 a 800 metros, con una temperatura media de 27 a 22°C en las planicies costeras y de 28 a 22 ° C en las planicies internas; De 800 a 1,200 metros, con una temperatura media de 22 a 20°C en las planicies altas y de 21 a 19°C en las faldas de volcanes; De 1.200 metros y más, con una temperatura media de 21 a

19°C en faldas de volcanes y de 16 a 10°C en los valles y hondonadas por encima de los 1.800 metros<sup>12</sup>.

## 2.5 GEOMORFOLOGÍA

Desde el punto de vista geomorfológico la zona de estudio ha estado determinada por una serie de eventos o fenómenos naturales como procesos tectónicos, fenómenos volcánicos y procesos erosivos fluviales, los cuales han influido en la disposición de los distintos estratos geológicos.

El resultado de estos fenómenos ha conllevado a la formación de unidades geomorfológicas (Planicie Costera, Montaña Costera, Valle Central, Montaña Interior, Valle Interior y Montaña Norteña), de las cuales las que más están relacionada con la zona de estudio establecida son la que corresponde al Valle Central (Fosa Central) y Montaña Costera. Esta unidad geomorfológica contempla la ubicación de centros de actividad volcánica importantes como lo es el Complejo Volcánico de San Salvador (que incluye al Volcán de San Salvador (El Boquerón) y El Picacho). Esta unidad geomorfológica se extiende desde la zona alta y las faldas del sector sureste del Volcán de San Salvador, hasta la zona de la planicie del Valle de la Ciudad de San Salvador, circundante al cauce

---

<sup>12</sup> Clima El Salvador. Santa tecla, El Salvador: meteorología. Recuperado de: <http://www.snet.gob.sv/ver/meteorologia/clima+en+el+salvador/> , MARN, 2009-2015.

principal del Río Acelhuate, es decir desde los 635 msnm hasta los 1,750 msnm aproximadamente.

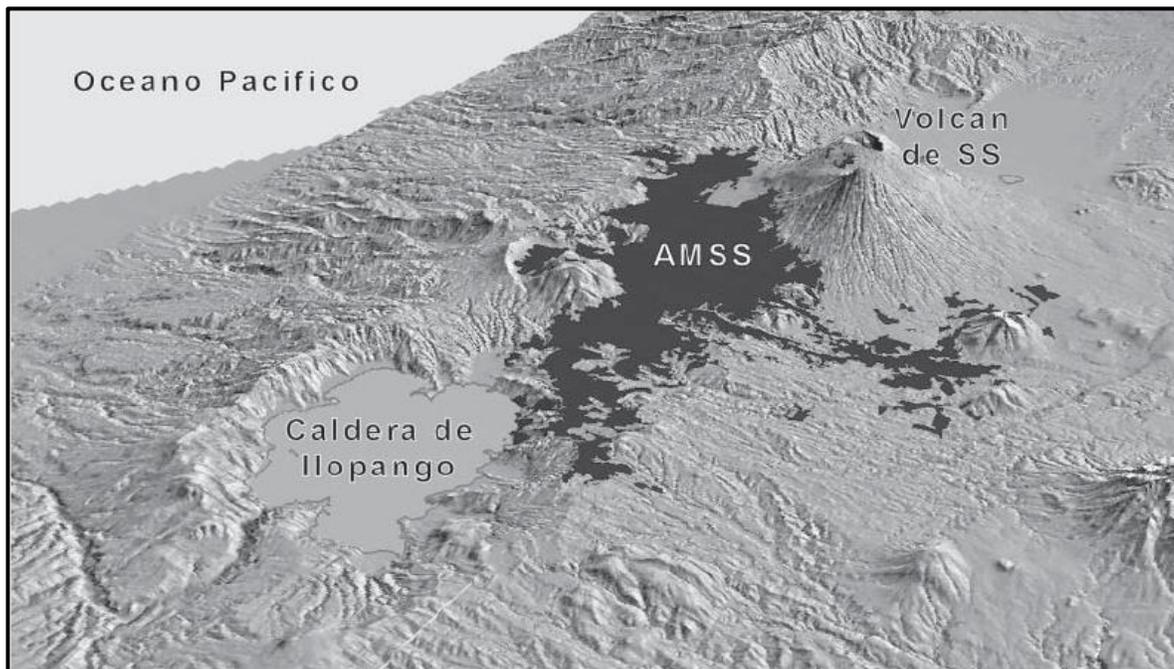
Un rasgo predominante e importante analizar, en la zona de estudio, es la Caldera de Ilopango, la cual es una depresión que mide actualmente 11 km en la dirección este-oeste y 8 km en la dirección norte-sur. Según Meyer-Abich (1956) la caldera es una depresión vulcano-tectónica, cuyo origen difiere de otras calderas como la de Coatepeque, localizada al oeste del territorio nacional, la cual fue formada por el colapso de un edificio volcánico. Por otra parte, Williams y Meyer-Abich (1953-1955) explican que el origen de la caldera se debe a un proceso de tres diferentes episodios de colapso, cada uno de los cuales se asocia a erupciones volcánicas violentas. El primero de ellos ocurre durante la formación de la unidad geológico-tectónica llamada Fosa Central, la cual corresponde con el final del período Plioceno y el principio del Pleistoceno.

En lo que respecta al Volcán de San Salvador, se puede establecer que constituye una zona importante de la zona de estudio. Antiguamente se le denominaba Quezaltepeque, y en la actualidad se le conoce como Boquerón, ubicándose a una distancia de 7 km al oeste de la ciudad de San Salvador. Geológicamente hablando, el Volcán de San Salvador es un sistema compuesto por los restos de erupciones múltiples. Originalmente, su tamaño era mucho más grande, pero una violenta explosión destruyó el cono del edificio volcánico, dejando un cráter de 1,600 m de diámetro, conocido como Boquerón (1890 msnm), una aguda y elevada cumbre en su parte más oriental, llamada Picacho,

cuya altura sobre el nivel del mar es de 1,960 m y una tercera elevación menos predominante al noroeste del cráter llamada El Jabalí

La depresión de Ilopango, a comparación con el Estrato-Volcán San Salvador tuvo características diferentes como erupciones de magma enriquecido con sílice (dacítico), manifestándose en la superficie de diversas formas, tales como cenizas volcánicas y pómez, domos y cúpulas de lava, o simplemente fluyendo como corrientes de lava. Algunos de los domos tuvieron explosiones sucesivas, durante las cuales fueron lanzadas al aire cenizas y pómez en forma de nubes o avalanchas ardientes.

El último colapso de la caldera (260 A.D.), el cual dio origen a la depresión actual del Lago de Ilopango, está asociado a una erupción volcánica, en la que fueron expulsadas cenizas finas de color claro, conocidas como "Tierra Blanca". Estas fueron analizadas en repetidas ocasiones por Williams y Meyer-Abich (1953) y Meyer-Abich (1956), y descritas como un material blanco y pumítico, altamente vesiculoso con fenocristales de hornblenda, plagioclasas, hiperstena y magnetita. En lo que respecta a la Cordillera del Bálsamo, perteneciente a la Formación Bálsamo, la constituyen dos extensos estrato-volcanes basálticos-andesíticos: Panchimalco y Jayaque, pertenecientes al período terciario y calculándose su edad entre los 7.2-6.1 y 2.6-1.5 millones de años respectivamente. Se llegaron a constituir como la base para todo el material que iba siendo expulsando tanto por el Volcán de San Salvador como la Caldera de Ilopango.



**Ilustración 2-3: Mapa de relieve del Área Metropolitana de San Salvador (AMSS, OPAMSS, 2008), el AMSS está rodeado por el volcán de San Salvador y Caldera de Ilopango. (Modificado de Lexa et al., 2011). Fuente: Revista Geológica de América Central, 47: 117-132, 2012 ISSN: 0256-7024.**

## 2.6 ESTRATIGRAFÍA.

Dürr (1960) y Dürr – Klinge (1960), introducen la clasificación estratigráfica de las distintas unidades volcánicas del terciario y cuaternario. Son ellos, los que denominan con el nombre de “estratos” a cada una de las unidades Bálsamo, Cuscatlán y San Salvador, las cuales posteriormente son elevadas al rango de “Formación” por Wiesemann (1975) y Wiesemann et al (1978).

Para el área del AMSS, se establece que las características regionales muestran materiales volcánicos relacionados con las formaciones Bálsamo (Plioceno) y Cuscatlán (Pleistoceno) hacia el sur y este, y San Salvador (Holoceno) hacia el

norte y al oeste. La secuencia y descripción de cada una de ellas, de la más antigua a la más reciente, es la siguiente:

a) **Formación Bálsamo.**

Durante esta fase se depositaron grandes cubiertas piroclásticas, emitidas en su mayor parte a lo largo de fracturas y en menor proporción desde aparatos centrales, y potentes depósitos de lahares (final del vulcanismo del Terciario superior)

b) **Formación Cuscatlán.**

Esta formación, es producto de una fase posterior a la formación de graben o fosa central (Plioceno Pleistoceno), en la que tuvieron lugar la emisión de cubiertas piroclásticas desde centros ubicados en su interior, y formación de domos y formas volcánicas centrales. En esta formación también están comprendidos los depósitos lacustres y fluviales (originados a raíz de la erosión del material de la depresión central. Graben o fosa).

c) **Formación San Salvador.**

Esta Formación se encuentra en toda la cadena volcánica joven que atraviesa la parte Sur del país (Holoceno a Pleistoceno). Está compuesta por productos extrusivos volcánicos: corrientes de lava, cúpulas de lava, tobas fundidas, tobas, pómez, escoria y cenizas volcánicas, en los que a veces se encuentran intercalaciones de sedimentos lacustres. El espesor de los estratos y la sucesión

varía de volcán a volcán. También se encuentran suelos fósiles color café y negro.

Las rocas volcánicas que conforman la superficie del AMSS están, en su mayoría, incluidas en la formación San Salvador, producto de los volcanes pertenecientes al frente volcánico de América Central (Plioceno-Cuaternario) (Lexa et al., 2011). Hernández (2008) describe la estratigrafía del AMSS y sus características; los estratos más importantes son: TB4, TB3, TB2 y Tierra Blanca Joven (TBJ), que son productos eruptivos de la Caldera de Ilopango. Además, G1, G2, así como, diferentes flujos de lava y tefras que pertenecen al estrato volcán de San Salvador. El basamento de la formación San Salvador está compuesto por los productos de las calderas y los volcanes de la formación Cuscatlán y los restos de estratovolcanes andesíticos de la formación Bálsamo (Lexa et al., 2011).

La región más inestable del AMSS corresponde con los depósitos de espesor importante de la tefra volcánica llamada Tierra Blanca Joven (TBJ), producto de la última erupción pliniana de la Caldera de Ilopango (536 D.C., Dull et al., 2010), cuyos productos son una intercalación de caídas, oleadas piroclásticas, flujos piroclásticos y episodios de erupciones húmedas (freatomagmática) y secas.

Los depósitos piroclásticos TBJ (Hernández, 2004) consisten principalmente de fragmentos de vidrio volcánico que forman cenizas de arena fina y tamaño limo

(grandes cantidades), fragmentos de pómez y líticos (tamaño grava, arena y grava); polvo volcánico y cristales en pequeña cantidad (tamaño arena y limo)<sup>13</sup>.

Por lo general las laderas o taludes de Tierra Blanca Joven (TBJ) son verticales y sufren una gran cantidad de movimientos de ladera debido a las lluvias, erosión o a los terremotos. (Rolo et al. 2004).

La conformación geológica de la zona metropolitana se encuentra actualizada en <https://geoportal.opamss.org.sv/portal/>, y puede observarse en el mapa anexo 15.

## **2.7 USO DE SUELO DEL AMSS**

El uso que se le da al suelo del AMSS juega un papel importante en el comportamiento de la escorrentía superficial del territorio y por ende del comportamiento de la cuenca en cuestión.

En los últimos años San Salvador ha sufrido un incremento desmedido en la población y con ello se refleja el uso acelerado del suelo. En los últimos 31 años, el AMSS ha consumido cerca de tres veces más de suelo de lo que se consumió en un periodo de 383 años (de 1594 a 1977), en los cuales el territorio mismo ha delimitado una mayor expansión, debido a la configuración geográfica y a los

---

<sup>13</sup>Problemática y conocimiento actual de las tefras tierra blanca joven en el área metropolitana de San Salvador, El Salvador. Revista Geológica de América Central, 47: 117-132, 2012 ISSN: 0256-7024

grandes elementos físicos que condicionan un grado de crecimiento aún mayor. Esta tendencia de crecimiento de la mancha urbana, consume y absorbe el suelo y se expande hacia zonas ambientalmente valiosas como: el Volcán de San Salvador, la Cordillera del Bálsamo, el Cerro de San Jacinto y áreas de ribera de ríos y quebradas, igualmente en zonas sensibles o susceptibles a amenazas o donde las condiciones topográficas lo permitan.

En los últimos años, el crecimiento y expansión de áreas habitacionales periféricas, ha provocado pérdida de suelos eminentemente rurales y afectación de áreas naturales y de zonas con potencial para el desarrollo de actividades agropecuarias las cuales, están perdiendo su carácter agropecuario para convertirse en áreas comerciales, industriales o de servicio.

Se puede establecer que en la zona de la cuenca del río Acelhuate existen importantes áreas urbanas como el AMSS, la cual comprende los sectores urbanos de los municipios de Santa Tecla, Antigua Cuscatlán, San Salvador, Mejicanos, Ayutuxtepeque, Delgado, Apopa, Nejapa, Soyapango, Ilopango, San Martín y San Marcos, además extensiones importantes de tierras agropecuarias y de caña de azúcar (parte media y baja).

## **2.8 CRECIMIENTO URBANO**

El AMSS cuenta con un territorio aproximado de 600 Km<sup>2</sup>, de los cuales se tienen datos estimados del consumo de suelo en diversos años. Partiendo del año 1594, el territorio de San Salvador había consumido un área de 0.24 Km<sup>2</sup>; 321 años

después, en 1915, se habían consumido 2.94 Km<sup>2</sup> de territorio, lo que da un promedio de consumo de suelo de 0.01 Km<sup>2</sup> x Año; para el año 1948, se observa un crecimiento urbano en los municipios de Santa Tecla y Antiguo Cuscatlán, en totalidad crece en extensión 15.4 km<sup>2</sup> ;a partir del año 1955, se registran áreas de desarrollo urbano alrededor de algunos centros históricos, como Santa Tecla, así como hacia el oriente del AMSS, donde se tiene mancha urbana del Aeropuerto de Ilopango, en este punto ya el territorio ha aumentado 48.9 Km<sup>2</sup> ; de 1938 a 1977 (en un periodo de 39 años) ese promedio de suelo consumido se incrementó considerablemente, según el dato anterior a 1.26 Km<sup>2</sup> x Año, lo que represento el inicio de un acelerado consumo de suelo natural y agrícola, provocado principalmente por los procesos de industrialización de la economía nacional, lo que estimulo las grandes migraciones de población hacia la Capital San Salvador y sus municipios aledaños.

Un cambio considerable, se da entre los años 1995 y 2002, cuando se experimenta un crecimiento urbano acelerado, alcanzando la totalidad de los 14 municipios del AMSS, extendiéndose incluso a territorios de alto valor ambiental, como el Volcán de San Salvador, las faldas del Cerro San Jacinto, la Cordillera del Bálsamo y el Cerro Nejapa, este crecimiento fue tan acelerado que el área de urbanización casi se duplicó de 95 Km<sup>2</sup> a 155 Km<sup>2</sup>. Para los años 2007 y 2008, el AMSS consumió 159.71 Km<sup>2</sup>, siendo el promedio de suelo consumido por año desde 1977, de 3.24 Km<sup>2</sup> x Año. Esta dinámica de consumo excesivo de suelo queda evidenciada territorialmente, expandida en aquellas áreas donde las

condiciones topográficas del territorio lo permiten e incluso en áreas no adecuadas para el asentamiento de personas.

Entre 2011 y 2016, la OPAMSS ha otorgado 2,856 permisos de construcción, valorados en \$1,300 millones de inversión. El 66.8 % de los permisos corresponden a proyectos habitacionales, equivalente a 1,907.

El 18.3% para usos de comercio y servicios (523), otro 10.7 % para equipamientos (307), el 3.3 % para usos industriales (94); y el 0.9 % para otros fines.

San Salvador, Antiguo Cuscatlán y Santa Tecla son los municipios donde se ha ejecutado la mayoría de proyectos; seguidos de Mejicanos, Apopa y Soyapango.

Este crecimiento implica la problemática de los recursos naturales en términos del agotamiento del agua, área forestal y verde asociado a recarga de acuíferos y el aire, y el aumento de impermeabilización del suelo.

De acuerdo a la siguiente Ilustración 2-4, a partir del año 1900, ya se observa una mancha urbana importante, que parte de San Salvador y se extiende hacia los municipios aledaños; para el año 1948, se observa un crecimiento urbano en los municipios de Santa Tecla y Antiguo Cuscatlán.

La mancha urbana se ha expandido principalmente en dirección este-oeste, desde el extremo poniente en Santa Tecla, hasta el extremo oriente, en San Martín, favorecida por la presencia de infraestructura vial que atraviesa todo el

territorio metropolitano. Existe un importante crecimiento al norte, en los municipios de Cuscatancingo (en la porción más al norte) y en Apopa, con una continuación en el municipio vecino, Nejapa, aunado por la construcción del Bypass Nejapa, Quezaltepeque, que genera una fuerte presión a la urbanización. En el caso de municipios como Tonacatepeque, se ha visto limitado su crecimiento en el sector norte, en parte por la falta de conectividad en términos de vías primarias, rasgo que podría extenderse también al sector sur de Santa Tecla<sup>14</sup>.

---

<sup>14</sup> Esquema Director del Área Metropolitana de San Salvador, OPAMSS, 2013, Primera Edición.

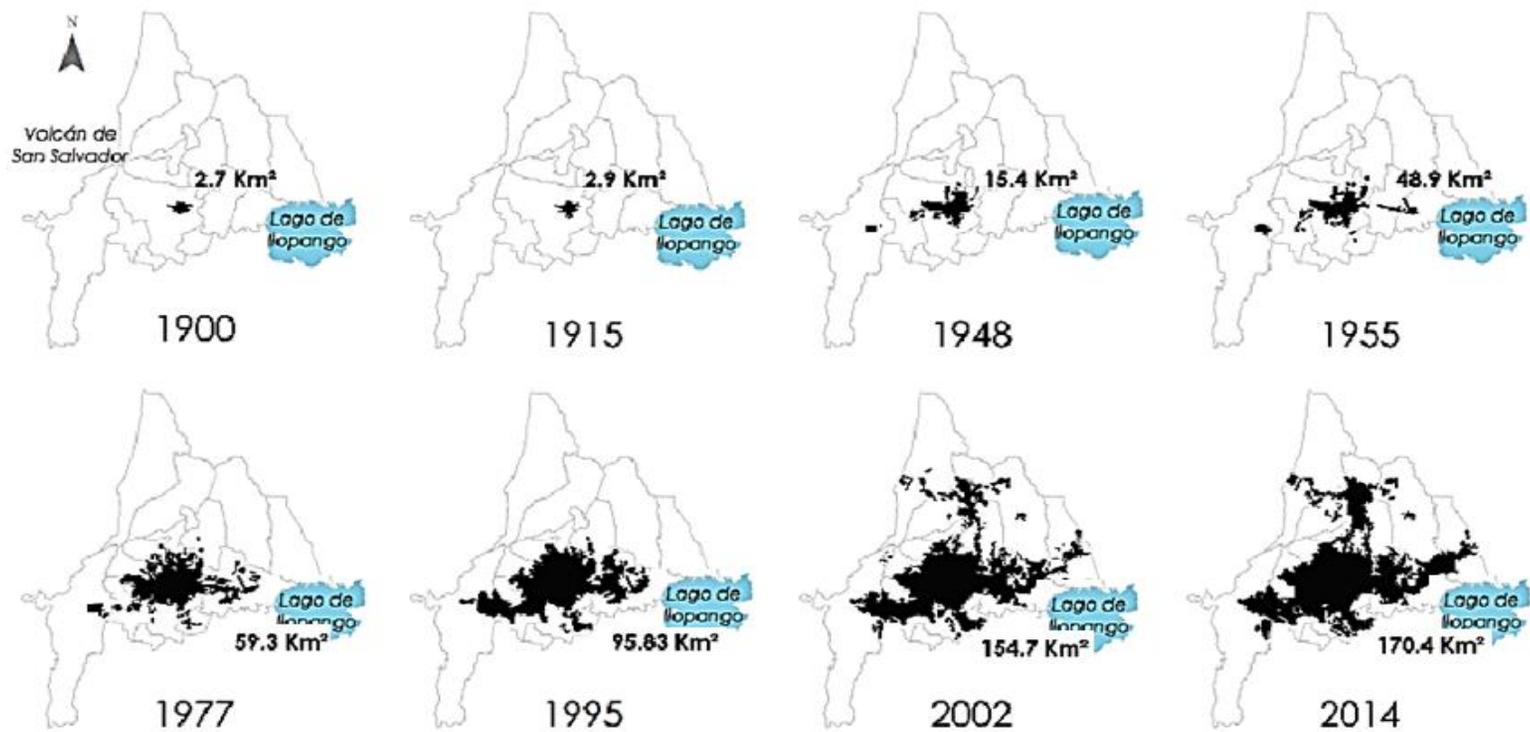


Ilustración 2-4 Crecimiento urbano del AMSS en los años 1900 hasta 2014. Fuente Resumen Ejecutivo Esquema director OPAMSS

## **2.9 QUE ES EL CAMBIO CLIMÁTICO**

### **2.9.1 CONCEPTO**

Se llama cambio climático a la variación global del clima de la Tierra, se debe a causas naturales y a la acción del ser humano; se producen diversas escalas de tiempo y sobre todo a los parámetros climáticos. El clima de la Tierra es dinámico y a consecuencia de alteraciones en el balance energético, está sometido a variaciones en todas las escalas temporales, desde hace miles de millones de años.

El cambio climático es uno de los principales problemas ambientales y sociales de la humanidad debido a las consecuencias que puede tener. Un cambio climático puede tornarse peligroso cuando amenaza severamente a las sociedades, sus economías y el mundo natural.

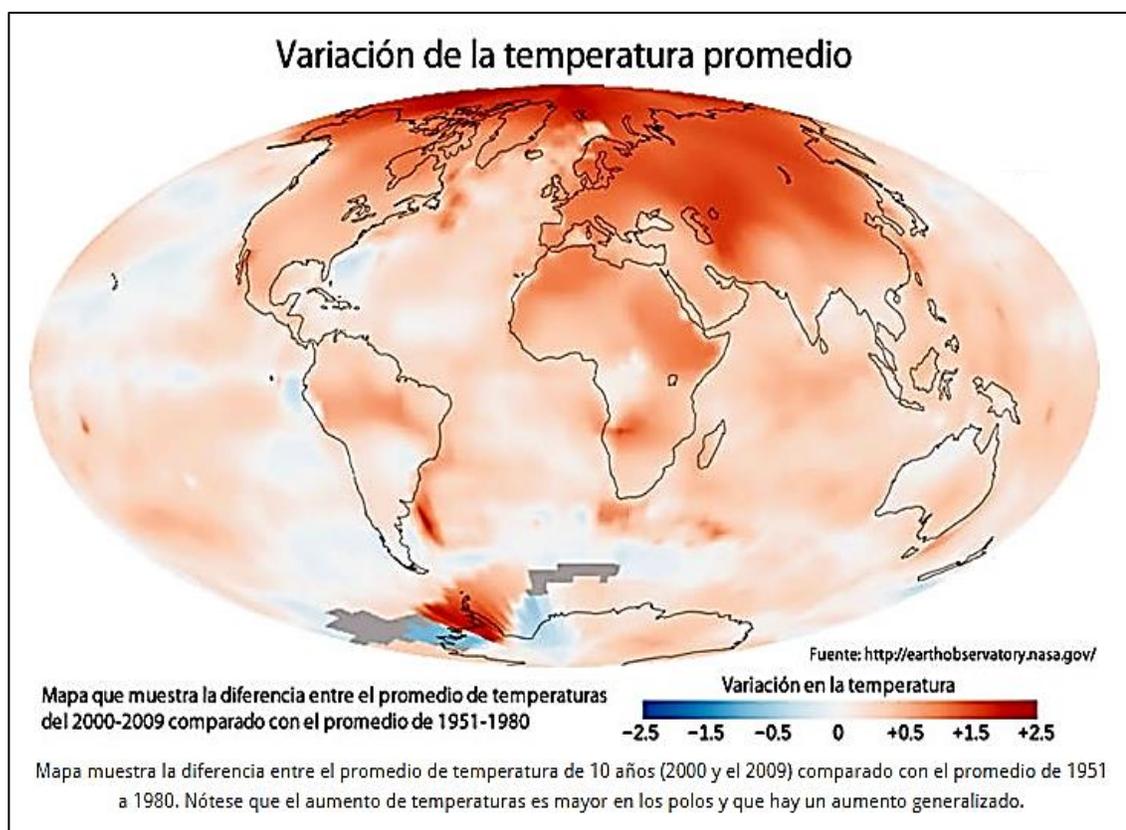
Es uno de los mayores desafíos de nuestro tiempo y supone una presión adicional para nuestras sociedades y el medio ambiente, desde pautas meteorológicas cambiantes que amenazan la producción de alimentos, hasta el aumento del nivel del mar que incrementa el riesgo de inundaciones catastróficas.

## **2.10 CAUSAS Y CONSECUENCIAS DEL CAMBIO CLIMÁTICO**

### **2.10.1 CAUSAS**

En las últimas décadas, muchos de los indicadores y estudios han señalado que el calentamiento global ha sido alarmante a nivel mundial

Las temperaturas en la Tierra son aptas para la vida gracias a un proceso natural llamado el efecto invernadero. Cuando la radiación solar llega a nuestra atmósfera, parte de ella es reflejada al espacio y parte de ella es absorbida por la Tierra. Esto causa que la superficie de la Tierra se caliente. Calor es irradiado hacia el exterior y absorbido por los gases presentes en la atmósfera. En la Tierra, estos gases son llamados gases de efecto invernadero.



**Ilustración 2-5: Variaciones de la temperatura, años 1951-1980. Fuente: <http://cambioclimaticoglobal.com/> año de visita a página 2018**

### ¿Qué son los gases de efecto invernadero (GEI)?

Los gases de efecto invernadero (GEI), o gases de invernadero, crean una banda de gases alrededor de la Tierra e impiden que la radiación solar se refleje de vuelta al espacio. El efecto creado por esta banda de GEI que rodea la Tierra, se denomina Efecto Invernadero. El efecto invernadero mantiene la superficie de la Tierra dentro de un rango y en un nivel que hace que la vida en la Tierra sea posible. Los principales GEI son:

- ✓ El vapor de agua (H<sub>2</sub>O)
- ✓ El dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>),
- ✓ El óxido nitroso (N<sub>2</sub>O)
- ✓ El metano (CH<sub>4</sub>) y
- ✓ El ozono (O<sub>3</sub>).

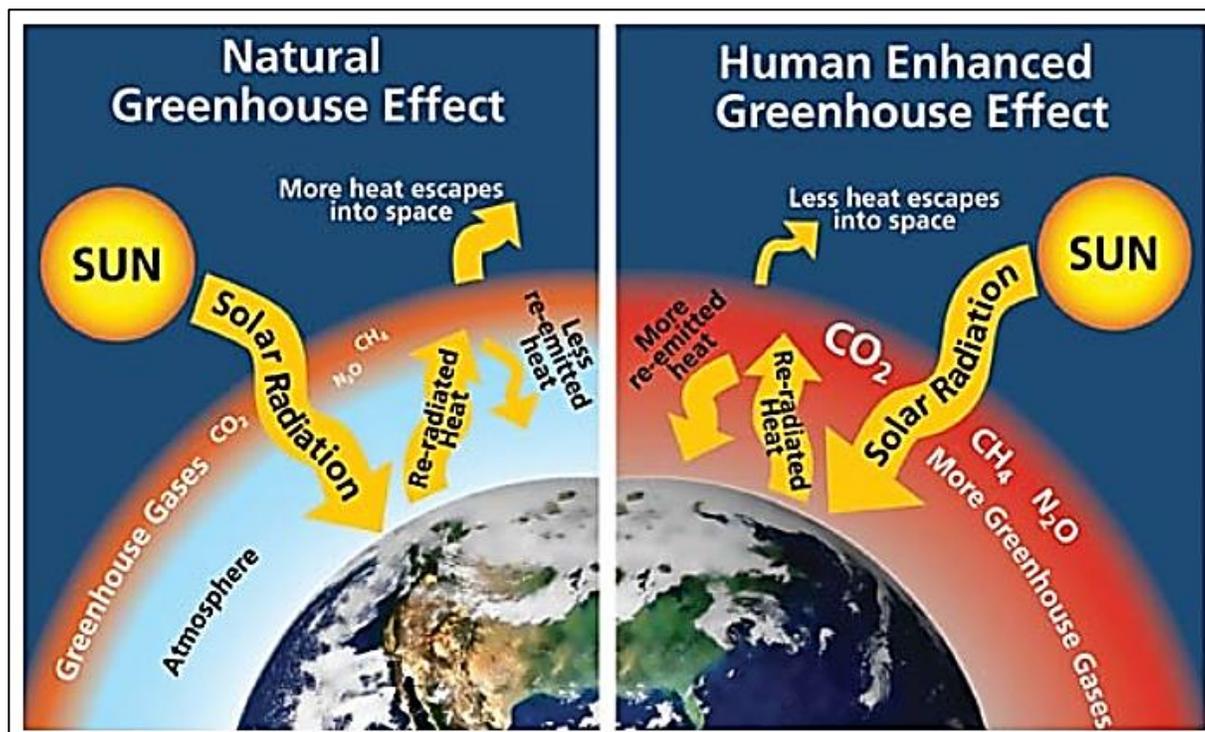


Ilustración 2-6 Proceso del calentamiento por gases de efecto invernadero en el planeta Tierra. Fuente: EKOenergy.org\_ año de visita de página 2018

Hay muchos gases de efecto invernadero responsables de un calentamiento adicional de la atmósfera, los cuales son producidos de distintas formas por personas. La mayoría provienen de la combustión de combustibles fósiles de los coches, de las fábricas y de la producción de electricidad. En el informe de índice de desarrollo humano del año 2008 expone que el 24,7% de emisión de CO<sub>2</sub> el cual concierne al sector energía se deriva de la industrialización, sumando a esto el porcentaje de los diversos procesos industriales tales como el nuclear, procesamiento del petróleo en derivados etc. que corresponden el 1.4% de emisión CO<sub>2</sub>, dando como resultado el 26.1% de emanaciones del sector

industria para el año 2000. Lo cual confirma, que el aumento del Cambio climático, es debido principalmente a la generación masiva e indiscriminada del CO<sub>2</sub> por la misma industrialización<sup>15</sup>; entre otros que se puede mencionar son los desechos (1.5%), cambio de uso de suelo (7.6%), agricultura (5.6%) y procesos industriales (1.4%)

### 2.10.2 CONSECUENCIAS DEL CAMBIO CLIMATICO EN EL MUNDO

La actividad de los seres humanos tiene una influencia cada vez mayor en el clima y las temperaturas al quemar combustibles fósiles, talar las selvas tropicales y explotar ganado, se debe a estas actividades una gran parte de la generación de gases que contribuyen al efecto invernadero y en consecuencia al calentamiento global:

- ✓ El CO<sub>2</sub> es un gas de efecto invernadero producido principalmente por la actividad humana y es responsable del 63% del calentamiento global causado por el hombre.

---

<sup>15</sup> Causas y efectos del Cambio Climático generados por el sistema de producción industrial actual; los esfuerzos de la comunidad internacional para contrarrestarlo y los compromisos adquiridos por los países desarrollados como los principales contaminadores, periodo 1990-2007, Artiga S. & Menjívar A. & Aquino K., 2010, Ciudad Universitaria, San Salvador, El Salvador, Página 17.

Su concentración en la atmósfera supera actualmente en un 40% el nivel registrado al comienzo de la industrialización. Las enormes cantidades de gases así producidos se añaden a los que se liberan de forma natural en la atmósfera, aumentando el efecto invernadero y el calentamiento global, además de este también se encuentran el metano, óxido nitroso, gases fluorados

- ✓ Los otros gases de efecto invernadero se emiten en menores cantidades, pero son mucho más eficaces que el CO<sub>2</sub> a la hora de retener el calor y en algunos casos mil veces más potentes. El metano es responsable del 19% del calentamiento global de origen humano y el óxido nitroso, del 6%.
- ✓ El cambio climático ha generado respuestas negativas por parte del planeta, el aumento de la temperatura global en 2016 fue de 1,1 grados, el mayor de la historia de la humanidad.

Otras consecuencias son:

- ✓ Aumento del nivel del mar
- ✓ Los glaciares de montaña de todo el mundo se funden y pierden superficie, grosor y volumen.
- ✓ El progresivo deshielo de las masas glaciares, como el Ártico y Groenlandia disminuyen de superficie
- ✓ Las precipitaciones se reducen en muchos sitios y se agudizan las sequías.

- ✓ Los fenómenos meteorológicos extremos son más intensos: huracanes, precipitaciones intensas, inundaciones, olas de calor
- ✓ Especies animales y vegetales ven desplazado su hábitat o cambian de comportamiento.

## 2.11 ACUERDOS INTERNACIONALES

### ➤ **Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático**

El sistema de las Naciones Unidas está a la vanguardia de los esfuerzos para salvar nuestro planeta. En 1992, la Cumbre para la Tierra dio lugar a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) como primer paso para afrontar el problema. Hoy en día cuenta con una composición casi universal. Un total de 197 países han ratificado la Convención, convirtiéndose en Partes de la misma. El objetivo final de la Convención es prevenir una interferencia humana "peligrosa" con el sistema climático.

### ➤ **Protocolo de Kioto**

En 1995 los países iniciaron las negociaciones para fortalecer la respuesta mundial al cambio climático y dos años después, adoptaron el Protocolo de Kioto. Este obliga jurídicamente a los países desarrollados que son Parte a cumplir unas metas de reducción de las emisiones. El primer período de compromiso del Protocolo comenzó en 2008 y finalizó en 2012. El segundo período de compromiso empezó el 1 de enero de 2013 y terminará en 2020.

➤ **Acuerdo de París**

En la 21ª Conferencia en París, las Partes en Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) alcanzaron un acuerdo histórico con el objetivo de combatir el cambio climático y acelerar e intensificar las acciones y las inversiones necesarias para un futuro sostenible con bajas emisiones de carbono.

El Acuerdo de París se basa en la Convención y, por primera vez, agrupa a todas las naciones bajo una causa común: realizar ambiciosos esfuerzos con el objetivo de combatir el cambio climático y adaptarse a sus efectos, con mayor apoyo para ayudar a los países en desarrollo a que lo hagan. De esta manera, define un nuevo camino en el esfuerzo climático a nivel mundial.

El principal objetivo del Acuerdo de París es reforzar la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático manteniendo el aumento de la temperatura mundial en este siglo por debajo de los 2 °C con respecto a los niveles preindustriales y proseguir con los esfuerzos para limitar aún más el aumento de la temperatura a 1,5 °C.

En el Día de la Tierra, el 22 de abril de 2016, 175 líderes mundiales firmaron el Acuerdo de París en la Sede de las Naciones Unidas en Nueva York. Este fue, con diferencia, el acuerdo internacional que más países firmaron en un solo día. Otros también lo han firmado desde entonces.

## 2.12 EL SALVADOR, UNO DE LOS PAÍSES MÁS VULNERABLES FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO

El Salvador es uno de los países más vulnerables del mundo, al igual que el resto de Centroamérica y el Caribe de acuerdo con Germanwatch. En su pequeña extensión, (poco más de 20 700 km<sup>2</sup>), el 88.7% del territorio se considera zona de riesgo y sobre esa superficie se asienta el 95.4% de una población que ronda los seis millones de habitantes. También, su ubicación geográfica lo hace blanco de eventos climáticos cada vez más frecuentes. En apenas dos años, El Salvador se ha visto afectado por cinco eventos climáticos extremos: las tormentas tropicales Ida en 2009; Agatha, Alex y Mathew en 2010, y la depresión tropical 12E en 2011.

PAÍS	POSICIÓN A NIVEL MUNDIAL					
	2005	2006	2007	2008	2009	2010
EL SALVADOR	104	34	123	112	91	1

Tabla 2-5: Ranking de vulnerabilidad. Fuente: Germanwatch (2010).

Los expertos coinciden en que el cambio climático ya está afectando la región centroamericana. En las últimas décadas se puede percibir un incremento de fenómenos meteorológicos y todo indica que ocurrirán cada vez con mayor frecuencia y mayor intensidad.

De hecho, las pasadas depresiones tropicales superaron con creces los acumulados de lluvia del huracán Mitch y también su impacto en daños materiales. Por lo tanto, estos sucesos no pueden ser ignorados<sup>16</sup>.

**En Diciembre del año 2016**, el Gobierno de El Salvador reunió a expertos y actores claves para identificar maneras de aumentar la inversión en el cambio climático y los flujos de financiamiento en los sectores gubernamentales.

El evento, contó con el apoyo del Programa de Preparación del Fondo Verde para el Clima, que cuenta con el acompañamiento del Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) y el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) coincide con la etapa final del análisis dirigido por el gobierno sobre el gasto público en la adaptación y mitigación del cambio climático, conocido como Análisis Institucional del Gasto Público del Clima.

En el desarrollo, se reconoció que era necesario incrementar el entendimiento entre las partes (los actores claves, los tomadores de decisiones nacionales, los representantes de las instituciones y ministerios), sobre su propio rol y el rol de

---

<sup>16</sup> Evaluación de daños y pérdidas en El Salvador ocasionados por la Depresión Tropical 12E, CEPAL. (2011), página. 5.

sus instituciones para combatir el cambio climático, así como informarse sobre las necesidades de financiamiento.

La consulta reunió a miembros del Comité Nacional de Financiamiento del Clima, integrado por miembros del Ministerio de Hacienda, Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, así como la Secretaría Técnica de Planificación de la Presidencia.

Los participantes examinaron las Contribuciones nacionalmente determinadas por El Salvador, las cuales fueron desarrolladas sobre la base de los compromisos contraídos en la Conferencia de las Partes de la Convención Marco de Naciones Unidas para el Cambio Climático celebrada en París en diciembre de 2015, y discutieron la necesidad de una visión clara tanto de las necesidades de financiamiento como los caminos para su implementación. Estos compromisos representan una política sobre el clima y las acciones para reducir las emisiones y adaptarse al cambio climático en muchos sectores a partir de una fecha determinada.

Las Contribuciones nacionales determinadas por El Salvador, comprenden 30 compromisos vinculados al Plan nacional del cambio climático, que buscan la descarbonización del suministro energético incrementando el uso de energía renovable, mejorando la eficiencia energética, el manejo de la tierra, la planeación urbana y el transporte.

El Salvador estableció así el camino para el logro de sus compromisos de la COP21 y el apoyo continuo del Programa de Preparación del Fondo Verde para el Clima, en este sentido asegurar el financiamiento adicional para la implementación de estos compromisos juega un papel importante.

**CAPITULO 3- CARACTERIZACIÓN  
DE LA CUENCA DEL RIO  
ACELHUATE**

### 3.1 INTRODUCCIÓN

Es de suma importancia conocer todos los factores que se involucran en el comportamiento hidrológico e hidráulico de la cuenca en estudio, esto brindará un mejor panorama al análisis de la misma y es por ello es que en el presente capítulo se ha realizado la caracterización física de la cuenca del río Acelhuate, dado que la respuesta de una cuenca ante una precipitación se ve condicionada por todos los factores físicos como: geología, tipo de suelo, evapotranspiración, hidrología, área, perímetro, longitud de cauces, longitud de cuenca, pendiente del cauce principal, pendiente media de la cuenca, elevación media de la cuenca y parámetros que sirven para la comparación entre cuencas similares como lo es: orden de corriente, densidad de corriente, índice de compacidad, factor de forma, relación de elongación, relación de circularidad.

Los datos obtenidos de la caracterización servirán para determinar características morfométricas y de su red de drenaje principal.

Para la obtención de la información del presente Capítulo fue necesario apoyarse en información en formato digital, la cual ha sido analizada y generada en plataforma de análisis de sistemas de información geográficas (SIG, por siglas en inglés) utilizando QGIS y a través de información obtenida de las distintas instituciones.

### 3.2 CONCEPTOS

Dentro de los términos generales se utilizan, para la definición e identificación de los componentes para determinar las características de la cuenca, se tienen:

**Cuenca:** Se entiende aquella depresión o forma geográfica que hace que el territorio vaya perdiendo altura a medida que se acerca al nivel del mar Sistema integrado por varias subcuencas o micro cuencas.

**Subcuencas:** Conjunto de micro cuencas que drenan en un solo cauce con caudal fluctuante pero permanente.

**Micro cuencas:** Una micro cuenca es toda área en la que su drenaje va a dar al cauce principal de una Subcuenca; es decir, que una Subcuenca está dividida en varias micro cuencas.

**Quebradas:** Es toda depresión que desarrolla su drenaje directamente a la corriente principal de una micro cuenca.

**Cuenca alta:** Corresponde generalmente a las áreas montañosas o cabeceras de los cerros, limitadas en su parte superior por las divisorias de aguas.

**Cuenca media:** Donde se juntan las aguas recogidas en las partes altas y en donde el río principal mantiene un cauce definido.

**Cuenca baja o zonas transicionales:** Donde el río desemboca a ríos mayores o a zonas bajas tales como estuarios y humedales.

**Zona de Captación o Transporte:** Es la porción de la cuenca que en principio se encarga de captar la mayor parte del agua que entra al sistema, así como de transportar el agua proveniente de la zona de cabecera. Esta zona puede considerarse como de mezcla ya que en ella confluyen masas de agua con diferentes características físico-químicas.

**Zona de Emisión:** Se caracteriza por ser la zona que emite hacia una corriente más caudalosa el agua proveniente de las otras dos zonas funcionales.

**Parteaguas:** Es una línea imaginaria que delimita la cuenca hidrográfica, marca el límite entre cuenca hidrográficas y las cuencas vecinas, constituye el punto con mayor elevación altimétrica desde donde escurre el agua que se precipita en el territorio delimitado por éste, hasta un punto de salida.

**Río principal:** Suele ser definido como el curso con mayor caudal de agua (medio o máximo) o bien con mayor longitud. La mayoría de cuencas de drenaje presentan un río principal bien definido desde la desembocadura hasta cerca de la divisoria de aguas. El río principal tiene un curso, que es la distancia entre su nacimiento y su desembocadura; en esta investigación **el río principal de la cuenca es el Río Acelhuate.**

**Afluentes:** Corresponde a un curso de agua, también llamado tributario, que desemboca en otro río más importante con el cual se une en un lugar llamado confluencia.

### 3.3 UBICACIÓN

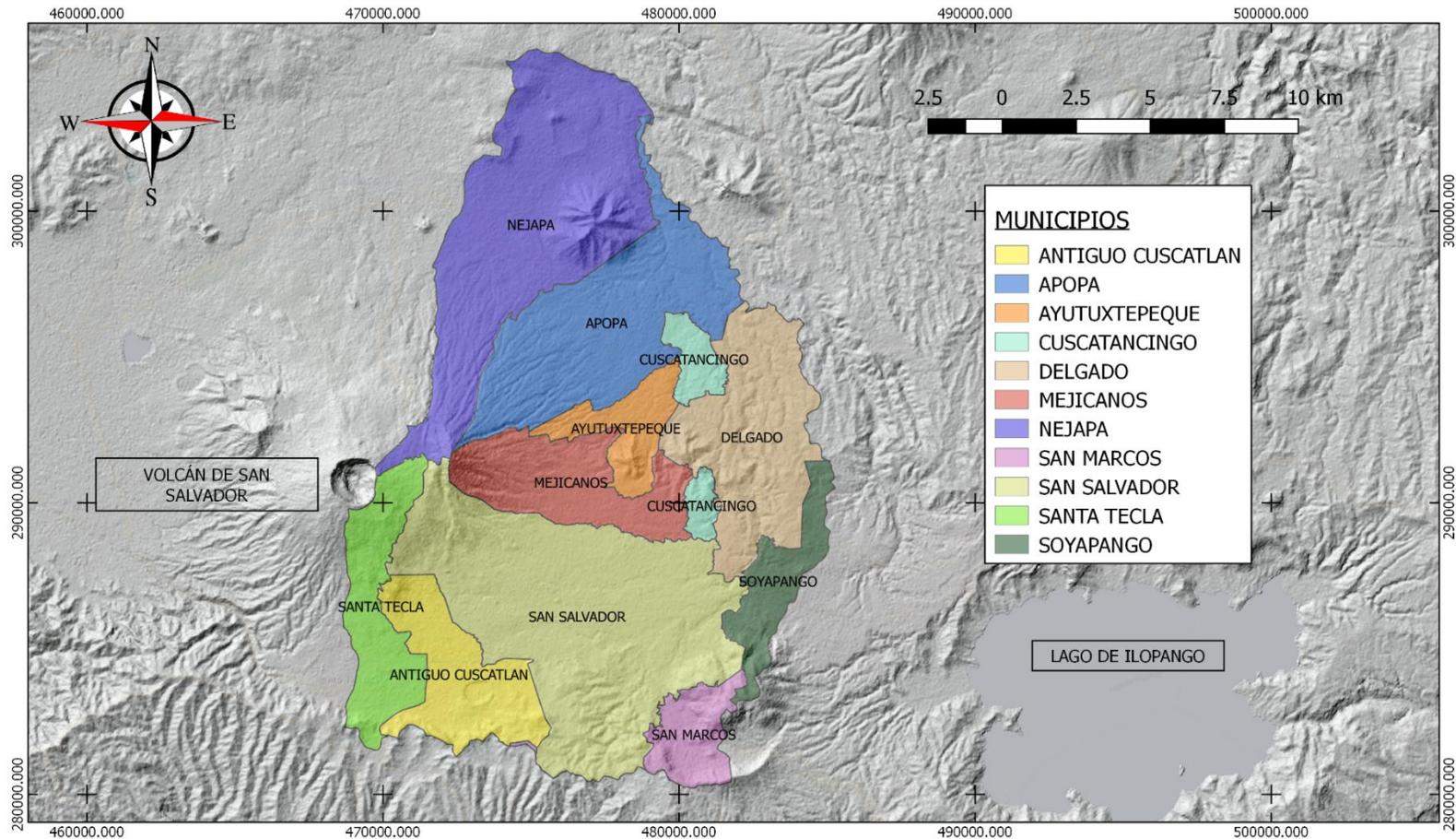
En la cuenca del río Acelhuate se encuentran los departamentos de La libertad y San Salvador con coordenadas: Punto 1: 13°37'21.50" N, 89°8'31.70" O; Punto 2: 13°51'56.12" N, 89°5'56.25" O; Punto 3: 13°54'11.84" N, 89°16'57.24" O; Punto 4: 13°37'22.64" N, 89°19'32.01" O. Esta cuenca comprende los siguientes municipios: Antiguo Cuscatlán, San Salvador, Nueva San Salvador, Mejicanos, Soyapango, Ciudad Delgado, Cuscatancingo, Ayutuxtepeque, Tonacatepeque, Guazapa, San Martín, Apopa, Nejapa, Aguilares, San Marcos, Suchitoto, San José Guayabal y Oratorio de Concepción. (Véase Mapa 3.1).

El río Acelhuate forma parte del sistema hidrográfico del río Lempa y en su trayecto hacia la desembocadura, se forma de la confluencia de los ríos Matalapa e Ilohuapa 2.2 Kms al Sur de la Ciudad capital, corre con Rumbo Nor-Este, recibe el aporte de varios afluentes, entre ellos, la quebrada Montserrat, Arenal de Mejicanos, quebrada Tutunichapa, río Tomayate, y los ríos Ilohuapa, Las Cañas, Guazapa y Tasajera. Un tramo del río sirve de límite municipal entre San Salvador y Soyapango.

El área de la cuenca del río Acelhuate en estos departamentos es de 733.0 km<sup>2</sup>, 3.5% de la superficie total del país<sup>17</sup> y la cuenca como tal tiene una extensión aproximada es de 1,072.98 Km<sup>2</sup>, constituyendo el 5.1% del área del país

---

<sup>17</sup> Caracterización de la cuenca del río Acelhuate. (Autor desconocido) (s.f). Recuperado de la página <http://www.uca.edu.sv/investigacion/fiaes/acelhuate.html>



PROYECCIONES DE LOS IMPACTOS HIDROLÓGICOS BASADOS EN EL PLAN DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL VIGENTE: ESQUEMA DIRECTOR, EN EL ÁREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR (AMSS)

NOMBRES:  
ESTRADA PONCE, JOSUÉ RODRIGO  
LÓPEZ RECINOS, LIDIA YANET

MAPA 3.1: MAPA DE MUNICIPIOS EN LA CUENCA DEL RIO ACELHUATE EN PARTE ALTA Y MEDIA.

FUENTE: ELABORADO POR GRUPO DE TESIS

### 3.4 GEOLOGÍA DE LA CUENCA

Los ciclos eruptivos que han ocurrido dentro de las formaciones geológicas han dado origen a los diferentes materiales dentro de la superficie del territorio salvadoreño, donde cerca del 90% de estos son Piroclastos (Hernández, 2004). Como lo describe Hernández y según se muestra en la figura 3-1, la mayoría del Área Metropolitana de San Salvador (AMSS) se encuentra dentro de la Unidad geológica llamada: Rocas volcánicas plio-pleistocénicas y holocénicas, las cuales comprenden los edificios volcánicos más jóvenes que se han establecido en el interior de la estructura del Graben Central los cuales se disponen paralelamente al eje del graben y evolucionaron inmediatamente después de la configuración del mismo, estando la caldera de Ilopango y la zona de estudio inmersa dentro de esta Unidad.

Producto de toda esta actividad antes descrita, el AMSS está cubierta en su mayor parte por depósitos de flujos piroclásticos o ignimbritas producto de la erupción Pliniana la más reciente ocurrida en la caldera de Ilopango, en el año 536 D.C., (Dull et al, 2010). Y de los productos de erupciones volcánicas provenientes del Volcán de San Salvador, entre los que encontramos: G1, G2, Ignimbritas Boquerón (IB) y Apopa. De todas estas erupciones, las principales con las que se encuentra formada la superficie de la AMSS son las producidas por la Caldera de Ilopango y el Volcán de San Salvador (O. Ayala 2013).



**Ilustración 3-1: Mapa geológico simplificado que muestra el perfil estratigráfico que constituye el territorio salvadoreño, Fuente: Hernández, 2004.**

La geología superficial de la cuenca se encuentra dentro del miembro S4 denominado como Tierra Blanca, producto de la Formación San Salvador, la cual está constituida en su mayoría por materiales piroclásticos, siendo las más representativas las cenizas volcánicas riolíticas-dacíticas (Tierra Blanca Joven), las que han sido investigadas por diferentes geólogos destacando Schmidt Thomé y Walter Hernández y los ingenieros Alex Chávez y Óscar Ayala, especialmente en la zona Nor-Oriente de San Salvador, que es donde se

encuentran visibles los diferentes estratos de Tierra Blanca. Dentro de las investigaciones realizadas destacan:

- El Dr. Michel Schmidt-Thomé, integrante de la Misión Geológica Alemana quien trabajó en El Salvador entre 1969-1974, elaboró un documento que aborda sobre la Geología del Área Metropolitana de San Salvador, en el cual se contempla algunas consideraciones para el desarrollo de la ciudad, llamado The Geology in the San Salvador área (El Salvador, Central América), a bases foro cita development and planning [La geología en el área de San Salvador (El Salvador, Centroamérica), una base para el desarrollo y la planificación de la ciudad].
- Documento “Mecanismo de Ruptura de Taludes en Ignimbritas de Tierra Blanca Joven, Caldera de Ilopango, El Salvador”, desarrollado por el ingeniero Walter Hernández Geólogo del SNET.
- Documento “Estudio de la Evolución de la Erosión Fluvial Reciente, en la microcuenca del río Las Cañas”, elaborado por Geólogos del mundo en el año 2013.

Bajo este material (TBJ), dentro de la zona de estudio, se encuentra la formación Cuscatlán, la que puede verse en algunas zonas del AMSS, (Antiguo Cuscatlán, por ejemplo), que datan de fechas anteriores a las erupciones que produjeron a la tierra blanca<sup>18</sup>.

Los tipos de rocas que se observan en la zona están constituidos por: lavas andesíticas y Basálticas, materiales piroclásticos y sedimentos volcánicos detríticos con materiales piroclásticos; debido a la conformación geológica antes referida, es muy recurrentemente que se presenten problemas de erosión, inundación, movimientos de ladera, socavamiento, colapso de tuberías y problemas en las descargas de aguas, debido a las lluvias, sismos, escorrentía superficial en ríos y quebradas, así como, a procesos antrópicos

En la cuenca del río Acelhuate, existen 2 regiones geológicas que son definidas como mayor y una menor. El área sur del límite entre San José Guayabal, Ojo de Agua, es parte de una mayor depresión (graben) en una zona de fallas que corren aproximadamente del Sureste al Noroeste, la cual ha permanecido y continúa sujeta a un arqueamiento. La depresión contiene espesos depósitos de material Pleistoceno y Holoceno reciente formación en San Salvador.

---

<sup>18</sup> Mapa Geológico 1:100,000, Misión Geológica Alemana, 1978

Una serie de fallas de la época Terciaria, principalmente al Oeste, demarcan la depresión en el Norte y Sur. El área Norte de la depresión contiene rocas del Pleistoceno de la formación del Cuscatlán. Estratos del Mío-Plioceno de la formación del Bálsamo se encuentran al extremo sur de la cuenca en la cordillera del Bálsamo, la cual forma el borde inclinado sur de la depresión. Estos también sobresalen en ciertos lugares a través del material en la depresión<sup>19</sup>.

### **3.5 TIPOS DE CUENCAS**

Una cuenca, es una zona con una superficie de terreno donde las gotas de agua de una precipitación se drenan por un sistema de drenaje (considerando una superficie totalmente impermeable) hacia un mismo punto llamado punto de salida. Incluye ecosistemas terrestres (selvas, bosques, matorrales, pastizales, manglares, entre otros) y ecosistemas acuáticos (ríos, lagos, humedales, etc.). Sus límites están establecidos por una línea imaginaria llamada parteaguas.

Las cuencas hidrográficas se dividen en:

- Exorreicas, endorreicas y arreicas

---

<sup>19</sup> Análisis del nivel de contaminación de las aguas del río Acelhuate en el tramo zoológico-río arenal Monserrat y propuesta de un sistema de tratamiento. Gloria Oriana Pavlova Claros Ramírez nidia Guadalupe Menjívar Alfaro. Año 2010, pag.31

**a) Cuenca Exorreica:**

Las cuencas exorreicas se definen como aquellas que descargan el volumen de agua en un punto localizado en la salida del parteaguas aguas debajo de la cuenca, desembocando generalmente en una corriente de agua o en el mar. (Véase Ilustración 3-2). En El Salvador existen al menos 58 cuencas hidrográficas conocidas como cuencas **exorreicas**, que alimentan a los ríos que desembocan en el Océano Pacífico; dentro de ellas existen cinco que son las de mayor importancia:

- Río Lempa
- Río Goascorán
- Río Grande de San Miguel
- Río Jiboa
- Río Paz

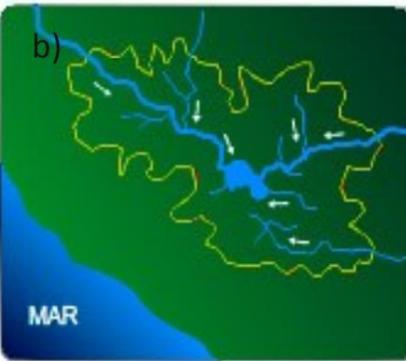
**b) Cuencas Endorreicas:**

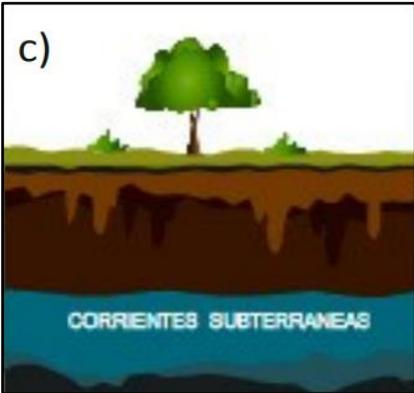
Las cuencas endorreicas se definen como aquellas que no llegan al mar, que tienen como resultado la formación de sistemas de agua estancada ya que desembocan en lagos o lagunas. Se caracterizan por situarse en el interior de la cuenca (véase Ilustración 3-2). En el salvador dos de las cuencas endorreicas más importante son: el Lago de Coatepeque y el Lago de Ilopango.

**c) Cuencas Arreica**

Es una cuenca hidrográfica cuyas aguas no desembocan ni en lagos ni en mares, pues se evaporan o se infiltran al suelo, desapareciendo del paisaje.

Las cuencas arreicas se suelen presentar en zonas áridas o desiertos donde existen pequeños cursos de agua de carácter temporal o intermitente que se evaporan o infiltran en el terreno hasta desaparecer. Generalmente los caudales de agua son escasos. (Ilustración 3-2)

TIPO DE CUENCA	ILUSTRACIÓN	EJEMPLO
Exorreica	 <p>Diagrama de una cuenca exorreica (a) que muestra un sistema de ríos que desembocan en el mar (MAR).</p>	 <p>Fotografía de un río que fluye a través de un paisaje verde, desembocando en el mar.</p>
Endorreica	 <p>Diagrama de una cuenca endorreica (b) que muestra un sistema de ríos que desembocan en un lago o mar interior (MAR).</p>	 <p>Fotografía de un lago azul rodeado por montañas y vegetación, con un pequeño pueblo en la orilla.</p>

TIPO DE CUENCA	ILUSTRACIÓN	EJEMPLO
Arreica		

**Ilustración 3-2: Tipos de cuenca y su comportamiento de drenaje y ejemplos de tipo de cuenca. Fuente: google imágenes**

### 3.6 TIPOS DE SUELO EN LA CUENCA

Dentro de la cuenca del río Acelhuate se encuentran seis diferentes tipos de suelos dentro de los cuales hay suelos que son combinación de otros, pero siempre hay un dominante que para el caso del área de la cuenca en estudio es el Regosol; además se describe los diferentes tipos de suelo encontrados en el área de la cuenca.

#### **Regosol, Latosol pardo forestal y Litosol**

El primero es el más extensivo y se caracteriza por ser profundo y poseer horizontes superiores con alta cantidad de materia orgánica de 20 a 25 cm de espesor, de texturas franco arenosas con partículas de escoria, color negro a

café muy oscuro, friables. El drenaje externo es rápido y el interno es bueno manteniendo una adecuada humedad durante la época seca

### **Regosoles y gran grupo de latosoles pardos.**

En su mayor parte pertenecen al gran grupo de los Regosoles, pero son más variables en el color y espesor del horizonte superior y también en la profundidad a que se encuentran los suelos. El horizonte superficial es franco o franco limoso de color pardo grisáceo muy oscuro a casi negro con estructura granular y por lo general de 30 a 60 cm de espesor. El drenaje tanto interno como externo es moderado con un moderado peligro de erosión.

### **Latosoles y Latosoles arcillo rojizo.**

Los Latosoles son suelos de mayor antigüedad y acidez por lo tanto más empobrecidos de nutrientes. Se presenta en zonas altas y montañosas. Presenta una alta permeabilidad gracias a su gruesa capa superior. Los primeros están representados por los afloramientos de los conglomerados duros y por los suelos muy poco profundos. Los Latosoles Arcillo Rojizos son suelos arcillosos, rojizos y muy pedregosos que varían que desde superficiales a moderadamente profundos. El drenaje superficial es bueno son áreas secas o húmedas según la estación

### **Regosoles**

Son suelos francos, de color café grisáceo muy oscuro, con estructura ligeramente granular y con espesores variando de 20 a 30 cms., sobre el material

original o madre, compuestos de cenizas blancas, de textura franca o franco arenosa fina. El drenaje interno varía de bueno a ligeramente rápido; el externo es bueno. En parte inclinadas hay peligro de erosión.

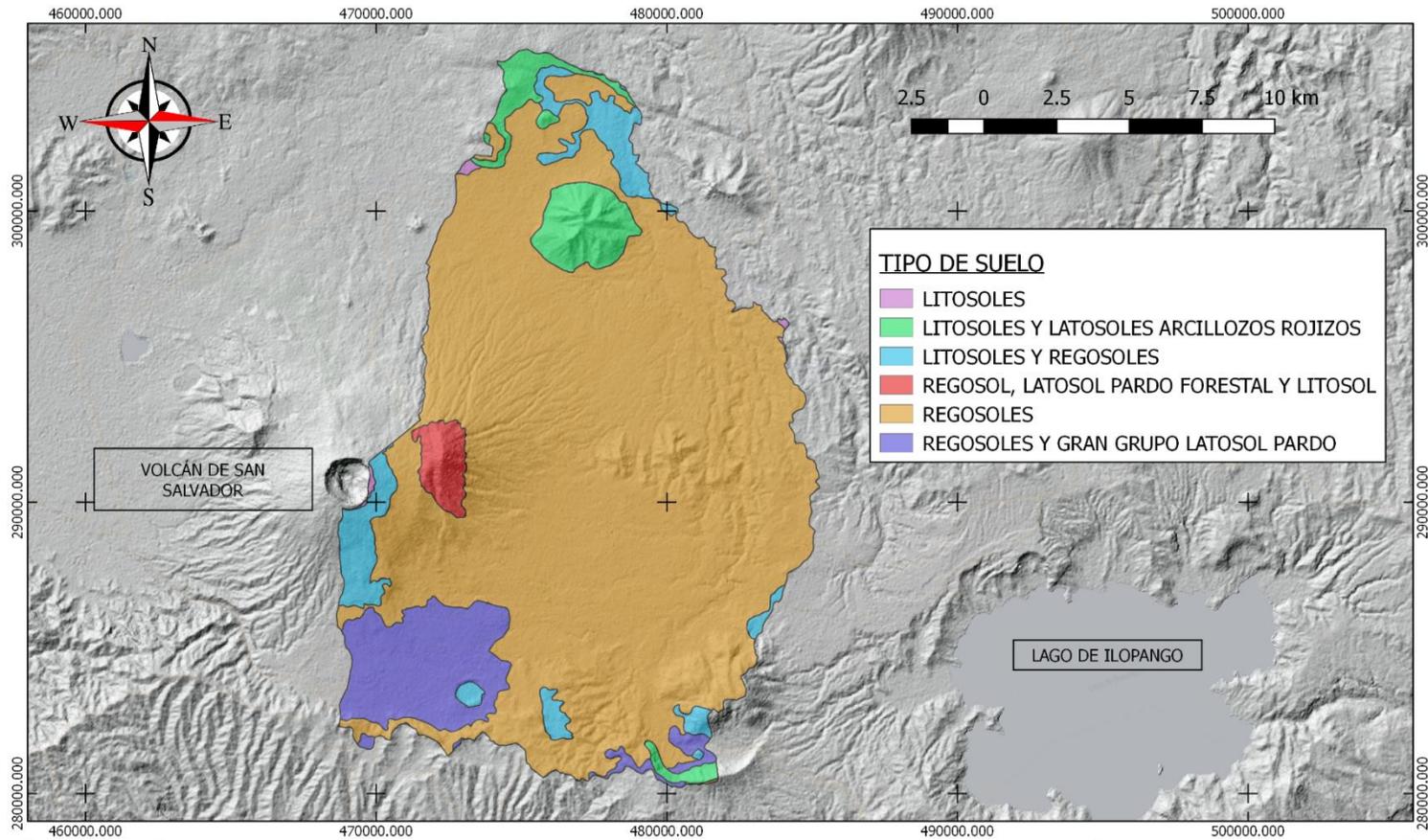
El Regosol que es más extensivo posee generalmente una capa superficial con un espesor promedio de 25 cm de textura franca o franca arenosa, de estructura pulverulenta de color pardo grisáceo, con partículas gruesa de talpetate. El drenaje externo varía de rápido a excesivo, el interno es algo restringido.

### **Litosol**

De acuerdo a descripción dada en el Plan Nacional de Ordenamiento y Desarrollo Territorial (PNODT 2002) son suelos muy superficiales, pedregosos y de poco o ningún desarrollo sobre roca dura. Están constituidas por gravas, piedras y materiales rocosos de diferentes tamaños. Son suelos de profundidad variable, desde superficiales a moderadamente profundos, predominando los superficiales. En el perfil presentan un suelo superficial franco a franco arenoso, friable y permeable que descansa sobre toba dura a una profundidad menor. El drenaje externo varía de rápido a excesivo y el interno es lento; en la época no lluviosa estas áreas se secan rápidamente.

<b>TIPO SUELO</b>	<b>ÁREA (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>ÁREA %</b>
<b>REGOSOL, LATOSOL PARDO FORESTAL Y LITOSOL.</b>	<b>4.40</b>	<b>1.6%</b>
<b>LITOSOLES Y REGOSOLES</b>	<b>14.82</b>	<b>5.4%</b>
<b>LITOSOLES Y LATOSOLES ARCILLO ROJIZOS.</b>	<b>13.64</b>	<b>5.0%</b>
<b>REGOSOLES</b>	<b>219.85</b>	<b>79.7%</b>
<b>LITOSOLES</b>	<b>0.57</b>	<b>0.2%</b>
<b>REGOSOLES Y GRAN GRUPO LATOSOL PARDO</b>	<b>22.54</b>	<b>8.2%</b>
<b>TOTAL</b>	<b>275.82</b>	<b>100.0%</b>

**Tabla 3-1: Área de tipo de suelo dentro de la cuenca. Fuente: Elaboración propia.**



PROYECCIONES DE LOS IMPACTOS HIDROLÓGICOS BASADOS EN EL PLAN DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL VIGENTE: ESQUEMA DIRECTOR, EN EL ÁREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR (AMSS)

NOMBRES:  
ESTRADA PONCE, JOSUÉ RODRIGO  
LÓPEZ RECINOS, LIDIA YANET

MAPA 3.2: MAPA DE TIPO DE SUELO EN LA CUENCA DEL RIO ACELHUATE EN PARTE ALTA Y MEDIA

FUENTE: ELABORADO POR GRUPO DE TESIS

### 3.7 EVAPOTRANSPIRACIÓN

La evapotranspiración es la combinación de dos procesos independientes por los cuales se pierde agua, la evaporación del agua de la superficie del suelo y la transpiración del cultivo, por consiguiente, todos los factores que inciden en la evaporación y en la transpiración, influirán en la evapotranspiración<sup>20</sup>.

Es la fuente que mantiene los niveles locales de humedad y la biodiversidad local. En las áreas con vegetación arbórea, gran parte del agua de las lluvias regresa a la atmósfera por evaporación o transpiración volviendo a precipitar en la zona circundante; zonas en donde la evapotranspiración real es más alta, tienden a albergar mayor biodiversidad.

Por ello, es importante conocer los procesos físicos de generación y circulación por las que pasa el agua dentro de una cuenca.

La evaporación y la transpiración son esencialmente el mismo proceso. La diferencia entre estos dos conceptos está en la participación de los seres vivos en el segundo; este parámetro se expresa en mm/día.

---

<sup>20</sup>Material de apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura de hidrología. Cahuana A. & Yugar W (2009) CIV-233, pág. 94.

Dentro de este concepto se llevan a cabo algunas distinciones:

**La Evapotranspiración real:** se define como la cantidad de agua realmente consumida por un terreno cultivado de acuerdo con las disponibilidades de agua, es decir, el suministro de humedad a la superficie de evaporación es un factor determinante en la evapotranspiración. A medida que el suelo se seca, la tasa de evapotranspiración cae por debajo del nivel que generalmente mantiene en un suelo bien humedecido. Es esta evapotranspiración que depende de la cantidad de humedad existente en el suelo<sup>21</sup>.

**La Evapotranspiración de referencia:** es la pérdida de agua por evaporación y transpiración de un cultivo tomado como referencia (gramíneas o pastos), debido a condiciones climáticas. Es definida como la evapotranspiración de una superficie extensa de gramíneas de 8 a 15 cm de altura, uniforme, de crecimiento activo, que asombran totalmente el suelo y que no escasean de agua<sup>22</sup>.

La evapotranspiración es un fenómeno dependiente en buena parte de las condiciones atmosféricas, del suelo y de la vegetación. Después de una lluvia o de un riego por aspersión, la interface entre el sistema terreno-planta y la

---

<sup>21</sup> Balance hídrico integrado y dinámico de El Salvador Documentos Técnicos del PHI-LAC, N°2. UNESCO, 2006. Página 16.

<sup>22</sup> Balance hídrico integrado y dinámico de El Salvador Documentos Técnicos del PHI-LAC, N°2. UNESCO, 2006. Página 13.

atmósfera está saturada, y evidentemente la transpiración y la evaporación están en el valor potencial, siendo entonces la evapotranspiración función de muchos factores<sup>23</sup>:

**Factores Climatológicos (c):** Radiación, Temperatura y Humedad del aire, Velocidad del viento, etc.

**Factores Edáficos (s):** Conductibilidad hídrica, Espesor del estrato activo, Calor superficial, Capacidad hídrica, Rugosidad de la superficie, etc.

**Factores de la Planta (v):** conductibilidad hídrica de los tejidos, estructura de la parte epigea, índice LAI, profundidad y densidad del sistema radical, etc.

**Factores Fitotécnicos (f):** laboreo del suelo, rotación de cultivos, orientación de las líneas de siembra, densidad poblacional, tipo e intensidad de la poda, etc.

**Factores Geográficos (g):** extensión del área, variación de las características climáticas en el borde del área considerada, etc.

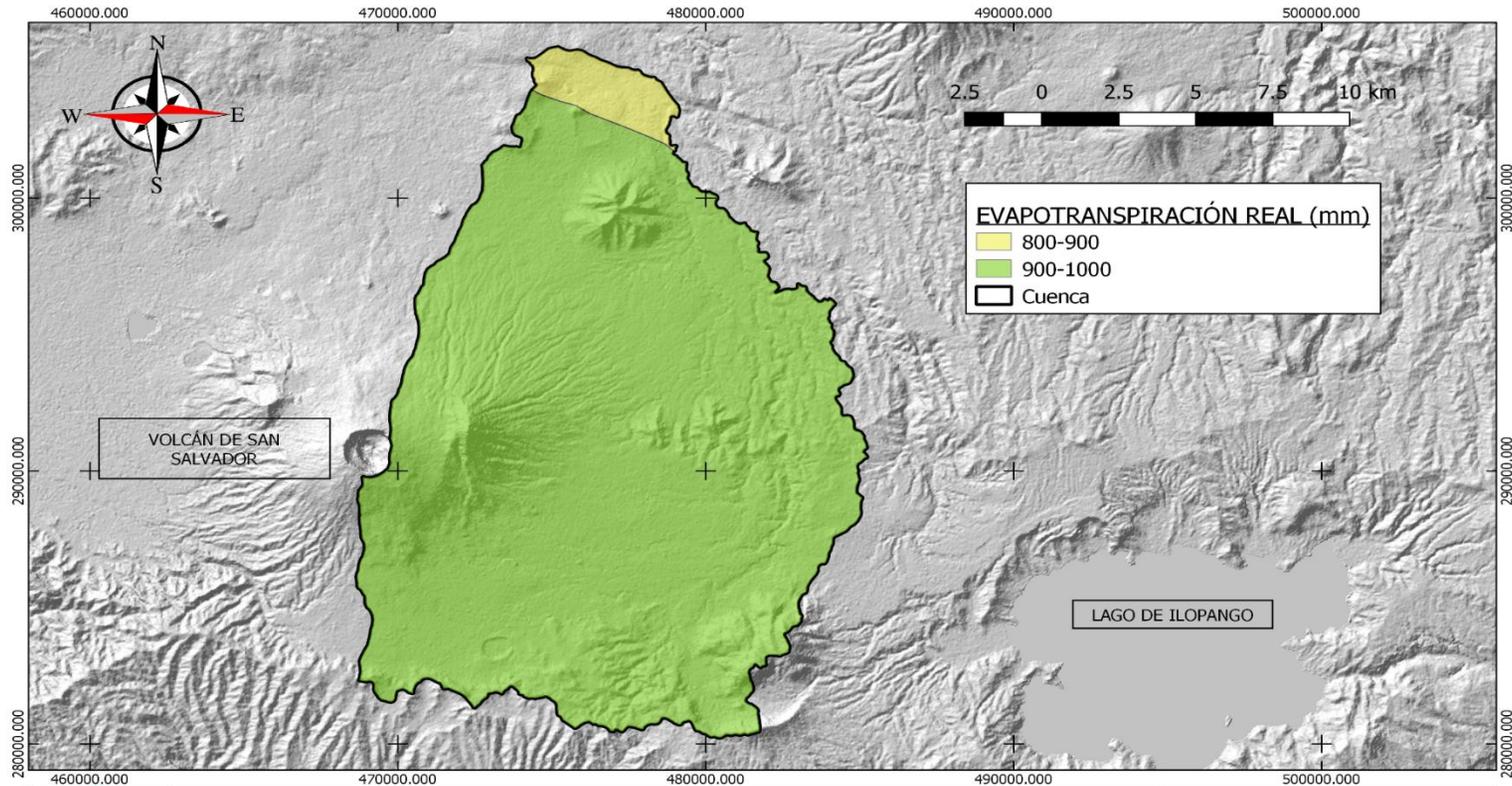
**Agua disponible en la interface con la Atmósfera (Q):** cuyo origen es la lluvia, el riego y/o el aporte hídrico de la capa freática.

---

<sup>23</sup> Material de apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura de hidrología CIV-233. Cahuana A. & Yugar W. (2009). Página. 95.

El Mapa 3.3 muestra la Evapotranspiración real de referencia de la cuenca del río Acelhuate y en el Mapa 3.4 se muestra la Evapotranspiración potencial de la misma cuenca.

Para la evapotranspiración potencial se tiene un valor máximo y mínimo de 1,750 mm y 1,451 mm respectivamente, mientras que la evapotranspiración real el valor máximo es de 1,000 mm y el mínimo es de 800 mm.

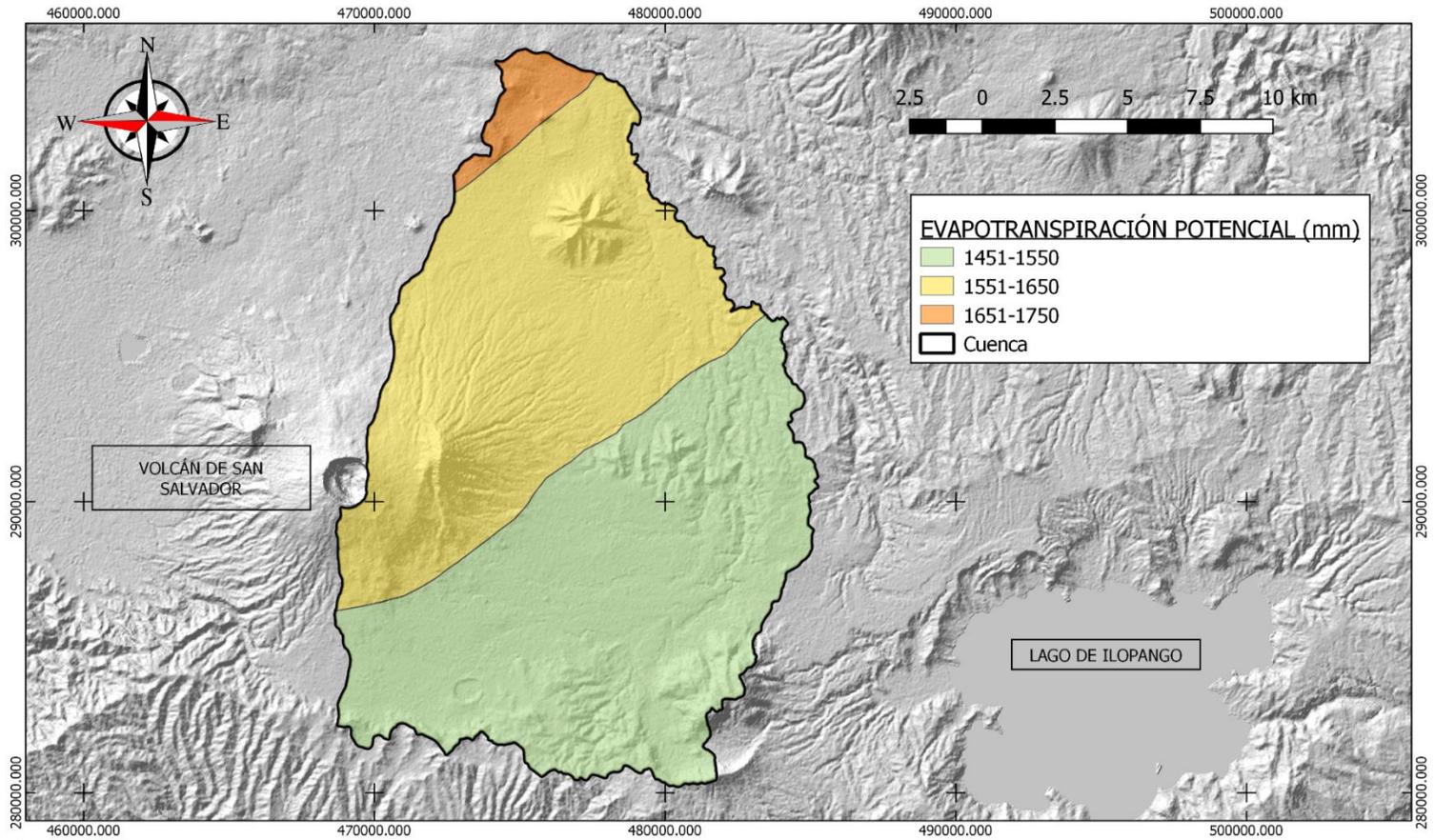


PROYECCIONES DE LOS IMPACTOS HIDROLÓGICOS BASADOS EN EL PLAN DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL VIGENTE: ESQUEMA DIRECTOR, EN EL ÁREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR (AMSS)

NOMBRES:  
ESTRADA PONCE, JOSUE RODRIGO  
LOPEZ RECINOS, LIDIA YANET

MAPA 3.3: MAPA DE EVAPOTRASPIRACIÓN REAL EN LA CUENCA DEL RIO ACELHUATE EN PARTE ALTA Y MEDIA

FUENTE: ELABORADO POR GRUPO DE TESIS



	<p>PROYECCIONES DE LOS IMPACTOS HIDROLÓGICOS BASADOS EN EL PLAN DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL VIGENTE: ESQUEMA DIRECTOR, EN EL ÁREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR (AMSS)</p>	<p>NOMBRES: ESTRADA PONCE, JOSUE RODRIGO LOPEZ RECINOS, LIDIA YANET</p>	<p>MAPA 3.4: MAPA DE EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL EN LA CUENCA DEL RIO ACELHUATE EN PARTE ALTA Y MEDIA</p>
---	--	---	--

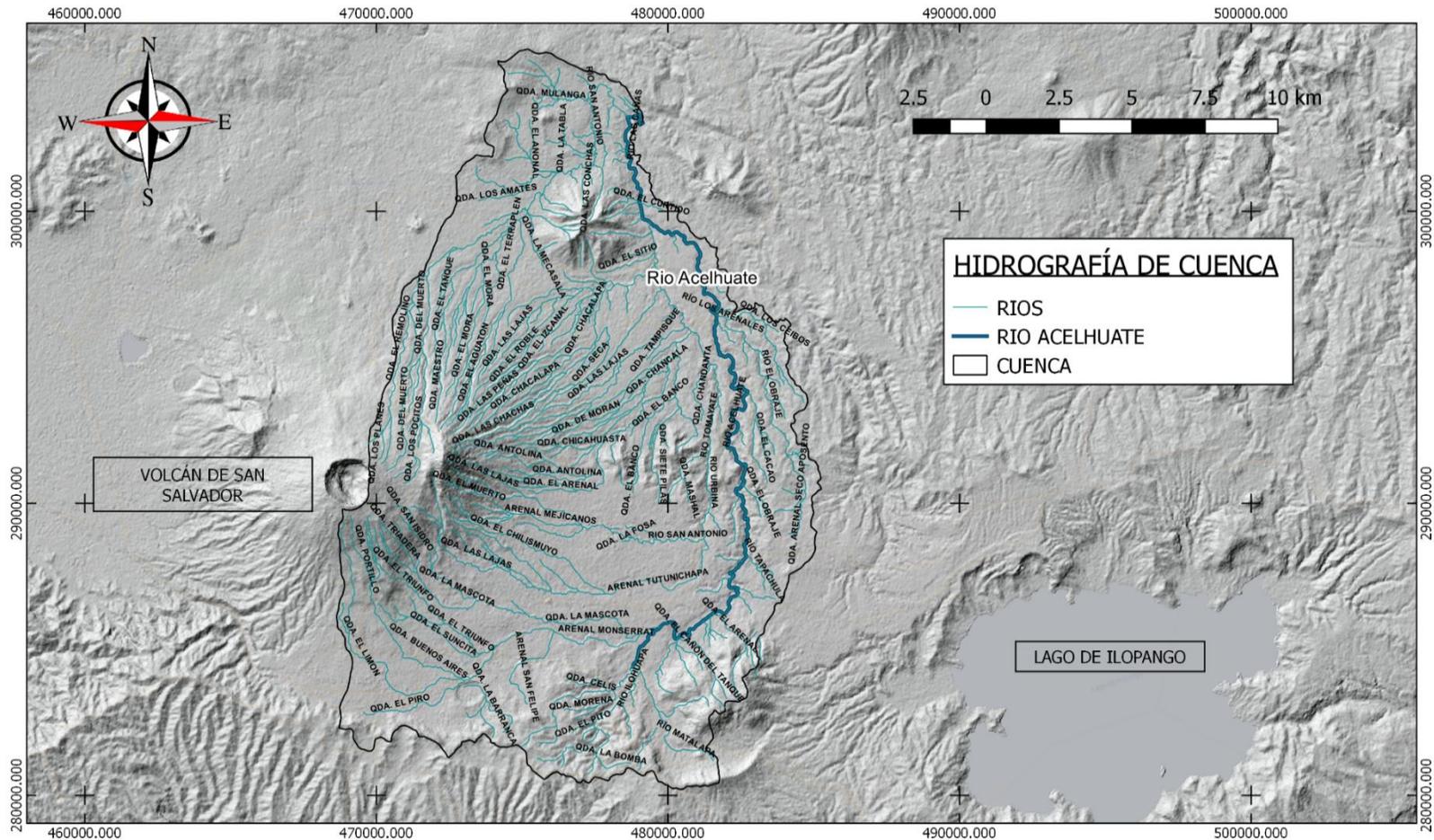
FUENTE: ELABORADO POR GRUPO DE TESIS

### 3.8 HIDROGRAFÍA

El río Acelhuate, forma parte del sistema hidrográfico del río Lempa, y en su trayecto hacia la desembocadura, recibe el aporte de varios afluentes, entre ellos: Río Urbina, Río Tomayaque, Río Tapachula, Río san Antonio, Río Paleca Chanchimo, Río Matalapa, Río Mariona, Río los Arenales, Río Chacalapa, Río Ilohuapa, Río El obraje, Río El Garrobo, Río el Filate, Río El Chaguite, Río El Cacao, Río el Ángel, Río Arenal Monserrat, Río Acelhuate. En la siguiente Tabla 3-2 se presentan las longitudes de los cauces que conforman la red hidrográfica de la cuenca del río Acelhuate y además se agrega un mapa de la ubicación de los mismos (Ver mapa 3.5).

AFLUENTES	LONGITUD (Mts)
Río Urbina	5,523.55
Río Tomayate	10,139.35
Río Tapachula	1,984.76
Río San Antonio	3,528.41
Río Paleca Chanchimo	2,306.16
Río Matalapa	4,801.27
Río Mariona	1,750.15
Río Los arenales	2,310.75
Río La Chacalapa	1,543.42
Río Ilohuapa	4,569.44
Río El Obraje	2,129.04
Río El Garrobo	1,361.59
Río El Filate	1,206.48
Río El Chaguite	1,604.86
Río El Cacao	2,523.98
Río El Ángel	1,397.27
Río Arenal Monserrat	758.37

**Tabla 3-2: Afluentes que aportan agua al río Acelhuate. Fuente: Elaboración propia**



PROYECCIONES DE LOS IMPACTOS HIDROLÓGICOS BASADOS EN EL PLAN DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL VIGENTE: ESQUEMA DIRECTOR, EN EL ÁREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR (AMSS)

NOMBRES:  
ESTRADA PONCE, JOSUÉ RODRIGO  
LÓPEZ RECINOS, LIDIA YANET

MAPA 3.5: MAPA HIDROGRÁFICO EN LA CUENCA EN PARTE ALTA Y MEDIA DEL RIO ACELHUATE

FUENTE: ELABORADO POR GRUPO DE TESIS

### **3.9 PARÁMETROS FÍSICOS DE LA CUENCA**

Para realizar el proceso de cálculo de los parámetros físicos de la cuenca en estudio, en la mayoría de ellos se utilizó el programa de software de versión libre de análisis de información geográfica QGis, el cual consiste en un software que permite manejar información en formato Raster (imagen de pixeles) y vectorial.

#### **3.9.1 ÁREA Y SUPERFICIE DE DRENAJE**

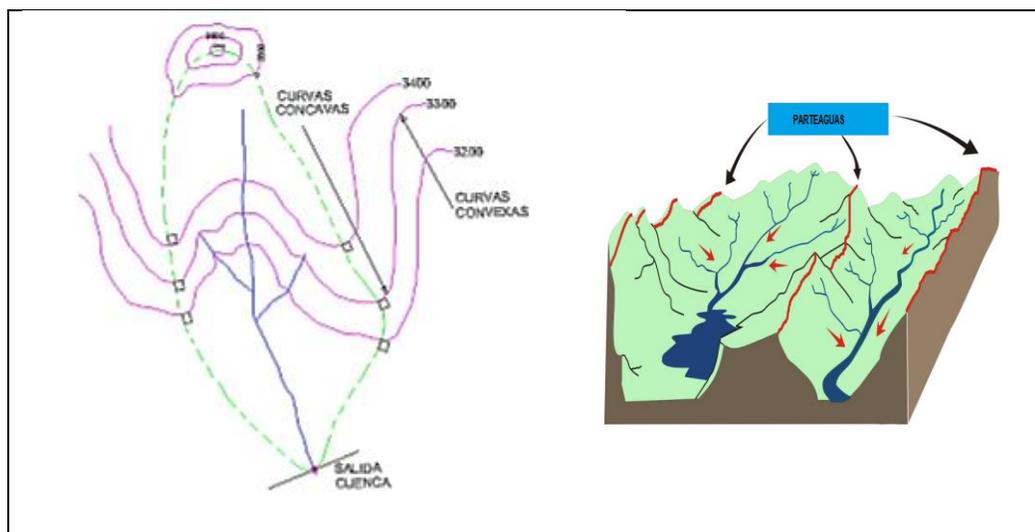
Se define como la extensión (Area) de territorio delimitada por los accidentes geográficos por la cual escurre el volumen de agua superficial que drena hacia el interior de la cuenca. Es una propiedad que contribuye en conjunto con otras propiedades, a la forma de respuesta de la cuenca a la Precipitación<sup>24</sup>.

El cálculo de la superficie o área de drenaje, es el resultado de una previa actividad llamada trazado del Parteaguas o delimitación topográfica de la cuenca, la cual consiste en proyectar una línea divisoria que corta ortogonalmente a las curvas de nivel y pasa por los puntos de mayor nivel topográfico; cuando el Parteaguas aumenta en altitud corta a las curvas de nivel por la parte convexa, en caso contrario, cuando la altitud de este decrece corta a las curvas de nivel

---

<sup>24</sup> Manual de consideraciones técnicas hidrológicas e hidráulicas para estructura vial de Centroamérica, DACGER, (2016). 1ª edición.

por su parte cóncava; como dato importante, el parteaguas nunca corta el cauce de un río, excepto en el punto de interés de la cuenca (Ver Ilustración 3-3).



**Ilustración 3-3: Izquierda trazado de la divisoria topográfica de la cuenca (Parteaguas). Fuente: Cahuana A. & Yugar W. (2009). Derecha, ejemplo de Parteaguas en dos cuencas vecinas, la línea divide la precipitación que se tributan a una y a la otra. Fuente: Cartilla técnica, aguas subterráneas-acuíferos, ISBN: 978-9972-602-76-4**

Como se mencionó anteriormente, la obtención del área de la cuenca se realizó usando el programa de software de versión libre de análisis de información geográfica QGis, siendo tal procedimiento desarrollado de la siguiente manera: teniendo ya cargado el archivo vector “**shape**” en el programa, se procede a seleccionar la herramienta llamada calculadora de campo, la cual nos permite realizar múltiples tareas como lo podrían ser geométrico, matemáticos, conversiones, etc. En el apartado de **operaciones geométricas** seleccionamos la opción “**\$area**” la cual nos calcula el área del uno o varios polígonos que

conformen el vector, para el caso de este trabajo, era un único polígono (Ver Imagen 3.1), el resultado lo muestra en forma de campo en tabla de atributos el cual se le atribuyo un nombre y tipo de número (real o entero).

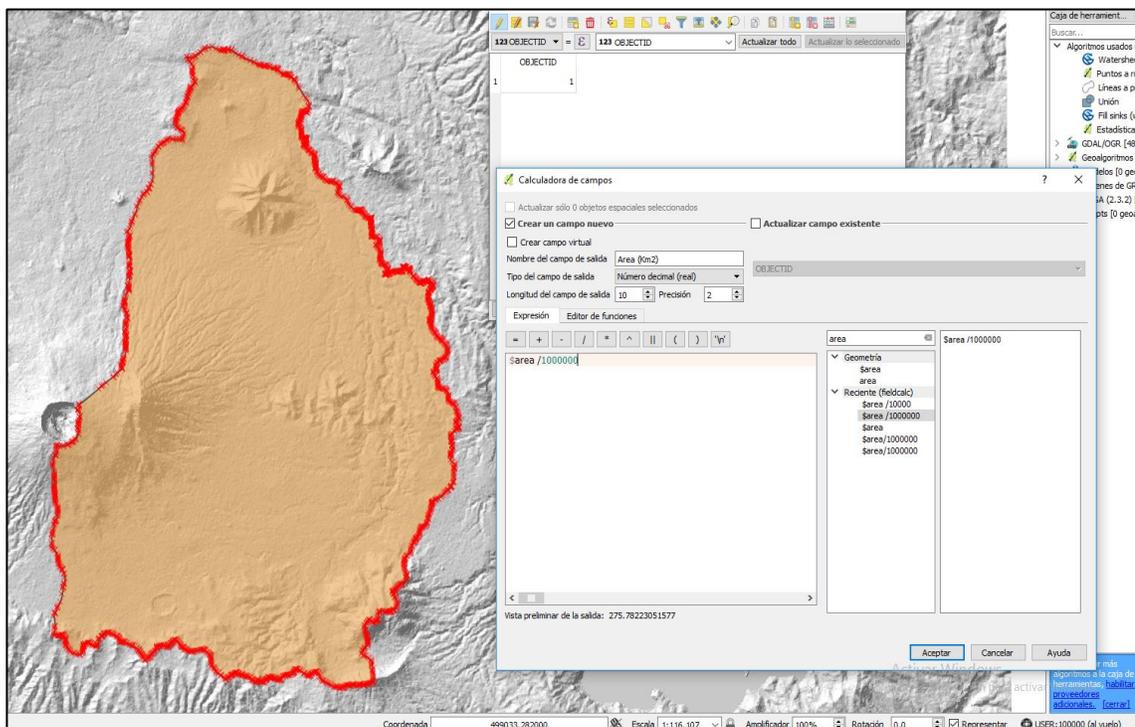


Imagen 3-1: cálculo de área de la cuenca usando QGis. Fuente: elaboración propia.

TAMAÑO DE CUENCA (Km <sup>2</sup> )	DESCRIPCIÓN
25 <	Muy pequeña
25 - 250	Pequeña
250 - 500	Intermedia pequeña
500 - 2500	Intermedia grande

TAMAÑO DE CUENCA (Km <sup>2</sup> )	DESCRIPCIÓN
2500 - 5000	Grande
>5000	Muy grande

**Tabla 3-3. Clasificación de cuenca en función del área. Fuente: Benítez M. (2016).**

El área de una cuenca se expresa comúnmente en kilómetros cuadrados (Km<sup>2</sup>) y se puede clasificar en función de su tamaño; La cuenca del río Acelhuate en la parte media y alta tiene un área de **275.73 Km<sup>2</sup>** y según la clasificación para el tamaño de cuenca que se muestra en la tabla 3-3, la cuenca del río Acelhuate se considera como una cuenca con características de tamaño que se puede clasificar como **intermedia-pequeña**.

### 3.9.2 PERÍMETRO DE LA CUENCA

El Perímetro de la cuenca es la medida del trazado superficial de los límites del área de estudio o Parteaguas de en este caso una cuenca hidrográfica, teniéndose midiendo esto da como resultado la longitud del borde del contorno (límite exterior) de la forma irregular, de la cuenca proyectada en un plano horizontal, obtenida una vez delimitada la cuenca con el trazando del parteaguas.

El Perímetro de la cuenca fue calculado de la misma manera que se realizó en el apartado de anterior (área de cuenca); en el programa QGis con la herramienta calculadora de campos, se seleccionara en este caso “\$perimeter”, utilizando el

este algoritmo que calculará el perímetro de uno o varios polígonos que conformen la capa como se muestra en la Imagen 3-2.

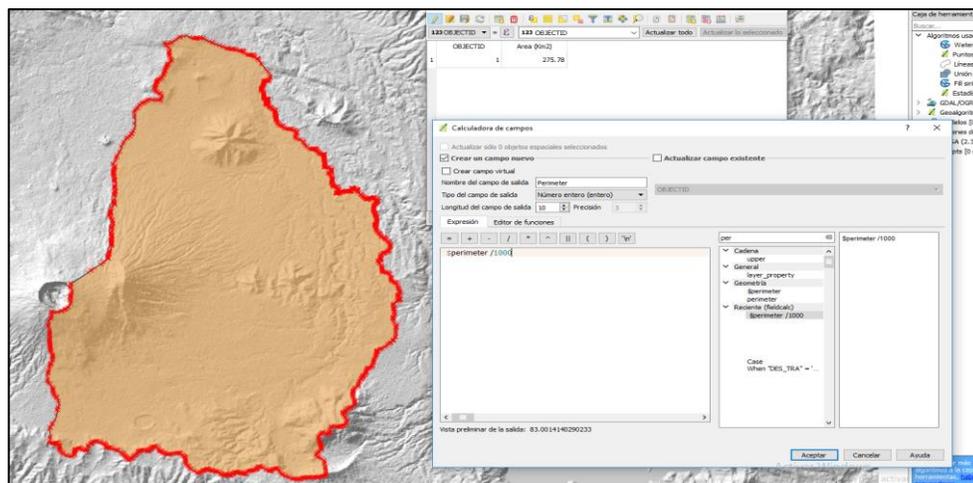


Imagen 3-2: Cálculo de perímetro usando QGIS. Fuente: Elaboración propia.

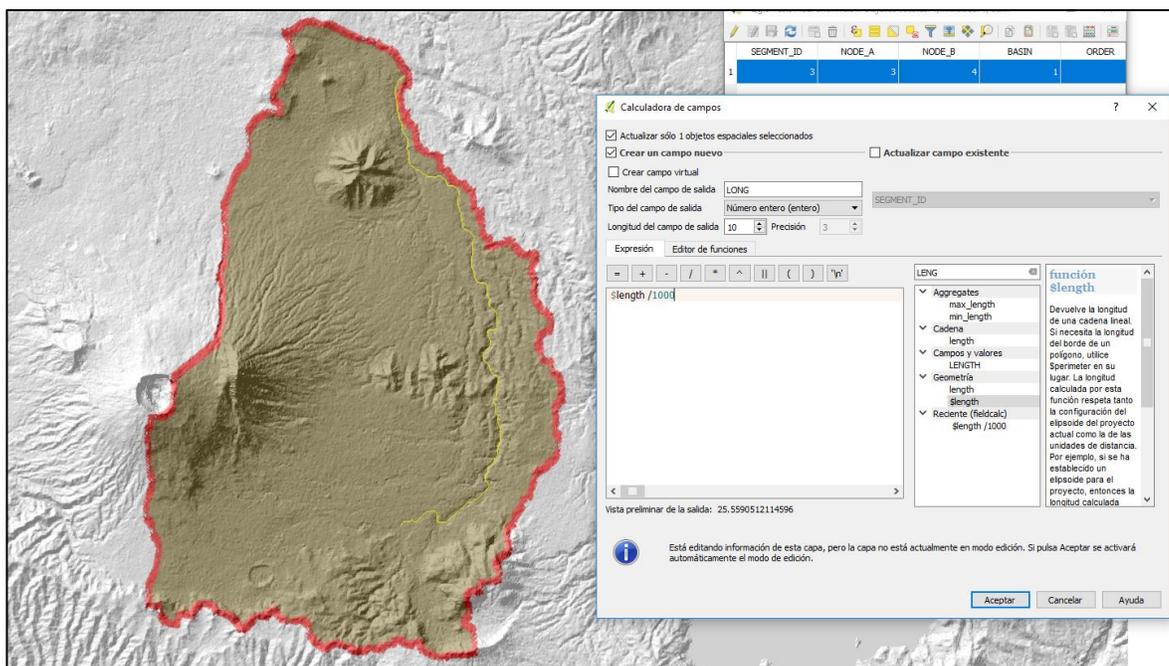
Las unidades del perímetro son las que corresponden a la longitud y debido a las dimensiones de las cuencas de drenaje, suele utilizarse el kilómetro (Km). Para la cuenca del río Acelhuate su perímetro corresponde a **83.00 kilómetros**.

### 3.9.3 LONGITUD DE CAUCE PRINCIPAL

La corriente principal de una cuenca se mueve por el cauce del río, que pasa por la salida de la misma<sup>25</sup>, el cual recibe aportaciones de volumen de precipitación

<sup>25</sup> Fundamentos de hidrología de superficie, Aparicio Mijares, 1992, 1ª. Edición, página 20.

de otros cauces de menor extensión, llamados Secundarios y reciben el nombre de Tributarios y siendo esta definición aplicable solamente a las cuencas Exorreicas. Para la obtención de la longitud total del cauce principal de la cuenca del Rio Acelhuate se utilizó la herramienta calculadora de campo, en la pestaña de operaciones geométricas se selecciona “\$length”, la cual devuelve la longitud de una cadena lineal (Ver Imagen 3-3); luego solo se suman todas las longitudes resultantes.



**Imagen 3-3: Longitud de cauce principal utilizando QGIS. Fuente: Elaboración propia.**

La longitud del cauce ( $L_c$ ) queda definida por la longitud del cauce principal medido en planta desde el punto de salida hasta su cabecera, la longitud del cauce del Rio Acelhuate posee una **longitud de 25.55 kilómetros**.

### 3.9.4 LONGITUD AXIAL DE LA CUENCA DEL RIO ACELHUATE

La longitud axial de la cuenca ( $L_A$ ) queda definida como la distancia con mayor dimensión a lo largo del cauce principal, medido desde los puntos más separados de la salida de la cuenca y el límite del parteaguas. Este parámetro es útil en la definición de algunos coeficientes relacionados con la forma de la cuenca los cuales permiten inferir cuál será la respuesta ante determinadas condiciones de precipitación. La longitud media de la cuenca es de **24.22 km**, la cual está comprendida desde la desembocadura hasta el punto más alejado del perímetro. Estos datos fueron obtenidos utilizando la herramienta de análisis de datos georreferenciados QGis (Ver Imagen 3-4).

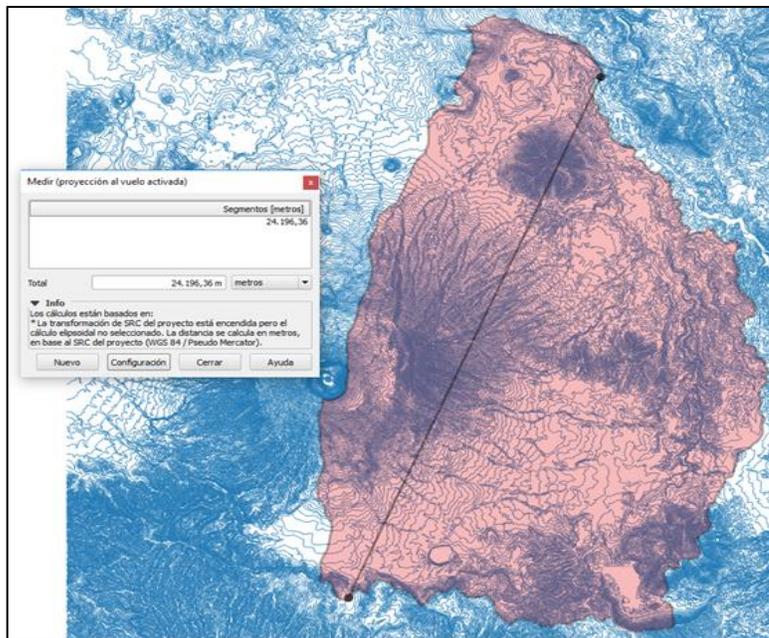


Imagen 3-4: Longitud de la cuenca del rio Acelhuate. Fuente: Elaboración propia utilizando QGis.

### 3.9.5 ANCHO PROMEDIO DE LA CUENCA

Es un parámetro característico de la cuenca que resulta de la relación del área de la cuenca y su longitud, como se muestra:

$$B = \frac{A}{L_A} \text{ (Ecuación 3.1)}$$

Dónde:

B= Ancho promedio (Kms)

A= Área de la cuenca (km<sup>2</sup>)

L<sub>A</sub>= Longitud Axial de la cuenca (Kms)

Los respectivos datos de la cuenca para la utilización de la ecuación 3.1 son: área de 275.81 km<sup>2</sup> y una longitud axial de 24.22 Km.

$$B = \frac{275.73}{24.22} = 11.38 \text{ kms}$$

### 3.9.6 PENDIENTE MEDIA DEL CAUCE PRINCIPAL

La pendiente media del cauce principal es un parámetro importante en la caracterización de la cuenca por el hecho que este nos brinda información de cómo será la respuesta de la cuenca cuando ocurra una precipitación. Este valor surge de la necesidad de darle un valor representativo de pendiente a todo un

cauce que puede variar en su pendiente de forma significativa a lo largo de su recorrido.

La pendiente del canal de un río influye sobre la velocidad de flujo y por consecuencia, debe jugar un papel importante en la forma del hidrograma. Los perfiles típicos de los cauces naturales son cóncavos hacia arriba.<sup>26</sup>

Una forma de obtener este valor es conocido como el método de **Pendiente media**, la cual es definida como la diferencia de elevaciones relativas de los puntos extremos del cauce del río dividido entre el recorrido total.

$$S = \frac{H}{L} \times 100 \text{ (Ecuación 3.2)}$$

Donde:

S= Pendiente media del cauce principal (%)

H= Diferencia total de elevación del cauce del río en kilómetros (H<sub>máx</sub> - H<sub>mín</sub>)

L= Longitud de la corriente en kilómetros

Utilizando la ecuación 3.2:

---

<sup>26</sup> Hidrología para ingenieros, Linsley, Kohler y Paulus, 1977, 2a Edición, página 350.

$$S = \frac{(0.648 - 0.370)}{25.55} \times 100 = 1.09\%$$

### **Método de Taylor & Schwartz**

Un método más apegado a la realidad por su carácter ponderado, utilizando de las características geométricas del cauce principal de la cuenca, como propuesto por Taylor y Schwartz, de acuerdo con este criterio, se considera que el río puede estar formado por una serie de tramos de igual longitud o bien por tramos de longitud variable<sup>27</sup>. La pendiente media para tramos de igual longitud se determina con la expresión:

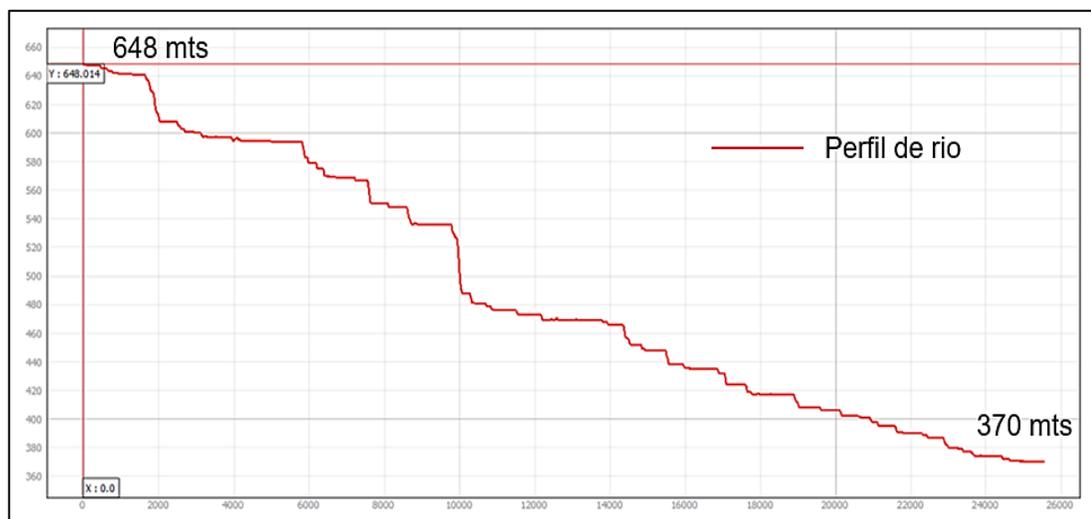
$$S_c = \left( \frac{1}{\frac{1}{\sqrt{S_1}} + \frac{1}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{S_n}}} \right)^2 \quad \text{(Ecuación 3.3)}$$

Para la aplicación de este método se debe de elaborar un perfil de río principal que nos permita visualizar los desniveles en toda su longitud, para ello se utiliza una aplicación en QGis llamada **Terrain profile**.

---

<sup>27</sup> Principios fundamentales de la hidrología superficial Agustín B. & Antonio J., 2006, 1ª edición, página 39.

Esta aplicación permite obtener un perfil a partir de las líneas que conforman un río, dichas líneas de río están guardadas y representada en un archivo vector que al ser cargada a la aplicación brindara los desniveles del río desde el punto más alto al punto más bajo, siendo este proceso realizado sobre un archivo raster de alturas previamente cortada según el área de la cuenca.



**Imagen 3-5: Perfil de río principal de la cuenca del río Acelhuate en QGIS. Fuente: Elaboración propia**

La ventaja principal de esta forma de obtención del perfil del río por medio de QGIS es que, además de brindar el perfil graficado, también da los datos tabulados de las alturas con respecto a la distancia horizontal recorrida, esto se puede visualizar en la pestaña de tabla, ayudando de gran manera en la aplicación del método de Taylor & Schwartz. Para la resolución y aplicación de la

ecuación anterior se utiliza el formato de mostrado en la Tabla 3-4, en donde se calcula las pendientes de tramos iguales del cauce del río Acelhuate.

N <sup>o</sup>	ESTACIÓN	ALTURA (m)	TRAMO (m)	DESNIVEL (m)	S (m/m)	1/((S)^(1/2))
	0	648.014				
1	2000	612.000	2000	36.014	0.018	7.452
2	4000	594.322	2000	17.678	0.009	10.636
3	6000	579.036	2000	15.286	0.008	11.438
4	8000	551.015	2000	28.021	0.014	8.448
5	10000	507.000	2000	44.015	0.022	6.741
6	12000	473.030	2000	33.970	0.017	7.673
7	14000	466.059	2000	6.971	0.003	16.938
8	16000	436.018	2000	30.041	0.015	8.159
9	18000	417.155	2000	18.863	0.009	10.297
10	20000	406.022	2000	11.133	0.006	13.403
11	22000	390.055	2000	15.967	0.008	11.192
12	24000	374.074	2000	15.981	0.008	11.187
13	25550.1	370.010	1550.1	4.064	0.003	19.530
$\Sigma$						143.096

**Tabla 3-4. Cuadro de parámetros para aplicación de ecuación de pendiente de Taylor y Schwartz en el río Acelhuate. Fuente: elaboración propia**

Extrayendo los datos necesarios de la Tabla 3-4, y aplicándolos en la Ecuación 3.3 se calcula la pendiente promedio del cauce Río Acelhuate así:

$$S_c = \left( \frac{1}{\frac{1}{\sqrt{S_1}} + \frac{1}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{S_n}}} \right)^2 = \left( \frac{13}{143.096} \right)^2 = 0.83\%$$

El cauce principal de la cuenca del Rio Acelhuate, posee una elevación máxima de 648 m.s.n.m. y una elevación mínima de 370 m.s.n.m. además de un recorrido de 25.55 Kms. Calculando se obtiene una pendiente de 1.09% con el método ponderado, pero se tomará como pendiente más real la calculada con el método de Taylor & Schwartz de **0.83%**.

### 3.9.7 PENDIENTE MEDIA DE LA CUENCA

La pendiente del terreno es un factor importante en el proceso del flujo sobre la superficie y es por lo tanto un parámetro hidrológico de interés, particularmente en cuencas pequeñas donde los procesos de flujo de superficie pueden ser el factor dominante en la determinación de la forma del hidrograma. Dada la variación considerable que se puede presentar de la pendiente del terreno de una cuenca típica, es necesario definir un índice promedio que la represente. En la Tabla 3-5 se especifica los rangos de pendiente y su característica específica en cuanto a su valor de pendiente.

PENDIENTE MEDIA (%)	TIPO DE TERRENOS
0 a 2	Llano
2 a 5	Suave
5 a 10	Accidentado medio
10 a 15	Accidentado medio
15 a 25	Fuertemente accidentado
25 a 50	Escarpado
mayor a 50	Muy escarpado

Tabla 3-5. Clasificación de Tipos de terrenos en función de la pendiente. Fuente: Pérez, J. (1979).

### **Criterio de J.W Alvord para la Pendiente Media**

Un método que se utiliza es el llamado criterio de J.W Alvord, que propone obtener la pendiente de la cuenca mediante la obtención de las pendientes existentes entre las curvas de nivel y usando la siguiente ecuación<sup>28</sup>:

$$S_c = \frac{DxL_{curva}}{A} x 100 \text{ (Ecuación 3.4)}$$

<sup>28</sup> Utilización del modelo "HEC-HMS" en sistemas de pronósticos hidrológicos y verificación de los datos obtenidos por el modelo CMPORH, en la cuenca del Río Sucio (Tesis de Pregrado). Universidad de El Salvador. Carrillo C. & Mejía N. (2016). El salvador, pág. 53.

Dónde:

$S_c$ = Pendiente de la cuenca (%)

D= Desnivel constante entre curvas de nivel (Kms)

$L_{curvas}$ = Longitud total de las curvas de nivel dentro de la cuenca (Kms)

A= Área de la cuenca (km<sup>2</sup>)

Los datos para la utilización de la ecuación 3.4 y calcular la pendiente de la cuenca del Rio Acelhuate son: la distancia entre curva de nivel es de 0.01 km, la longitud total de las curvas de nivel es de 6,612.36 km (obtenido de programas QGIS) y el área total es de 275.73 km<sup>2</sup> y el resultado obtenido es el siguiente:

$$S_c = \frac{0.01 \times 6612.36}{273.73} \times 100 = 23.98 \%$$

También se realizó el análisis de pendiente del terreno de la cuenca usando el programa QGIS, la cual consiste en una distribución de una red o un conjunto de puntos localizados al azar sobre el mapa de la cuenca de los cuales se determina su pendiente.

Los datos obtenidos se presentan en la tabla, los cuales se introducen en la ecuación para obtener la pendiente media de la cuenca del rio Acelhuate.

$$S_c = \frac{\sum \text{Pendiente promedio} \times \text{Numero de ocurrencia}}{\sum \text{Numero de ocurrencia}} \quad \text{(Ecuación 3.5)}$$

RANGO DE PENDIENTE		PENDIENTE MEDIA	ÁREA (Km <sup>2</sup> )	OCURRENCIA	OCURRENCIA X PENDIENTE MEDIA
Menor	Mayor				
0	15	7.5	159.234	4445	33,337,5
15	30	22.5	71.610	9017	20,2882,5
30	45	37.5	28.366	4644	1,74150
45	60	52.5	10.800	2801	14,7052,5
60	75	67.5	3.988	1801	12,1567,5
75	90	82,5	1.378	1071	88,357,5
90	120	105	0.555	295	30,975
120	150	135	0.069	77	10,395
150	180	165	0.013	23	3,795
180	300	240	0.005	4	960
<b>TOTALES</b>			<b>276.018</b>	<b>24,178.000</b>	<b>813,472.500</b>

Tabla 3-6. Cuadro de pendiente promedio. Fuente: Elaboración propia

Evaluando la ecuación 3.5 con los resultados de la tabla 3-6, el valor queda:

$$S_c = \frac{813,472.5}{24,178} = 33.64\%$$

Según los resultados obtenidos para una pendiente de **33.64%** usando la ecuación de J.W. Alvord y además de los criterios de la clasificación de la tabla 3-5 propuesto por (Pérez. J. 1979), el relieve de la cuenca del río Acelhuate es clasificada como **Escarpado**.

### 3.9.8 ELEVACIÓN DE LA CUENCA

#### **Elevación Máxima**

La elevación máxima es un valor que se lee directamente de la planimetría de la cuenca, ubicando la cota de mayor altura en la cuenca estudiada, se expresa en m.s.n.m.

#### **Elevación Mínima**

La elevación mínima se determina en correspondencia con la cota de la cuenca de menor elevación respecto al nivel del mar, y se expresa en m.s.n.m.

#### **Elevación Media de la cuenca**

La elevación media de la cuenca es un parámetro fisiográfico que promedia o en algunos casos pondera las diferentes variaciones de las elevaciones del terreno de una cuenca. Muchos de los factores de gran interés en la cuenca dependen de la elevación, por ello es útil saber cómo está distribuida la cuenca en función de las elevaciones.

#### **Método de la Red de puntos**

Este método consiste en la utilización de una malla cuadrículada sobre el mapa topográfico de la cuenca; en cada intersección de la malla se identificará su respectiva altura y se calculará el promedio de todas las aturas de las intercepciones, el resultado será la elevación media de la cuenca. Se debe tener en cuenta que para aplicar el método se tiene que cumplir la condición de promediar al menos 100 datos de las alturas de esas intersecciones.

$$E_m = \frac{\sum \text{Elevaciones}}{N^{\circ} \text{ de intersecciones}} \quad (\text{Ecuación 3.6})$$

Aplicando este método en la cuenca del Rio Acelhuate para obtener la elevación media se generaron 107 elevaciones, esto para cumplir con el requisito de un mínimo de 100 datos (véase Ilustración 3-4), haciendo la suma de todas las elevaciones resulta un total de 79,084.691. Aplicando la ecuación 3.6 y sustituyendo datos la elevación media resultante es 732.266 m.s.n.m.

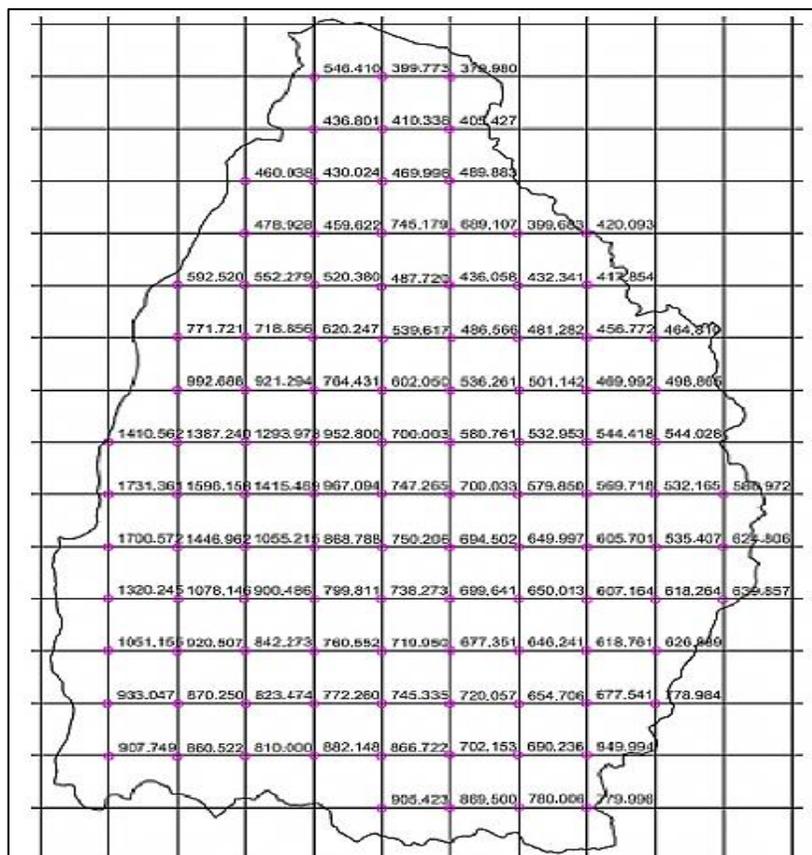


Ilustración 3-4: Mapa de Red de puntos representando alturas en m.s.n.m. sobre el mapa de la cuenca. Fuente: Elaboración propia.

### 3.9.9 LA CURVA HIPSOMÉTRICA

La curva hipsométrica refleja con mejor precisión el comportamiento global de las variaciones de elevación de la cuenca. Representa el porcentaje o fracción del área de la cuenca que se encuentra por encima de una cota determinada o intervalos de elevación.

Conceptualmente una curva Area-Elevación (Curva Hipsométrica) se puede construir midiendo entre contornos de las curvas de nivel de un mapa topográfico y representando en una gráfica el área acumulada por encima o por debajo de una cierta elevación<sup>29</sup>, además para la obtención de la elevación media se hará uso de la siguiente ecuación:

$$E_m = \frac{\sum(\text{COTA MEDIA} * \text{PORCENTAJE DE AREA ACUMULADA})}{\text{AREA TOTAL}} \quad (\text{Ecuación 3.7})$$

INTERVALO ENTRE CURVA A (m)		COTA MEDIA B (m)	ÁREA C (Km <sup>2</sup> )	ÁREA/ÁREA TOTAL D (Km <sup>2</sup> /Km <sup>2</sup> )	PORCENTAJE ACUMULADA (E)	B*C (Km <sup>2</sup> *m)
1,900	1,950	1,925	0.084	0.030%	0.030%	161.820
1,801	1,900	1,850.5	0.528	0.191%	0.222%	976.428
1,701	1,800	1,750.5	1.857	0.673%	0.894%	3,250.186
1,601	1,700	1,650.5	2.673	0.968%	1.863%	4,411.735

<sup>29</sup> Hidrología para ingenieros, Linsley, Kohler y Paulus, 1977, 2a Edición, página 351

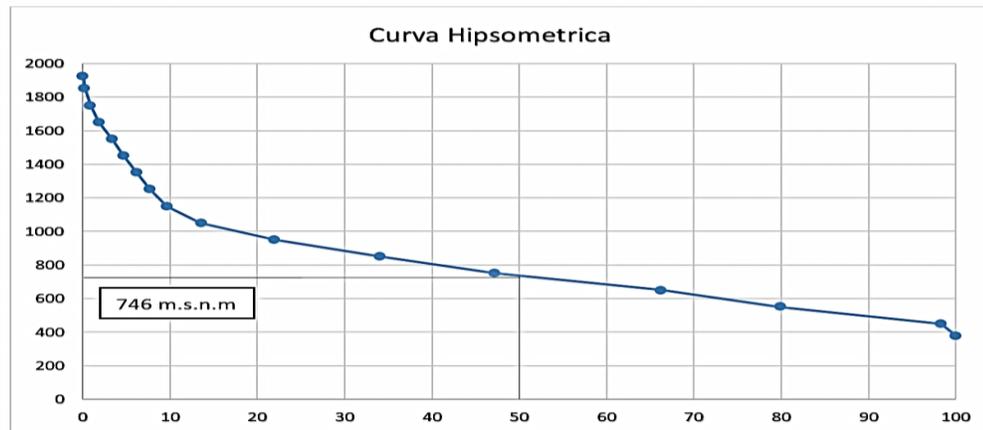
INTERVALO ENTRE CURVA A (m)		COTA MEDIA B (m)	ÁREA C (Km <sup>2</sup> )	ÁREA/ÁREA TOTAL D (Km <sup>2</sup> /Km <sup>2</sup> )	PORCENTAJE ACUMULADA (E)	B*C (Km <sup>2</sup> *m)
1,501	1,600	1,550.5	3.990	1.446%	3.308%	6,186.495
1,401	1,500	1,450.5	2.844	1.030%	4.339%	4,125.313
1,301	1,400	1,350.5	3.208	1.162%	5.501%	4,332.784
1,201	1,300	1,250.5	3.673	1.331%	6.832%	4,592.852
1,101	1,200	1,150.5	5.204	1.885%	8.717%	5,986.914
1,001	1,100	1,050.5	10.464	3.791%	12.508%	10,992.826
901	1,000	950.5	23.378	8.470%	20.978%	22,220.314
801	900	850.5	33.380	12.094%	33.072%	28,390.089
701	800	750.5	36.484	13.218%	46.290%	27,381.172
601	700	650.5	52.963	19.189%	65.478%	34,452.716
501	600	550.5	38.413	13.917%	79.395%	21,146.253
401	500	450.5	52.226	18.922%	98.317%	23,527.996
360	400	380	4.647	1.683%	100.000%	17,65.753
$\Sigma$			276.01594			20,3901.65

Tabla 3-7. Valores de curva hipsométrica. Fuente: Elaboración propia.

Aplicando la ecuación 3.7 con los datos obtenidos de tabla 3-7, el resultado es el siguiente:

$$E_m = \frac{203901.65}{276.01} = 746.62 \text{ metros}$$

Otro criterio que se utiliza para la estimación de la elevación media de la cuenca se basa en la Curva Hipsométrica, la cual equivale a la cota correspondiente al 50% sobre el área acumulada de la cuenca como se ve en la Ilustración 3-5



**Ilustración 3-5: Curva hipsométrica de la cuenca del Río Acelhuate. Fuente: elaboración propia.**

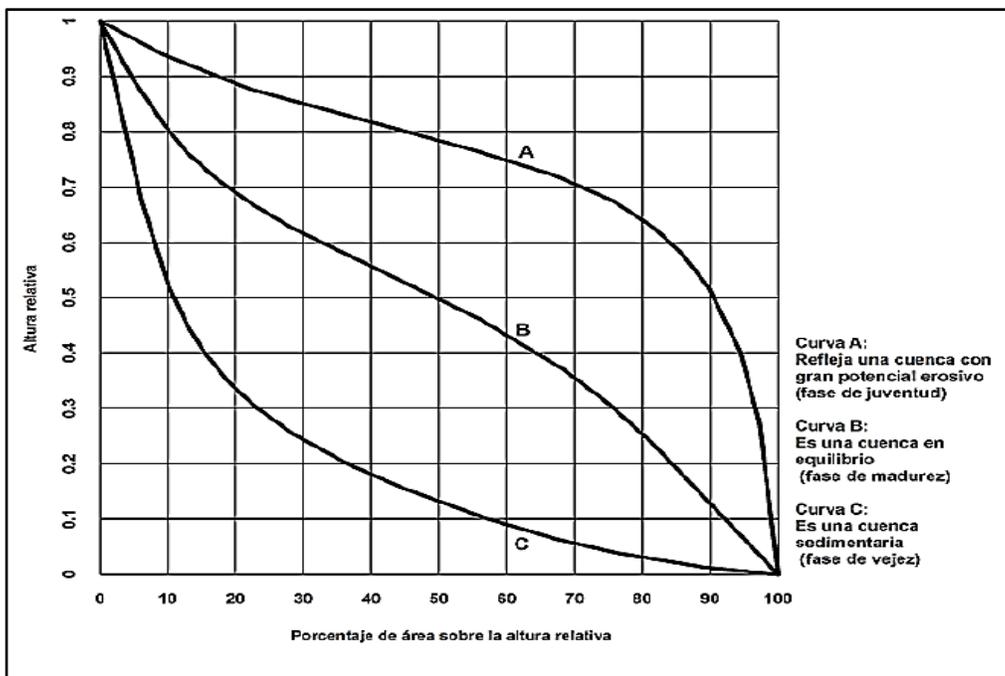
Strahler (1957) había demostrado que la curva hipsométrica tiene formas características que definen el tipo de cuenca, los cuales son: cuencas con escenarios de juventud, madurez y vejez<sup>30</sup>. Según (Schumn, 1956), citado por (Silva, 1999), atendiendo la dinámica de los sedimentos, una fase de Juventud–Erosión (curva A) implica una zona en donde predomina la producción de sedimentos y aguas; una fase de Madurez-Equilibrio (curva B) se refiere a una zona en la cual predomina el transporte de ambos y una zona en fase de Vejez-Sedimentación (curva C) es caracterizada por la disposición de

<sup>30</sup> Theoretical Geomorphology. 3° edición, Adrián E. Scheidegger (1961), Página. 24.

sedimentos.<sup>31</sup>(vease

Ilustracion

3-6).



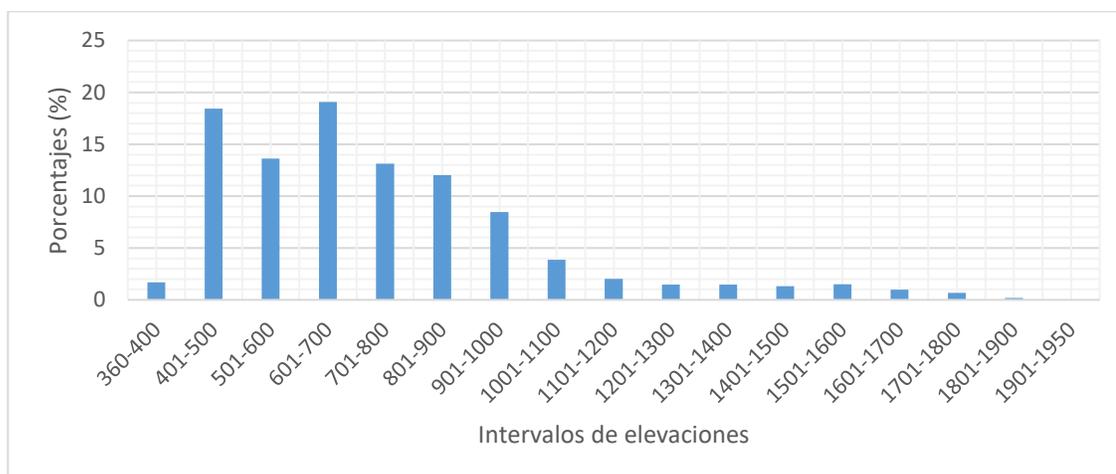
**Ilustración 3-6: Curvas hipsométricas característico del ciclo de erosión. Fuente: DACGER, (2016) Manual de consideraciones técnicas hidrológicas e hidráulicas para estructura vial de Centroamérica, 1ª edición.**

Por lo tanto, se concluye que por la forma de la curva hipsométrica de la cuenca del río Acelhuate a causa de la erosión presente, se puede caracterizar como una cuenca en fase de madurez y equilibrada.

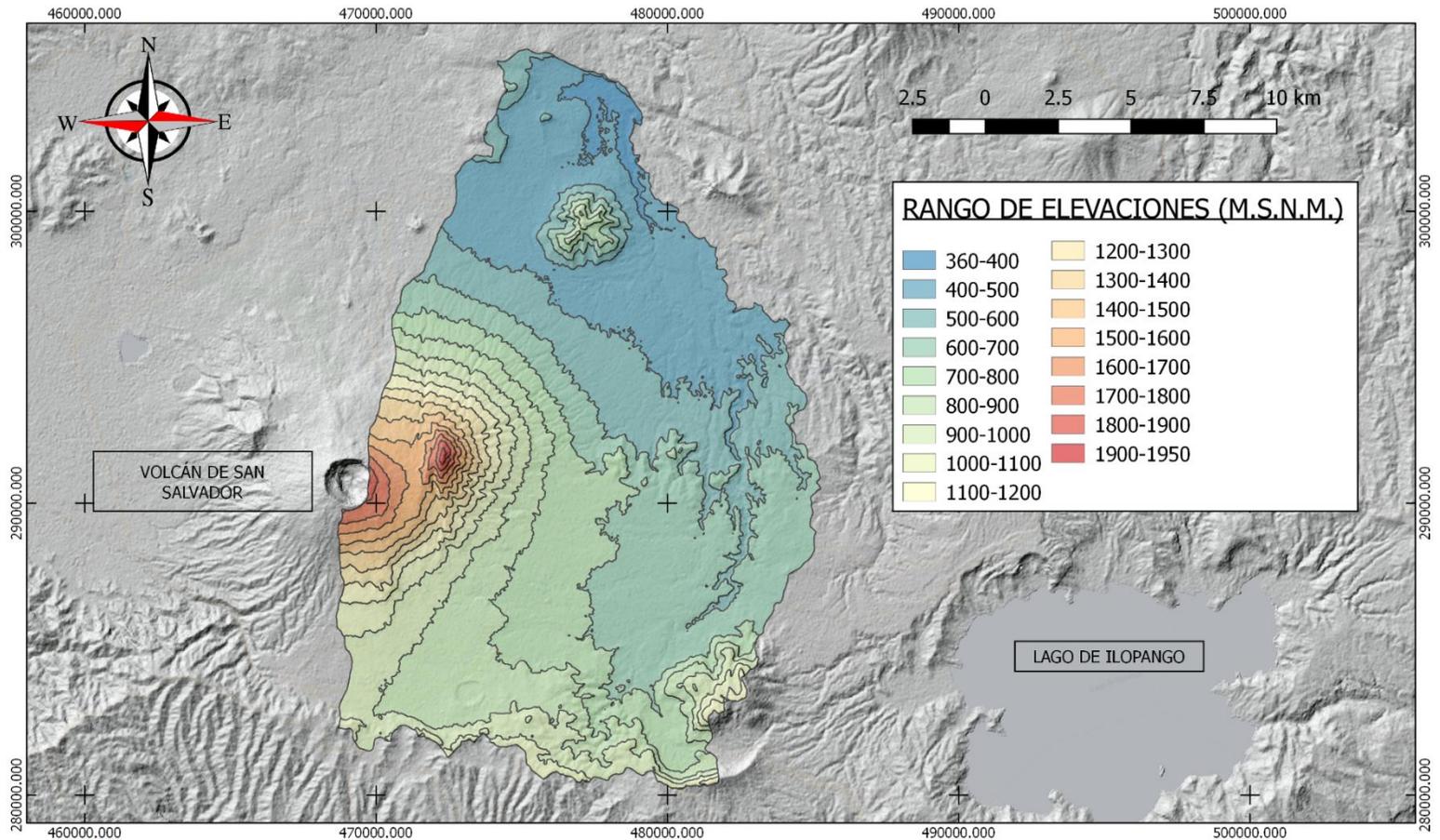
<sup>31</sup> Insumos técnicos para la modelación probabilística de riesgos de inundaciones en la cuenca del río Sucio utilizando el modelo Capra (Tesis de Pregrado). Benítez M. (2016). Universidad de El Salvador. El Salvador.

### 3.9.10 HISTOGRAMA DE FRECUENCIA ALTIMÉTRICA

La gráfica de Frecuencia de Intervalos de Alturas o Histograma de Frecuencias Altimétricas (Ilustración 3-7) nos muestra de forma más clara el rango de elevación que más se repite en la cuenca del río Acelhuate con un porcentaje de 19.189 %, del área de la cuenca, se encuentra el rango de elevaciones de 6010 a 700 m.s.n.m., mientras que en el Mapa 3.6, se muestra la distribución de alturas de toda la cuenca en estudio.



**Ilustración 3-7: Distribución de porcentaje de área de la cuenca. Fuente: Elaboración propia.**



PROYECCIONES DE LOS IMPACTOS HIDROLÓGICOS BASADOS EN EL PLAN DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL VIGENTE: ESQUEMA DIRECTOR, EN EL ÁREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR (AMSS)

NOMBRES:  
ESTRADA PONCE, JOSUÉ RODRIGO  
LÓPEZ RECINOS, LIDIA YANET

MAPA 3.6: MAPA DE ELEVACIONES EN CUENCA DEL RIO ACELHUATE EN PARTE ALTA Y MEDIA

FUENTE: ELABORADO POR GRUPO DE TESTS

### 3.10 PARÁMETROS DE FORMA DE LA CUENCA

Es la configuración geométrica de la cuenca tal como está proyectada sobre el plano horizontal. La forma incide en el tiempo de respuesta de la cuenca, es decir, al tiempo de recorrido de las aguas a través de la red de drenaje, y, por consiguiente, a la forma del hidrograma resultante de una lluvia dada.

Para determinar la forma de una cuenca se utilizan varios índices asociados a la relación área perímetro. Para explicar cuantitativamente la forma de la cuenca, se compara la cuenca con figuras geométricas conocidas como lo son: el círculo, el óvalo, el cuadrado y el rectángulo, este último principalmente

#### 3.10.1 ORDEN DE LAS CORRIENTES

El orden de las corrientes es una clasificación que refleja el grado de ramificación o bifurcaciones dentro de una cuenca. En el sistema de drenaje en cuencas pueden existir diferentes tipos de corrientes, estas se enumeran para poder ser identificadas; Para ello existen diversos criterios para el ordenamiento de los cauces de la red de drenaje en una cuenca hidrográfica, estos son:

##### **El Criterio de Horton:**

- Los cauces de primer orden (1) son aquellos que no poseen tributarios,
- Los cauces de segundo orden (2) tienen afluentes de primer orden,

- Los cauces de tercer orden (3) reciben influencia de cauces de segundo orden, pudiendo recibir directamente cauces de primer orden<sup>32</sup>.

Como se muestra en la ilustración 3-8:

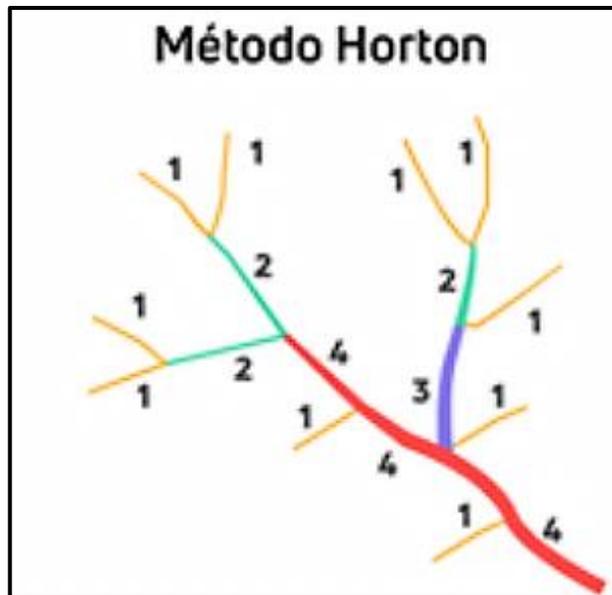


Ilustración 3-8: Jerarquización de red de drenaje mediante uso del Criterio de Horton.  
Fuente: <https://images.app.goo.gl/nkP8gLCheou78id9>, Gestión de Cuencas Hídricas. .

### **El sistema de Strahler:**

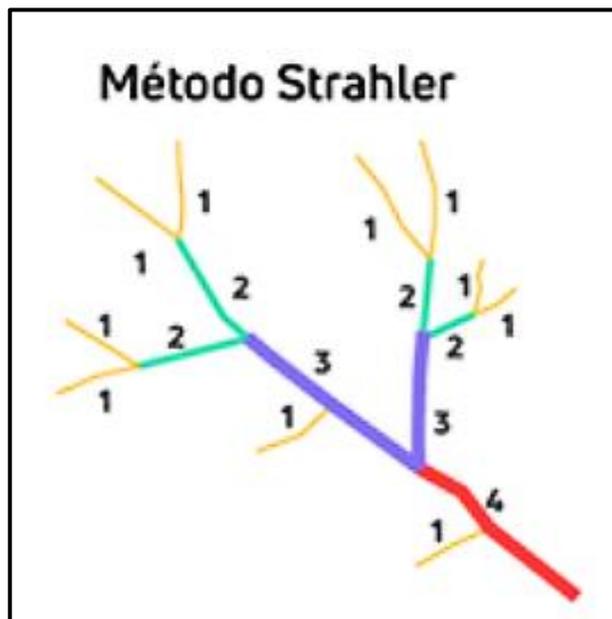
Para evitar la subjetividad de la designación en las corrientes determina que:

- todos los cauces serán tributarios, aun cuando las corrientes sean ríos principales.

<sup>32</sup> Cahuana A. & Yugar W. (2009). Material de apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura de hidrología CIV-233, Página 32.

- El río en este sistema no mantiene el mismo orden en toda su extensión.
- El orden de una cuenca hidrográfica está dado por el número de orden del cauce principal<sup>33</sup>.

Como se muestra en la ilustración 3-10:

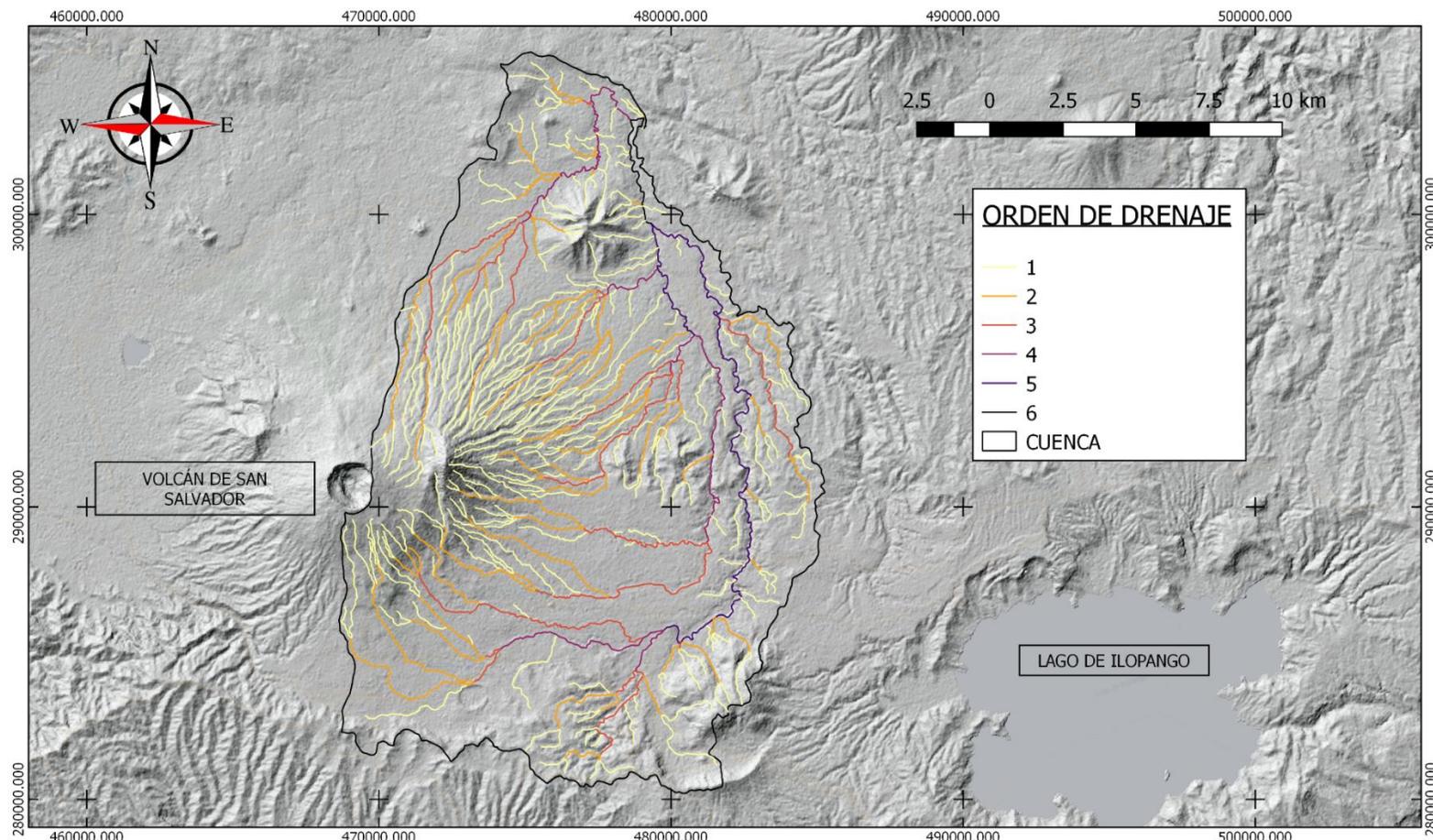


**Ilustración 3-9: Jerarquización de red de drenaje mediante el uso del Criterio Strahler.**  
Fuente: Google búsqueda, <https://images.app.goo.gl/nkP8gLChCeou78id9>, Gestión de Cuencas Hídricas.

---

<sup>33</sup> Material de apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura de hidrología CIV-233, Cahuana A. & Yugar W. (2009). Página 32.

En el Mapa 3.7 se detalla el orden del drenaje que caracteriza la cuenca, según Strahler la cuenca del río Acelhuate posee un orden de corriente de 6, siendo el cauce principal poseedor de 2 órdenes diferentes, en su parte alta un orden 5 y en su parte media un orden de 6.



PROYECCIONES DE LOS IMPACTOS HIDROLÓGICOS BASADOS EN EL PLAN DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL VIGENTE: ESQUEMA DIRECTOR, EN EL ÁREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR (AMSS)

NOMBRES:  
ESTRADA PONCE, JOSUÉ RODRIGO  
LÓPEZ RECINOS, LIDIA YANET

MAPA 3.7: MAPA DE ORDEN DE DRENAJE EN LA CUENCA DEL RIO ACELHUATE EN PARTE ALTA Y MEDIA

FUENTE: ELABORADO POR GRUPO DE TESIS

### 3.10.2 DENSIDAD DE DRENAJE

Horton en 1945 definió la densidad de drenaje de una cuenca como el cociente entre la longitud total de los cauces pertenecientes a su red de drenaje y la superficie de la cuenca.<sup>34</sup>

$$D_d = \frac{L_t}{A} \text{ (Ecuación 3.8)}$$

Donde:

$D_d$  = Densidad de drenaje de la cuenca (Kms/Km<sup>2</sup>)

$L_t$  = Longitud total de todos los cauces de la cuenca (Kms)

$A$  = Área de la cuenca (Kms)

Como definición de la densidad de drenaje se entiende como un indicador de la respuesta de la cuenca ante un evento de precipitación, y, por lo tanto, es un condicionante de la forma del hidrograma resultante en el punto de desagüe de la cuenca. A mayor densidad de drenaje indica cuencas con área de materiales erosionables, suelos poco permeables, poca presencia de vegetación y relieve montañoso; Una menor densidad de corriente indica área de materiales

---

<sup>34</sup> Material de apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura de hidrología CIV-233. Cahuana A. & Yugar W. (2009).

resistente a erosiones, suelos permeables con gran cantidad de vegetación y pendientes suaves. Aplicando la ecuación 3.8 se obtiene el siguiente resultado:

$$D_d = \frac{L_t}{A} = \frac{656.61}{275.73} = 2.38$$

A continuación, se presenta la siguiente tabla de características de distintos valores de densidad de drenaje.

DENSIDAD DE DRENAJE (Km/Km <sup>2</sup> )	CATEGORÍA
< 1	Baja
1 a 2	Moderada
2 a 3	Alta
>3	Muy alta

**Tabla 3-8: Clasificación de diferentes valores de Densidad de Drenaje Fuente: Benítez M. (2016).**

En este caso la cuenca del Rio Acelhuate presenta un valor de **densidad** de drenaje de 2.38 por lo que la cuenca se categoriza como una cuenca con **alto drenaje** según la tabla 3-8

### 3.10.3 ÍNDICE DE COMPACIDAD O COEFICIENTE DE GRAVELIUS

Dada la importancia de la configuración de las cuencas, se trata de cuantificar parámetros por medios de índices o coeficientes, los cuales relacionan los movimientos del agua y las respuestas de la cuenca a tal movimiento (hidrogramas).<sup>35</sup>

El índice de Compacidad de una cuenca o índice de Gravelius ( $I_c$ ), señala la mayor o menor compacidad de la cuenca a través de la relación entre el perímetro de la cuenca y la circunferencia del círculo que tenga la misma superficie que la cuenca.

$$I_c = \frac{P}{P_o} = \frac{P}{2\sqrt{\pi * A}} = 0.282 * \frac{P}{\sqrt{A}} \text{ (Ecuación 3.9)}$$

#### Donde

$I_c$  = índice de compacidad

P = Perímetro de la cuenca

A = Área de la cuenca

---

<sup>35</sup> Material de apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura de hidrología CIV-233, Cahuana A. & Yugar W. (2009). Página 19.

Cuanto más cercano esté el índice a la unidad, se considera que la cuenca tiene una forma más circular y que por tanto es más compacta, y va aumentando conforme disminuye la compacidad<sup>36</sup>. Aplicando la ecuación 3.9 se obtiene:

$$I_c = \frac{P}{P_o} = \frac{P}{2\sqrt{\pi * A}} = 0.282 * \frac{P}{\sqrt{A}} = 0.282 * \frac{83.00}{\sqrt{275.73}} = 1.40$$

Para el caso de la cuenca del río Acelhuate el factor resultante es de 1.40 por lo tanto, **la cuenca se cataloga como irregular** por ser un valor distinto y alejado de la Unidad.

#### 3.10.4 FACTOR DE FORMA

El factor de forma está definido como el coeficiente que relaciona el área total de la cuenca y el cuadrado de su longitud axial, siendo la expresión matemática la siguiente:

$$F_f = \frac{A}{L_c^2} \text{ (Ecuación 3.10)}$$

Ff = factor de forma (Adimensional)

---

<sup>36</sup> Análisis Morfométrico de la cuenca y de la red de drenaje del Río Zadorra y sus afluentes aplicado a la peligrosidad de crecidas. Matauco A. (2004). Página 316.

$A$  = área de la cuenca ( $\text{km}^2$ )

$L_c$  = Longitud de la cuenca (Km)

Una cuenca con un Factor de Forma bajo está menos sujeta a crecidas en comparación de una cuenca con la misma área y mayor factor de forma<sup>37</sup>, en otras palabras, en cuencas de igual área, la que sea de forma más alargada presentara menor susceptibilidad a las crecidas.

Un valor de Factor de Forma superior a la Unidad indica una forma redondeada de la cuenca o de un río principal corto de la misma, y como consecuencia se presenta una tendencia a concentrar el escurrimiento de lluvia intensa formando de manera más fácil las crecidas; en cambio valores menores a la Unidad señalan formas alargadas de la cuenca.

Este parámetro relaciona la forma de una cuenca con la de un cuadrado ( $F_f = 1$ ) y ha sido utilizado frecuentemente como indicador de la forma del hidrograma unitario.<sup>38</sup> Aplicando la ecuación 3.10 se obtiene:

---

<sup>37</sup> Conceptos básicos de Morfometría de Cuencas Hidrográficas, Cardona B. (s.f).

<sup>38</sup> Utilización del modelo "HEC-HMS" en sistemas de pronósticos hidrológicos y verificación de los datos obtenidos por el modelo CMPORH, en la cuenca del Río Sucio (Tesis de Pregrado). Universidad de El Salvador. El salvador, Carrillo C. & Mejía N. (2016). página 53.

$$F_f = \frac{A}{L_c^2} = \frac{275.73}{(24.22)^2} = 0.47$$

Para el caso de la cuenca del río Acelhuate el factor de forma da como resultado 0.47 ya que es bastante alejado de la unidad, esta cuenca presenta una forma alargada.

### 3.10.5 RELACIÓN DE ELONGACIÓN

Fue definido por Schumm, como la relación entre el diámetro de un círculo (D) de área igual a la cuenca y la longitud de la cuenca (L).<sup>39</sup>

$$R_e = 1.1284 * \frac{\sqrt{A}}{L} \text{ (Ecuación 3.10)}$$

Además, la relación de la elongación esta correlacionada con el relieve de la cuenca, de manera que valores cercanos a la unidad son típicos de regiones con relieve bajo, en cambio donde el resultado de la relación de elongación de un valor que varía entre 0.60 a 0.80 significara a una cuenca con fuertes relieves y

---

<sup>39</sup> Material de apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura de hidrología CIV-233, Cahuana A. & Yugar W. (2009). página 55.

pendientes pronunciadas del terreno<sup>40</sup>. Aplicando la ecuación 3.10 se tiene como resultado:

$$R_e = 1.1284 * \frac{\sqrt{A}}{L} = 1.1284 * \frac{\sqrt{275.73}}{24.22} = 0.77$$

La cuenca del río Acelhuate presenta un valor de relación de **elongación de 0.81**, solo un poco abajo del límite superior de los valores característicos de una cuenca con fuertes relieves, por lo tanto, la cuenca en estudio presenta un relieve que se puede catalogar como fuerte y como consecuencia a generar crecidas en sus cauces.

### 3.10.6 TIEMPO DE CONCENTRACIÓN

Se define como el tiempo mínimo necesario para que todos los puntos de una cuenca estén aportando agua de escorrentía de forma simultánea al punto de salida, punto de desagüe o punto de cierre.<sup>41</sup>

---

<sup>40</sup> Material de apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura de hidrología CIV-233, Cahuana A. & Yugar W., 2009, página 21.

<sup>41</sup> Tiempo de concentración de la cuenca, Agua y sig., 2014, Recuperado de la página: <https://www.aguaysig.com/2014/08/tiempo-de-concentracion-de-la-cuenca.html>

Este parámetro es propio de cada cuenca ya que depende de varios factores como lo son el tamaño de la cuenca, forma de la cuenca, alturas, pendientes, etc. Para el cálculo de este importante parámetro se puede usar la siguiente ecuación:

### **Fórmula de Kirpich.**

Desarrollada a partir de la información del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de los EE.UU., obtenida en el estudio de siete cuencas rurales en Tennessee con canales bien definidos y pendientes entre 3% y 10%<sup>42</sup>

$$t_c = 0.1947 * L^{0.77} * S^{-0.385} \text{ (Ecuación 3.11)}$$

Donde:

tc= Tiempo de concentración (min)

L= Longitud del cauce principal (m)

S= Pendiente media del cauce principal (m/m)

---

<sup>42</sup> Insumos técnicos para la modelación probabilística de riesgos de inundaciones en la cuenca del Río Sucio utilizando el modelo CAPRA (tesis de pregrado), Benítez M., 2016, .Universidad de El Salvador, El Salvador, página 44.

Con respecto a la cuenca en estudio los datos correspondientes para la utilización de la ecuación 3.11 del tiempo de concentración son: longitud de cuenca es de 30.98 kilómetros y la pendiente del cauce principal es de 0.77%.

$$t_c = 0.01947 * 25550^{0.77} * 0.0083^{-0.385} = 304.94 \text{ min} \cong 5 \text{ horas } 4 \text{ min}$$

### 3.10.7 RELACIÓN DE CIRCULARIDAD

Relación de circularidad, denominado también como radio de circularidad, es el coeficiente entre el área de la cuenca y la de un círculo cuyo perímetro es igual al perímetro total de la cuenca.

$$R_{Ci} = \frac{4\pi A}{P^2} \text{ (Ecuación 3.12)}$$

Donde:

Rci: Relación de Circularidad

A: área de la cuenca en kilómetros cuadrados

P: perímetro de la cuenca en kilómetros

Cuando el coeficiente de relación de circularidad resulta ser cercano a la unidad se puede concluir que la cuenca presenta una forma mayormente circular y si el valor es cercano a 0.785 es una cuenca cuadrada.<sup>43</sup>

Aplicando la ecuación 3.12 se obtiene el siguiente resultado:

$$R_{Ci} = \frac{4\pi A}{P^2} = 4\pi * \frac{275.73}{83.00^2} = 0.50$$

La cuenca al presentar una relación de singularidad de 0.50, no presenta características de ser una cuenca circular, por estar alejado de la unidad y de 0.785, pero al ser una cifra cercana a 0.785 se concluye que la cuenca presenta más características de ser una cuenca con tendencias de forma cuadrada, aunque se le relacionaría más a una cuenca irregular.

### 3.11 TABLA RESUMEN DE LA CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA

A continuación, se presenta un resumen de todos los parámetros obtenidos en formato de tabla de la cuenca del Rio Acelhuate.

---

<sup>43</sup> Material de apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura de hidrología CIV-233, Cahuana A. & Yugar W., 2009, página 21.

<b>PARÁMETRO</b>	<b>VALOR</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>CARACTERIZACIÓN</b>
<b>Área</b>	<b>275.73</b>	<b>Km<sup>2</sup></b>	La cuenca del rio Acelhuate se considera como una cuenca intermedia-pequeña
<b>Perímetro</b>	<b>83.00</b>	<b>Km</b>	Este valor representa la medición lineal del parteaguas de la cuenca
<b>Longitud del cauce principal</b>	<b>25.55</b>	<b>Km</b>	Representa la medida del cauce principal de la cuenca
<b>Longitud de la cuenca</b>	<b>24.22</b>	<b>Km</b>	Medición realizada desde la salida del parte agua hacia aguas arriba
<b>Ancho promedio</b>	<b>11.38</b>	<b>km</b>	Representa una medida de cuan ancha es la cuenca en su recorrido
<b>Pendiente media del cauce principal</b>	<b>0.83</b>	<b>%</b>	Es una pendiente muy suave
<b>Pendiente media de la cuenca</b>	<b>33.64</b>	<b>%</b>	Terreno que tiende a escarpado
<b>Elevación media de la cuenca</b>	<b>746.62</b>	<b>m.s.n.m.</b>	Las frecuencias de alturas mayoritariamente están entre el rango entre 400 a 900 m.s.n.m. (Porcentajes entre el 10% y 20%) teniendo el punto más alto una altura de 1950 m.s.n.m en el volcán de San salvador, y su punto más bajo de 360 m.s.n.m. con un porcentaje menor al 2%, esto nos indica que es muy variable en su altura y además en un

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD	CARACTERIZACIÓN
			fuerte indicado de su clima cálido tropical
<b>Orden de corriente</b>	<b>6</b>	<b>Adimensional</b>	Teniendo en cuenta que la cuenca no es de gran extensión y que el resultado de orden de drenaje fue 6, la cuenca tiene una buena respuesta frente a una tormenta evacuando el agua en menos tiempo, esto debido a un denso drenaje.
<b>Densidad de drenaje</b>	<b>2.38</b>	<b>Km/Km<sup>2</sup></b>	El resultado obtenido es un indicador de que la cuenca tiene una densidad de drenaje alta, es decir, tiene una capacidad alta de evacuar agua.
<b>Índice de compacidad</b>	<b>1.40</b>	<b>Adimensional</b>	la cuenca presenta una forma ovalada rectangular, además tiene una forma un tanto alargada en forma de "pera"
<b>Factor de forma</b>	<b>0.47</b>	<b>Adimensional</b>	Para una cuenca con factor de forma diferente de la unidad la forma que esta presentará será con tendencia al alargamiento, como consecuencia el hidrograma también tendrá una forma alargada.
<b>Relación de elongación</b>	<b>0.77</b>	<b>Adimensional</b>	Este valor indica que la cuenca presenta una tendencia de fuerte relieve y pendientes pronunciadas lo que crea una susceptibilidad de crecidas

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD	CARACTERIZACIÓN
Tiempo de concentración	304.44	minutos	Es el tiempo que tarda una gota en el punto más alejado de la cuenca en recorrer hasta el punto de salida

**Tabla 3-9. Resumen de parámetros físicos y de forma de la cuenca Rio Acelhuate. Fuente: elaboración propia.**

### 3.12 RELACION PRECIPITACIÓN Y ESCURRIMIENTO A TRAVES DEL METODO SCS

La búsqueda de una relación simple entre la precipitación (P) y el escurrimiento (Q) directo ha sido una de las tareas básicas de los modeladores de los procesos hidrológicos en cuencas o en parcelas experimentales; este trabajo es particularmente crítico cuando la información de precipitación disponible en la mayoría de las cuencas hidrográficas sólo existe a nivel diario o cuando incluso está incompleto. El método del SCS fue desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos en 1964; el cual es recomendado para estimar los caudales máximos en cuencas rurales y urbanas; así como, la

forma del hidrograma correspondiente y determinar los umbrales de escorrentía a través de un número hidrológico o número de curva agregado de la cuenca<sup>44</sup>.

### **Determinación del volumen**

El volumen escurrido, expresado en unidades de altura de agua (mm, pulgadas, etc.), o lluvia efectiva, se calcula en función de la lluvia (P), del potencial máximo de retención (S) y de las pérdidas iniciales. Se observó empíricamente que las abstracciones o pérdidas iniciales eran aproximadamente el 20% de las pérdidas máximas.<sup>45</sup> Por lo que la estimación del volumen se obtiene por medio de la expresión siguiente:

$$Q = \frac{(P-0.2S)^2}{P+0.8S} \text{ (Ecuación 3.13)}$$

En donde:

Q = Lluvia efectiva

P = Altura de lluvia

---

<sup>44</sup> Método del SCS, (Autor desconocido) (s.f).Universidad de Chile. Recuperado de la pagina [http://www7.uc.cl/sw\\_educ/hidrologia/Capitulo\\_4/modulo4/scs.pdf](http://www7.uc.cl/sw_educ/hidrologia/Capitulo_4/modulo4/scs.pdf)

<sup>45</sup> Cálculo de la precipitación neta mediante el método S.C.S, F. Javier. (s.f), Departamento de Geología de Salamanca, España, Página 4.

S = Potencial de retención

En la ecuación 3.13 surge un factor como lo es el potencial de máximo de retención el cual está en función del CN o número de curva e indica la cantidad de volumen de escorrentía que se pierde en el camino a un punto de salida, este factor se calcula con la siguiente expresión:

$$S = 25.4 \left( \frac{1000}{CN} - 10 \right) \text{ (Ecuación 3.14)}$$

El número de curva es un valor asignado a una porción de área de una superficie que indica la capacidad de retención, este valor es usado para convertir precipitación total en lluvia efectiva o escurrimiento directo de agua, siendo este un valor que puede comprender de 0 a 100. Un valor de 0 significaría que la superficie en cuestión no retiene agua en su superficie y que el volumen se infiltraría en su totalidad; caso contrario sería con una superficie con un número de curva de 100 que indica una superficie totalmente impermeable. Ese intervalo de valores puede cambia según el nivel de precisión deseado, bien podría ser de 0 a 10, o de 0 a 1000.

El valor de número de curva depende principalmente del tipo de suelo y sus características físicas como lo pueden ser su granulometría, humedad, plasticidad, etc. también del uso que se le esté dando al suelo, es decir, el tipo y cantidad de vegetación existente o la superficie del área en estudio que presenta urbanización.

La infiltración del terreno varía mucho en función de la permeabilizada del suelo y las condiciones de superficie, considerando este método en 4 tipos de suelo (A, B, C y D).

**El suelo de tipo A** corresponde a suelos arenosos o limo arenosos con baja potencial de escurrimiento, son suelos con buen drenaje y conductividad hidráulica. **Los suelos tipo B** tienen tasas de infiltración moderadas y son del tipo limoso.

**Los suelos tipo C** tiene baja capacidad de infiltración cuando están saturados y son limos arcillas con algo de arena.

**Los suelos tipo D** tienen un alto potencial de escurrimiento y pequeña infiltración, están formados fundamentalmente por suelos finos arcillosos o limosos.

### 3.12.1 NÚMERO DE CURVA

DESCRIPCIÓN DE USO DE TIERRA		GRUPO HIDROLÓGICO			
		A	B	C	D
Tierra cultivada	Sin tratamiento de conservación	72	81	88	91
	con tratamiento de conservación	62	71	78	81
Pastizales	Condiciones pobres	68	79	86	89
	Condiciones optimas	39	61	74	80
Vegas de ríos	Condiciones optimas	30	58	71	78
Bosques	Troncos delgados, cubierta pobre, sin hierba	45	66	77	83

DESCRIPCIÓN DE USO DE TIERRA		GRUPO HIDROLÓGICO			
		A	B	C	D
	Cubierta buena	25	55	70	77
Áreas abiertas, césped, parques, campos de golf, cementerios, etc.					
óptimas condiciones	cubierta de pasto en el 75% o mas	39	61	74	80
Condiciones aceptables	Cubierta de pato en el 50% o el 75%	49	69	79	84
Áreas comerciales de negocios (85% impermeables)		89	92	84	95
Distritos industriales (72% impermeables)		81	88	91	93
Residenciales					
Tamaño de lote promedio	porcentaje promedio impermeable				
1/8 acre o menos	65	77	85	90	92
1/4 acre	38	61	75	83	87
1/3 acre	30	57	72	81	86
1/2 acre	25	54	70	80	85
1 acre	20	51	68	79	84
Parqueaderos pavimentados, techos, accesos, etc.		98	98	98	98
calles y carreteras					
Pavimentos con cunetas y alcantarillado		98	98	98	98
Grava		76	85	89	91
Tierra		72	82	87	89

Tabla 3-10: Numero de curva de escorrentía. Fuente: Ven Te Chow. Hidrología aplica, pág. 154.

La intercepción de estos factores se realiza con ayuda de la Tabla 3-10, formulada por Ven Te Chow que da como resultado un número de escorrentía de un suelo en condiciones promedio (CN-II). Todos estos factores se condesan en

mapas cartográficos que ayuden a una mejor visualización y tratamiento de los datos.

Para la determinación del mapa digital que nos ayude a asignar valores de número de curva a la cuenca, se utiliza como se mencionó anteriormente el programa QGis. Como primer paso se debe de dividir la cuenca en sub cuencas con la herramienta “**r. watershed**” (Imagen 3-6), el cual solicita como requisito el archivo tipo “**raster**” o de elevación de la cuenca en estudio y el tamaño mínimo de la sub cuenca que generara.

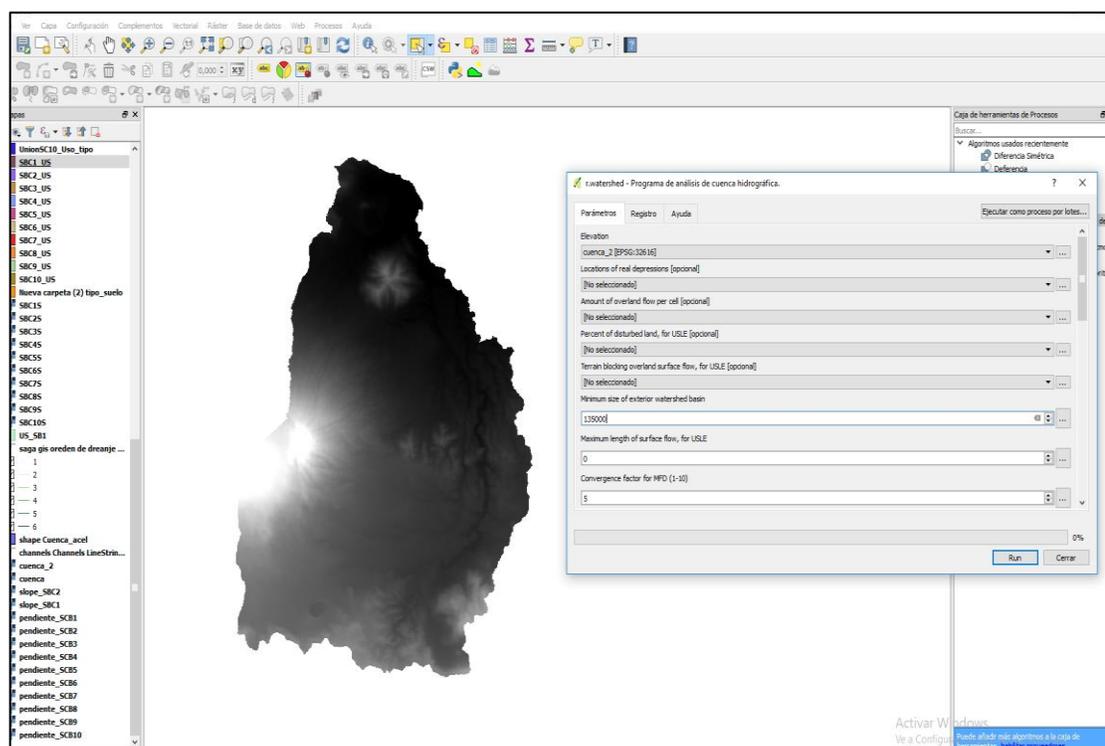
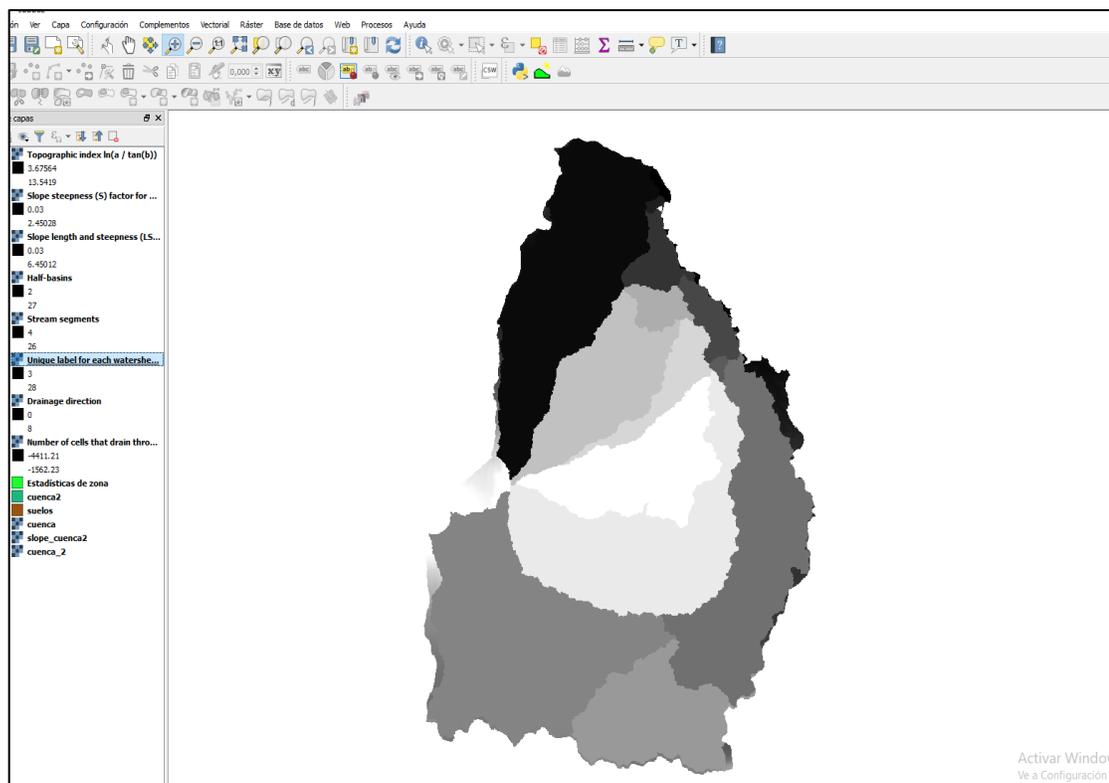


Imagen 3-6. Captura de QGis proceso de subdivisión de cuenca. Fuente: Elaboración propia

El resultado obtenido de este proceso son una diversidad de capas raster en las que se encuentra el drenaje y cauce principal de la cuenca entre otros, pero el que es de nuestro interés se denomina “**Unique label for each watershed**” como se puede ver en la imagen 3-7, esta capa nos proporciona la cuenca dividida en subcuencas, hay que recalcar que este proceso puede generar cuencas pequeñas que para facilitar el análisis es mejor unirlas a cuencas cercanas más grandes.

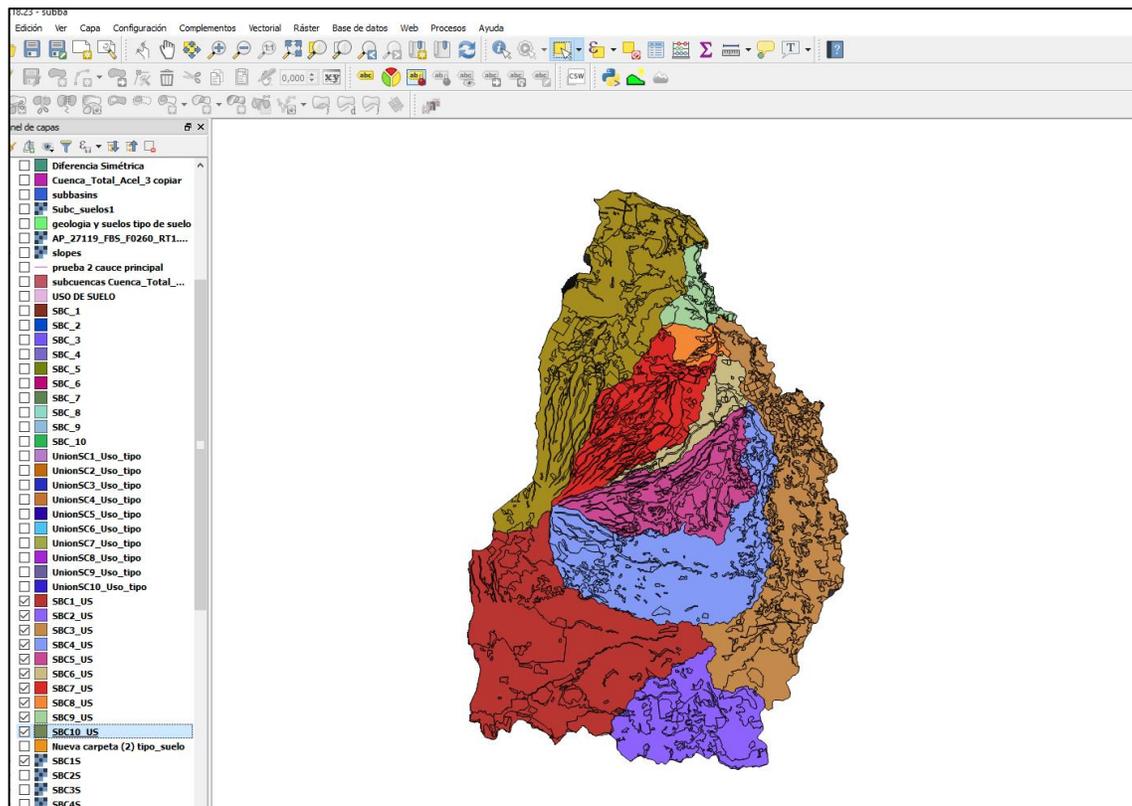


**Imagen 3-7. Resultado de la división de la cuenca en subcuencas en QGIS. Fuente:**

**Elaboración propia**

Esta capa **raster** servirá para delimitar el mapa de la cuenca, tanto la perteneciente a uso de suelo y tipo de suelo. Con la herramienta “**dividir capa**”

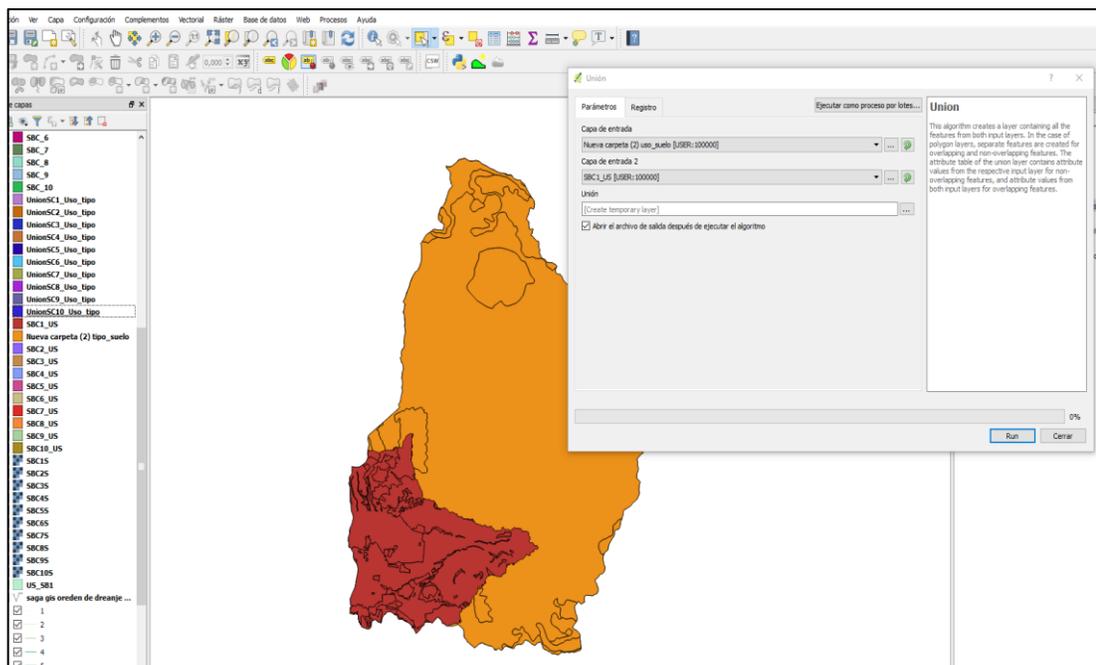
en la pestaña capa se cortó cada sub cuenca para hacerlas independientes una de la otras en el análisis, y luego a la capa uso de suelo también se le hizo el mismo proceso para obtener cada sub cuenca con su respectiva información de uso y tipo de suelo tal como se muestra en la imagen 3-8.



**Imagen 3-8. Uso de suelo de cada subcuenca. Fuente: Elaboración propia.**

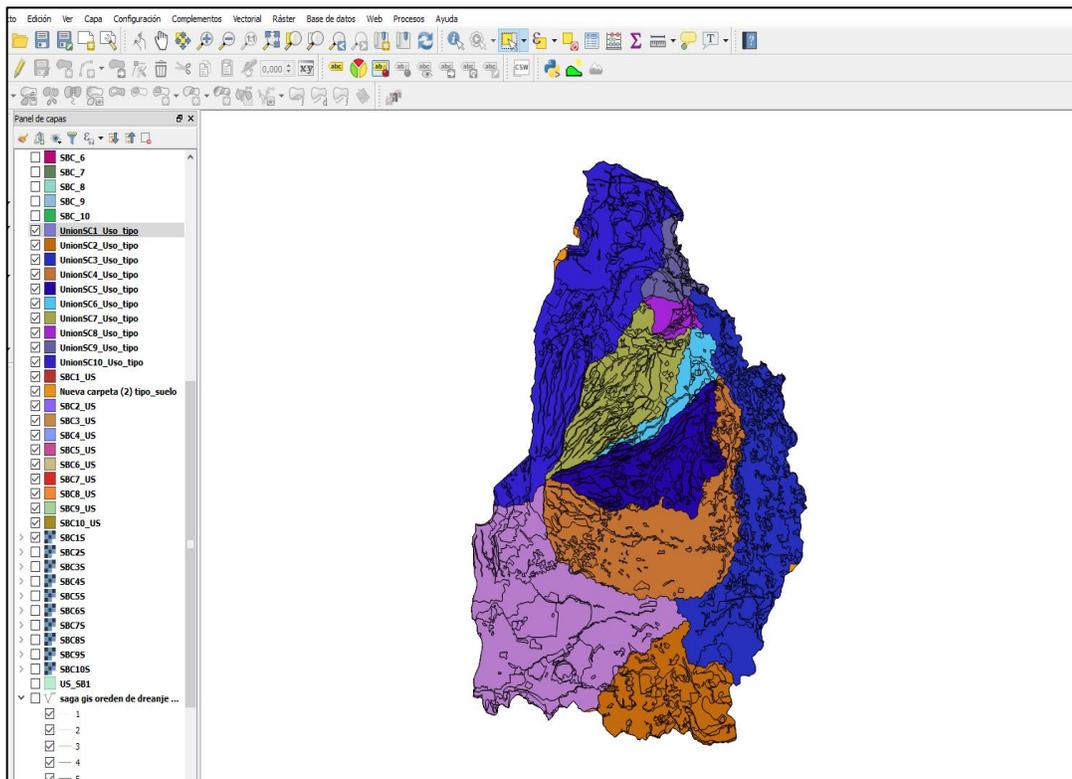
El siguiente paso es unir tanto el mapa de uso de suelo y el mapa de tipo de suelo, para ello se utiliza la herramienta “**unión**” en la pestaña vectorial; esta función nos permitirá unir los datos de la tabla de atributos de la capa uso de suelo con la capa de tipo de suelo (imagen 3-9), pero, ya que la cuenca se

subdividió en múltiples sub cuencas, el proceso debe de repetirse para cada una de ellas.



**Imagen 3-9. Unión de capas en QGis. Fuente: Elaboración propia**

El resultado son mapas individuales compuesto de polígonos que contienen la información de tipo y uso de suelo en sus tablas de atributos. Ya con la capa creada, en la tabla de atributos de cada sub cuenca podemos agrupar en función de un uso de suelo los datos, por ejemplo “Urbano continuo”, este particular uso de suelo puede contener una variada información de tipo de suelo como lo puede ser regosol, latosol, litosol, etc. por lo tanto, se sumará el área de cada polígono con información igual tanto de uso de suelo como de tipo de suelo y se le asignará un valor de numero de curva a ese respectivo polígono.



**Imagen 3-10. Capas unidas de uso y tipo de suelo. Fuente: Elaboración propia**

A continuación, se presenta la tabla de muestra de la asignación del número de curva para la sub cuenca SBC1 (código asignado por el grupo de investigación); el grupo hidrológico se obtuvo en función de la descripción de drenaje de cada tipo de suelo para este trabajo, esto debido a confusión en la nomenclatura y descripción en los datos proporcionados, pero obteniéndose buenos resultados siguiendo este método. Además, el CN (III) calculado es el número perteneciente a un suelo saturado el cual se calcula con la siguiente fórmula.

$$CN (III) = \frac{23 * CN(II)}{10 + 0.13 * CN(II)} \quad \text{(Ecuación 3.13)}$$

CUENCA SBC1						
USO DE SUELO	TIPO DE SUELO	GRUPO HID.	ÁREA (KM <sup>2</sup> )	CN	CN(III)	AREA*CN(III) (KM <sup>2</sup> )
BOSQUE DE GALERIA	LITOSOLES Y REGOSOLES	B	0.317525	58	76.05	24.15
	REGOSOLES	B	0.492913	58	76.05	37.49
	REGOSOLES Y GRAN GRUPO LATOSOL PARDO	C	0.140101	71	84.92	11,90
CAFÉ	LITOSOLES	B	0.079401	55	73.76	5.86
	LITOSOLES Y REGOSOLES	B	3.83317	55	73.76	282.74
	REGOSOL, LATOSOL PARDO FORESTAL Y LITOSOL.	B	0.649472	55	73.76	47.91
	REGOSOLES	B	7.66726	55	73.76	565.54
	REGOSOLES Y GRAN GRUPO LATOSOL PARDO	C	3.891967	70	84.29	328.07
CULTIVOS, PASTOS Y GRANOS BASICOS	LITOSOLES	B	0.000042	71	84.92	0.00
	LITOSOLES Y REGOSOLES	B	0.121586	71	84.92	10.33
	REGOSOL, LATOSOL PARDO FORESTAL Y LITOSOL.	B	0.019133	71	84.92	1.62
	REGOSOLES	B	2.201417	71	84.92	186.94
	REGOSOLES Y GRAN GRUPO LATOSOL PARDO	C	0.053055	78	89.08	4.73
PARQUE	REGOSOLES Y GRAN GRUPO LATOSOL PARDO	C	0.000179	79	89.64	0.02
	REGOSOLES	B	0.353995	69	83.66	29.61
	URBANO	B	0.104851	85	92.87	9.74

CUENCA SBC1						
USO DE SUELO	TIPO DE SUELO	GRUPO HID.	ÁREA (KM <sup>2</sup> )	CN	CN(III)	AREA*CN(III) (KM <sup>2</sup> )
TEJIDO URBANO CONTINUO			16.49151	85	92.87	1531.63
			13.912492	85	92.87	1292.11
TEJIDO URBANO DISCONTINUO	URBANO	B	0.036479	75	87.34	3.19
			0.638978	75	87.34	55.81
			0.006263	75	87.34	0.55
			2.319078	75	87.34	202.55
			0.216017	75	87.34	18.87
VEGETACION ARBOREA	LITOSOLES	B	0.004778	55	73.76	0.35
	LITOSOLES Y REGOSOLES	B	0.204022	55	73.76	15.05
	REGOSOLES	B	0.457489	55	73.76	33.74
	REGOSOLES Y GRAN GRUPO LATOSOL PARDO	C	0.722237	70	84.29	60.88
VEGETACION HERBACEA	LITOSOLES Y REGOSOLES	B	0.014231	61	78.25	1.11
	REGOSOLES	B	0.13597	61	78.25	10.64
	REGOSOLES Y GRAN GRUPO LATOSOL PARDO	C	0.320087	74	86.75	27.77
COMERCIO	REGOSOLES Y GRAN GRUPO LATOSOL PARDO	C	0.350977	94	97.30	34.15
ZONA INDUSTRIAL	LITOSOLES Y REGOSOLES	B	0.422651	88	94.40	39.90
	REGOSOLES	B	0.087442	88	94.40	8.25
	REGOSOLES Y GRAN GRUPO LATOSOL PARDO	C	1.061445	91	95.88	101.77
Suma			57.33			4984.96

Tabla 3-10. Tabla de asignación de número de curva SBC1. Fuente: Elaboración propia

SUBCUENCA SCB2						
USO DE SUELO	TIPO DE SUELO	GRUPO HID.	AREA (KM <sup>2</sup> )	CN	CN (III)	AREA*CN(III) (KM <sup>2</sup> )
ARBOLES FRUTALES	REGOSOLES Y GRAN GRUPO LATOSOL PARDO	C	0.000477	70	84.29	0.04
BOSQUE DE GALERIA	LITOSOLES Y REGOSOLES	B	0.000017	58	76.05	0.00
	REGOSOLES	B	0.247878	58	76.05	18.85
CAFÉ	LITOSOLES Y REGOSOLES	B	0.090175	55	73.76	6.65
	LITOSOLES Y LATOSOLES ARCILLO ROJIZOS.	C	0.031396	70	84.29	2.65
	REGOSOLES	B	6.31985	55	73.76	466.16
	REGOSOLES Y GRAN GRUPO LATOSOL PARDO	C	0.400125	70	84.29	33.73
CULTIVO, PASTO Y GRANOS BASICOS	LITOSOLES Y LATOSOLES ARCILLO ROJIZOS.	C	0.234701	78	89.08	20.91
	REGOSOLES	B	0.285473	71	84.92	24.24
	REGOSOLES Y GRAN GRUPO LATOSOL PARDO	C	0.008506	78	89.08	0.76
BOSQUE MONOESPECIFICO	LITOSOLES Y REGOSOLES	B	0.023537	55	73.76	1.74
	REGOSOLES	B	0.322456	55	73.76	23.78
TEJIDO URBANO CONTINUO	URBANO	B	0.192722	85	92.87	17.90
			1.156159	85	92.87	107.38
			6.418304	85	92.87	596.09
			1.218175	85	92.87	113.14
TEJIDO URBANO	URBANO	B	0.012604	75	87.34	1.10
			0.043317	75	87.34	3.78

SUBCUENCA SCB2						
USO DE SUELO	TIPO DE SUELO	GRUPO HID.	AREA (KM <sup>2</sup> )	CN	CN (III)	AREA*CN(III) (KM <sup>2</sup> )
DISCONTINUO			1.346786	75	87.34	117.63
			0.372748	75	87.34	32.56
VEGETACION ARBOREA	LITOSOLES Y LATOSOLES ARCILLO ROJIZOS.	C	0.802373	70	84.29	67.63
	LITOSOLES Y REGOSOLES	B	0.526179	55	73.76	38.81
	REGOSOLES	B	1.85387	55	73.76	136.74
	REGOSOLES Y GRAN GRUPO LATOSOL PARDO	C	0.115963	70	84.29	9.77
VEGETACION HERBACEA	LITOSOLES Y REGOSOLES	B	0.239616	61	78.25	18.75
	REGOSOLES	B	0.358402	61	78.25	28.04
	REGOSOLES Y GRAN GRUPO LATOSOL PARDO	C	0.006894	79	89.64	0.62
ZONA INSUSTRIALES Y LOGISTICA	REGOSOLES	B	0.223618	88	94.40	21.11
	REGOSOLES Y GRAN GRUPO LATOSOL PARDO	C	0,010507	91	95.88	1.01
	LITOSOLES Y LATOSOLES ARCILLO ROJIZOS.	C	0,011212	91	95.88	1.07
Suma			22.87404			1912.65

Tabla 3-11. Tabla de asignación de número de curva SBC2. Fuente: Elaboración propia

SUBCUENCA SCB3						
USO DE SUELO	TIPO DE SUELO	GRUPO HID.	AREA (KM <sup>2</sup> )	CN	CN (III)	AREA*CN (III) (KM <sup>2</sup> )
BOSQUE DE GALERIA	REGOSOLES	B	1.483896	58	76.05	112.86
CAFÉ	REGOSOLES	B	0.050924	55	73.76	3.76
CULTIVO PASTO Y GRANOS BASICOS	LITOSOLES	B	0.068568	71	84.92	5.82
	LITOSOLES Y REGOSOLES	B	0.009403	71	84.92	0.80
	REGOSOLES	B	3.091636	71	84.92	262.54
INSTITUCIONAL	REGOSOLES	B	0.168851	85	92.87	15.68
BOSQUE MONOESPECIFICO	REGOSOLES	B	0.016123	55	73.76	1.19
TEJIDO URBANO CONTINUO	URBANO	B	0.378024	85	92.87	35.11
			14.600121	85	92.87	1355.97
TEJIDO URBANO DISCONTINUO	URBANO	B	0.024411	75	87.34	2.13
			7.377835	75	87.34	644.39
VEGETACION ARBOREA	LITOSOLES	B	0.040364	55	73.76	2.98
	LITOSOLES Y REGOSOLES	B	0.065251	55	73.76	4.81
	REGOSOLES	B	16.182593	55	73.76	1193.64
VEGETACION HERBACEA	LITOSOLES Y REGOSOLES	B	0.015626	61	78.25	1.22
	REGOSOLES	B	1.235771	61	78.25	96.70
ZONAS COMERCIALES	LITOSOLES Y REGOSOLES	B	0.057143	92	96.36	5.51
	REGOSOLES	B	0.198062	92	96.36	19.08
ZONA INDUSTRIALES Y LOGISTICA	LITOSOLES Y REGOSOLES	B	0.093424	88	94.40	8.82
	REGOSOLES	B	1.395133	88	94.40	131.70
<b>Suma</b>			<b>46.553159</b>			<b>3904.72</b>

Tabla 3-12: Tabla de asignación de número de curva SBC3. Fuente: Elaboración propia.

SUBCUENCA SCB4						
USO DE SUELO	TIPO DE SUELO	GRUPO HID.	AREA (KM <sup>2</sup> )	CN	CN (III)	AREA*CN (III) (KM <sup>2</sup> )
BOSQUE DE GALERIA	REGOSOL, LATOSOL PARDO FORESTAL Y LITOSOL.	B	0.121972	58	76.05	9.28
	REGOSOLES	B	2.994978	58	76.05	227.78
CAFÉ	REGOSOL, LATOSOL PARDO FORESTAL Y LITOSOL.	B	0.936931	55	73.76	69.11
	REGOSOLES	B	1.50416	55	73.76	110.95
CULTIVO, PASTO Y GRANOS BASICOS	REGOSOL, LATOSOL PARDO FORESTAL Y LITOSOL.	B	0.545803	71	84.92	46.35
	REGOSOLES	B	1.722284	71	84.92	146.26
PARQUE RECREATIVO	REGOSOLES	B	0.102228	69	83.66	8.55
TEJIDO URBANO CONTINUO	REGOSOLES	B	24.576626	85	92.87	2282.53
TEJIDO URBANO DISCONTINUO	REGOSOL, LATOSOL PARDO FORESTAL Y LITOSOL.	B	0.009274	75	87.34	0.81
	REGOSOLES	B	2.562298	75	87.34	223.80
VEGETACION ARBOREA	REGOSOL, LATOSOL PARDO FORESTAL Y LITOSOL.	B	0.126984	66	81.70	10.37
	REGOSOLES	B	3.620495	66	81.70	295.80
VEGETACION HERBACEA	REGOSOLES	B	1.337006	61	78.25	104.62

SUBCUENCA SCB4						
USO DE SUELO	TIPO DE SUELO	GRUPO HID.	AREA (KM <sup>2</sup> )	CN	CN (III)	AREA*CN (III) (KM <sup>2</sup> )
ZONAS COMERCIALES	REGOSOLES	B	0.233398	92	96.36	22.49
ZONAS INDUSTRIALES Y LOGISTICAS	REGOSOLES	B	0.117871	88	94.40	11.123
SUMA			40.512308			3569.82

Tabla 3-13: Tabla de asignación de número de curva SBC4. Fuente: Elaboración propia.

SUBCUENCA SCB5						
USO DE SUELO	TIPO DE SUELO	GRUPO HID.	AREA (KM <sup>2</sup> )	CN	CN (III)	AREA*CN(III) (KM <sup>2</sup> )
BOSQUE DE GALERIA	REGOSOL, LATOSOL PARDO FORESTAL Y LITOSOL.	B	0.020438	58	76.05	1,55
	REGOSOLES	B	1.502498	58	76.05	114.27
CAFÉ	REGOSOL, LATOSOL PARDO FORESTAL Y LITOSOL.	B	0.14087	55	73.76	10.39
	REGOSOLES	B	7.689116	55	73.76	567.16
CAÑA DE AZUCAR	REGOSOLES	B	0.1115	81	90.74	10.12
CULTIVO, PASTOS Y GRANOS BASICOS	REGOSOLES	B	1.335668	71	84.92	113.42
TEJIDO URBANO CONTINUO	REGOSOLES	B	3.732595	85	92.87	346.66
TEJIDO URBANO	REGOSOLES	B	5.344293	75	87.34	466.78

SUBCUENCA SCB5						
USO DE SUELO	TIPO DE SUELO	GRUPO HID.	AREA (KM <sup>2</sup> )	CN	CN (III)	AREA*CN(III) (KM <sup>2</sup> )
DISCONTINUO						
VEGETACION ARBOREA	REGOSOLES	B	1.428194	55	73.76	105.34
VEGETACION HERBACEA	REGOSOLES	B	1.933259	61	78.25	151.28
Suma			23.238431			1886.98

Tabla 3-14: Tabla de asignación de número de curva SBC5. Fuente: Elaboración propia.

SUBCUENCA SCB6						
USO DE SUELO	TIPO DE SUELO	GRUPO HID.	AREA (KM <sup>2</sup> )	CN	CN(III)	AREA*CN(III) (KM <sup>2</sup> )
BOSQUE DE GALERIA	REGOSOLES	B	0.572185	58	76.05	43.52
CAFÉ	REGOSOLES	B	1.104215	55	73.76	81.45
CAÑA DE AZUCAR	REGOSOLES	B	2.097642	81	90.74	190.35
CULTIVO PASTO Y GRANOS BASICOS	REGOSOLES	B	0.112619	71	84.92	9.56
TEJIDO URBANO CONTINUO	REGOSOLES	B	2.230612	85	92.87	207.17
TEJIDO URBANO DISCONTINUO	REGOSOLES	B	0.522751	75	87.34	45,66

SUBCUENCA SCB6						
USO DE SUELO	TIPO DE SUELO	GRUPO HID.	AREA (KM <sup>2</sup> )	CN	CN(III)	AREA*CN(III) (KM <sup>2</sup> )
VEGETACION HERBACEA	REGOSOLES	B	0.28376	61	78.25	22.20
ZONA INDUSTRIAL Y LOGISTICA	REGOSOLES	B	0.107769	88	94.40	10.17
Suma			7.031553			610.08

Tabla 3-15: Tabla de asignación de número de curva SBC6. Fuente: Elaboración propia.

SUBCUENCA SCB7						
USO DE SUELO	TIPO DE SUELO	GRUPO HID.	AREA (KM <sup>2</sup> )	CN	CN(III)	AREA*CN(III) (KM <sup>2</sup> )
ARBOLES FRUTALES	REGOSOLES	B	0.00509	55	73.76	0.38
BOSQUE DE GALERIA	REGOSOL, LATOSOL PARDO FORESTAL Y LITOSOL.	B	0.015885	58	76.05	1.21
	REGOSOLES	B	2.416052	58	76.05	183.75
BOTADERO Y RELL	REGOSOLES	B	0.264839	71	84.92	22.49
CAFÉ	REGOSOL, LATOSOL PARDO FORESTAL Y LITOSOL.	B	0.251913	55	73.76	18.58
	REGOSOLES	B	8.236014	55	73.76	607.50
CAÑA DE AZUCAR	REGOSOLES	B	5.142497	81	90.75	466.66
CULTIVO, PASTOS Y GRANOS BASICOS	LITOSOLES Y LATOSOLES ARCILLO ROJIZOS.	C	1.008864	71	84.92	85.67
	REGOSOLES	B	0.243592	71	84.92	20.69

SUBCUENCA SCB7						
USO DE SUELO	TIPO DE SUELO	GRUPO HID.	AREA (KM <sup>2</sup> )	CN	CN(III)	AREA*CN(III) (KM <sup>2</sup> )
TEJIDO URBANO CONTINUO	URBANO	B	0.137022	85	92.87	12.73
			1.284122	85	92.87	119.26
TEJIDO URBANO DISCONTINUO	URBANO	B	1.113672	75	87.34	97.27
				75	87.34	0.00
VEGETACION ARBOREA	LITOSOLES Y LATOSOLES ARCILLO ROJIZOS.	C	0.278468	70	84.29	23.47
	REGOSOLES	B	0.558527	55	73.76	41.20
VEGETACION HERBACEA	REGOSOLES	B	0.817708	61	78.25	63.98
				61	78.25	0.00
ZONA INDUSTRIALES Y LOGISTICA	REGOSOLES	B	0.663005	88	94.40	62.59
				88	94.40	0.00
Suma			22.43727			1827.42

Tabla 3-16: Tabla de asignación de número de curva SBC7. Fuente: Elaboración propia.

SUBCUENCA SCB8						
USO DE SUELO	TIPO DE SUELO	GRUPO HID.	AREA (KM <sup>2</sup> )	CN	CN (III)	AREA*CN(III) (KM <sup>2</sup> )
BOSQUE DE GALERIA	REGOSOLES	B	0.08852808	58	76.05	6.73
CULTIVO, PASTOS Y GRANOS BASICOS	LITOSOLES Y LATOSOLES ARCILLO ROJIZOS.	C	1.58365414	78	89.08	141.07
	REGOSOLES	B	0.23799386	71	84.92	20.21
BOSQUE MONOESPECIFICO	REGOSOLES	B	0.1665033	55	89.08	0.43
TEJIDO URBANO CONTINUO	URBANO	B	0.00461517	85	92.87	0.43
		B	0.58440915	85	92.87	54.28

SUBCUENCA SCB8						
USO DE SUELO	TIPO DE SUELO	GRUPO HID.	AREA (KM <sup>2</sup> )	CN	CN (III)	AREA*CN(III) (KM <sup>2</sup> )
TEJIDO URBANO DISCONTINUO	URBANO	B	0.00408394	75	87.34	0.36
		B	0.36114121	75	87.34	31.54
VEGETACION ARBOREA	LITOSOLES Y LATOSOLES ARCILLO ROJIZOS.	C	0.07664252	70	84.29	6.46
VEGETACION HERBACEA	REGOSOLES	B	0.36535852	61	78.25	28.59
ZONA DE EXTRACCION DE ARENA	LITOSOLES Y LATOSOLES ARCILLO ROJIZOS.	C	0.00631471	79	89.64	0.57
	REGOSOLES	B	0.05170022	69	83.66	4.33
Suma			3.53094482			294.98

Tabla 3-17: Tabla de asignación de número de curva SBC8. Fuente: Elaboración propia.

SUBCUENCA SCB9						
USO DE SUELO	TIPO DE SUELO	GRUPO HID.	AREA (KM <sup>2</sup> )	CN	CN(III)	AREA*CN (III) (km <sup>2</sup> )
BOSQUE DE GALERIA	LITOSOLES Y REGOSOLES	B	0.054458	58	76.05	4.14
	REGOSOLES	B	0.035189	58	76.05	2.68
CAÑA DE AZUCAR	LITOSOLES Y REGOSOLES	B	1.180949	81	90.75	107.17
	REGOSOLES	B	0.065952	81	90.75	5.98
CULTIVO, PASTO Y GRANOS BASICOS	LITOSOLES Y LATOSOLES ARCILLO ROJIZOS.	C	1.005095	78	89.08	89.53
	LITOSOLES Y REGOSOLES	B	0.633895	71	84.92	53.83
	REGOSOLES	B	0.449537	71	84.92	38.17
TEJIDO URBANO CONTINUO	LITOSOLES Y REGOSOLES	B	0.061157	85	92.87	5.68
	REGOSOLES	B	0.20897	85	92.87	19.41

SUBCUENCA SCB9						
USO DE SUELO	TIPO DE SUELO	GRUPO HID.	AREA (KM2)	CN	CN(III)	AREA*CN (III) (km2)
TEJIDO URBANO DISCONTINUO	LITOSOLES Y REGOSOLES	B	0.164964	75	87.34	14.41
	REGOSOLES	B	0.326154	75	87.34	28.49
VEGETACION ARBOREA	LITOSOLES Y LATOSOLES ARCILLO ROJIZOS.	C	0.499749	70	84.29	42.13
VEGETACION HERBACEA	LITOSOLES Y LATOSOLES ARCILLO ROJIZOS.	C	0.090099	74	86.75	7.82
	LITOSOLES Y REGOSOLES	B	0.292984	61	78.25	22.93
	REGOSOLES	B	0.061645	61	78.25	4.82
Suma			5.130797			447.18

Tabla 3-18: Tabla de asignación de número de curva SBC9. Fuente: Elaboración propia.

SUBCUENCA SCB10						
USO DE SUELO	TIPO DE SUELO	GRUPO HID.	AREA (KM <sup>2</sup> )	CN	CN (III)	AREA*CN (III) (KM <sup>2</sup> )
ARBOLES FRUTALES	REGOSOLES	B	0.016442	55	73.76	1.21
BOSQUE DE GALERIA	LITOSOLES	B	0.005590	58	76.05	0.43
	LITOSOLES Y LATOSOLES ARCILLO ROJIZOS.	C	0.043110	71	84.92	3.66
	REGOSOL, LATOSOL PARDO FORESTAL Y LITOSOL.	B	0.067491	58	76.05	5.13
	REGOSOLES	B	2.006047	58	76.05	152.57
	LITOSOLES Y REGOSOLES	B	0.234781	58	76.05	17.86

SUBCUENCA SCB10						
USO DE SUELO	TIPO DE SUELO	GRUPO HID.	AREA (KM <sup>2</sup> )	CN	CN (III)	AREA*CN (III) (KM <sup>2</sup> )
BOTADERO Y RELLENO SANITARIO	LITOSOLES Y LATOSOLES ARCILLO ROJIZOS.	C	0.017921	79	89.64	1.61
	LITOSOLES Y REGOSOLES	B	0.357430	69	83.66	29.90
	REGOSOLES	B	0.080290	59	76.80	6.17
CAFÉ	LITOSOLES	B	0,070800	55	73.76	5.22
	LITOSOLES Y REGOSOLES	B	0.612710	55	73.76	45.19
	REGOSOL, LATOSOL PARDO FORESTAL Y LITOSOL.	B	1.535272	55	73.76	113.24
	REGOSOLES	B	11.546673	55	73.76	851.69
CAÑA DE AZUCAR	LITOSOLES	B	0.024672	81	90.75	2.24
	LITOSOLES Y LATOSOLES ARCILLO ROJIZOS.	C	0.592199	88	94.40	55.91
	LITOSOLES Y REGOSOLES	B	2.227673	81	90.75	202.15
	REGOSOLES	B	13.386516	81	90.75	1214.76
CULTIVO, PASTOS Y GRANOS BASICOS	LITOSOLES Y LATOSOLES ARCILLO ROJIZOS.	C	3.933087	78	89.08	350.35
	LITOSOLES Y REGOSOLES	B	0.060228	71	84.92	5.11
	REGOSOLES	B	1.717822	71	84.92	145.88
TEJIDO URBANO CONTINUO	URBANO	B	1.093033	85	92.87	101.51
		B	0.139752	85	92.87	12.98
TEJIDO URBANO DISCONTINUO	URBANO	B	0.017795	75	87.34	1.55
		B	0.533104	75	87.34	46.56
		B	0.561359	75	87.34	49.03
		B	0.007610	75	87.34	0.66
		B	4.145766	75	87.34	362.10
	LITOSOLES	B	0.014346	55	73.76	1.06

SUBCUENCA SCB10						
USO DE SUELO	TIPO DE SUELO	GRUPO HID.	AREA (KM <sup>2</sup> )	CN	CN (III)	AREA*CN (III) (KM <sup>2</sup> )
VEGETACION ARBOREA	LITOSOLES Y LATOSOLES ARCILLO ROJIZOS.	C	2.258726	70	84.29	190.40
	LITOSOLES Y REGOSOLES	B	0.123238	55	73.76	9.09
	REGOSOLES	B	0.362862	55	73.76	26.77
VEGETACION HERBACEA	LITOSOLES Y LATOSOLES ARCILLO ROJIZOS.	C	0.211786	74	86.75	18.37
	LITOSOLES Y REGOSOLES	B	0.068108	61	78.25	5.33
	REGOSOLES	B	1.52844	61	78.25	119.60
ZONA INDUSTRIAL	REGOSOLES	B	0.263133	88	94.40	24.84
<b>SUMA</b>			<b>49.86581</b>			<b>4180.13</b>

**Tabla 3-19: Tabla de asignación de número de curva SBC10. Fuente: Elaboración propia.**

Como paso siguiente, con la suma del área de cada sub cuenca y la suma total del producto del número de curva para una condición saturada y el área de un específico tipo de suelo, se realiza una ponderación a de los resultados:

SUBCUENCA	CN
SBC1	86.95
SBC2	83.62
SBC3	83.88
SBC4	88.12
SBC5	81.2
SBC6	86.76
SBC7	81.45

SUBCUENCA	CN
SBC8	83.54
SBC9	87.16
SBC10	83.83

**Tabla 3-20: Número de curva ponderado. Fuente: Elaboración propia.**

### 3.13 INFORMACIÓN PLUVIOMÉTRICA

Una parte importante en la modelación es la identificación de las estaciones pluviométricas que se utilizarán para la obtención de datos de registro de lluvia de tormentas particulares, en donde la calidad y cantidad en sus registros intervienen directamente en los resultados.

Estos datos han sido proporcionados por el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales MARN; a través, del Observatorio de Amenazas y Fenómenos Naturales.; este Observatorio realiza la observación sistemática de amenazas relacionadas con fenómenos naturales del tipo meteorológico, hidrológico, geológico y oceanográfico. También tiene por objeto vigilar, pronosticar y alertar de los fenómenos atmosféricos y oceanográficos destructivos que puedan afectar al país y a la región; así mismo, efectúa la investigación de dichos eventos para la alerta temprana, la reducción de riesgos y la planificación ambiental territorial.

Los registros de lluvia son un elemento básico en la realización de cualquier estudio hídrico-hidrológico de un país, por lo que la importancia de una buena y

densa red de monitoreo es esencial y muy influyente en la calidad de los trabajos de investigación sobre recursos hidráulicos y comportamiento de los mismos.

El Observatorio Ambiental de Amenazas y Fenómenos Naturales, es la entidad gubernamental en el ámbito nacional, reconocida por la Organización Meteorológica Mundial (OMM), para realizar el monitoreo y la vigilancia de las situaciones atmosféricas en todo el país a través de la Red Nacional de Estaciones Meteorológicas del MARN; así como, las condiciones regionales o de escala Sinóptica (observación que se efectúa cada hora y se remite a un centro recolector de datos, mediante mensajes codificados por la vía de comunicación más rápida) y planetaria, para evaluar posibles sistemas atmosféricos con potencial de afectar el país, tales como: Tormentas Tropicales, Huracanes y fenómenos como El Niño y La Niña<sup>46</sup>.

Este monitoreo consiste en obtener la información que genera cada una de las 31 estaciones meteorológicas telemétricas que incluyen a 5 estaciones sinópticas con una cobertura de 100 km<sup>2</sup>cada una, 25 estaciones climatológicas convencionales y 34 estaciones pluviométricas telemétricas (éstas últimas registran sólo las precipitaciones), incluyéndose 90 pluviómetros convencionales

---

<sup>46</sup> DOA/MARN (s. f). Dirección General del Observatorio de Amenazas y Fenómenos Naturales del MARN, San Salvador, El Salvador.

<http://www.snet.gob.sv/ver/snet/areas+de+snet/servicio+meteorologico/>.

cuya información es transmitida por observadores locales voluntarios al Centro de Pronóstico Meteorológico (CPM), donde son ingresados los datos al Sistema de transmisión y recepción de información Satelital, conocido como STAR 4, y enviados cada hora, con el Sistema Satelital al Centro Mundial de Meteorología, con sede en Washington, Estados Unidos de América; para la alimentación de la base mundial de datos, los cuales son procesados y distribuidos por canales exclusivos a todos los usuarios, incluyendo nuestro país.

Los productos son emitidos en formatos diferentes, tales como: mapas numéricos meteorológicos de variables como: humedad, viento, precipitación<sup>47</sup>.

Para la selección de las estaciones y el evento lluvioso con el que se trabajará, se han tomado en cuenta factores importantes, como se muestra:

- Registro continuo de las estaciones, es decir que debe haber una falta de datos nulo o casi nulo.
- Estaciones que tengan el registro del evento a evaluar.
- Estaciones con registro de al menos 10 años continuos.

---

<sup>47</sup> SNET, (s. f). Servicio Meteorológico Nacional. Áreas de SNET. San Salvador, El Salvador. <http://www.snet.gob.sv/ver/snet/areas+de+snet/servicio+metorologico/>.

De esta manera según los factores antes mencionado, se seleccionaron 3 estaciones para el análisis meteorológico; escogiéndose por su cercanía al área de la cuenca del río Acelhuate en la parte media y alta, además dichas estaciones pluviométricas también cuentan con registros uniformes y completos entre las fechas correspondientes a varios eventos meteorológicos que serán de gran ayuda para conocer el comportamiento hidrológico e hidráulico de la cuenca.

Las estaciones escogidas para el presente estudio son:

Estación Santa Tecla o Procafé, estación Ilopango y estación Belloso. Estas estaciones se caracterizan por tener un periodo de registro de más de 10 años con funcionalidad constante, con datos registrados cada 15 minutos.

Siempre con ayuda de la DOA/MARN, se obtuvieron datos de lluvia de las estaciones que se encuentra dentro y en los alrededores de la cuenca del río Acelhuate.

En los siguientes capítulos se verán las áreas influenciadas y la distribución de cada estación, en la Tabla 3-21, muestra las coordenadas y códigos de las estaciones utilizadas en esta investigación.

ESTACIÓN	CÓDIGO	COORDENADAS	
		X	Y
Ilopango, San Salvador, Municipio SAN SALVADOR	S10	487199,779	286518,19
Belloso, San Salvador, Municipio SAN SALVADOR	28	479338,895	285944,261
Procafé, La Libertad, Municipio LA LIBERTAD	L48	468809,176	285243,01

Tabla 3-21: Coordenadas de estaciones pluviométricas. Fuente: elaboración propia.

### **La Precipitación:**

La precipitación es uno de los factores que se deben de analizar para definir si es, o no factible realizar obras de captación. Los datos importantes se obtienen de las estaciones meteorológicas y pluviométricas. Para elegir el evento lluvioso a utilizarse en el análisis hidrológico e hidráulico, debe de ser registrado por las estaciones elegidas, teniendo en cuenta que éste debe cumplir las características siguientes:

**La Frecuencia de las Lluvias:** Es la periodicidad media estadística en años en que pueden presentarse eventos de características similares en intensidad y duración.

**La Duración y la Intensidad de las Lluvias:**

Las precipitaciones se dan durante un periodo de tiempo dentro de un área determinada. El tiempo de desarrollo de este evento climatológico puede oscilar entre unos cuantos minutos a varios días. A este tiempo de desarrollo de dicho evento se le conoce como: **La duración de las lluvias.**

**Intensidad de la lluvia:** Se define como la cantidad de agua que cae por unidad de tiempo en un lugar determinado. Esta característica se enlaza directamente con la anterior (Duración de la lluvia), debido a que dentro un mismo tiempo de retorno, si aumenta la duración de lluvia, se disminuye su intensidad.

Ambos términos son importantes ya que la escorrentía ocurre sólo después de exceder un cierto límite, o la intensidad de una lluvia excede la tasa de infiltración, o la intensidad y la duración de una lluvia exceden la capacidad de almacenaje de agua del suelo. Este límite depende del suelo.

El evento lluvioso con el que se desarrollará la investigación, es la lluvia ocurrida durante la Tormenta Tropical IDA, el cual será descrito en el Capítulo 4 de la presente investigación.

**CAPITULO 4- MODELACIÓN  
HIDROLÓGICA DE LA CUENCA  
MEDIA Y ALTA DEL RIO  
ACELHUATE**

#### 4.1 INTRODUCCIÓN

La modelación hidrológica es una herramienta de gran importancia para el estudio de crecidas en cualquier punto de un río, incluyendo el análisis de las inundaciones; además, es posible manejar hipótesis muy realistas o previsibles que ofrezcan cierto grado de confianza para la toma de decisiones, ya sea en el ordenamiento del territorio en torno a los ríos o para exigir criterios de diseño de obras e infraestructuras capaces de soportar y funcionar adecuadamente en situaciones de emergencia.(Dueñas 1997).

En el presente capítulo se realiza la calibración para modelación hidrológica de la cuenca alta y media del río Acelhuate, para lo cual fue necesario apoyarse en los datos de estaciones meteorológicas y pluviométricas dentro de la zona de estudio, principalmente las que registraron eventos lluviosos que provocaron daños dentro de esta área; además, se utilizó como apoyo para la simulación, el programa de software libre HEC-HMS.

Los datos que serán utilizados fueron obtenidos en el Capítulo 3; además de los datos pluviométricos entregados por parte del MARN, para efectuar la calibración y simulación de crecidas en la cuenca; obteniendo como resultados valores de caudal en tres escenarios definidos bajo la normativa vigente del Esquema Director del AMSS, establecido por la OPAMSS

## 4.2 GENERALIDADES DEL PROGRAMA HEC-HMS

El Sistema de Modelado Hidrológico está diseñado para simular procesos de precipitación-escorrentía de sistemas de cuencas dendríticas. Los hidrogramas producidos por el programa son utilizados directamente o en conjunto con otros softwares para estudios relacionados con el agua, disponibilidad, drenaje urbano, previsión de flujos, urbanización futura, impacto, diseño, reducción de daños por inundaciones, planicie aluvial, regulación, y operación de sistemas.<sup>48</sup>

Se puede calcular el hidrograma de escorrentía de una cuenca o varias subcuencas a partir de lluvias de diseño para diferentes periodos de retorno o de un evento en particular.

La interfaz de usuario consiste en una barra de menú, una barra de herramientas y cuatro principales paneles. Empezando de la parte superior izquierda en la figura y moviendo al contrario al sentido el reloj, estos espacios de interfaz son referidos como: El explorador de cuenca, editor de componentes, espacio de mensajes y el escritorio<sup>49</sup>.

---

<sup>48</sup> Hydrologic Modeling System HEC-HMS User's Manual, Bill S., Mike B., Tom B., Matt F. & Greg K. (2018), 1ª Edición. Página 1.

<sup>49</sup> Hydrologic Modeling System HEC HMS, J Fleming. (2003), 1ª Edición. Página6.

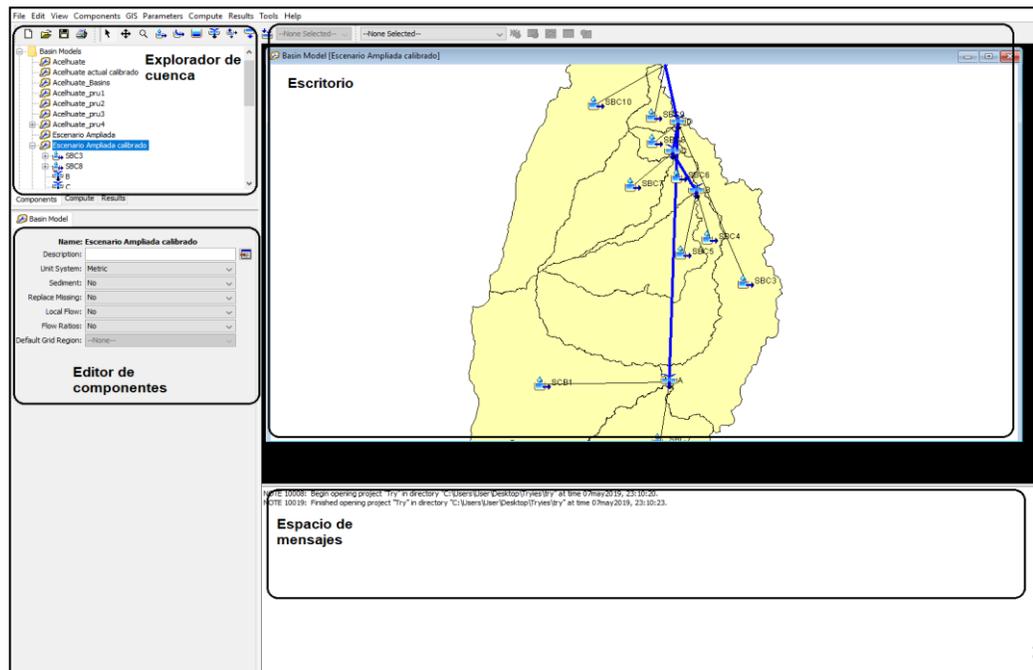


Ilustración 4-1: Interfaz de programa HEC-HMS. Fuente: Elaboración propia.

### Explorador de Cuenca.

El explorador de cuenca fue desarrollado para proveer de un acceso rápido a todos los componentes en un proyecto de HEC HMS. Por ejemplo, un usuario puede fácilmente navegar del modelo físico de la cuenca a la información de precipitación y luego al modelo meteorológico sin usar un menú aparte o alguna ventana adicional. El explorador de cuenca está dividido en tres partes: **Los componentes, El Cómputo y Los Resultados** además organiza el modelo dentro de carpetas individuales, los cuales cuando son seleccionados se abren y muestran su contenido.

### **Editor de Componentes.**

Cuando un componente o subcomponente en el explorador de cuenca es activado (simplemente seleccionando un componente en el explorador), un editor de componentes específico se abrirá. Todos los datos que pueden ser especificados en los componentes del modelo y serán introducidos en el editor de componentes. Cualquier dato requerido será indicado con un **asterisco rojo**. Por ejemplo, los parámetros para el método del SCS (Servicio de Conservación de Suelo o método de cálculo de número de curva), el dato de número de curva será de suma importancia y requerido para una correcta simulación y aparecerá con un asterisco rojo.

### **Espacio de Mensajes**

Notas, advertencias y errores son mostrados en el espacio de mensajes. Esos mensajes son de ayuda para identificar el porqué de un fallo de la simulación o el porqué de una acción requerida, como en el caso de que el ingresado de datos no está completado.

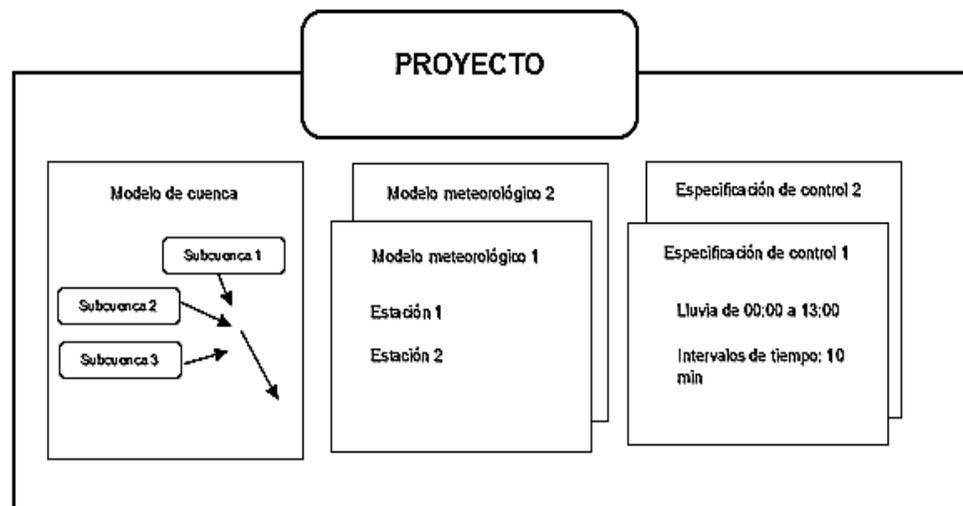
### **Escritorio**

En el escritorio se pueden presentar tablas de resultados, tablas de registros, gráficas, editores globales y el mapa de la cuenca. Los resultados no están confinados al área de escritorio, pero si el mapa de la cuenca como lo pueden ser los ríos, subcuencas, reservorios, etc. Estos elementos son añadidos desde la tabla de herramientas y usados para visualización de la cuenca.

### 4.3 COMPONENTES DEL PROGRAMA HEC HMS

El software HEC-HMS requiere de la introducción de componentes básicos para el funcionamiento adecuado del programa, tales componentes son: **Modelo de la Cuenca, Modelo Meteorológico, Especificaciones de Control y Datos de Serie de tiempo**. Para iniciar una modelación se debe de abrir como un **Proyecto nuevo**, en el cual dentro de ese proyecto se almacena muchos tipos de datos pertenecientes a la cuenca, como pueden ser los datos de área, tiempos, datos meteorológicos, etc. El programa crea una simulación uniendo de forma lógica los datos y las especificaciones de control. La simulación del proyecto brinda la información de cómo es la respuesta de la cuenca a una precipitación definida en puntos intermedios (subcuencas) y en el punto de salida.

La estructura básica de la modelación de la cuenca es la siguiente:



**Ilustración 4-2: Estructura básica de un proyecto en HEC-HMS. Fuente: Elaboración propia (Con base en información del documento HEC-HEMS Manual Elemental).**

#### 4.4 HERRAMIENTAS PARA EL MODELO DE UNA CUENCA EN PROGRAMA HEC-HMS

La representación física de una cuenca se realiza con un modelo de cuenca. Aquí se informa al programa de las distintas subcuencas y sus características, Los elementos hidrológicos están conectados en una red dendrítica para simular los procesos de escorrentía. Los elementos disponibles son: **Subcuenca, Tramo, Unión, Fuente, Salida, Reservorio, y Desviación.**

DESCRIPCIÓN DE ELEMENTOS HIDROLÓGICOS DE HEC-HMS		
ELEMENTO	DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO
Sub cuenca (Subbasin)	La cuenca por modelar se divide en diferentes subcuencas, esto sirve para la representación de cada una de ellas y para tener una representación de cómo está conformada la cuenca.	
Tramo (Reach)	Este elemento es utilizado para el traslado y conexión de flujo aguas abajo en el modelo de la cuenca.	
Unión (Junction)	Este elemento sirve para representar la suma de hidrogramas en un punto.	
Fuente (Source)	Si existe un aporte de caudal extra conocido se puede modelar mediante esta función.	
Salida (Sink)	Expresa la salida de caudal en un punto de la red, es decir el punto de salida de la cuenca	
Reservorio (Reservoir)	Para prevenir crecidas importantes en ciertos puntos de interés se deberá ubicar embalses de laminación; con esta función se modelan.	

DESCRIPCIÓN DE ELEMENTOS HIDROLÓGICOS DE HEC-HMS		
ELEMENTO	DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO
Desviación (Diversion)	Existen puntos de la red donde pueden existir estructuras hidráulicas como vertederos que extraen cierta cantidad de caudal.	

**Tabla 4-1: Herramientas de programa HEC-HMS. Fuente: elaboración propia con base a información de manual HEC.**

En este Capítulo, los datos a utilizar para la calibración del modelo hidrológico de la cuenca son: área de las subcuencas y tiempo de retardo de tramos, métodos de pérdida y transformación que se aplicara al modelaje del proyecto, etc. Los cuales servirán para la modelación y el análisis hidrológico posterior.

## 4.5 MODELO DE LA CUENCA DEL RIO ACELHUATE

### 4.5.1 SUB CUENCAS (SUBBASIN)

Como ya se ha mencionado, una cuenca se debe dividir en varias sub cuencas, esto con el objetivo de que el programa pueda hacer su análisis y a las sub cuencas involucradas, se les debe asignar sus respectivas características físicas en HEC-HMS; Para realizar esta división se utiliza el programa QGis usando la herramienta de extensión **GRASS** llamada **r.watersherd**, esta herramienta sirve para subdividir la cuenca e identificar las ramificaciones de sus ríos en formato raster, el cual posteriormente usando la herramienta **vectorizar** en QGis se transforman dicha capa en datos tipo vector (archivos shape) y como se vio anteriormente (en el Capítulo 3), con la asistencia de la calculadora de campos

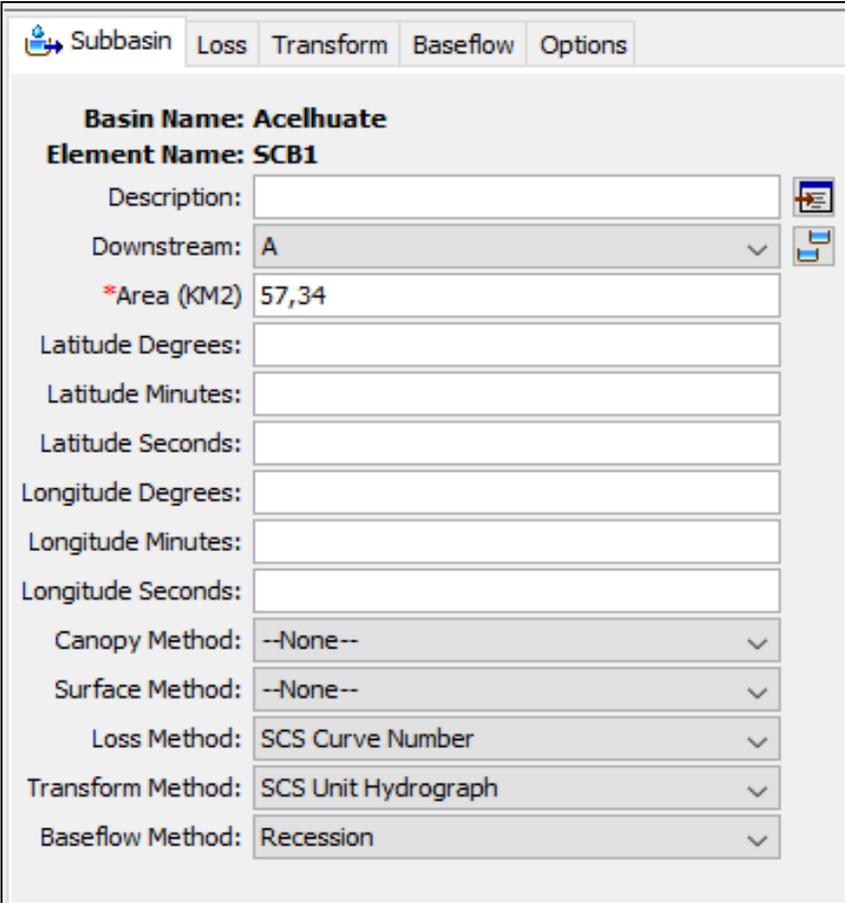
de QGis se calcula el área de cada sub cuenca. Los archivos shape resultantes se pueden usar como mapas **layer** (mapas de fondo). Estas capas se cargan el programa HEC-HMS para una mejor visualización del área de análisis.

El primer dato de entrada que el programa solicita es el área de cada subcuenca; este dato se calculó en QGis como se vio en el Capítulo anterior. El producto de la división de la cuenca resultó en 10 subcuencas, y para propósitos de correlatividad se le asignó una nomenclatura a cada de ellas, por ejemplo: SBC4, como se muestra en el mapa 4.1. A continuación se muestra una Tabla mostrando las áreas calculadas de las subcuencas en el área de estudio del río Acelhuate y una Tabla donde se visualizan las áreas de la cuenca.

<b>SUB CUENCA</b>	<b>ÁREA (km<sup>2</sup>)</b>
<b>SBC1</b>	57.34
<b>SBC2</b>	22.88
<b>SBC3</b>	46.57
<b>SBC4</b>	40.51
<b>SBC5</b>	23.24
<b>SBC6</b>	7.03
<b>SBC7</b>	22.49
<b>SBC8</b>	3.53
<b>SBC9</b>	5.13
<b>SBC10</b>	54.29

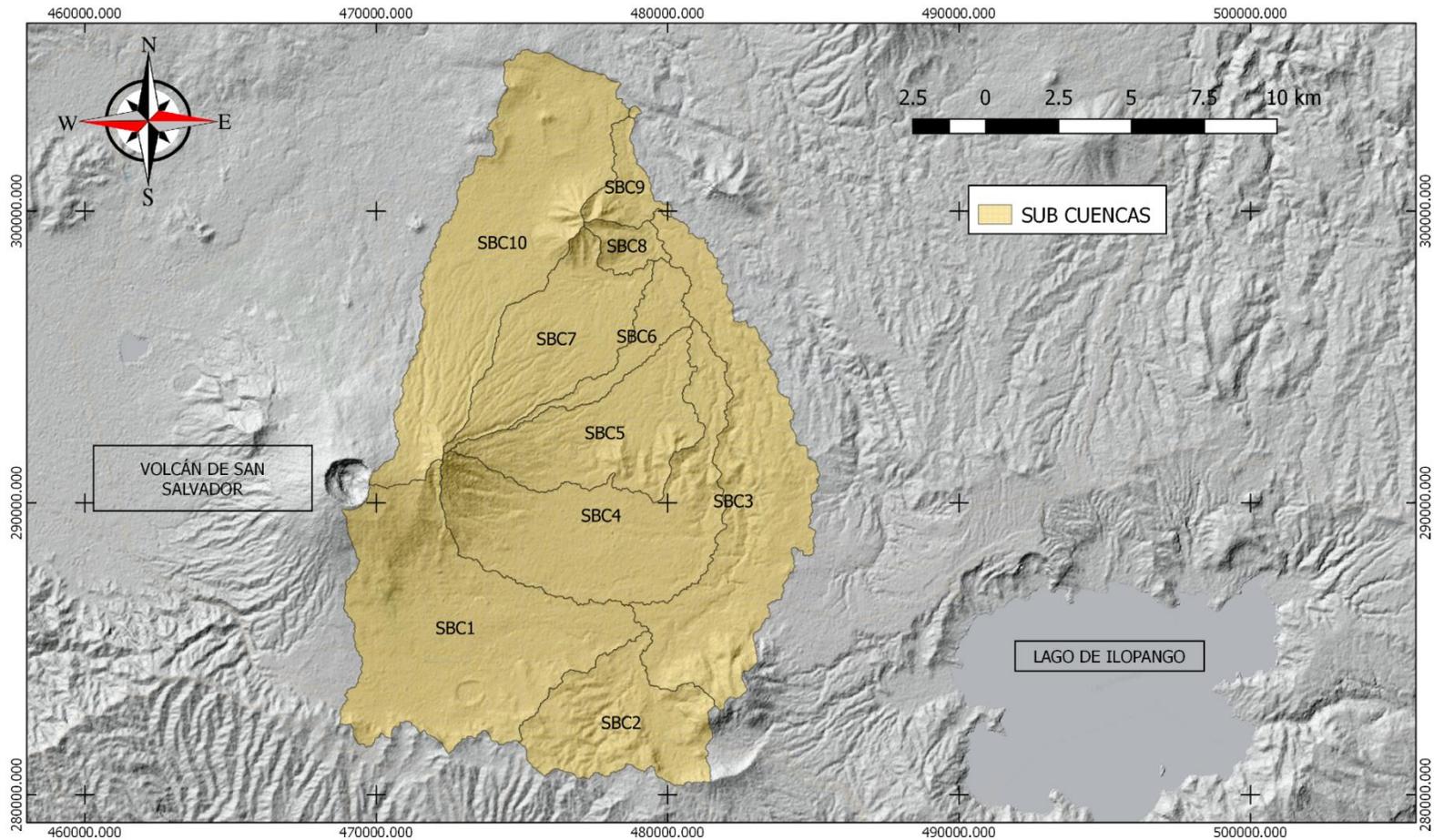
**Tabla 4-2: Área de las sub cuencas que conforman la cuenca del Rio Acelhuate. Fuente: elaboración propia**

La información acerca del área de las subcuencas es introducido en la zona de interfaz de **Editor de componentes**, al seleccionar la pestaña **Subbasin** se despliega un formulario en donde el área de subcuenca aparece como un dato obligatorio (se visualiza un asterisco rojo); Las unidades en que debe de introducirse el área es en kilómetros cuadrados y según la versión del programa con la que se cuente, y en este caso el separador de decimales será una coma (,).



Subbasin	
Basin Name:	Acelhuate
Element Name:	SCB1
Description:	<input type="text"/>
Downstream:	A
*Area (KM2)	57,34
Latitude Degrees:	<input type="text"/>
Latitude Minutes:	<input type="text"/>
Latitude Seconds:	<input type="text"/>
Longitude Degrees:	<input type="text"/>
Longitude Minutes:	<input type="text"/>
Longitude Seconds:	<input type="text"/>
Canopy Method:	--None--
Surface Method:	--None--
Loss Method:	SCS Curve Number
Transform Method:	SCS Unit Hydrograph
Baseflow Method:	Recession

Imagen 4-1: Editor de componentes. Fuente: elaboración propia.



PROYECCIONES DE LOS IMPACTOS HIDROLÓGICOS BASADOS EN EL PLAN DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL VIGENTE: ESQUEMA DIRECTOR, EN EL ÁREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR (AMSS)

NOMBRES:  
ESTRADA PONCE, JOSUÉ RODRIGO  
LÓPEZ RECINOS, LIDIA YANET

MAPA 4.1: MAPA DE SUB CUENCAS EN LA CUENCA DEL RIO ACELHUATE EN PARTE ALTA Y MEDIA

FUENTE: ELABORADO POR GRUPO DE TESIS

Como se mencionó anteriormente, para una mejor visualización espacial de las subcuencas, una capa de fondo puede agregarse al Modelo de la cuenca en el programa HEC HMS seleccionando la pestaña **View** luego **Background Maps o Map Layer**, se desplegará un formulario en el cual se debe de seleccionar la opción **Add**, esto solicitará la ubicación de los archivos que se desean cargar. Se debe recordar que el tipo de archivo debe ser uno tipo **Shape**, ya que esos ya están previamente referenciados geográficamente y ahorrará inconvenientes al tratar de cargar otros archivos.

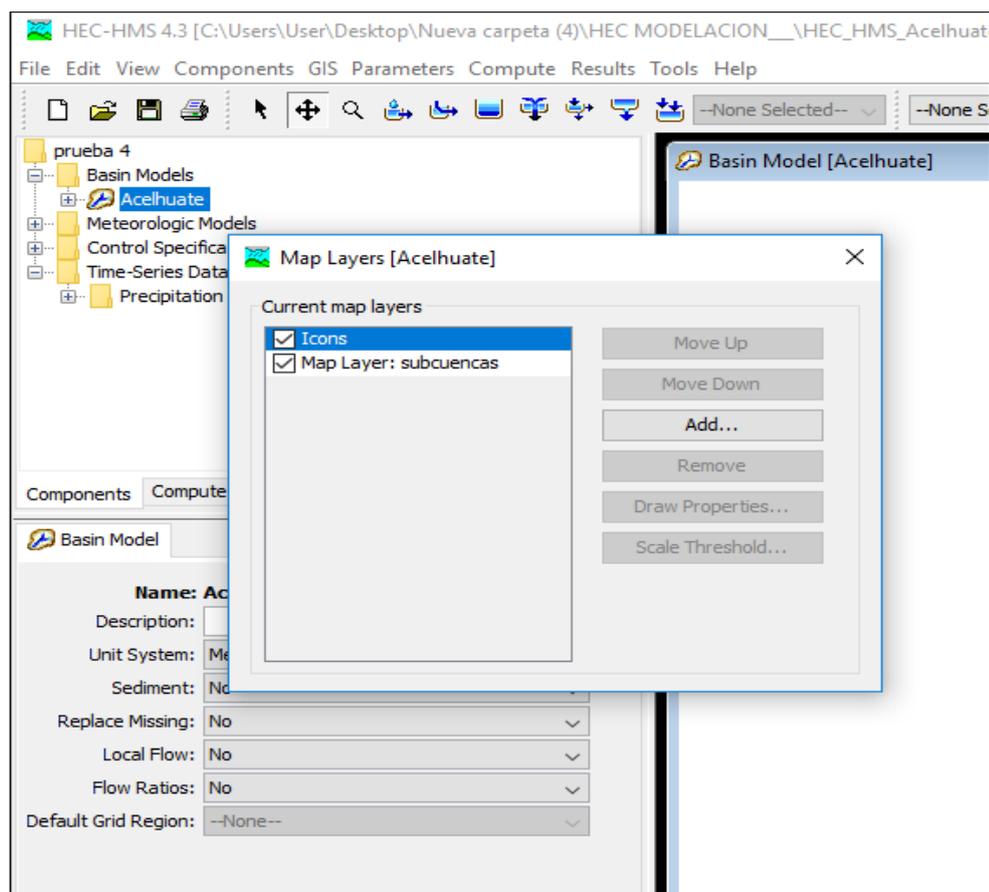
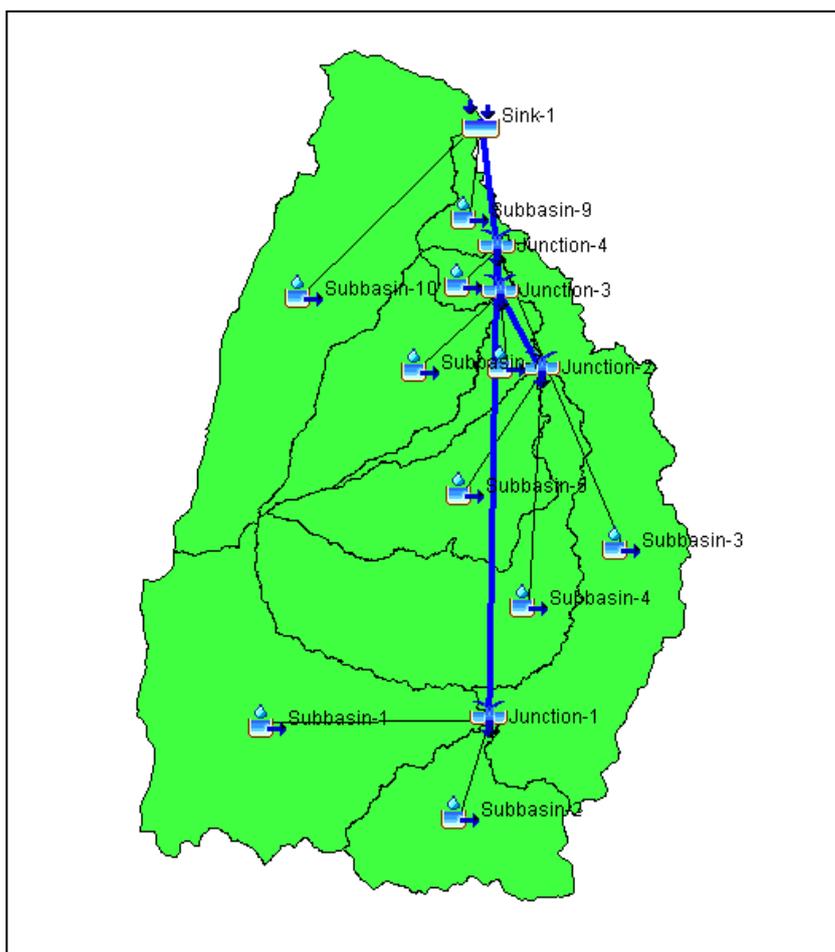


Imagen 4-2: Interfaz de Mapa layer. Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto, con las capas de fondo cargadas se puede modelar de manera más clara la cuenca ya que se podrá ver más adecuadamente como están distribuidas las subcuencas en la región de estudio y colocar componentes correspondientes como lo pueden ser: Reservorios, Uniones, Salidas, etc., más adecuadamente, y así conectarlos de forma más precisa, evitando así posteriores errores en la simulación. Al realizar este proceso en la cuenca del río Acelhuate, se tiene como resultado la siguiente configuración de componentes de la cuenca (Ilustración 4-3)



**Ilustración 4-3: Distribución de los Componentes de la cuenca en HEC-HMS. Fuente: Elaboración propia**

#### 4.5.2 MÉTODO DE PÉRDIDAS INICIALES (LOSS METHOD)

Como se mencionó en el Capítulo 3, este sistema de valoración (Loss Method), consiste en asignar un número adimensional a cada subcuenca, cuyos valores están entre 0 para una cuenca con una capacidad de escurrimiento prácticamente nula y un valor de 100 que significa una impermeabilidad máxima.

Este valor numérico depende de varios factores generadores de escorrentía de la cuenca y se mencionan a continuación:

Tipo de suelo hidrológico; este parámetro indica estructura física y extensión del suelo presente en la cuenca.

- **Uso de la tierra y tratamiento:** este parámetro tiene que ver con la estabilidad del suelo en la cuenca, es decir el porcentaje de vegetación o de tejido urbano que conforme el territorio.
- **Condiciones previas de humedad:** indica la capacidad del suelo de retención de agua. **Pendiente:** inclinación o pendiente media del terreno en que se esté haciendo el análisis

Para la obtención del número de curva como se mencionó en el Capítulo 3, el análisis consiste en generar una intercepción de capas de temática cartográfica de uso de suelos y con el de tipo de suelos para generar una capa única con la

información tabulada de los polígonos resultantes, y de esa manera apoyándose en la tabla de número de curva para usos de suelos agrícolas, suburbana y urbana según Ven Te Chow.

El resultado de la asignación de valores numéricos de curva a cada división de la cuenca y la ponderación realizada anteriormente de cada subcuenca se presenta en la siguiente tabla resumen:

<b>SUBCUENCA</b>	<b>CN</b>
<b>SBC1</b>	86.95
<b>SBC2</b>	83.62
<b>SBC3</b>	83.88
<b>SBC4</b>	88.12
<b>SBC5</b>	81.2
<b>SBC6</b>	86.76
<b>SBC7</b>	81.45
<b>SBC8</b>	83.54
<b>SBC9</b>	87.16
<b>SBC10</b>	83.83

**Tabla 4-3 : Tabla de número de curva de cada subcuencas. Fuente: Elaboración propia.**

Estos datos son introducidos en la subcuenca respectiva, para ello se debe de seleccionar la cuenca en cuestión, que se encuentra en la carpeta “**Basins**” en

el explorador de cuenca; entonces aparecerá en el editor de componentes en el cual se debe de acceder a la pestaña llamada “**Loss**” que es la parte donde el programa convierte la lluvia en escorrentía. Se debe de mencionar que el programa exige la introducción de información sobre impermeabilidad previa en porcentaje, pero en este trabajo se dejó un valor de cero por conveniencia y falta de información precisa.

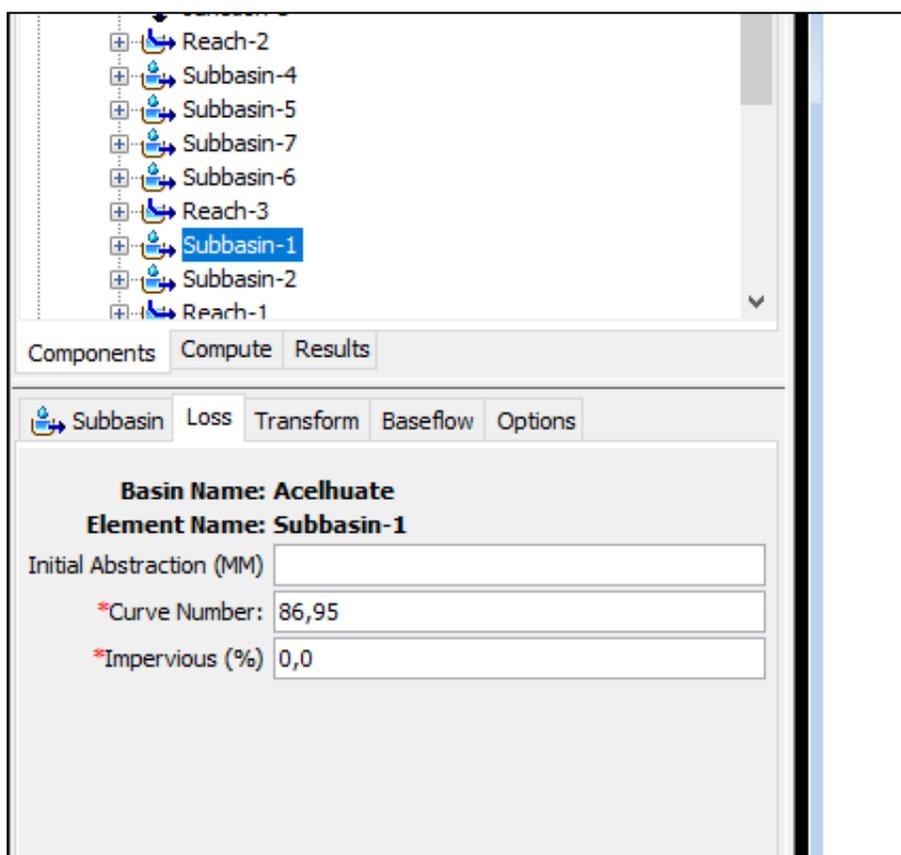


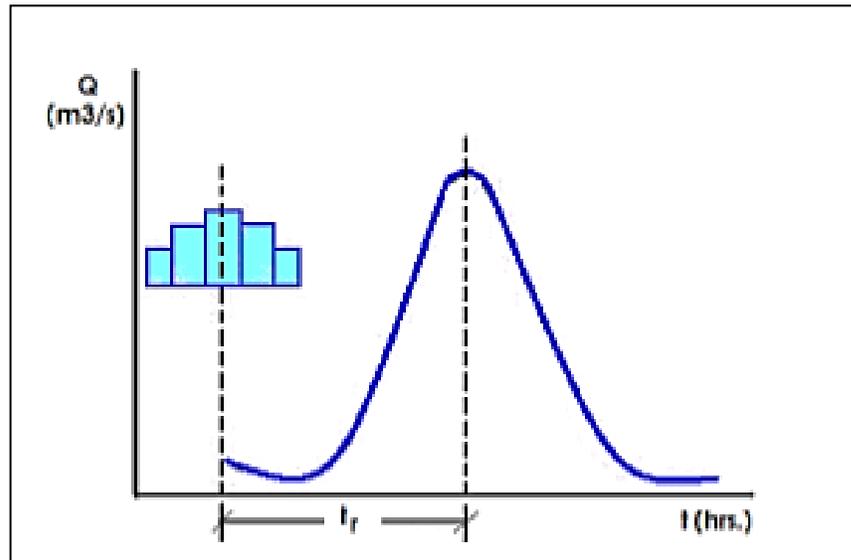
Imagen 4-3: Interfaz de usuario de número de curva. Fuente: Elaboración propia.

### 4.5.3 MÉTODO DE TRANSFORMACIÓN DE LLUVIA (TRANSFORM)

Una vez establecida la distribución física de la cuenca y estimada las pérdidas con un modelo determinado, se procede a la transformación del exceso de lluvia neta o efectiva a escorrentía superficial o caudal en el punto de salida en cada subcuenca. El método utilizado es el del diagrama unitario SCS (SCS unit hydrograph), para este método el único parámetro solicitado es el tiempo de retardo (Tlag) en unidades de minutos, que se define como el intervalo del tiempo comprendido entre los instantes que corresponden, al centro de gravedad del hietograma de la tormenta, y al centro de gravedad del hidrograma<sup>50</sup>, algunos autores lo toman desde la máxima altura de precipitación, esto sería preciso si los diagramas correspondientes fueran simétricos.

---

<sup>50</sup> Material de apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura de hidrología CIV-233, Cahuana A. & Yugar W., 2009, página 176.



**Ilustración 4-4 : Representación gráfica del tiempo de retraso. Fuente: Cahuana A. & Yugar W. (2009).**

Según el manual elemental del programa HEC-HMS el tiempo de retardo es igual al 35% del tiempo de concentración<sup>51</sup>, así como se muestra en la siguiente ecuación:

$$Tlag = 0.35 * Tc \text{ (Ecuacion 4.1)}$$

Con base a lo anterior mencionado, se hizo el cálculo para cada subcuenca del área de estudio, recordando que las unidades requeridas de los tiempos son en

<sup>51</sup> Manual de utilización del programa HEC-HMS, Universitat politècnica de Catalunya (2014). 1ª, Edición. Pàgina 19.

minutos; a continuación, se presenta la tabulación del tiempo de concentración y el tiempo de retardo para cada subdivisión de la cuenca:

SUB CUENCA	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN (hrs.)	TIEMPO DE RETARDO T <sub>la</sub> (min)
<b>SBC1</b>	1.66	34.86
<b>SBC2</b>	1.04	21.84
<b>SBC3</b>	2.59	54.39
<b>SBC4</b>	1.31	27.51
<b>SBC5</b>	1.13	23.73
<b>SBC6</b>	1.25	26.27
<b>SBC7</b>	0.99	20.79
<b>SBC8</b>	0.29	6.09
<b>SBC9</b>	0.60	12.72
<b>SBC10</b>	2.73	57.33

**Tabla 4-4 : Tiempo de retardo para cada subcuenca. Fuente: Elaboración propia.**

Para introducir estos datos se debe de acceder a la pestaña **Transform** en el editor de componentes; en el tipo de grafica se dejó la opción por defecto (**Standard**); los datos de tiempo de retardo se ingresan en el espacio (**Lag Time**) en minutos como se observa en la imagen.

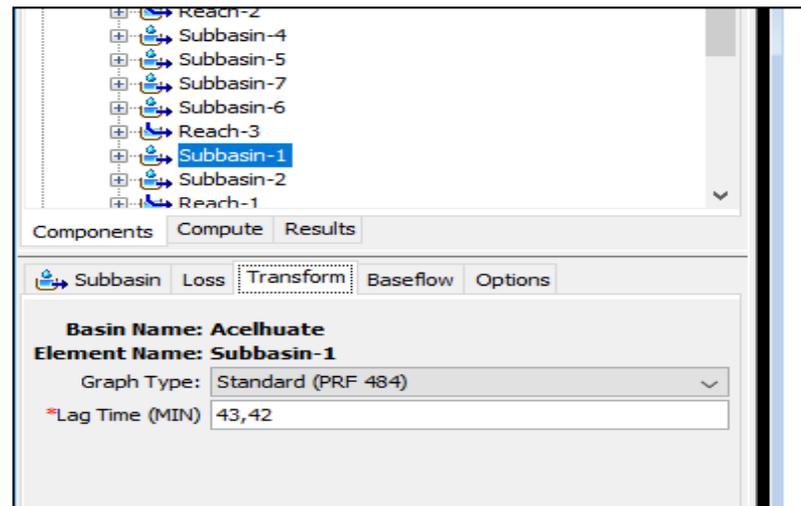


Imagen 4-4: Interfaz de usuario de método Transform. Fuente: Elaboración propia.

#### 4.5.4 MÉTODO DE FLUJO BASE (BASEFLOW)

La curva de agotamiento o curva de recesión es la parte del hidrograma en que el caudal de una cuenca procede solamente de escorrentía básica que se debe a escorrentía subterránea u otras aportaciones externas.

Este método se refiere a la suma al hidrograma resultante de la precipitación el caudal base que tenía la cuenca antes de la crecida y que debe de continuar por debajo del hidrograma de crecida<sup>52</sup>. Cuando en una cuenca empieza el periodo seco, el caudal del río es mantenido por el flujo de aguas subterráneas vecinas al cauce o de flujo de agua residuales. Para mayor comprensión los caudales de

<sup>52</sup> HEC-HMS. manual elemental, F. Javier.S. (2014), Dpto. Geología, Universidad de Salamanca, España, Página 5.

rio en la estación seca o periodo sin lluvia pueden representarse por la llamada curva de recesión, cuya ecuación es:

$$Q_t = Q_o * e^{-\alpha t} \text{ (Ecuación 4.2)}$$

En donde  $Q_t$  es el caudal en un tiempo  $t$ ;  $Q_o$  es el caudal e el tiempo  $t = 0$ ; el término “alfa” es la constante de recesión y  $t$  es el tiempo sin lluvias en días. Para cada subcuenca resultante del análisis de la cuenca del rio Acelhuate no hay un registro de caudal base para los rio y quebradas que conforman la red de drenaje, solo se tiene el conocimiento de transito de aguas residuales en época de poca o nula lluvia, pero ya que el volumen de agua no es despreciable se asumirán valores diferentes de cero para un resultado más preciso y real.

Un término importante y significativo en la evaluación de una curva de recesión y como dato de entrada en el programa HEC-HMS, es la constante de recesión que representada en unidades de tiempo ( $\text{Dias}^{-1}$ ); si se aplica logaritmos a la **ecuación 4.1**, y se grafica el caudal  $Q_t$  en función del tiempo, la curva de recesión aparecerá como una recta y se podrá calcular la pendiente de esa recta, la cual es la constante de recesión que es característica de cada cuenca.

Estos elementos se ven mejor representados en la Ilustración 4-5 de un hidrograma típico que consta de una rama ascendente, un segmento de recta y

una rama descendente o recesión. La forma de la rama ascendente está influenciada principalmente por las características de la lluvia que causa el ascenso; la curva de recesión representa el aporte de agua almacenado dentro de la cuenca. La forma de recesión es bastante independiente de las características de la lluvia que causó el ascenso y describe la disminución del volumen de agua almacenado<sup>53</sup>. El valor de la constante de recesión toma un valor menor a la unidad, para la cuenca del río Acelhuate **se tomó un valor de 0.8.**

---

<sup>53</sup> Hidrología para ingenieros, Linsley, Kohler & Paulus, 1984, 2ª Edición, Página.186.Linsley, Kohler, Paulus. (1984). Hidrología para ingenieros. 2ª edición. Pag.186.

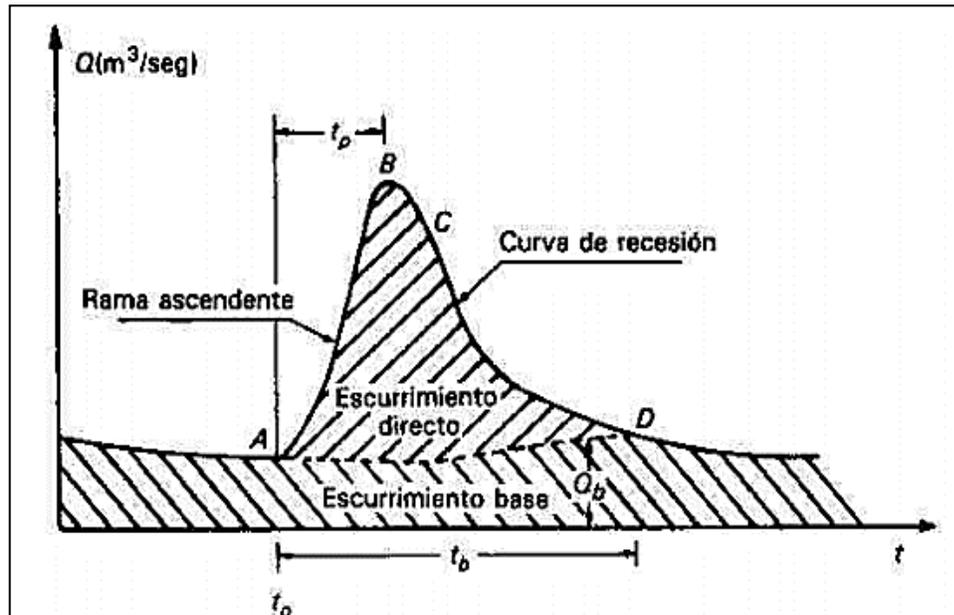


Ilustración 4-5: división del hidrograma. Fuente: Aparicio Mijares, F.J.

El método de flujo base de recesión está diseñado para aproximarse al comportamiento típico observado en las cuencas hidrográficas cuando el flujo del canal retrocede exponencialmente después de un evento. Este método está destinado principalmente para la simulación de eventos. Sin embargo, para una simulación en el programa se tiene la capacidad de reiniciarse automáticamente después de cada tormenta y, por lo tanto, puede usarse para simulación continua; significando que no se conserva masa dentro de la subcuenca. Se debe especificar el flujo base inicial al comienzo de una simulación como una descarga

en unidades de volumen por tiempo. Este método es particularmente bueno cuando se observan datos de flujo en la salida de la subcuenca para determinar el flujo inicial en el canal<sup>54</sup>. El método usado para la cuenca del río Acelhuate es el de descarga inicial (**Discharge**)

En el apartado **Threshold Type** hay dos métodos diferentes para determinar cómo restablecer el flujo base durante un evento de tormenta: la relación entre el flujo máximo (ratio to peak) y el umbral (threshold flow). Al utilizar el método de relación a pico (ratio to peak), se debe especificar la relación de flujo al pico. El flujo base se restablece cuando el flujo de corriente dividido por el flujo máximo cae al valor especificado. Por ejemplo, si se selecciona una relación de 0.2, el flujo base se restablecerá en el lado en recesión de un hidrograma de eventos cuando el flujo haya disminuido al 20% del flujo máximo de eventos<sup>55</sup>.

En la cuenca del río Acelhuate se usó un valor asumido de 0.3, fundamentado que en cuencas rurales los valores pueden oscilar de entre 0.25 a 0.35. En la imagen 4-5 se representa el editor de componentes de la modelación con los datos usados para el proyecto.

---

<sup>54</sup> Hydrologic Modeling System HEC-HMS, W. scharffenberg, 2016. Página 226.

<sup>55</sup> Hydrologic Modeling System HEC-HMS, W. scharffenberg, 2016. Página 227.

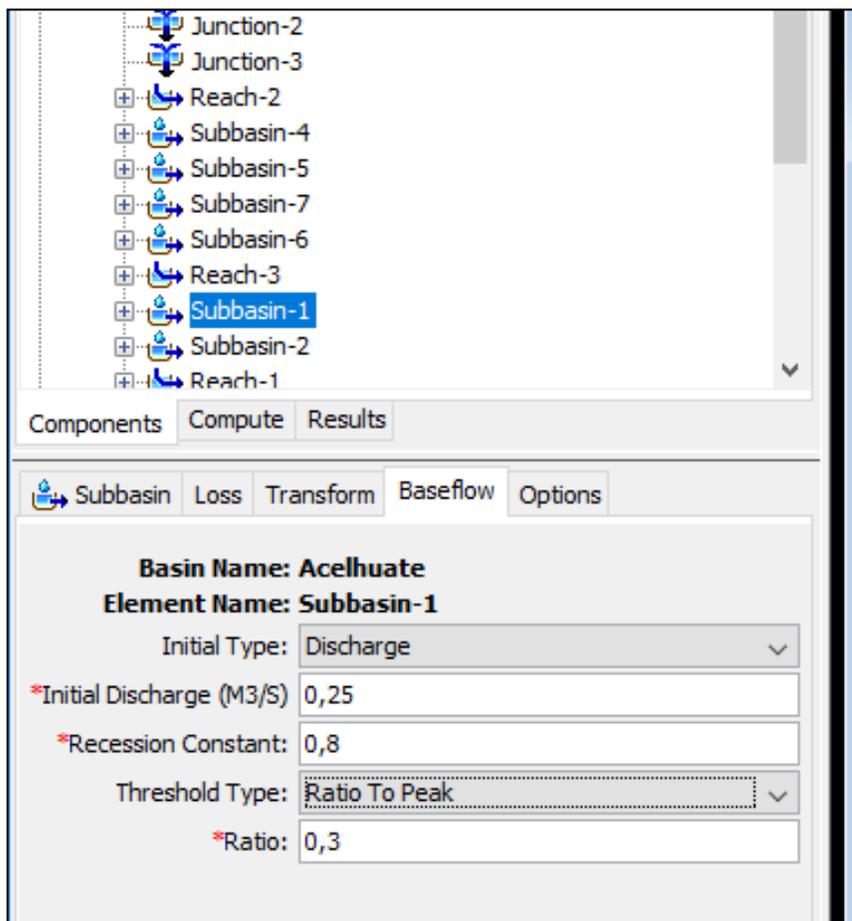


Imagen 4-5: Interfaz de usuario de método baseflow. Fuente: Elaboración propia.

#### 4.5.5 MODELO DE TRÁNSITO DE AVENIDA

Suponiendo que a lo largo de un canal seco en un extremo **A** se arroja un volumen de agua (Ilustración 4-6) el hidrograma generado en el punto será inicialmente más alto y de menor duración y a medida que avanza, el mismo volumen pasará por los puntos B y C cada vez con un hidrograma más aplanado.

Y si, además, se asume que no hay pérdidas de volumen, el área bajo la curva de los tres hidrogramas será idéntica.

Por efecto calcular el tránsito de avenida es obtener el hidrograma de punto **C** a partir del punto **A**, en otras palabras, obtener el hidrograma de salida a partir del hidrograma de entrada<sup>56</sup>

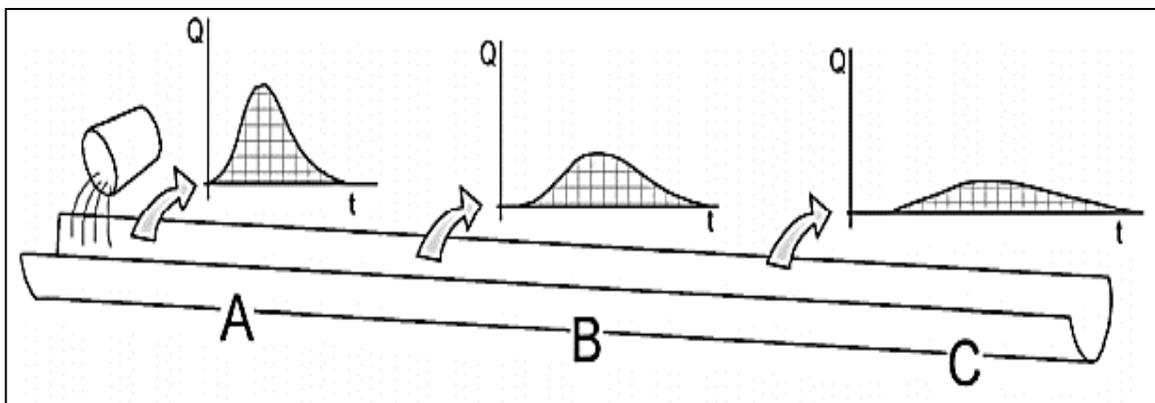


Ilustración 4-6 : Comportamiento de un hidrograma a lo largo de un canal. Fuente:

Google imágenes.

### **Tránsito en Cauces: Método de Muskingum**

En este método fue desarrollado por el cuerpo de ingenieros de los Estados Unidos de América y fue aplicado al río Muskingum, por lo que lleva su nombre

<sup>56</sup> Tránsito de Avenidas, conceptos básicos, F. Javier Sánchez., 2013, Página 1.

Se basa en que el almacenamiento (S) en un tramo del cauce puede descomponerse en dos partes:

- Almacenamiento en prisma, que sería proporcional al caudal de salida (O)
- Almacenamiento de cuña que sería diferencia entre el caudal de entrada y el de salida (I-O)<sup>57</sup>,

Además, se basa en la ecuación de continuidad y en la ecuación de almacenamiento dando como resultado la ecuación siguiente:

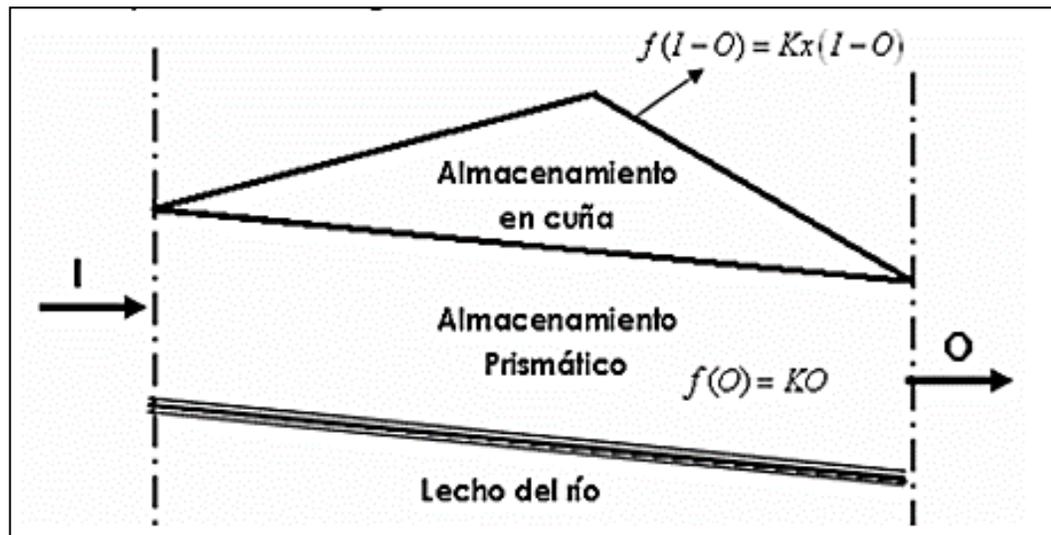
$$S = K[xI + 1 - XO] \text{ (Ecuación 4.3)}$$

Donde la constante, conocida como constante de almacenamiento, es la relación entre almacenamiento y descarga y tiene dimensiones de tiempo. K es aproximadamente igual al tiempo de viaje de la onda a través del tramo y X es un factor de peso que expresa la influencia relativa de las entradas y salidas del almacenamiento en el tramo<sup>58</sup>.

---

<sup>57</sup> Tránsito de Avenidas, conceptos básicos, F. Javier Sánchez., 2013, Página 2.

<sup>58</sup> Material de apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura de hidrología CIV-233, Cahuana A. & Yugar W. (2009), Página 209.



**Ilustración 4-7: Almacenamiento prismático y almacenamiento en curva. Fuente: Cahuana A. & Yugar W. (2009).**

El valor de  $X$  depende de la forma de almacenamiento por cuña modelado. El valor de  $X$  puede variar desde un valor de 0, es decir un cauce que no presente una cuña de almacenamiento hasta un valor de 0.5 para una cuña completamente desarrollada. En corrientes naturales  $X$  se encuentra entre 0.0 y 0.3 con un valor medio cercano a 0.2; asimismo, no se necesita una gran precisión en la determinación de  $X$  debido a que los resultados del método son relativamente insensibles al valor de este parámetro<sup>59</sup>.

<sup>59</sup> Revista Aqua-LAC (2009) Determinación empírica de los parámetros que modelan el tránsito de avenidas, por el método de Muskingum, en zonas de clima mediterráneo de Chile central. 1ª edición. Pag.44.p

Para el cálculo de K como anteriormente se dijo este valor está representado por unidades de tiempo y su valor es aproximadamente el tiempo que se tarde en recorrer el pico de avenida a lo largo del cauce<sup>60</sup>, para ello se calcula multiplicando el tiempo de concentración por 0.6, como a continuación se presenta.

SUB CUENCA	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN (horas)	K (horas)	X
<b>SBC1</b>	1.66	1.00	0.2
<b>SBC2</b>	1.04	0.62	0.2
<b>SBC3</b>	2.59	1.55	0.2
<b>SBC4</b>	1.31	0.79	0.2
<b>SBC5</b>	1.13	0.68	0.2
<b>SBC6</b>	1.25	0.75	0.2
<b>SBC7</b>	0.99	0.59	0.2
<b>SBC8</b>	0.29	0.17	0.2
<b>SBC9</b>	0.60	0.36	0.2
<b>SBC10</b>	2.73	1.64	0.2

**Tabla 4-5: Valores de Muskingum. Fuente: Elaboración propia.**

<sup>60</sup> Autor desconocido (s.f). capítulo 4 tránsito de avenidas por vasos y cauce. Recuperado de [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lic/solis\\_m\\_j/capitulo4.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lic/solis_m_j/capitulo4.pdf)

Para la introducción de los datos correspondiente al proceso de análisis de avenidas se debe de especificar el método que se usará, que en el caso de la cuenca del rio Acelhuate es el método Muskingum como se mencionó anteriormente. Para establecer esto se debe de posicionar en el área de **explorador de cuenca** y abrir la carpeta **Basins Models**, en el cual se encuentra los componentes llamados **Reach**. Aparecerá un formulario en el **Editor de componentes** en el debemos cambiar la opción de **Routing Method** a el método Muskingum; entonces en el mismo formulario se selecciona la pestaña **Routing** en el cual se ingresaron los datos de la tabla. El formulario quedará como se observa en la Imagen 4-6.

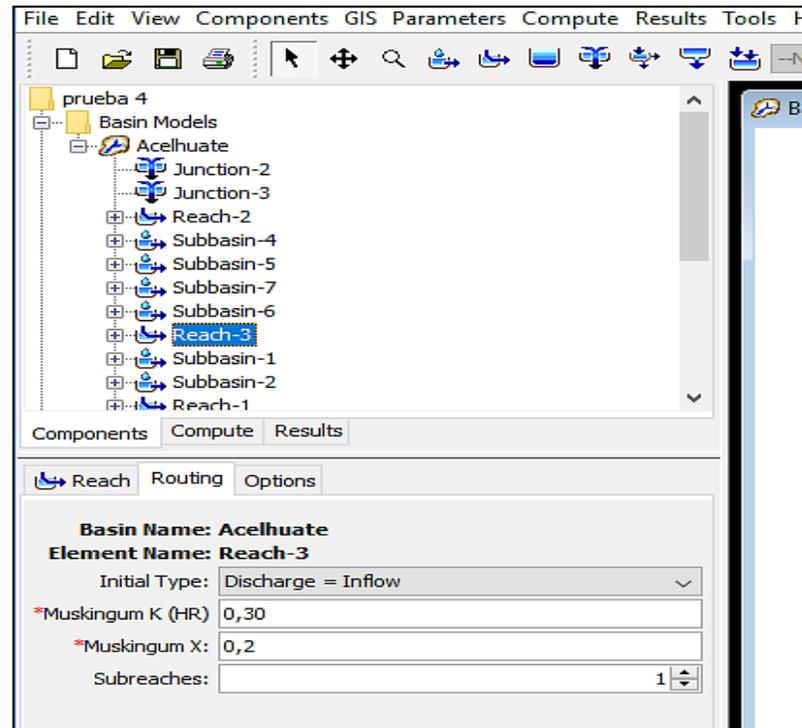


Imagen 4-6: Interfaz de usuario de método Muskingum. Fuente: Elaboración propia.

## 4.6 DATOS DE PRECIPITACIÓN (TIME SERIES DATA)

### 4.6.1 GENERALIDADES DE LA PRECIPITACIÓN

La precipitación se define como el agua cae a la superficie terrestre tales como la lluvia, la nieve, granizo, nevisca y otros procesos. La formación de la precipitación requiere la elevación de una masa de vapor de agua en la atmosfera de tal manera que se enfríe y parte de su humedad se condense<sup>61</sup>.

En nuestro país contamos con una época de lluvia y una época de estiaje que duran aproximadamente 6 meses. Durando la época lluviosa desde mayo a octubre, y la época de estiaje de noviembre hasta abril.

Los principales mecanismos de precipitación que se pueden presentar en un área son:

- **La Elevación frontal**, donde el aire caliente es elevado por aire frío por un pasaje frontal.
- **La Elevación orográfica**, mediante la cual una masa de aire se eleva para pasar por encima de una cadena montañosa; y

---

<sup>61</sup> Hidrología aplicada, Ven Te Chow, 1997, Página 65.

- **La Elevación conectiva**, ocurre generalmente en zonas cálidas y húmedas las masas de aire ascienden en altura y se enfrían y generan precipitación<sup>62</sup>.

#### 4.6.2 INTENSIDAD DE LA PRECIPITACIÓN

La Intensidad de la precipitación, es la cantidad de lluvia caída o precipitada sobre una cierta zona geográfica a lo largo de un lapso de tiempo (una hora, un minuto, etc.). Este dato (obtenido de estudios estadísticos para cada zona geográfica de un determinado territorio analizando la frecuencia y duración de las lluvias caídas a lo largo de un periodo de tiempo) permite establecer un valor de referencia aproximada con el que se calcula el caudal, y en consecuencia se utiliza para el diseño adecuado de una infraestructura hidráulica. La Intensidad de precipitación se valora según la relación altura de agua acumulada-tiempo de acumulación, por ello y entre otras, la unidad de medida a utilizar será mm/min.

Para análisis hidrológico y sus diversas metodologías es necesaria la utilización de los datos de registro de las estaciones meteorológicas del AMSS, los cuales

---

<sup>62</sup> Hidrología aplicada, Ven Te Chow, 1997, Traducción e impresión en Bogotá, Colombia, Página 66.

se encuentran íntimamente ligados al trabajo o procesamiento estadístico de los registros, dando como resultado la generación de la curva **Intensidad – Duración – Frecuencia (I-D-F)**.

Las curvas I-D-F, resultan de unir los puntos representativos de la intensidad media en intervalos de diferente duración, y correspondientes todos ellos a una misma frecuencia o período de retorno (Témez, 1978). Junto con la definición de las curvas, se deben considerar otros factores como son:

- ✓ **La intensidad de la precipitación**
- ✓ **La frecuencia o la probabilidad** de excedencia de un determinado evento de precipitación (Período de Retorno).

Por ello, es de suma importancia tener claro el concepto de cada una de estas variables, de modo de tener una visión más clara de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia.

#### 4.6.3 ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS DENTRO DEL ÁREA DE ESTUDIO

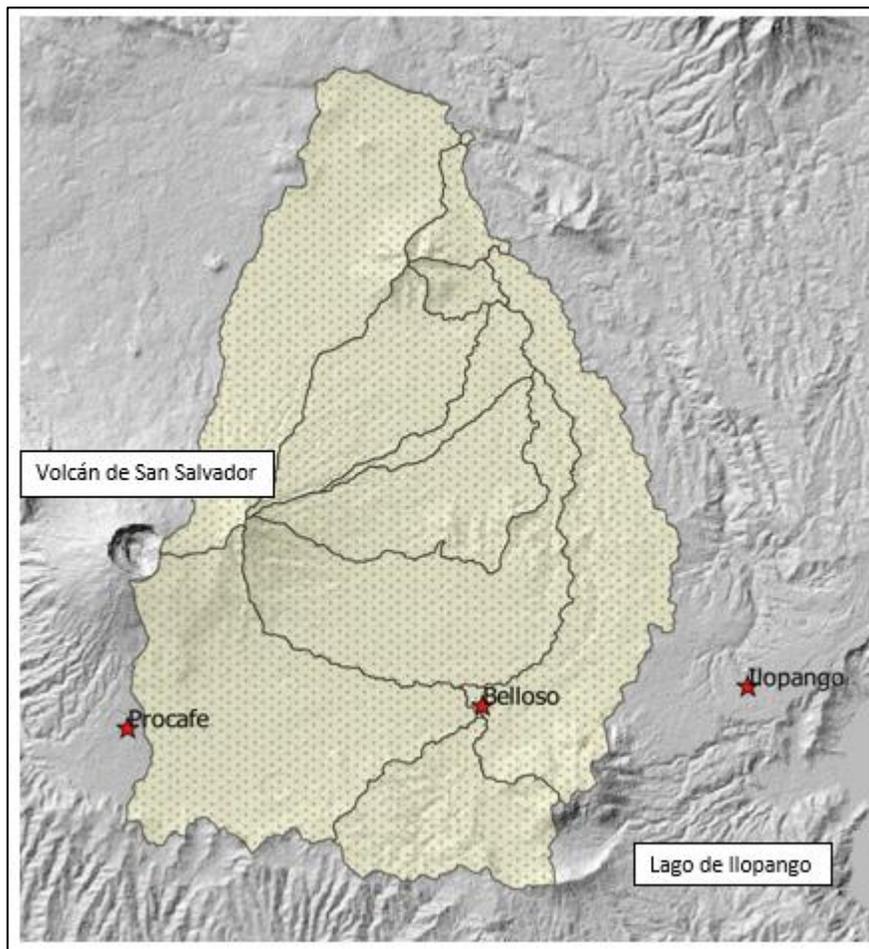
Las estaciones utilizadas, tal y como se detalló en el capítulo anterior serán 3: Estación Belloso, Estación Procafé y Estación Ilopango, cuentan con un registro continuo de la tormenta a usarse para la modelación inicial.

Los registros de lluvia tomados fueron del evento de tormenta tropical IDA, y son datos de lluvia acumulada con registros a cada 15 minutos. Se tomaron datos con igual fecha de inicio y de finalización para tener una concordancia en los resultados. En la siguiente Tabla 4-6 se muestra las estaciones y sus respectivas

coordenadas espaciales sobre el territorio en estudio, además se presenta en la Ilustración 4.8 para una mayor comprensión de la posición de cada estación.

ESTACIÓN	CÓDIGO	COORDENADAS	
		X	Y
<b>Ilopango, San Salvador, Municipio SAN SALVADOR</b>	S10	487199.779	286518.190
<b>Belloso, San Salvador, Municipio SAN SALVADOR</b>	28	479338.895	285944.261
<b>Procafé, La Libertad, Municipio LA LIBERTAD</b>	L48	468809.176	285243.010

**Tabla 4-6 : Estaciones pluviométricas. Fuente: Elaboración propia**



**Ilustración 4-8: Ubicación de las estaciones pluviométricas sobre la cuenca en estudio.**  
**Fuente: Elaboración propia**

#### **4.6.4 DESCRIPCIÓN DEL EVENTO METEOROLÓGICO (TORMENTA IDA)**

Para la realización del análisis hidrológico y modelación inicial de la cuenca del río Acelhuate, se seleccionará un evento meteorológico para correr el software HEC-HMS, el evento seleccionado será la tormenta IDA, principalmente con fines de calibración del modelo.

El 4 de noviembre de 2009, se formó La Depresión Tropical Once, al Este de la costa Caribe de Costa Rica, a partir de un área de baja presión que estaba siendo monitoreada por el Centro Nacional de Huracanes de los Estados Unidos. Unas horas más tarde, se elevó la Depresión Tropical al grado de Tormenta Tropical, adjudicándosele el nombre de IDA, y contabilizándola como la Novena Tormenta Tropical de la temporada de huracanes 2009. Persistió el sistema de Baja Presión en El Salvador desplazando abundante humedad hacia el territorio salvadoreño. Durante la noche del sábado 7 de noviembre y madrugada del 8 de noviembre, la baja presión se posicionó sobre las costas Pacíficas de Guatemala y El Salvador, lo que produjo lluvias intensas en la zona central y con menos intensidad en el resto del territorio Salvadoreño, condición que afectó diferentes comunidades de los cinco departamentos más afectados: La Paz, la Libertad, San Vicente, San Salvador y Cabañas, en donde hubo desbordamientos de ríos, viviendas dañadas, derrumbes e inundaciones, daños a infraestructura como puentes y carreteras.

Esta Tormenta Tropical dejó a su paso por El Salvador 184 muertos, más de 14,000 damnificados directos, más de 3,400 casas con daños severos en infraestructura; así como, más de 200 casas totalmente destruidas. Los 14 departamentos del País sufrieron inundaciones producidas por el desbordamiento de los ríos y quebradas.

A continuación, se presentan los valores máximos de precipitación registradas en las estaciones pluviométricas que serán utilizadas en el análisis, durante el período del 6 de noviembre a las 14:15 horas hasta el día 8 de noviembre a las 05:00 horas.

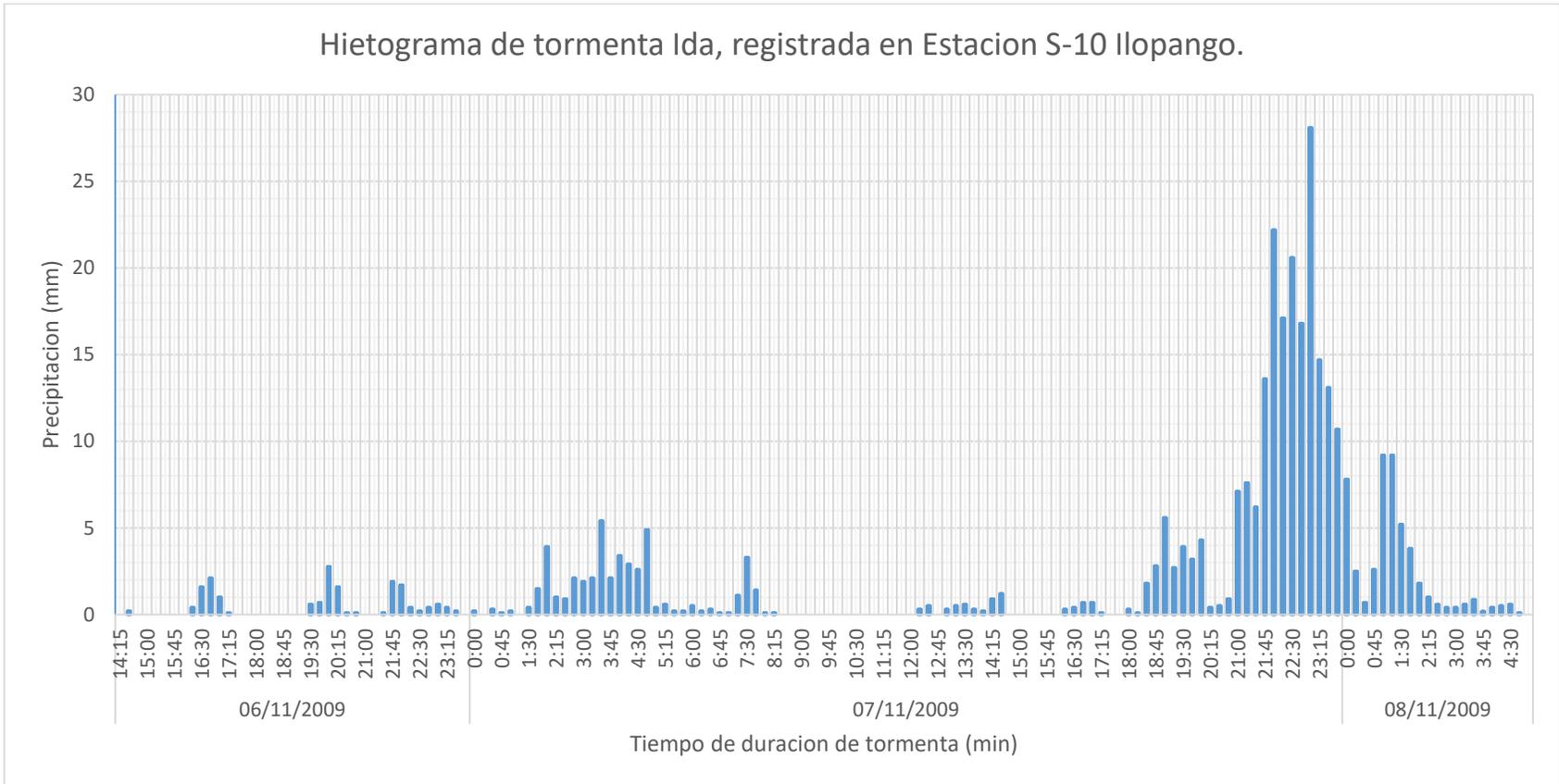
<b>ESTACIÓN</b>	<b>CÓDIGO</b>	<b>LLUVIA ACUMULADA (MM)</b>
<b>ILOPANGO</b>	<b>S10</b>	<b>321.44</b>
<b>PROCAFE</b>	<b>L48</b>	<b>260.81</b>
<b>BELLOSO</b>	<b>28</b>	<b>542.55</b>

**Tabla 4-7 : Lluvia registrada por las estacione en tormenta Ida. Fuente: Elaboración propia con base a información de MARN.**

#### **4.6.5 HIETOGRAMA**

Un hietograma es la representación en una gráfica de barras de la distribución de lluvia con respecto a intervalos iguales de tiempo la cual es la duración de la tormenta. En el eje de la variable dependiente se coloca la precipitación (mm) o bien se puede colocar la intensidad de la lluvia (en mm/hr o mm/min) y en el eje de la variable independiente se establece el tiempo (min, horas, días).

El programa HEC-HMS calcula de forma automática los hietogramas de las estaciones seleccionados en el análisis, pero primero se deben de ingresar una serie de datos de lluvia registrada a un intervalo de tiempo igual en todas las estaciones y que en este caso será cada 15 minutos para las estaciones Ilopango (S10), Belloso (28) y Procafé (L 48).



**Ilustración 4-9: Hietograma de lluvia en tormenta Ida registrada en estación Ilopango. Fuente: Elaboración propia.**

Hietograma de tormenta Ida, registrada en Estacion L-48 Procafe.

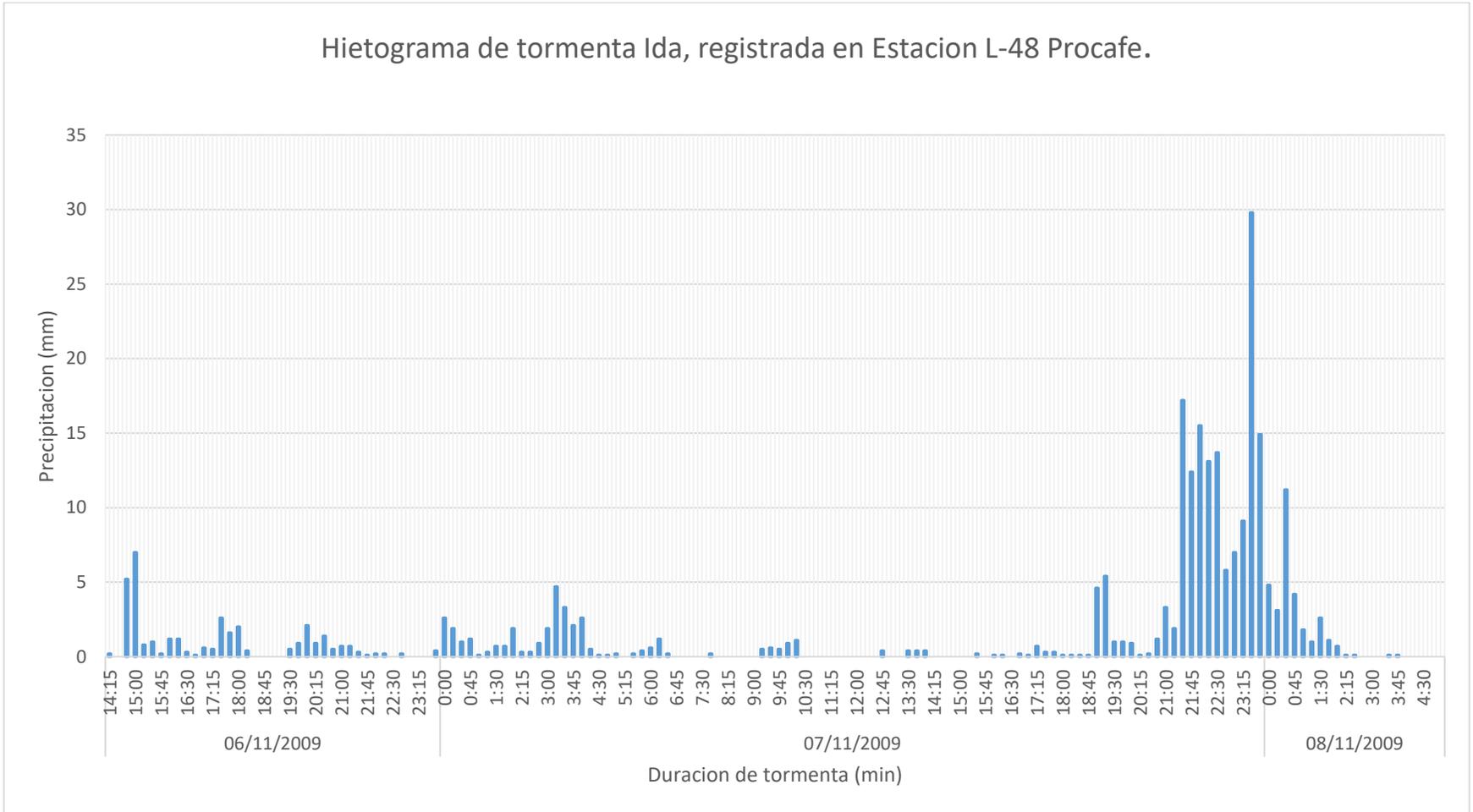
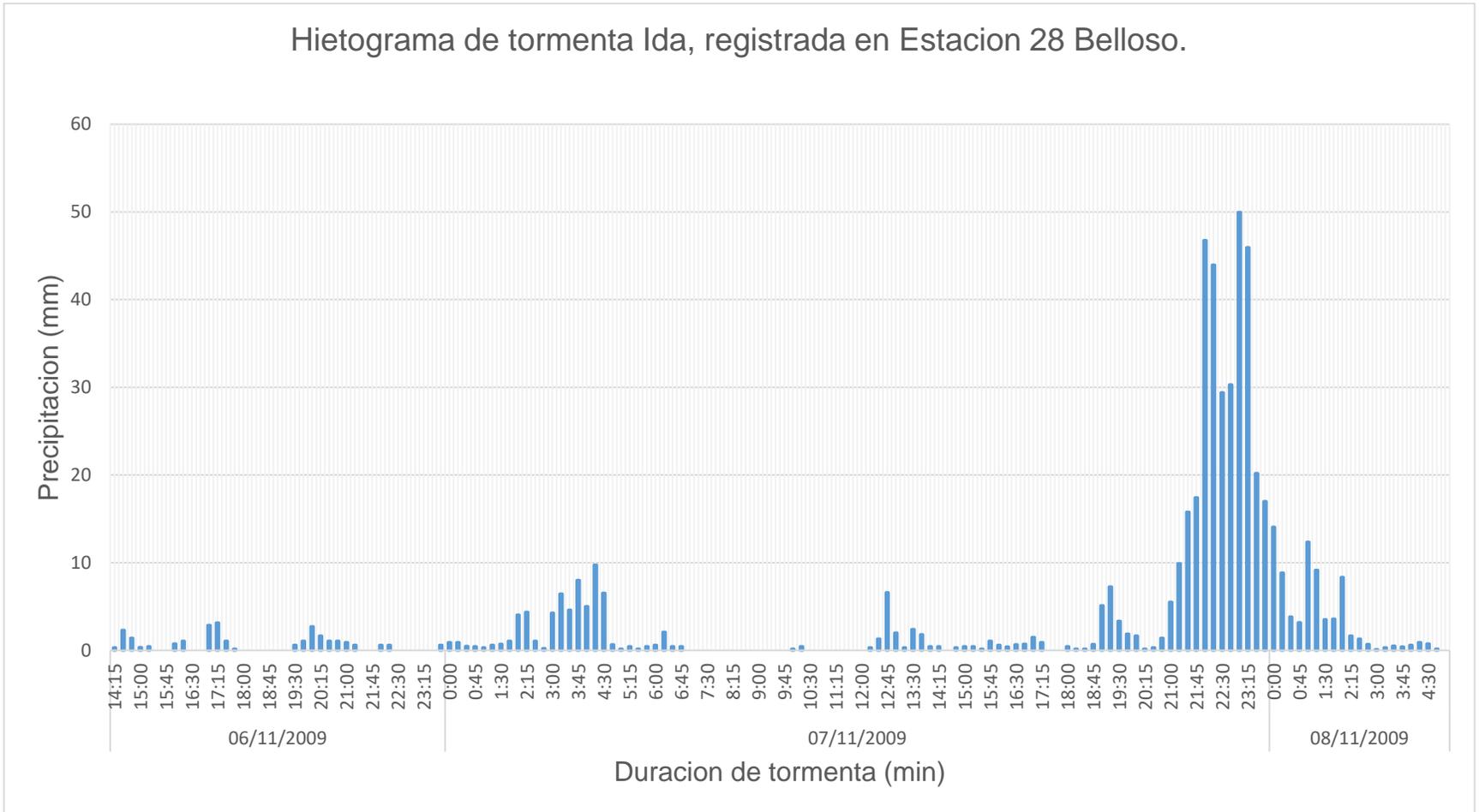


Ilustración 4-10: Hietograma de lluvia en tormenta Ida registrada en estación Procafé. Fuente: Elaboración propia



**Ilustración 4-11: Hietograma de lluvia en tormenta Ida registrada en estación Beloso. Fuente: Elaboración propia.**

#### 4.6.6 POLÍGONOS DE THIESSEN

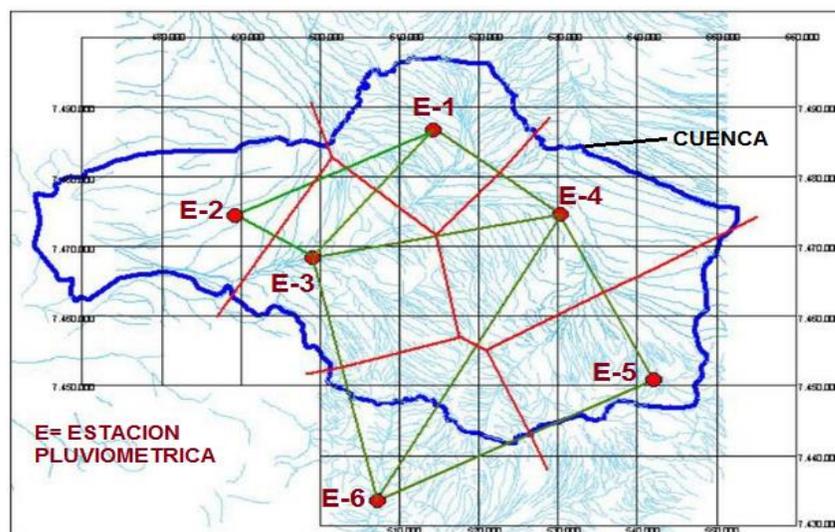
La lluvia registrada debe de repartirse en el tiempo de manera adecuada en las todas las subcuencas del área de estudio, es decir se le debe de asignar un porcentaje de la lluvia caída del evento climatológico seleccionada. Para hacer una asignación precisa se debe de realizar un análisis como lo propone el método llamado polígonos de Thiessen, este método es aplicable a zonas con una distribución irregular de estaciones y donde los accidentes topográficos no jueguen un papel importante en la distribución de las lluvias.

Este método trata de tener en cuenta la no uniformidad en la distribución de los pluviómetros mediante un factor de ponderación para cada uno de ellos y que cuyo proceso se basa en la división de área por la intersección de líneas mediatrices, tomando en cuenta otros puntos.

Para la aplicación de los polígonos de Thiessen se requiere:

- ✓ Delimitación de la cuenca
- ✓ Conocer la ubicación de cada estación dentro o en la periferia de la cuenca para proceder a su aplicación.
- ✓ Identificando el área de influencia de cada pluviómetro y/o pluviógrafo. Así se van formando triángulos entre las estaciones más cercanas uniéndolas con segmentos rectos sin que éstos se corten entre sí.

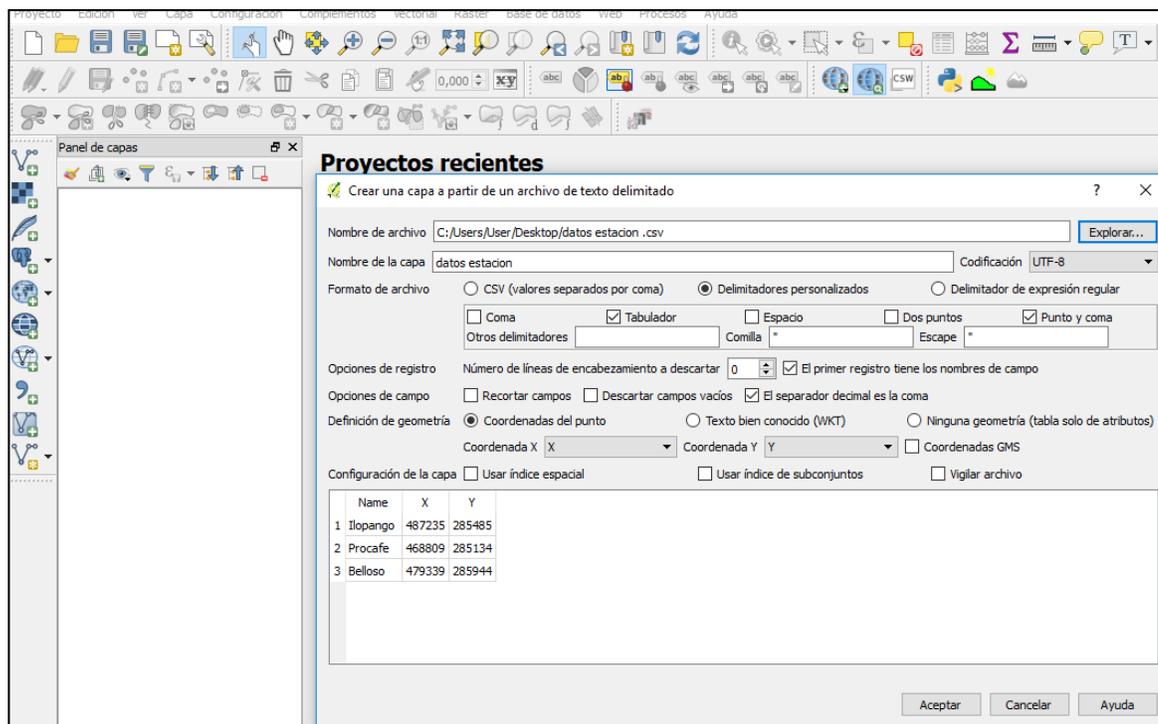
- ✓ A partir de allí se trazan líneas bisectrices, las cuales se ubican en el centro de cada lado del triángulo y se trazan perpendicularmente, éstas por geometría elemental se unirán en un punto común dentro o fuera de cada triángulo, y de esa manera se conformarán una serie de polígonos que delimitan el área de influencia de cada estación, considerada en el cálculo ponderado como el “peso” de cada precipitación en milímetros.
- ✓ El área de influencia de cada estación delimitada con su “Polígono” está comprendida exclusivamente dentro de la cuenca, si un punto en específico está rodeado de otros puntos, el área del punto en cuestión tendrá un área de influencia menor, a comparación de otro punto que este más separado de los demás, ya que tendrá más “interferencias” de otros (Ver Ilustración 4-12).



**Ilustración 4-12: Representación de método de los polígonos de Thiessen. Fuente: Hidrología Precipitaciones Distribución de área de Precipitaciones por Miguel Ayala Toro, modificaciones por Grupo de Tesis.**

### **Aplicación de Polígonos de Thiessen en la cuenca de río Acelhuate.**

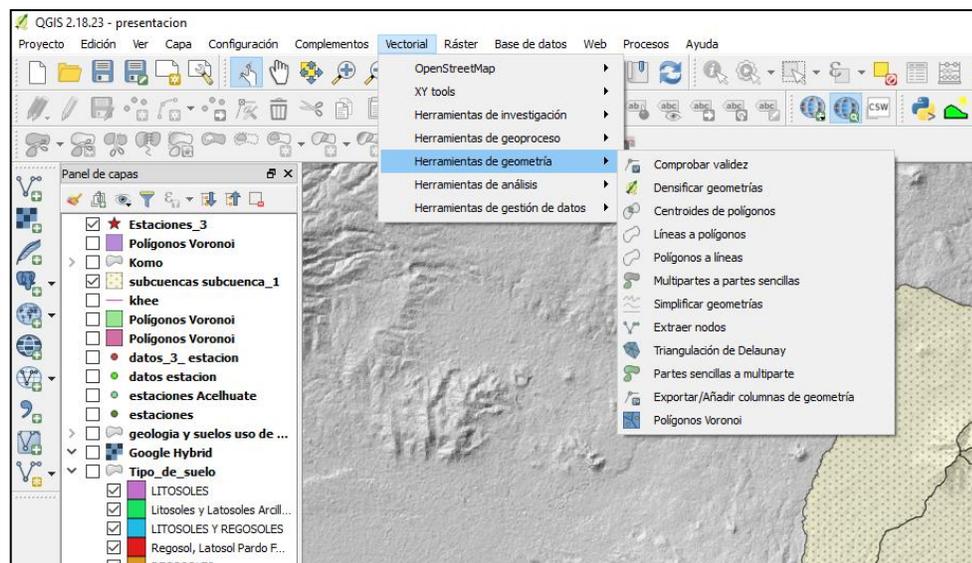
A continuación, se debe de hacer un trazado de los polígonos de Thiessen sobre la cuenca del río Acelhuate, usando los puntos de emplazamiento de las estaciones de Procafé, Ilopango y Belloso. Estas estaciones se toman como puntos sobre el mapa topográfico y estos puntos se cargan en QGis con la herramienta “añadir capa texto delimitado”, para ello se debe de determinar las coordenadas de las estaciones con las que se pretende trabajar (Imagen 4-7).



**Imagen 4-7: interfaz de carga de capa vector de puntos en QGis. Fuente: Elaboración propia.**

QGis brinda la facilidad de generar los polígonos de Thiessen bajo un solo algoritmo llamado polígonos de Voronoi, en honor por el matemático ruso

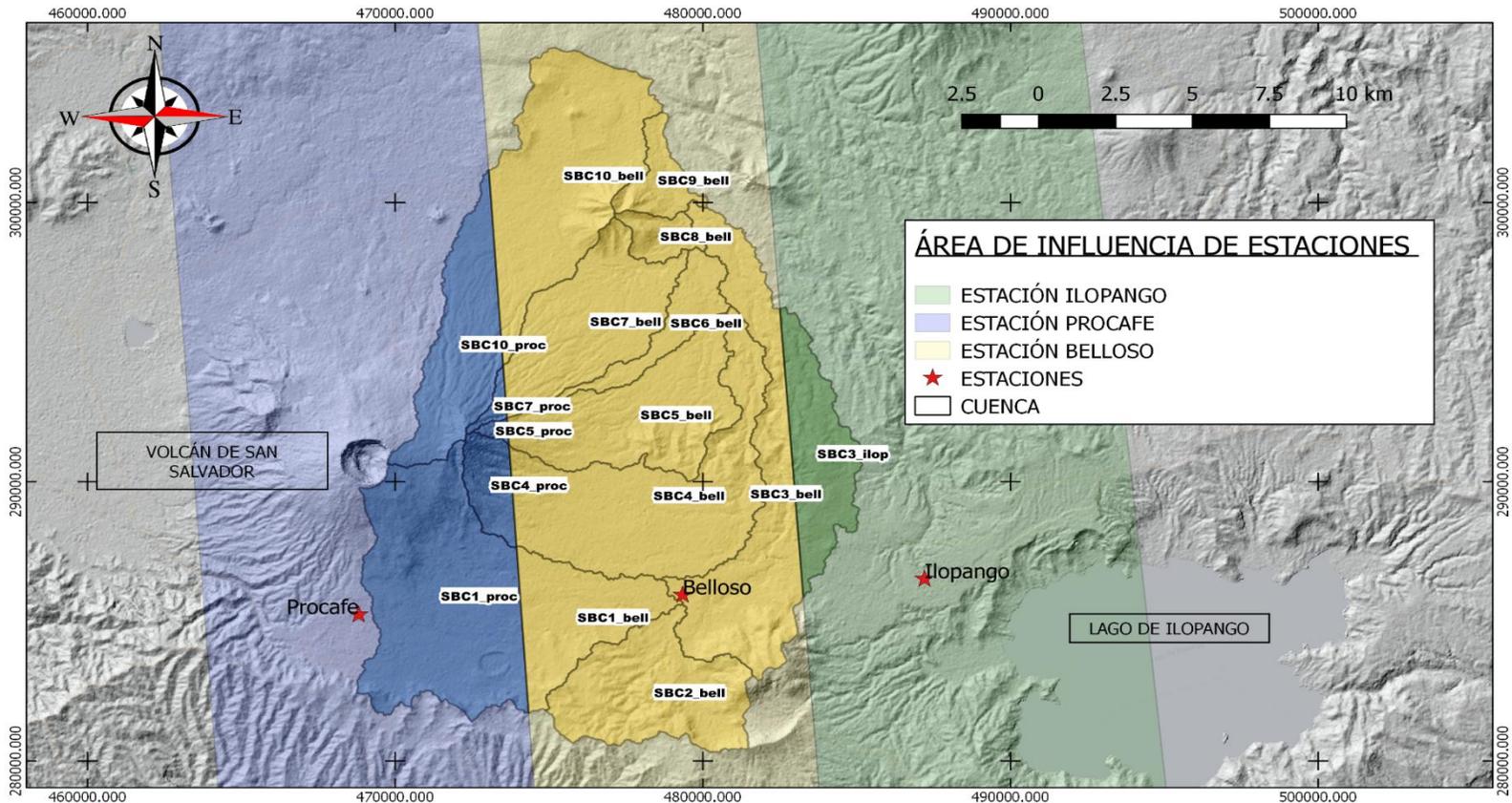
Gueorgui Voronoi en 1907 de donde toma su nombre alternativo.<sup>63</sup> Esta función se encuentra en la opción vectorial, luego en herramientas geométricas en la última opción (puede variar la posición en función a la versión de QGis) en el interfaz solicita que se seleccione la capa de puntos y un porcentaje de “buffer” el cual es una opción que permite amplificar la capa vector resultante para que se vea de una manera más adecuada, y se puede modificar a conveniencia del trabajo (imagen 4-8).



**Imagen 4-8: Generación de polígonos de Thiessen en QGis. Fuente: Elaboración propia.**

<sup>63</sup> Polígonos de Thiessen. (s.f). Wikipedia. Recuperado el 07 de abril de 2019 de [https://es.wikipedia.org/wiki/Pol%C3%ADgonos\\_de\\_Thiessen](https://es.wikipedia.org/wiki/Pol%C3%ADgonos_de_Thiessen).

Finalmente, se obtiene un mapa con las estaciones usadas en el análisis y las áreas de influencia que ejerce cada estación a las subcuencas. El mapa resultante se modificó en detalles para que luzca de la forma que aparece en el mapa. Primero se modificó el buffer de la capa para que abarcará toda la cuenca del río Acelhuate, también se modificó el color de cada sección de polígono para poder diferenciarse.



PROYECCIONES DE LOS IMPACTOS HIDROLÓGICOS BASADOS EN EL PLAN DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL VIGENTE: ESQUEMA DIRECTOR, EN EL ÁREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR (AMSS)

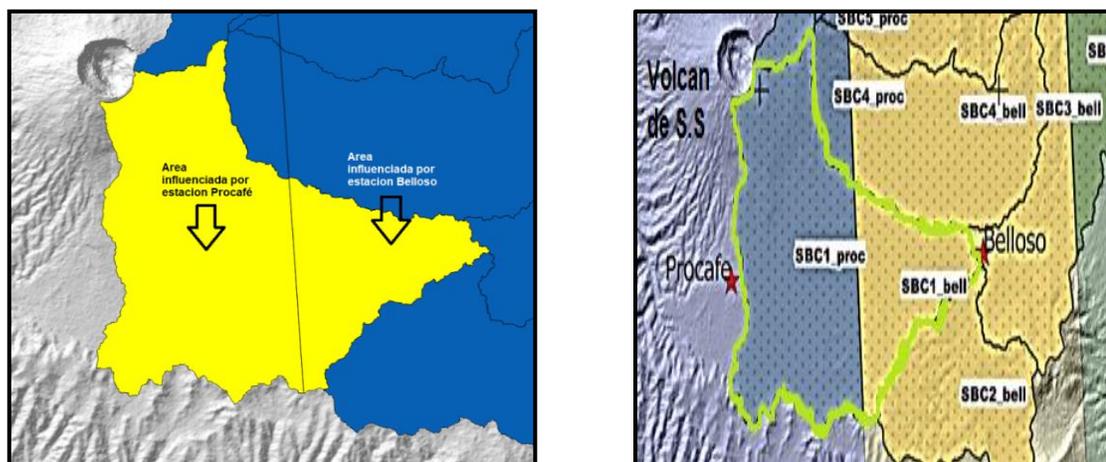
NOMBRES:  
ESTRADA PONCE, JOSUÉ RODRIGO  
LÓPEZ RECINOS, LIDIA YANET

MAPA 4.2: MAPA DE INFLUENCIA DE ESTACIONES EN LA CUENCA DEL RIO ACELHUATE EN PARTE ALTA Y MEDIA

FUENTE: ELABORADO POR GRUPO DE TESIS

#### 4.6.7 DISTRIBUCIÓN DE LA LLUVIA

Una vez dibujada en QGis, los polígonos de Thiessen, se calcula el área de cada uno de ellos con herramientas de QGis; la forma de cálculo del área de distribución estará en función del área de influencia que las estaciones ejercen sobre ella, tomando como ejemplo la subcuenca “SBC1”; cómo se puede observar del mapa, la subcuenca esta influenciada por dos estaciones, la estación Belloso y la estación Procafé. Ambas estaciones tienen un peso en sus registros al momento de establecer la lluvia representativa del sector; el peso que se le asigna a cada estación se calcula con base al área que se forma entre el contorno o límite de la subcuenca y el contorno del polígono de Thiessen que la rodea, como se muestra en la Ilustración 4-13; de esta forma, se divide la subcuenca en concordancia a la división generada por los polígonos de Thiessen y con QGis y sus herramientas geométricas se calculan las áreas correspondientes.



**Ilustración 4-13: Izquierda. Ejemplo de área de influencia de estación Procafé y Belloso en subcuenca SBC1. Derecha. Representación de polígono de Thiessen en subcuenca1**  
Fuente: Elaboración propia.

Para la subcuenca “SBC1” se obtuvieron dos áreas, **38.77 km<sup>2</sup>** y **15.16 km<sup>2</sup>** de la influencia de la estación Procafé y estación Belloso respectivamente. La suma de ambas áreas es el total de la extensión territorio de la subcuenca en análisis por lo tanto haciendo la relación del área calculada de cada estación con respecto al área total de la subcuenca (**53.93 km<sup>2</sup>**) se obtiene un peso que se le denominará porcentaje de área de influencia por el método de los polígonos de Thiessen o simplemente porcentaje de área ( $W_t$ ).

$$W_t = \frac{\text{Área de influencia de estación}}{\text{Área total de subcuenca}} \quad \text{(Ecuación 4.3)}$$

Los valores obtenidos de peso para cuenca son 71.89% y 28.11% para la estación Procafé y estación Belloso respectivamente, así se puede observar en la Tabla 4-8 junto con todos los valores de las demás subcuencas restantes siguiendo el mismo procedimiento antes mencionado.

SUB CUENCA	ESTACIÓN	ÁREA (km <sup>2</sup> )	TOTAL, DE ÁREA DE SUB CUENCA (km <sup>2</sup> )	PORCENTAJE DE ÁREA (%)
<b>SBC1_proc</b>	Procafé	38.77	53.93	71.89
<b>SBC1_bell</b>	Belloso	15.16		28.11
<b>SBC2_bell</b>	Belloso	21.50	21.50	100.00
<b>SBC3_ilop</b>	Ilopango	14.09	42.33	33.29
<b>SBC3_bell</b>	Belloso	28.24		66.71
<b>SBC4_proc</b>	Procafé	5.07	40.03	12.67
<b>SBC4_bell</b>	Belloso	34.96		87.33
<b>SBC5_proc</b>	Procafé	0.57	22.97	2.48
<b>SBC5_bell</b>	Belloso	22.40		97.52
<b>SBC6_bell</b>	Belloso	6.94	6.94	100.00
<b>SBC7_proc</b>	Procafé	1.01	22.17	4.56

SUB CUENCA	ESTACIÓN	ÁREA (km <sup>2</sup> )	TOTAL, DE ÁREA DE SUB CUENCA (km <sup>2</sup> )	PORCENTAJE DE ÁREA (%)
SBC7_bell	Belloso	21.16		95.44
SBC8_bell	Belloso	3.49	3.49	100.00
SBC9_bell	Belloso	4.92	4.92	100.00
SBC10_proc	Procafé	14.73	48.19	30.57
SBC10_bell	Belloso	33.46		69.43

Tabla 4-8 : Áreas de influencia de estaciones en subcuencas, según el método de los Polígonos de Thiessen. Fuente: elaboración propia.

Así, para obtener unos registros adecuados para la simulación en HEC-HMS, se debe de afectar a cada uno de los valores de registro de lluvia con los factores previamente calculados. Para ellos se tomó la ecuación que se basa en que la suma de los hidrogramas resultantes, que debe de ser igual al hidrograma de la tormenta registrada por las estaciones y también como dice a teoría de los Polígonos de Thiessen que, para la obtención de la lluvia promedio de una zona (Subcuenca) se debe de calcular la lluvia ponderada sumando producto de la precipitación de cada pluviómetro con el factor ponderado de área (Tabla 4.9). De tal manera de obtener los nuevos registros que se muestran a continuación:

$$\text{Registro ponderado} = \text{Registro} * W_t \text{ (Ecuación 4.4)}$$

Donde

$W_t$  = Peso obtenido por método Thiessen

Es de hacer notar que, el método de los Polígonos de Thiessen puede “afectar” a una subcuenca por más de una estación pluviométrica, eso quiere decir que para obtener los registros que se usarán en la modelación, se deberá sumar el registro ponderado de cada estación para dicha subcuenca. Para brindar una visión más clara del proceso empleado, en este apartado se mostrará un ejemplo del procedimiento usando el primer registro de lluvia de las tres estaciones. Se tiene que, el primer registro de la Tormenta IDA, para las tres estaciones es el siguiente:

FECHA	HORA	Registro (mm)		
		Procafé	Belloso	Ilopango
06/11/2009	14:15	0.2	0.3	0

**Tabla 4-9: ejemplo de registro de lluvia de estaciones. Fuente: elaboración propia.**

Según la tabla 4-8 la cuenca “SBC1” se ve influenciado por las estaciones Belloso y Procafé, siendo respectivamente sus pesos de afectación 0.2811, 0.7189 y 0 para la estación Ilopango por no ejercer un efecto sobre la subcuenca. Por lo tanto, se procede a hacer el producto del registro (R) y su respectivo peso de la manera siguiente:

$$R_{SBC1} = R_{Procafe} * W_t + R_{beloso} * W_t + R_{ilopango} * W_t$$

$$R_{SBC1} = 0.2 * 0.7189 + 0.3 * 0.2811 + 0 * 0$$

$$R_{SBC1} = 0.228 \text{ mm}$$

Entonces eso se efectuará para cada registro de lluvia para obtener un registro equivalente para cada estación, al final del proceso se obtuvo la cantidad de 10 nuevos registros, uno para cada subcuenca. Finalmente, estos datos son introducidos al programa HEC-HMS creando una nueva serie de datos de lluvia, esto se hace seleccionando la pestaña componentes y luego **Time-series data manager**. Entonces, aparecerán, unos formularios para rellenar los datos de lluvia del proyecto, y estos se introducirán en milímetros. Por defecto el modelo está preparado para recibir datos de lluvia en milímetros. No hace falta definir las coordenadas geográficas del “**gage**”, y tan solo hay que indicar la fecha y hora de inicio de la lluvia. Si se trabaja con lluvias sintéticas (no reales) de proyecto, se elegirá un inicio de tiempo cualquiera (habitualmente el 1 de enero a las 00:00 horas, por ejemplo). El programa permite ver el hietograma de precipitación de acuerdo al tiempo previamente establecido; para cada subcuenca se introdujeron los datos de lluvia previamente calculados, y se obtuvieron 10 nuevos registros, asignándoseles el nombre código de “**IDA\_sbc**” como se puede ver en la Imagen 4-9.

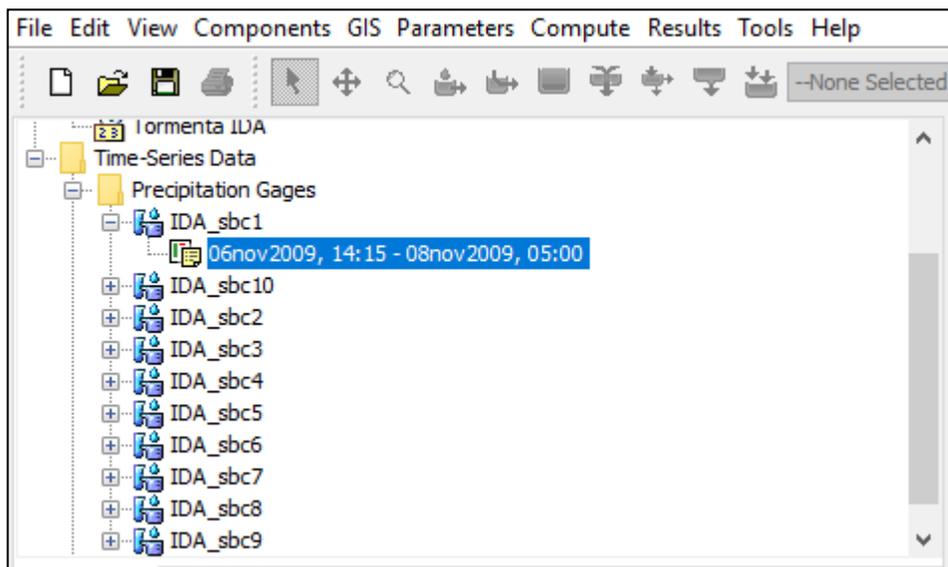


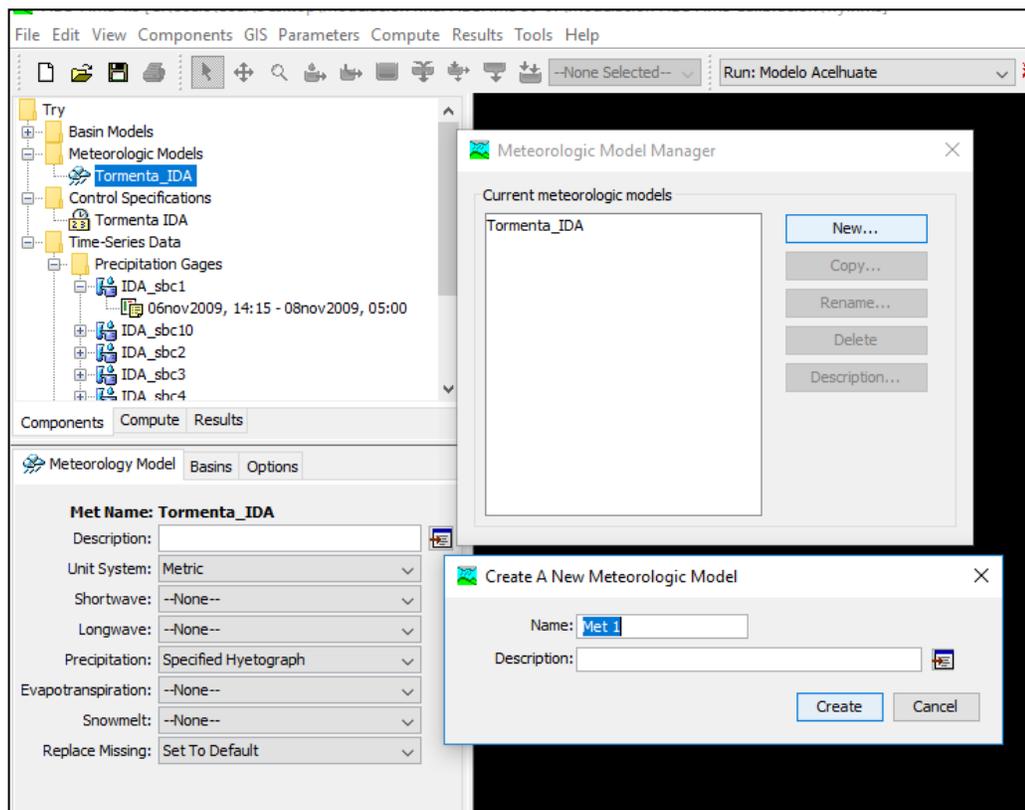
Imagen 4-9: Registro de lluvia e histograma en HEC HMS. Fuente: Elaboración propia.

#### 4.7 MODELO METEOROLÓGICO

El modelo meteorológico calcula la entrada de precipitación que requiere un elemento de subcuenca (Subbasin). El tipo de dato que el programa acepta en su análisis son uno o varios eventos lluviosos puntuales, lluvias de diseño, precipitación congelada, evapotranspiración o precipitación líquida. Se debe dotar al programa de un modelo meteorológico que debe incluir como mínimo una lluvia, esta lluvia será la precipitación bruta del modelo que se puede obtener con datos reales de precipitación, o bien, estimándola a partir de algún método de los disponibles, tal como el de los Bloques Alternos, generados a base de las curvas I-D-F.

El método de cálculo utilizado para ingresar los datos al modelo fueron hietogramas específicos, en que se aplicó los hietogramas calculados de una serie de tormentas medidas por estaciones pluviométricas en la región de estudio. Por su posición geográfica cada estación tiene una influencia menor o mayor en cada una de las subcuencas, para saber en cuanta magnitud influye más una estación con respecto a otra sobre una cuenca, para el caso se utilizó el método de los Polígonos de Thyssen (ver Mapa 4.3), como se expuso previamente, y se crearon los 10 nuevos registros de lluvia.

Para integrar los datos en el programa se debe de crear un modelo meteorológico seleccionando la opción **Components** y luego **Meteorologic Model Manager** (dependerá del idioma configurado); entonces aparecerá un formulario en donde permite agregar una descripción del modelo y el nombre con el que se quiere que aparezca en la interfaz y automáticamente aparecerá en el espacio de elementos del trabajo (Imagen 4-10)



**Imagen 4-10: Interfaz de creación de una tormenta en HEC HMS. Fuente: elaboración propia.**

A continuación, si se selecciona el modelo meteorológico recién creado se podrá tener acceso al editor de componentes de la misma, en ese espacio es posible cambiar algunos elementos del modelo, como lo es las unidades con las que se quiere trabajar, el método de análisis de precipitación que el programa desarrollará, evapotranspiración, precipitación congelada, etc. Para el análisis de la cuenca del Rio Acelhuate se establecieron las unidades métricas para trabajar en milímetros de lluvia y se aseguró el método de precipitación como

**Specified Hyetograph** para poder ingresar los registros de lluvia a una respectiva subcuenca.

The image shows a software interface for a meteorological model. At the top, there are three tabs: 'Components', 'Compute', and 'Results'. Below this, there is a 'Meteorology Model' section with two sub-tabs: 'Basins' and 'Options'. The 'Options' tab is active, showing a form for a basin named 'Tormenta IDA'. The form includes several fields:

- Met Name:** Tormenta IDA
- Description:** An empty text box with a help icon to its right.
- Unit System:** Metric (dropdown menu)
- Shortwave:** --None-- (dropdown menu)
- Longwave:** --None-- (dropdown menu)
- Precipitation:** Specified Hyetograph (dropdown menu, highlighted with a dashed border)
- Evapotranspiration:** --None-- (dropdown menu)
- Snowmelt:** --None-- (dropdown menu)
- Replace Missing:** Abort Compute (dropdown menu)

**Imagen 4-11: Interfaz de editor de componentes de modelo meteorológico. Fuente: Elaboración propia.**

El formulario del Modelo Meteorológico se muestra como en la imagen anterior (Imagen 4-11); luego seleccionando la pestaña **Basins** y activando la opción **Yes**, permite especificar las subcuentas a usar en la modelación (imagen 4-12), como también definir qué registro tomará cada una de ellas. La asignación de un

registro respectivo a cada estación se realiza seleccionando la opción **Specified Hyetograph**, y así, una por una se determina hasta completar todas las subcuencas del río Acelhuate (Imagen 4-13).

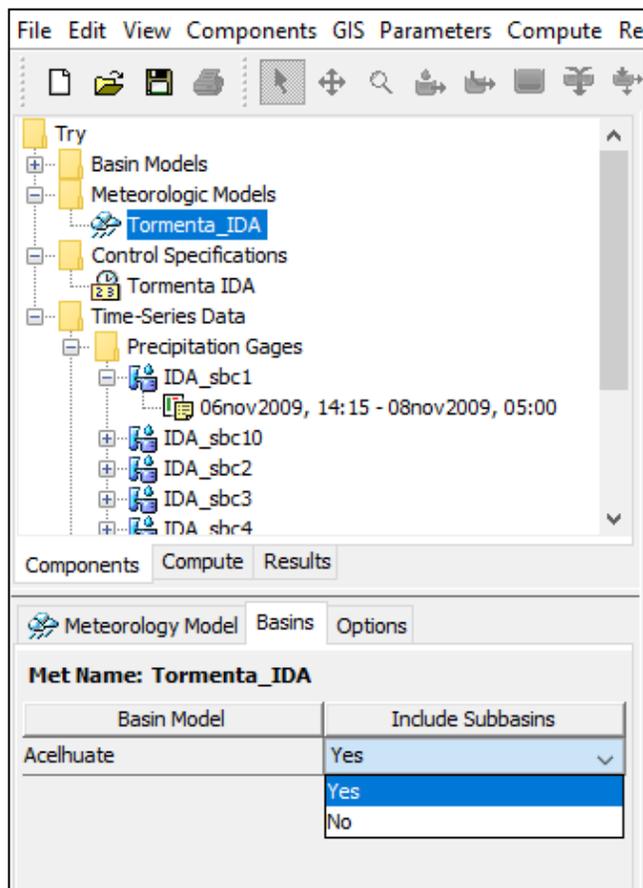


Imagen 4-12: Definición de cuencas en la modelación en HEC HMS. Fuente: Elaboración propia

Specified Hyetograph	
Met Name: Tormenta_IDA	
Subbasin Name	Gage
SBC10	IDA_sbc10
SBC2	IDA_sbc2
SBC3	IDA_sbc3
SBC4	IDA_sbc4
SBC5	IDA_sbc5
SBC6	IDA_sbc6
SBC7	IDA_sbc7
SBC8	IDA_sbc8
SBC9	IDA_sbc9
SCB1	IDA_sbc1

Imagen 4-13: Asignación de tormenta a cada subcuenca. Fuente: Elaboración propia.

#### 4.8 ESPECIFICACIÓN DE CONTROL

En seguida se debe definir unas especificaciones de cálculo para determinar así la cantidad de puntos en que se discretizan los hidrogramas, fijar el tiempo de duración en que el programa hará la simulación. Los datos que conforman la especificación de control lo conforman una fecha y la hora de inicio hasta una fecha y hora de finalización, junto con el intervalo de tiempo de registro usado. Usualmente se usa el tiempo de la duración de la tormenta que se usa para el análisis. Para este análisis el tiempo de duración de la tormenta Ida esta entre el 6 hasta el 8 de noviembre, un total de dos días (Ver Imagen 4-14).

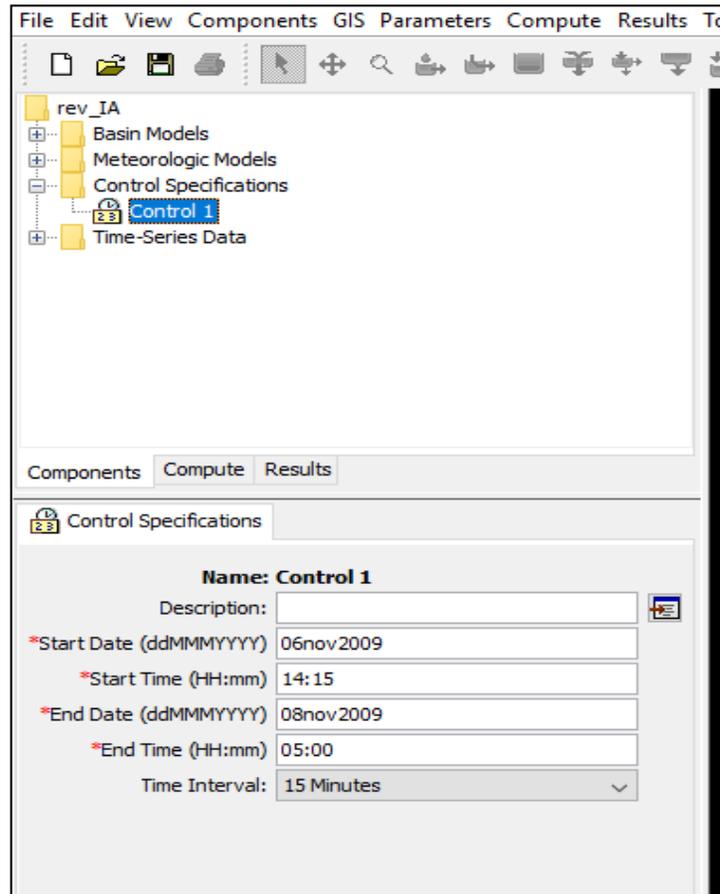


Imagen 4-14: captura tomada de programa HEC-HMS. Fuente: Elaboración propia.

#### 4.9 RESULTADOS DE MODELACIÓN

En esta parte del proceso se le indica al programa combinar los componentes antes definidos y se le ordena al programa que ejecute los cálculos para así tener los resultados del comportamiento hidráulico de la cuenca. El programa entrelaza el modelo físico de la cuenca con el modelo meteorológico y las especificaciones de control. Los resultados del programa pueden variarse a necesidad el usuario, para intereses de este trabajo lo que se busca es conocer los caudales generados por el registro de lluvia registrado sobre la cuenca del Rio Acelhuate

Para modelar el proyecto se debe de crear una **Run** el cual es el comando en donde el programa combina todos los datos ingresados; se debe de ingresar a la pestaña **Compute** y en seguida seleccionar la opción **Create Compute**; la cual abre una serie de opciones, de las cuales se debe de seleccionar la opción **Simulation Compute**.

Al haber creado la simulación aparecerá en el área de **Explorador de cuenca** en la pestaña de **Compute** y solamente se deberá de ordenar al programa que inicie la simulación con el comando dando click derecho a la corrida creada y seleccionando **Compute**. Los resultados de la modelación de la cuenca del rio Acelhuate se muestran en la captura tomada en HEC-HMS (Ver Imagen 4-15)

Show Elements:  Volume Units:  MM  1000 M3 Sorting:

Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (MM)
SBC6	7,03	292,8	07nov2009, 23:00	577,14
SBC7	22,49	895,2	07nov2009, 23:00	529,35
SBC4	40,51	1485,7	07nov2009, 23:30	518,41
PUNTO B	63,75	2392,4	07nov2009, 23:00	522,75
SBC5	23,24	921,0	07nov2009, 23:00	530,32
TRAMO 2	63,75	2187,2	08nov2009, 00:00	512,60
PUNTO C	93,27	3216,5	07nov2009, 23:30	521,50
TRAMO 3	93,27	3127,6	07nov2009, 23:30	519,16
PUNTO A	80,22	2188,2	07nov2009, 23:30	392,61
SBC2	22,88	896,5	07nov2009, 23:30	536,65
SBC1	57,34	1291,7	07nov2009, 23:30	335,13
TRAMO 1	80,22	1766,6	08nov2009, 00:30	376,53
SBC3	46,57	1396,8	07nov2009, 23:30	441,05
SBC8	3,53	151,4	07nov2009, 23:00	579,19
PUNTO D	223,59	6080,9	08nov2009, 00:00	452,67
TRAMO 4	223,59	5887,9	08nov2009, 00:00	448,09
SBC10	54,29	1528,0	08nov2009, 00:00	426,50
SBC9	5,13	222,1	07nov2009, 23:00	589,74
SALIDA	283,01	7534,4	07nov2009, 23:30	446,47

**Imagen 4-15: Resultados de la modelación en la cuenca del rio Acelhuate. Fuente: Elaboración propia.**

#### 4.10 PROCESO DE CALIBRACIÓN DE LA MODELACIÓN

Al confeccionar el modelo hidrológico de una cuenca, todos los datos introducidos (excepto, en la mayoría de las ocasiones, la superficie de la cuenca) están afectados a grandes errores o son suposiciones que no necesariamente estén apegadas a la realidad del lugar.

Se pueden presentar grandes diferencias en los resultados del modelo hidrológico debido a esta incertidumbre en los datos, sobre todos en el caudal pico que es el parámetro de comparación en este punto. Debido a ello es necesario hacer un ajuste de calibración del modelo usando datos obtenido en

campo. Si se dispone de datos de caudales se pueden afinar o mejorar los datos introducidos.

Es necesario ejecutar el modelo para un periodo en que conozcamos los caudales que se produjeron en la cuenca, pueden ser los caudales de un evento meteorológico usado para la modelación (el periodo de caudales medidos es conveniente que sea igual al periodo de control), luego se ingresa el registro de caudal con el que se cuente; esto es similar a la introducción de datos de precipitaciones, luego se ingresa al menú de **Components**, luego a **Time-Series Data Manager** y se elige **Discharge Gages** (imagen 4-16) y se le asigna un nombre (caudal medido en este caso).

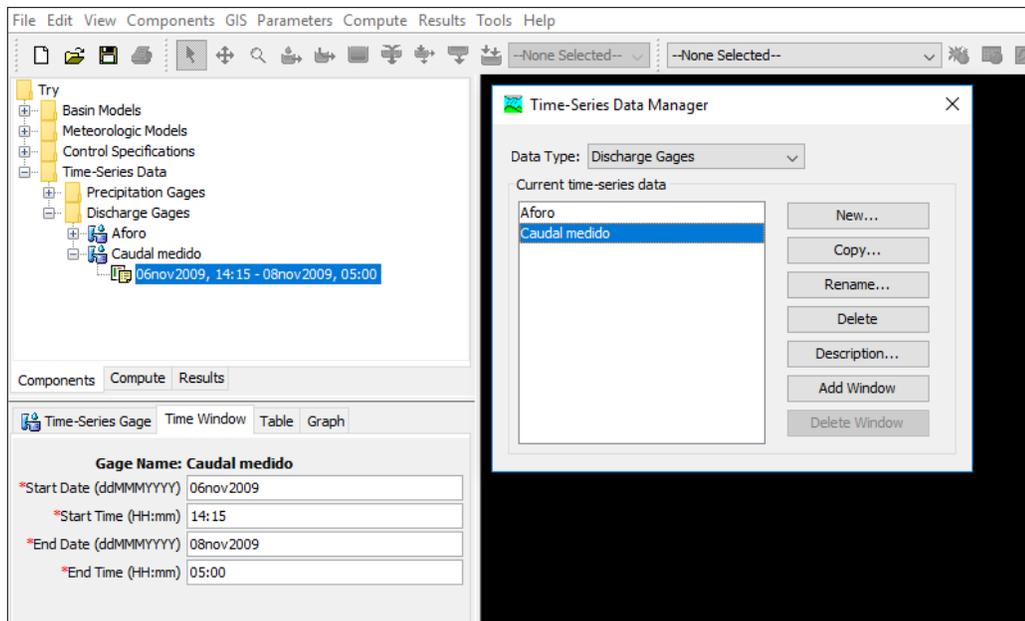


Imagen 4-16: Creación de registro de caudales observados. Fuente: Elaboración propia.

Ahora se le debe de adjudicar el registro de caudal del evento al punto correspondiente en el modelaje físico (punto A en este caso), para ello se debe de seleccionar el punto, y en la pestaña **Options** se accede a **Observed Flow** donde se seleccionará el registro (Ver Imagen 4-17), este nuevo registro no modificará el resultado al momento de correr el programa, ya que no interfiere en el análisis, su única función es mostrar en un a grafica la diferencia que hay entre el caudal producto del modelaje y el caudal observado (imagen 4-18)

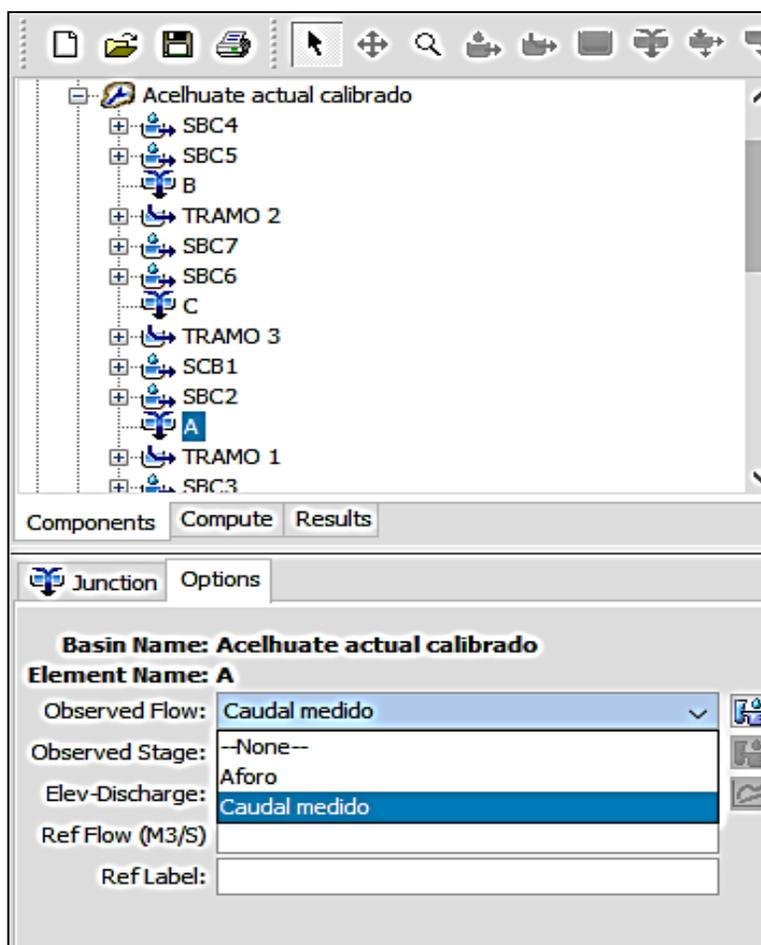
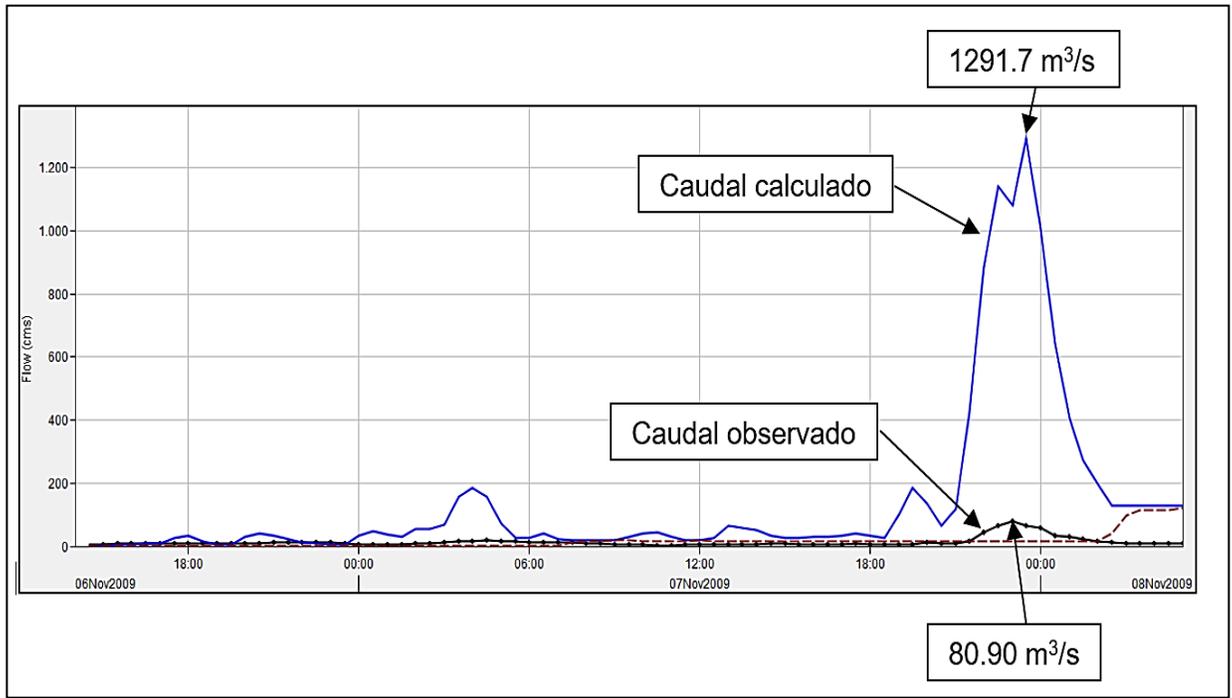


Imagen 4-17: Atribución de caudales registrados a un punto. Fuente: Elaboración propia.

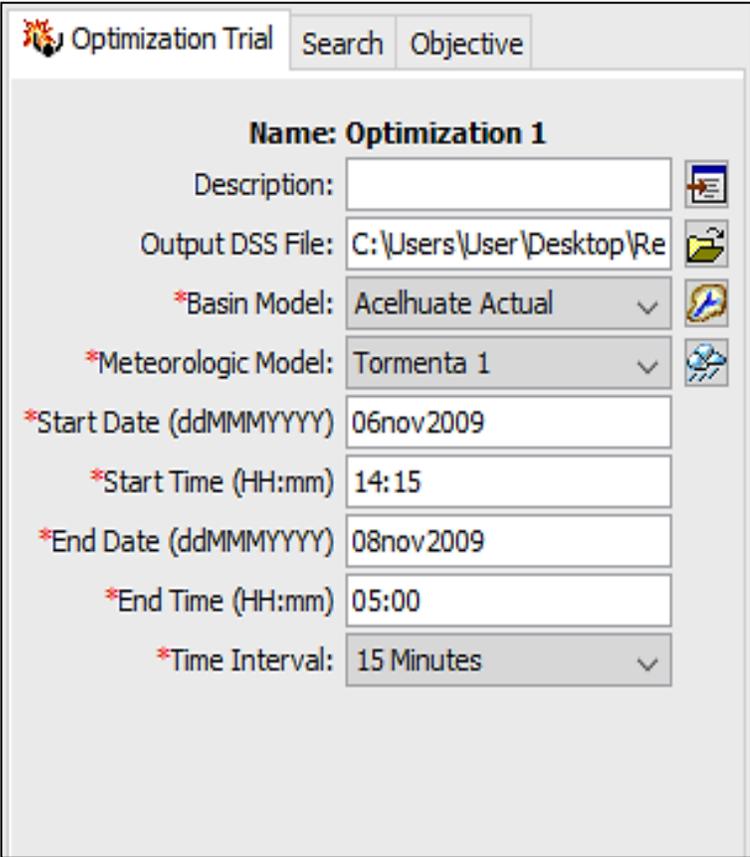


**Imagen 4-18: Resultado de modelación en HEC HMS. Fuente: Elaboración propia.**

Se observa en la imagen 4-18 que hay una importante diferencia en los caudales obtenidos entre ambas curvas, el hidrograma real aparece como una línea con puntos negros y la línea azul es el hidrograma generado por el HEC-HMS. La diferencia puede ser debido a datos erróneos de tiempo de retardo, infiltraciones iniciales no consideradas, etc. Como el hidrograma generado no se ajusta a los caudales reales, se deben de cambiar algunos parámetros y volver a ejecutar el modelo hasta conseguir una superposición satisfactoria.

Se debe de crear un ensayo de optimización en el programa para ello se debe de acceder al menú **Compute**, luego en **Create Optimization Trial** en el cual se

adjunta el nombre del ensayo, se elige la cuenca en que se aplicara la optimización y se elige el elemento meteorológico, además, se especifica el periodo de duración de la optimización que es igual al tiempo de especificaciones de control o igual al tiempo del periodo de registro de caudales observados y el editor de componentes se aparquera como en la imagen siguiente.



Field	Value
Name	Optimization 1
Description	
Output DSS File	C:\Users\User\Desktop\Re
*Basin Model	Acelhuate Actual
*Meteorologic Model	Tormenta 1
*Start Date (ddMMYYYY)	06nov2009
*Start Time (HH:mm)	14:15
*End Date (ddMMYYYY)	08nov2009
*End Time (HH:mm)	05:00
*Time Interval	15 Minutes

Imagen 4-19: Ensayo de optimización. Fuente: Elaboración propia.

Luego se debe de agregar los parámetros que se modificarán. Para indicar estos parámetros se debe de seleccionar el ensayo de optimización recién creado, se

desplegará una lista de opción de los cuales se debe optar por **Add Parameter**. seleccionando el parámetro recién creado se puede indicar el elemento que se quiere someter a cambio, para este caso se seleccionan todas las subcuencas, y luego se especifica el valor que se quiere cambiar a favor de un resultado más acorde a los caudales registrados, se presenta una imagen describiendo el proceso.

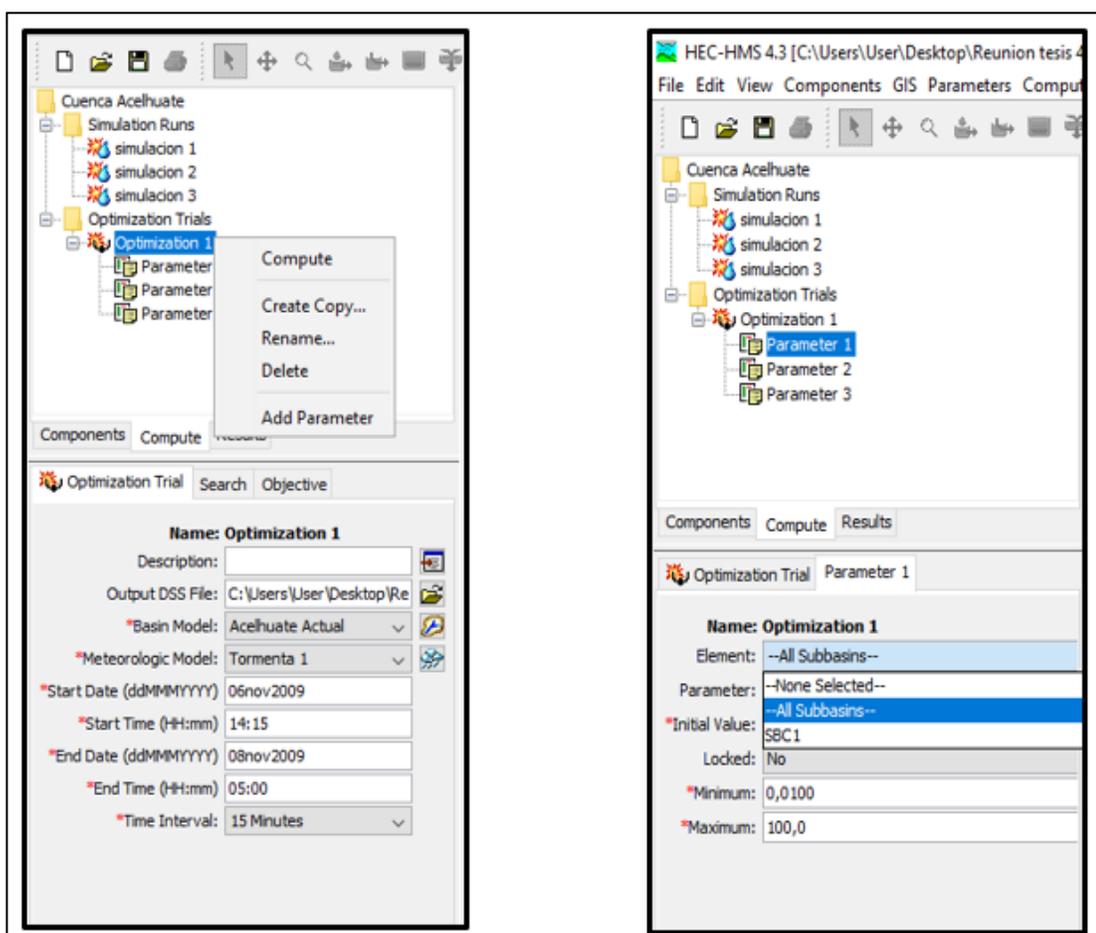
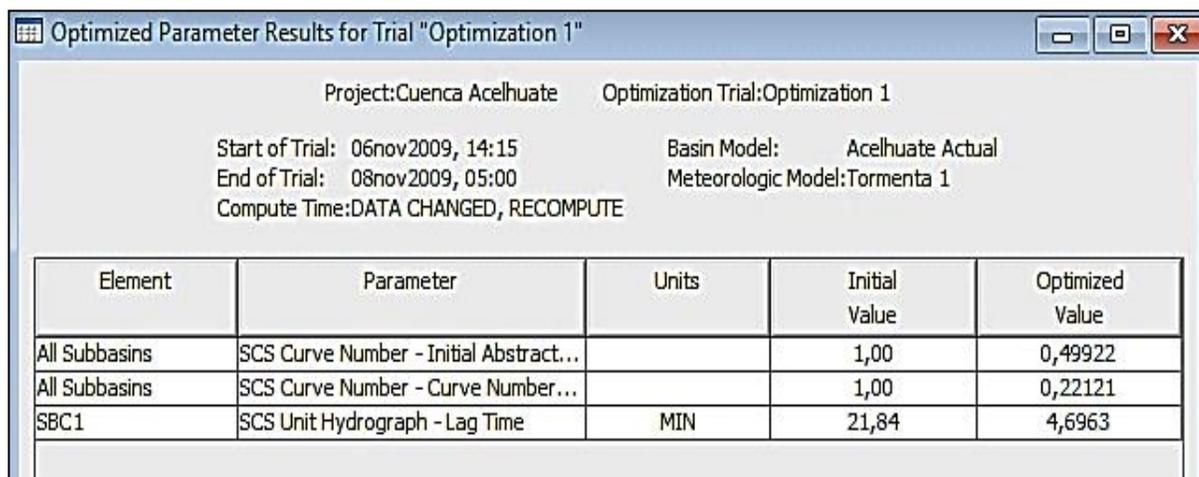


Imagen 4-20: Creación y asignación de parámetros para optimización. Fuente: Elaboración propia.

A los valores que se establecen a ser modificados, se les pueden atribuir restricciones como lo puede ser un valor mínimo y un valor máximo; luego de ser corrida la optimización, el programa brindará los datos necesarios para lograr una buena superposición de las curvas de caudales; para ver estos parámetros se debe de ir a la pestaña **Result** y en la carpeta **Optimization Trials** y se producirá la optimización de los parámetros. El resultado obtenido se puede ver en las Imágenes 4-21 y 4-22. La curva resultante, como se puede observar es muy aceptable, por lo tanto, se deberá correr de nuevo el modelo cambiando previamente los valores obtenidos por la optimización. Para una validación final, se puede notar que el caudal pico observado fue de 80.90 m<sup>3</sup>/s y el caudal obtenido de la calibración fue de 86.70 m<sup>3</sup>/s, por lo tanto, haciendo la relación se obtiene una diferencia de **3.3%**.

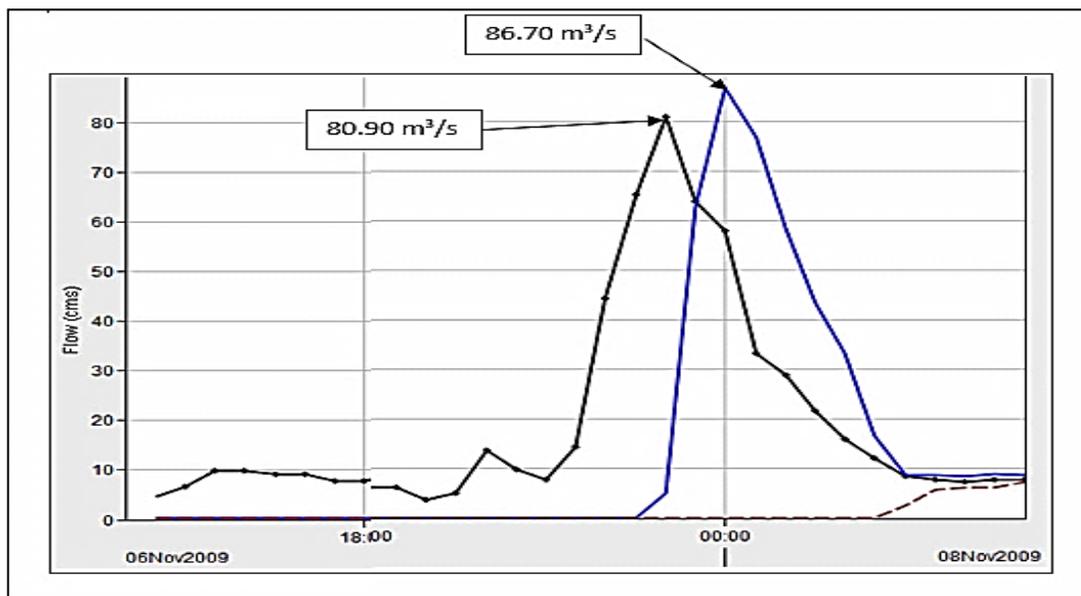


Project: Cuenca Acelhuate      Optimization Trial: Optimization 1

Start of Trial: 06nov2009, 14:15      Basin Model: Acelhuate Actual  
 End of Trial: 08nov2009, 05:00      Meteorologic Model: Tormenta 1  
 Compute Time: DATA CHANGED, RECOMPUTE

Element	Parameter	Units	Initial Value	Optimized Value
All Subbasins	SCS Curve Number - Initial Abstract...		1,00	0,49922
All Subbasins	SCS Curve Number - Curve Number...		1,00	0,22121
SBC1	SCS Unit Hydrograph - Lag Time	MIN	21,84	4,6963

**Imagen 4-21: Parámetros optimizados. Fuente: Elaboración propia.**



**Imagen 4-22: Gráfica de caudal optimizado. Fuente: Elaboración propia.**

Este proceso de calibración se basó en los datos de lluvia obtenidos en la estación Belloso, para construir la curva de calibración en HEC HMS, pero se puede observar que los caudales máximos del resultado de calibración son muy bajos en comparación a estudios y documentos de donde se realizaron análisis en zonas cercanas al punto de la estación Belloso (MARN/DOA/Adriana Erazo, 2010). La razón de esta diferencia de resultados se presume, que es debido a que la estación Belloso (del cual fueron tomados los datos de lluvia para la calibración), es una estación relativamente nueva y que ha presentado errores en sus aparatos de medición por lo que sus registros no representan la realidad de la zona en su totalidad. Por tal motivo se optará por otro método de calibración más apropiado para este caso en particular, que brinde mejores resultados; el método a utilizar será el de la **Curva de Calibración**.

#### 4.10.1 PROCESO PARA CONSTRUIR LA CURVA DE CALIBRACIÓN

El proceso de determinación de los caudales en función de los diferentes tirantes que puede alcanzar el agua en la sección del canal fue realizado con ayuda de hojas de cálculo en Excel.

Con este procedimiento se obtuvieron un total de 27 datos de caudal, correspondientes a igual número tirantes de nivel de agua de 0.20 metros de diferencia, en cada dato de cota en la sección transversal denominada Málaga, la cual se ubica en el sector de la colonia La Málaga, en San Salvador; además, se estableció una pendiente del canal para ese punto de 1.99 %, cuyo dato se obtuvo con el apoyo de la herramienta Google Earth y las curvas de nivel de la zona, estableciendo una sección longitudinal a 50 metros aguas arriba y 50 metros aguas abajo del punto de interés como se observa en la Imagen 4-23.



Imagen 4-23: Captura de Google Earth. Fuente: Elaboración propia.

El proceso de cálculo de caudal fue en base en la ecuación de Manning (ver Ecuación 4.5), que fue diseñada para el cálculo de velocidad de carga de agua en canales sin presión interior; esta expresión maneja un valor adimensional de rugosidad de las paredes, llamado “Coeficiente n de Manning”, que indica la resistencia al movimiento que presenta un volumen de agua en el medio donde circula; es decir, una pérdida de energía cinética por el frenado del fluido por la superficie de las paredes laterales y de fondo.

En este sentido, el coeficiente n de Manning, depende de las características de la superficie de las paredes del canal donde circula el agua, este valor puede encontrarse en tablas o definirse en laboratorios para materiales en específico; sin embargo, para esta investigación se asumirá un valor de 0.019, ya que se ha demostrado experimentalmente que para canales de concreto sin un acabado, el coeficiente de rugosidad es de 0.014 como valor mínimo y como valor máximo 0.020, y ya que el estado actual del cauce es el de un concreto con acabado no reciente (viejo), se decidió tomar un valor cercano al máximo coeficiente de Manning, ya antes apuntado<sup>64</sup>.

---

<sup>64</sup>. Diseño hidráulico de obras complementarias en caminos rurales. SAGARPA (2016), 1<sup>o</sup> edición. Página 33

$$Q = \frac{1}{n} * R_h^{\frac{2}{3}} * A * S^{1/2} \text{ (Ecuación 4.5)}$$

**Dónde:**

Q: caudal m<sup>3</sup>/s

Rh: Radio hidráulico

A: área de la sección transversal m<sup>2</sup>

S: pendiente del tramo

En la sección trasversal del punto Málaga (Ilustración 4-14) ubicada en un punto cercano de la intersección de la 13<sup>a</sup> Avenida Sur con la calle Francisco Menéndez en San Salvador, y a unos 20 metros aguas arriba del rio Arenal Monserrat; fueron obtenidos datos de los caudales a través de la fórmula de Manning, y se muestra un ejemplo del cálculo realizado para una altura de **4.50 metros** tomado desde el punto más bajo de la sección trasversal; además, se trazó la línea de lámina de agua, la cual contra el fondo, forma áreas geométricas conocidas, pudiéndose separar para tratarlas individualmente y simplificar los cálculos.



**Ilustración 4-14: Sección de cauce en punto Málaga. Fuente: Elaboración propia.**

Se calcularon las áreas de las formas triangulares y trapezoidales resultantes y además se calculó el Perímetro Mojado y el Radio Hidráulico, para finalmente calcular el caudal con la ecuación de Manning en función de la altura de 4.5 metros (Tabla 4-10) y así sumar los diferentes caudales acumulados para cada tirante, el caudal calculado del ejemplo dio como resultado  $974.23 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Corr.	Figura	Área (m <sup>2</sup> )	Perímetro mojado (m)	Radio Hidráulico	n (Manning)	Pendiente (%)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
1	Triángulo	0.050	1.452	0.035	0.019	1.99	0.040
2	Cuadrado	0.696	0.480	1.450	0.019	1.99	6.620
3	Trapezoide	0.255	2.761	0.092	0.019	1.99	0.386
4	Trapezoide	1.437	0.439	3.271	0.019	1.99	23.514
5	Cuadrado	44.955	9.990	4.500	0.019	1.99	909.758

Corr.	Figura	Área (m <sup>2</sup> )	Perímetro mojado (m)	Radio Hidráulico	n (Manning)	Pendiente (%)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
6	Trapezoide	0.661	0.242	2.730	0.019	1.99	9.582
7	Trapezoide	1.125	2.218	0.507	0.019	1.99	5.315
8	Cuadrado	1.230	0.580	2.120	0.019	1.99	15.066
9	Triangulo	0.956	2.304	0.415	0.019	1.99	3.948
<b>Suma</b>		51.3646					974.23

**Tabla 4-10: Cálculo de caudal en la sección Málaga. Fuente: Elaboración propia.**

Este proceso se realizó para diferentes cotas con el fin de tener una serie de datos que permitan construir una gráfica característica de caudal para esta sección con las condiciones geométricas e hidráulicas actuales; los resultados se muestran en la siguiente Tabla 4-11:

Nº	COTA (m)	CAUDAL (m <sup>3</sup> /s)
1	0.2	5.12
2	0.4	16.43
3	0.6	32.47
4	0.8	52.62
5	1	76.48
6	1.2	103.80
7	1.4	134.36
8	1.6	168.02
9	1.8	204.63
10	2	244.08
11	2.2	286.29
12	2.4	331.18
13	2.6	379.05
14	2.8	429.81
15	3	483.34
16	3.2	539.72

<b>17</b>	<b>3.4</b>	<b>599.07</b>
<b>18</b>	3.6	661.24
<b>19</b>	3.8	726.15
<b>20</b>	4	793.75
<b>21</b>	4.2	864.00
<b>22</b>	4.4	936.84
<b>23</b>	4.6	1012.25
<b>24</b>	4.8	1090.19
<b>25</b>	5	1170.63
<b>26</b>	5.2	1253.56
<b>27</b>	5.35	1317.29

**Tabla 4-11: Caudales para diferentes alturas. Fuente: Elaboración propia.**

Existen diferentes métodos que se puede utilizar para la elaboración de curvas de descarga simples, pero el seleccionado en este trabajo es el método analítico basado en expresiones logarítmicas también llamado **Curva Potencial**. Este método solo es aplicable cuando la sección de aforos es uniforme o se ajusta a un rectángulo o trapecio<sup>65</sup>, acotándose además que el caudal máximo que puede soportar esta sección hidráulica es de **1,317.29 m<sup>3</sup>/s**, con las condiciones antes comentadas.

---

<sup>65</sup> Método para elaborar curvas de calibración en cauces aluviales, A. Preciado, 1969, 1ª Edición. Página 10.

El método tiene como principio ajustar los datos a una curva tipo potencial<sup>66</sup>, definida por la ecuación de una parábola de orden superior, tangente al eje de las ordenadas. En este caso, el caudal queda dado por la ecuación 4.6:

$$Q = K * (H - H_o)^n \text{ (Ecuación 4.6)}$$

Donde:

Q: caudal en m<sup>3</sup>/s

H: nivel de agua leído en la escala, en metros

H<sub>o</sub>: Diferencia de nivel entre el punto de mayor profundidad del cauce y el cero de la escala en metros

K, n: Constantes a determinar

Si, se le aplican logaritmos a la ecuación anterior, se puede notar que la expresión se asemeja a una ecuación de tipo lineal con pendiente **n** e intercepto en **log K** en un sistema de coordenadas, cuyos ejes son **Log (h-ho)** y **Log Q**, es decir una ecuación de regresión lineal simple de la forma **y = mx+b**, siendo los parámetros **m** y **b** los equivalentes de **n** y **k** respectivamente; por lo tanto, se aplicará el

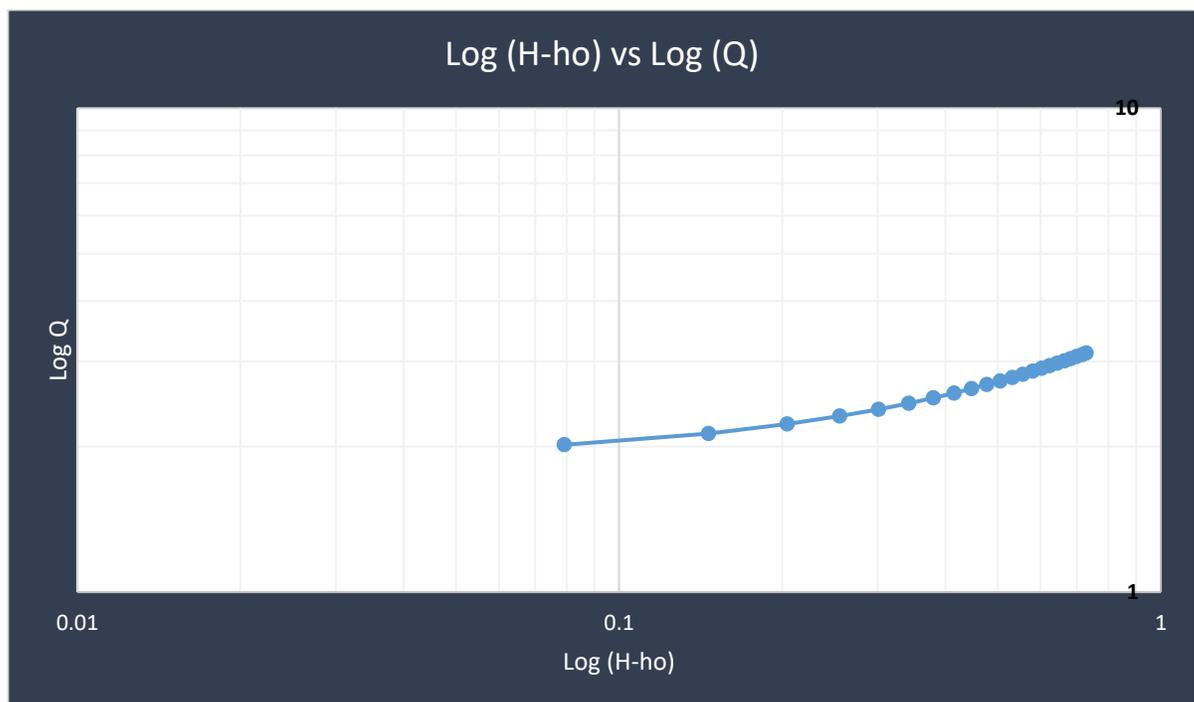
---

<sup>66</sup> Método para elaborar curvas de calibración en cauces aluviales. A. Preciado. (1969). 1ª Edición. Página 10.

método de resolución de una regresión lineal en la Ecuación 4.7, con ello se determinará el valor de las constantes **n** y **k**.

$$\text{Log}Q = \log K + n \cdot \log (H-h_0) \text{ (Ecuación 4.7)}$$

Al graficar en una escala logarítmica el valor del logaritmo del caudal contra el logaritmo de la diferencia entre la altura de agua y la altura donde el caudal es cero (Ilustración 4-15), se puede apreciar la tendencia notablemente mayor a una curva.



**Ilustración 4-15: Gráfica de caudal y altura en escala logarítmica. Fuente: Elaboración propia.**

Como se pudo haber notado en los valores del eje x, hay un dato expresado como  $H_0$ , que es una altura que representa el nivel en donde el caudal tendrá un valor de cero, el valor de  $h_0$  es la diferencia de nivel entre el punto de mayor profundidad del cauce y el cero de la escala, pudiendo ser positivo o negativo según sea el caso (ver Ilustración 4-16). Cuando el lecho del río está por debajo del cero de la escala, será negativo y cuando lecho del río está por encima del cero será positivo.<sup>67</sup>

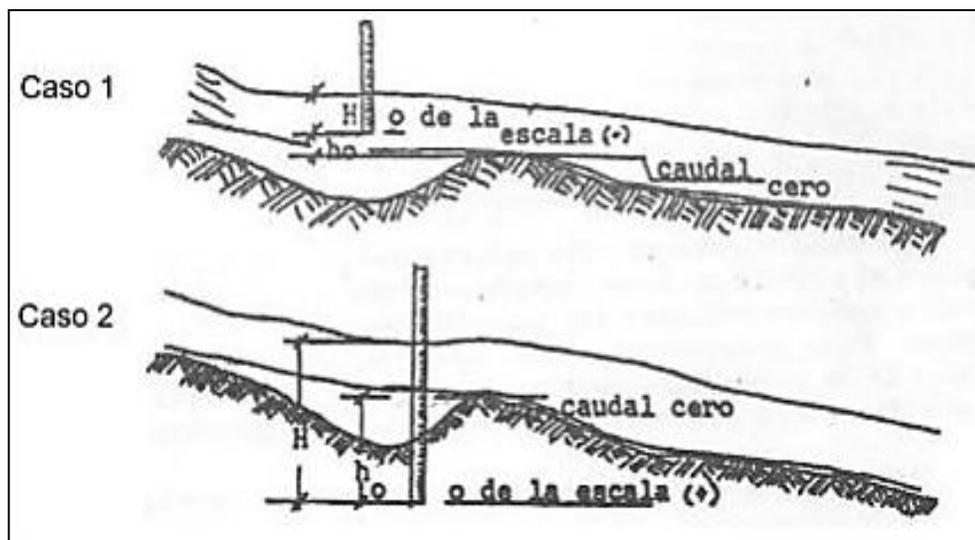


Ilustración 4-16: Nivel cero de un cauce. Fuente: Walfred C. Estrada (2016)

<sup>67</sup> Curvas de calibración de caudales de las estaciones hidrológicas de la cuenca Coatán a la cuenca madre vieja, correspondiente a la vertiente del pacífico para el periodo 2010-2013, Walfred C. Estrada, 2016, 1ª Edición, Pagina 39.

El valor de  $H_0$  fue sumido con valor de 0.0 ya que se supone que el medidor de altura de agua esta exactamente a la altura cero o en sus cercanías de la sección transversal del punto Málaga, pero no necesariamente es un valor fijo ya que puede cambiar para ajustar la curva a características más reales; habiendo definido el valor de  $H_0$  se restara a cada una de las cotas, con el fin de obtener el valor del logaritmo de esta diferencia. Con lo anterior expuesto se presentan los valores calculados resumidos en la Tabla 4-12.

				X	Y	XY	X^2	Y^2
Nº	COTA	CAUDAL	H-ho	Log (H-ho)	Log (Q)	(logQ)*Log (H-ho)	(Log(H-ho))^2	Log (Q)^2
1	0.2	5.12227436	0.2	-0.69897	0.70946284	-0.49589324	0.48855907	0.50333752
2	0.4	16.4278393	0.4	-0.39794001	1.21558045	-0.48372809	0.15835625	1.47763582
3	0.6	32.4731646	0.6	-0.22184875	1.51152461	-0.33532985	0.04921687	2.28470666
4	0.8	52.6181329	0.8	-0.09691001	1.72113543	-0.16679526	0.00939155	2.96230718
5	1	76.4818613	1	0	1.88355845	0	0	3.54779243
6	1.2	103.79725	1.2	0.07918125	2.01618585	0.15964411	0.00626967	4.06500537
7	1.4	134.362167	1.4	0.14612804	2.128277	0.31100094	0.0213534	4.52956298
8	1.6	168.016049	1.6	0.20411998	2.22535077	0.45423856	0.04166497	4.95218604
9	1.8	204.62698	1.8	0.25527251	2.3109629	0.58992529	0.06516405	5.3405495
10	2	244.083838	2	0.30103	2.38753902	0.71872086	0.09061906	5.70034259
11	2.2	286.291207	2.2	0.34242268	2.45680801	0.84126678	0.11725329	6.0359056

				X	Y	XY	X^2	Y^2
Nº	COTA	CAUDAL	H-ho	Log (H-ho)	Log (Q)	(logQ)*Log (H-ho)	(Log(H-ho))^2	Log (Q)^2
12	2.4	331.177631	2.4	0.38021124	2.520061	0.95815552	0.14456059	6.35070742
13	2.6	379.047379	2.6	0.41497335	2.5786935	1.07008907	0.17220288	6.64966015
14	2.8	429.805522	2.8	0.44715803	2.63327199	1.17748872	0.1999503	6.93412138
15	3	483.336422	3	0.47712125	2.68424952	1.2807125	0.22764469	7.2051955
16	3.2	539.722147	3.2	0.50514998	2.73217024	1.38015574	0.2551765	7.46475422
17	3.4	599.069236	3.4	0.53147892	2.77747702	1.47617048	0.28246984	7.71437859
18	3.6	661.237837	3.6	0.5563025	2.8203577	1.56897204	0.30947247	7.95441754
19	3.8	726.152087	3.8	0.5797836	2.86102759	1.65877687	0.33614902	8.18547887
20	4	793.754754	4	0.60205999	2.89968634	1.74578513	0.36247623	8.40818087
21	4.2	863.998467	4.2	0.62324929	2.93651297	1.83017963	0.38843968	8.62310843
22	4.4	936.842358	4.4	0.64345268	2.97166652	1.91212677	0.41403135	8.8308019

				X	Y	XY	X <sup>2</sup>	Y <sup>2</sup>
Nº	COTA	CAUDAL	H-ho	Log (H-ho)	Log (Q)	(logQ)*Log (H-ho)	(Log(H-ho)) <sup>2</sup>	Log (Q) <sup>2</sup>
23	4.6	1012.25034	4.6	0.66275783	3.00528793	1.99177811	0.43924794	9.03175554
24	4.8	1090.19005	4.8	0.68124124	3.03750221	2.06927177	0.46408962	9.2264197
25	5	1170.63219	5	0.69897	3.06842046	2.14473386	0.48855907	9.41520413
26	5.2	1253.55734	5.2	0.71600334	3.09814421	2.21828161	0.51266079	9.59849752
27	5.35	1317.28681	5.35	0.72835378	3.11968034	2.27223098	0.53049923	9.73240545
<b>Suma</b>				<b>9.1607527</b>	<b>66.3105949</b>	<b>28.3479589</b>	<b>6.57547839</b>	<b>172.724419</b>

Tabla 4-12: Datos para determinación de la ecuación de calibración de caudales. Fuente: Elaboración propia.

Con los valores correspondientes para la resolución de la ecuación logarítmica, se procede a calcular las magnitudes de los parámetros  $n$  y  $k$ , para ello se utilizará el método de **Mínimos Cuadrados** en la ecuación de regresión lineal (Ecuaciones 4.8 y 4.9), por lo tanto, las ecuaciones de las constantes  $n$  y  $k$  se podrán calcular a través de las ecuaciones siguiente:

$$b = \log(k) = \frac{\sum y \sum x^2 - \sum x \sum xy}{N \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad \text{(Ecuación 4.8)}$$

$$a = n = \frac{N \sum xy - \sum x \sum y}{N \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad \text{(Ecuación 4.9)}$$

**Donde:**

$N$ : número total de datos

$\sum x$ : sumatoria de los datos de la variable  $x$

$\sum y$ : sumatoria de los datos de la variable  $y$

$\sum xy$ : sumatoria de los productos de los datos en  $x$  e  $y$

Luego de evaluar ambas ecuaciones los resultados obtenidos son los valores de las constantes de la ecuación de la Curva de calibración de caudales:  $n$  y  $k$ , cuyos valores son **1.6871** y **76.4805**, respectivamente, siendo por lo tanto la ecuación resultante (preliminarmente), como se muestra a continuación

$$Q = 76.4805 * (H - H_0)^{1.6871} \quad \text{(Ecuación 4.10)}$$

Es entonces cuando se cuenta con la ecuación definida y se procede a calcular el Coeficiente de correlación, ya que es un estimadora muestra, utilizado para evaluar la asociación lineal entre dos variables X e Y<sup>68</sup> (caudal-altura para este caso en particular). Por lo tanto, como primer paso se calcula los promedios de los datos de Caudal (Y) y de Nivel de agua alcanzado (X), para luego usar la Ecuación 4.7 para calcular la de la expresión.

Nº	X	Y	X- Xprom	Y- Yprom	(X-Xprom)^2	(Y-Yprom)^2	(X-Xprom)* (Y-Yprom)
	Log (H- ho)	Log (Q)					
1	-0.6990	0.7095	-1.0383	-1.7465	1.0780	3.0502	1.8133
2	-0.3979	1.2156	-0.7372	-1.2404	0.5435	1.5385	0.9144
3	-0.2218	1.5115	-0.5611	-0.9444	0.3149	0.8919	0.5299
4	-0.0969	1.7211	-0.4362	-0.7348	0.1903	0.5399	0.3205
5	0.0000	1.8836	-0.3393	-0.5724	0.1151	0.3276	0.1942
6	0.0792	2.0162	-0.2601	-0.4398	0.0677	0.1934	0.1144
7	0.1461	2.1283	-0.1932	-0.3277	0.0373	0.1074	0.0633
8	0.2041	2.2254	-0.1352	-0.2306	0.0183	0.0532	0.0312
9	0.2553	2.3110	-0.0840	-0.1450	0.0071	0.0210	0.0122
10	0.3010	2.3875	-0.0383	-0.0684	0.0015	0.0047	0.0026
11	0.3424	2.4568	0.0031	0.0009	0.0000	0.0000	0.0000
12	0.3802	2.5201	0.0409	0.0641	0.0017	0.0041	0.0026

<sup>68</sup> Correlación y Regresión lineal, Instituto Aragonés de Ciencias de la Salud, C. Laguna, 1ª Edición, (s.f.). Página 3.

Nº	X	Y	X- Xprom	Y- Yprom	(X-Xprom)^2	(Y-Yprom)^2	(X-Xprom)* (Y-Yprom)
	Log (H- ho)	Log (Q)					
13	0.4150	2.5787	0.0757	0.1227	0.0057	0.0151	0.0093
14	0.4472	2.6333	0.1079	0.1773	0.0116	0.0314	0.0191
15	0.4771	2.6842	0.1378	0.2283	0.0190	0.0521	0.0315
16	0.5051	2.7322	0.1659	0.2762	0.0275	0.0763	0.0458
17	0.5315	2.7775	0.1922	0.3215	0.0369	0.1034	0.0618
18	0.5563	2.8204	0.2170	0.3644	0.0471	0.1328	0.0791
19	0.5798	2.8610	0.2405	0.4051	0.0578	0.1641	0.0974
20	0.6021	2.8997	0.2628	0.4437	0.0690	0.1969	0.1166
21	0.6232	2.9365	0.2840	0.4806	0.0806	0.2309	0.1365
22	0.6435	2.9717	0.3042	0.5157	0.0925	0.2660	0.1569
23	0.6628	3.0053	0.3235	0.5493	0.1046	0.3018	0.1777
24	0.6812	3.0375	0.3420	0.5816	0.1169	0.3382	0.1989
25	0.6990	3.0684	0.3597	0.6125	0.1294	0.3751	0.2203
26	0.7160	3.0981	0.3767	0.6422	0.1419	0.4124	0.2419
27	0.7284	3.1197	0.3891	0.6637	0.1514	0.4405	0.2582
<b>suma</b>	<b>9.1608</b>	<b>66.3106</b>			<b>3.4674</b>	<b>9.8690</b>	<b>5.8496</b>

Tabla 4-13: Cuadro de datos para coeficiente de correlación. Fuente: Elaboración propia.

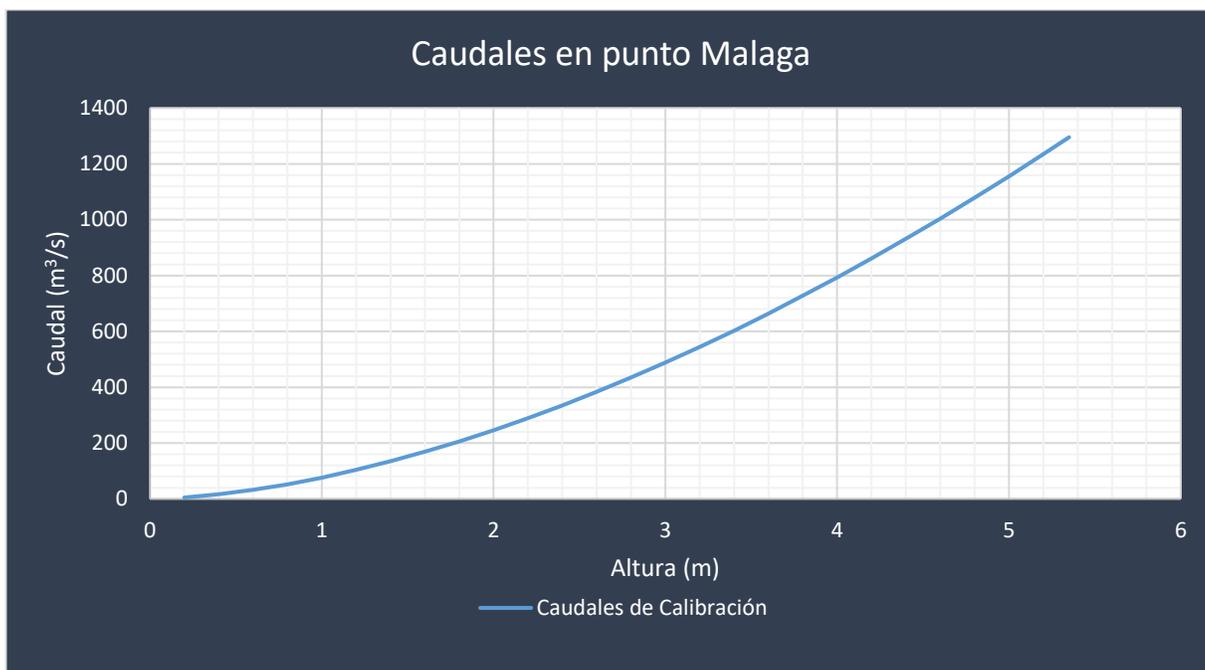
$$R^2 = \frac{\sum(x-\bar{x}) * \sum(y-\bar{y})}{\sqrt{\sum[(x-\bar{x})^2]} * \sqrt{\sum[(y-\bar{y})^2]}} \text{ (Ecuación 4.11)}$$

En este caso el coeficiente de correlación da un valor de 0.99998, concluyendo que los pares ordenados cumplen una relación muy aceptable unos con otros, según la expresión antes determinada; por lo tanto, se da por aceptada la gráfica correspondiente a la curva de descarga de caudal teórico en el punto de análisis.

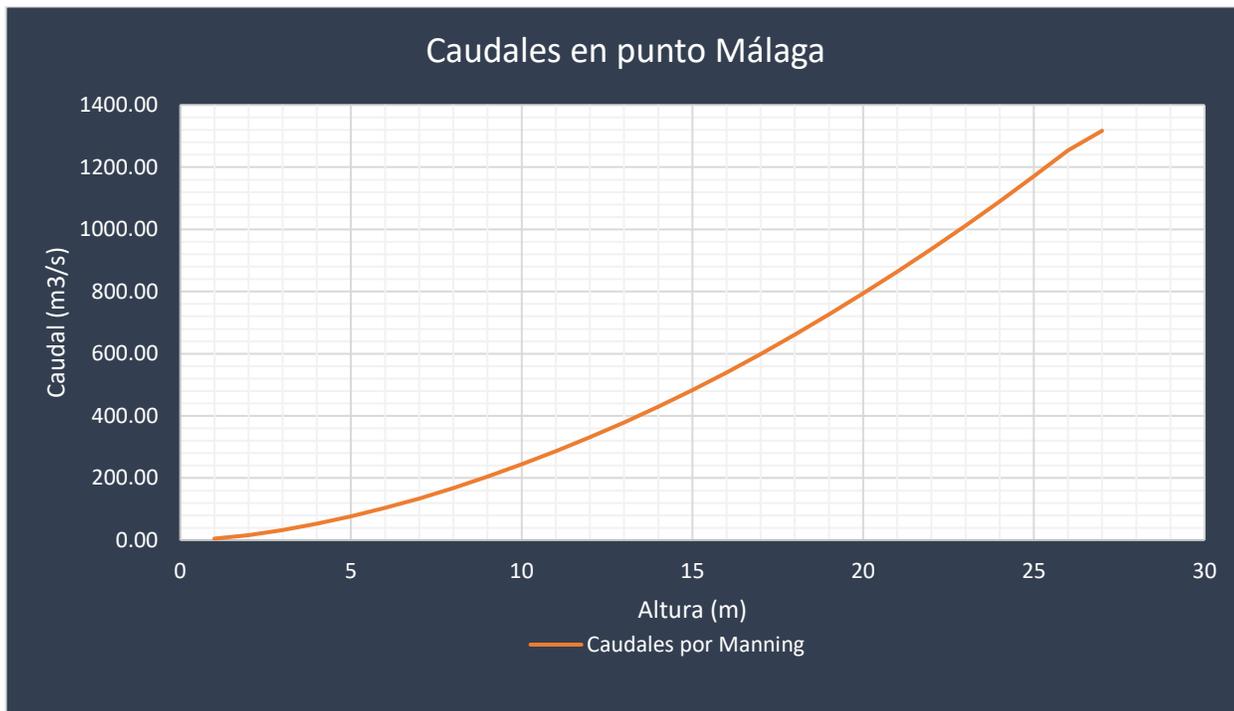
También se puede hacer una comparación de caudales calculados por ambos métodos (por la ecuación de Manning y la obtenida por la resolución de la Ecuación lineal por Mínimos cuadrados), recordando que ambos son puramente teóricos, ya que no existen aforos realizados por métodos directos en el sitio en cuestión.

Ambas curvas tienen un comportamiento parabólico, tendiendo a que si se aumenta el nivel de agua en una sección transversal el caudal aumentara proporcionalmente, pero al llegar a un límite de altura representada por la máxima cota de la sección, ya se obtendría un desbordamiento en la sección del cauce, ya que se estaría alcanzando el límite de la capacidad hidráulica del canal, esto tendería a verse en un comportamiento de la curva en una línea recta paralelo al eje x, ya que aunque se aumente la cota de altura de agua el caudal seguirá siendo constante.

Se nota una diferencia muy pequeña entre curvas, pero por ser una curva teórica calibrada y ajustada se toma como real la curva de calibración de la Ilustración 4.17 para el punto de análisis.



**Ilustración 4-17: Curva de caudal obtenida por curva de calibración. Fuente: Elaboración propia.**



**Ilustración 4-18: Curva de caudal obtenida por Manning. Fuente: Elaboración propia.**

#### 4.10.2 PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DE HIDROGRAMA DE CALIBRACIÓN

Para la realización de la calibración del modelo hidrológico utilizando el programa HEC HMS es necesario contar con un registro de caudales observados en campo, es decir, caudales medidos durante el tiempo que duro una tormenta en el punto del cauce de un rio esto para poder formar un hidrograma real.

Debido a que no se cuenta con estaciones en toda la red de drenaje del AMSS, que registre los niveles de agua ocurridos durante las tormentas, sobre los ríos y quebradas que la componen, es necesario optar por otros métodos para obtener

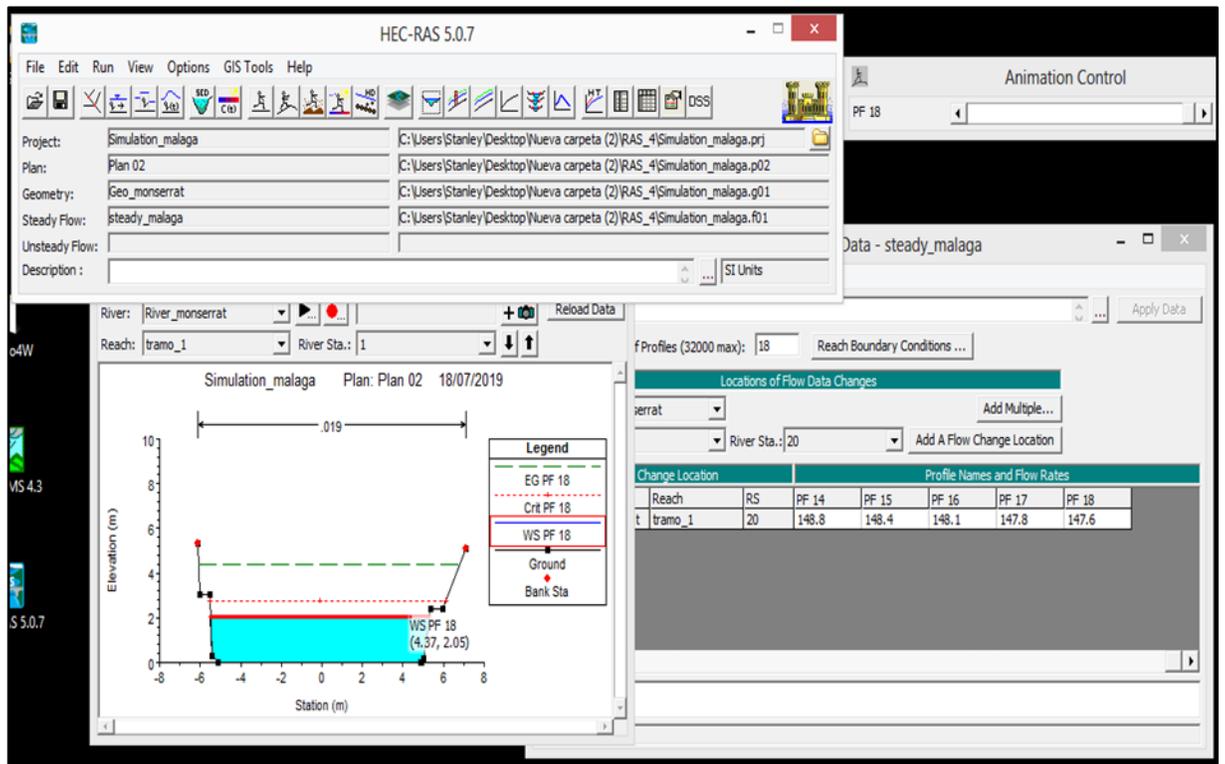
datos para validar los modelos hidráulicos. Por lo anterior, se deberá obtener caudales teóricos de una sección del cauce para una tormenta determinada.

En apartados anteriores se obtuvo un hidrograma producto de una simulación hidrológica utilizando registros de lluvia de la tormenta tropical IDA, donde se obtuvo un caudal máximo de **1,291.7 m<sup>3</sup>/s** en el punto de salida de la subcuenca 1 (SBC1), tal hidrograma se utilizará nuevamente para obtener un registro de caudales teóricos registrados en ese punto durante la ocurrencia de la tormenta IDA.

Un hidrograma es la relación caudal-tiempo en un punto de un cauce debido a una tormenta; este concepto explica que es posible observar el comportamiento de los caudales en varios periodos de tiempo ocurridos en diversos puntos sobre los que se tenga interés; al conocer estos caudales, es posible conocer la velocidad del flujo al que se conduce la masa de agua a lo largo de estos puntos del cauce y también conocer la altura que alcanza el agua, medida en la sección transversal del canal.

El análisis de la altura del agua en un cauce es importante, ya que permite visualizar el impacto generado en cualquier punto del mismo, debido a un fenómeno de precipitación, pero como se mencionó anteriormente, el país en general no cuenta con una densa red de monitoreo que mida altura de niveles en los ríos, por lo que se usarán los datos de caudales del hidrograma resultante de la modelación que se generó en la parte 4.10.4 de esta investigación, en donde

se ingresaron datos de lluvia de la tormenta tropical IDA, para el área de la cuenca del rio Acelhuate, dichos datos de caudal serán ingresados a otro software libre HEC-RAS, para generar secciones transversales que muestren la altura alcanzada de agua para un canal, considerando un caudal, en un tiempo específico. Este proceso se hace con el fin de obtener una serie de datos Altura-Tiempo de la sección transversal del canal, en el punto que se está analizando.



**Imagen 4-24: Resultado hidrológico de una modelación en HEC RAS. Fuente: Elaboración propia**

Con esta serie nueva de datos de altura obtenidos se pretende determinar un hidrograma teórico que simule ser una hidrograma observado y registrado en

campo ocurrido durante la tormenta IDA, de esta forma poder ingresar la información de caudales teóricos a HEC HMS para poder calibrar el modelo, para ello se usará la curva de calibración (Ilustración 4-17) , esto se hará evaluando las alturas obtenidas previamente en la ecuación de curva Altura-Caudal (Ecuación 4.10); El resultado obtenido son caudales evaluados con la Curva de Calibración (teóricos) los cuales serán ingresados y posteriormente analizados en el programa HEC-HMS; se graficará y mostrará el hidrograma teórico de la sección transversal representado por la línea negra punteada que representa un caudal máximo de **1,317.9 m<sup>3</sup>/s**.

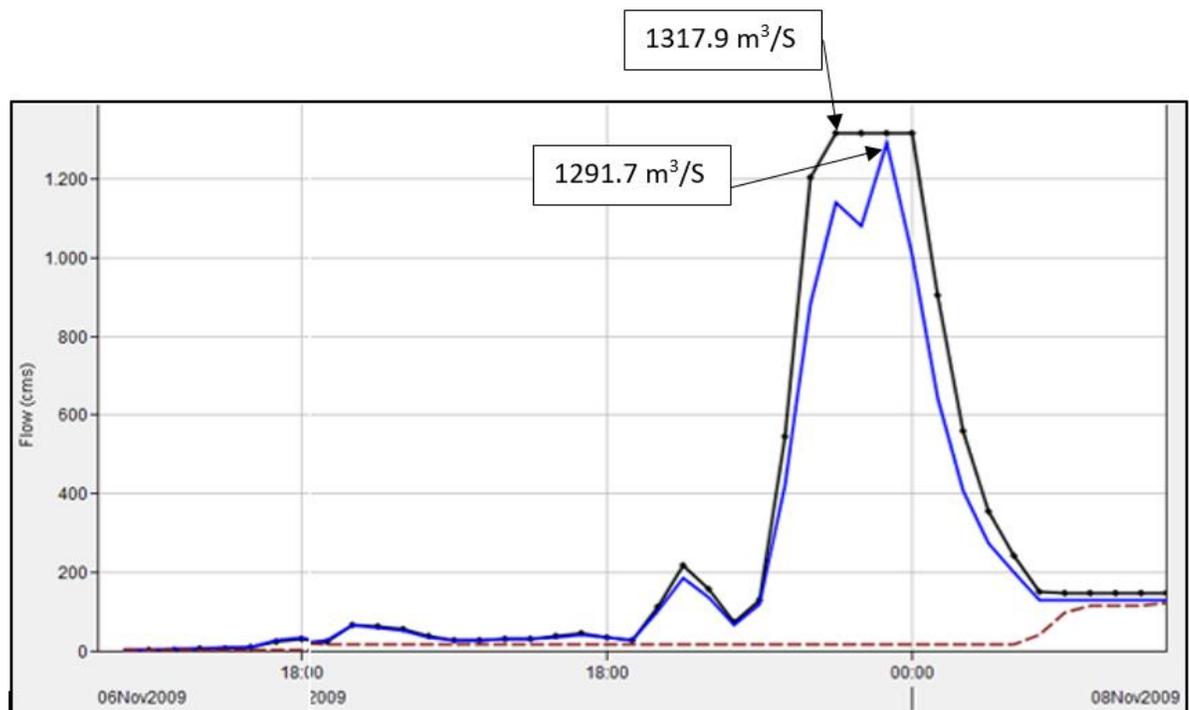
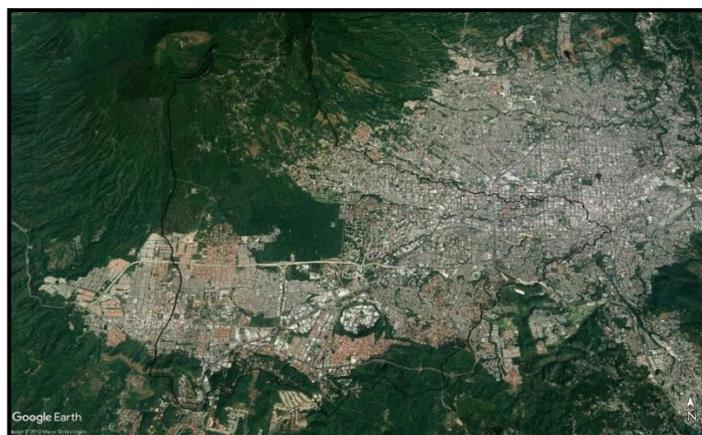


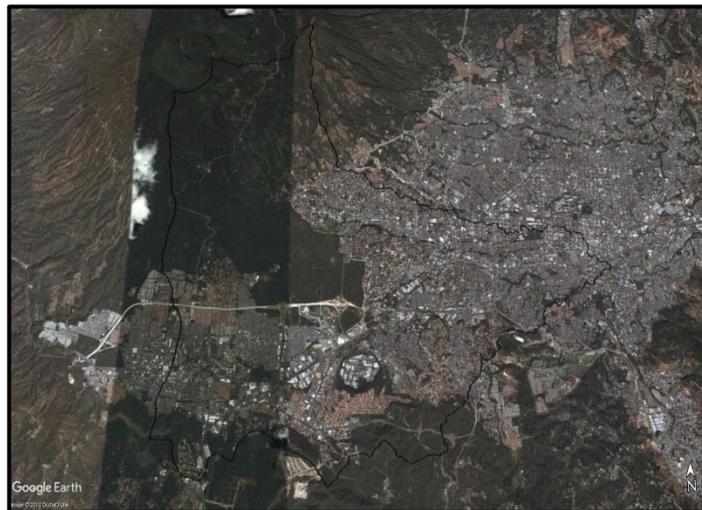
Imagen 4-25: Hidrograma de calibración. Fuente: Elaboración propia.

#### 4.10.3 CAMBIO DE NÚMERO DE CURVA (DEL AÑO 2016 AL AÑO 2009)

Como se mostró en el capítulo 3, de esta investigación, el número de curva se calculó en función del uso y tipo de suelo, para ello se usaron datos del documento Esquema Director correspondiente al año 2016; además para la elaboración de la modelación hidrológico de la cuenca se usaron datos de tormenta del año 2009, correspondientes a la Tormenta Tropical IDA. En este punto se puede notar que hay una disparidad en cuanto a las fechas en que fueron producidos los datos, debido a esto es necesario realizar una corrección de los datos de Número de Curva, adaptando el ya calculado (año 2016); El proceso de corrección se realizó analizando una fotografía satelital obtenida de la base de datos de Google Earth haciendo comparaciones de la extensión urbana presente en el año 2009 y 2016.



**Imagen 4-26: Sub cuenca del rio Acelhuate en condiciones del año 2016. Fuente: Google Earth.**



**Imagen 4-27: Sub cuenca del rio Acelhuate en condiciones del año 2009. Fuente: Google Earth.**

Según las imágenes satelitales existe una pequeña diferencia en el área urbanizada en el año 2016 con respecto al año 2009, también se puede notar pequeñas manchas urbanas que han surgido debido a la construcción de nuevas viviendas a los alrededores de la Zona Metropolitana de San Salvador y también debido a algunos asentamientos en la parte alta del volcán de San Salvador. En base a esta información, se hicieron estimaciones de la diferencia en el total de área urbanizada entre ambos años; se analizaron los datos de mapas de cada subcuenca en QGis y se obtuvo un porcentaje estimado de área perteneciente a cada sub cuenca.

SUB CUENCA	PORCENTAJE DE ÁREA
<b>SBC 1</b>	1.33
<b>SBC 2</b>	0.44
<b>SBC 3</b>	1.78
<b>SBC 4</b>	2.59
<b>SBC 5</b>	0.60
<b>SBC 6</b>	2.46
<b>SBC 7</b>	5.26
<b>SBC 8</b>	5.10
<b>SBC 9</b>	1.36
<b>SBC 10</b>	2.14

**Tabla 4-14: Estimación de porcentaje de crecimiento de área urbana del AMSS, entre el año 2009 al año 2016. Fuente: Elaboración propia.**

Como se puede ver en la tabla anterior, las subcuencas con mayor cambio ha ocurrido en las subcuencas 7 y 8 (SBC 7 y SBC 8), por lo que se aplicará un cambio de Numero de Curva en ellas; El proceso de cambio consiste en que basándose en los porcentajes de la tabla anterior, se hace una disminución del área de urbanización al momento de hacer los cálculos ponderados de Numero de Curva de cada subcuenca para transformar el número de curva calculado para 2016 a uno del año 2009; A la ponderación de cada sub cuenca se adiciona un porcentaje de área natural y a la vez se le resta un porcentaje de área urbanizada para que de esta manera , disminuya el número de curva de la subcuenca

adaptándose a condiciones de terreno menos impermeabilizado característico del periodo del año 2009.

Sub cuenca	CN 2016	CN 2009
<b>SBC 7</b>	81.45	80.50
<b>SBC 8</b>	86.9	85.57

**Tabla 4-15: Número de curva corregido para SBC 7 y SBC 8. Fuente: Elaboración propia.**

#### 4.10.4 CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO EN BASE A LA CURVA DE CALIBRACIÓN

La calibración del modelo hidrológico es realizada a través del HEC HMS en la sección **Optimización**, lo cual consiste en que el programa genera modificaciones a factores previamente indicados en el mismo, (valores de Numero de Curva, Tiempo de retardo, Caudal base), de tal manera que los datos del hidrograma obtenidos en la modelación (línea azul continua) cambien para ser iguales o lo más cercanos posibles al hidrograma de calibración. En este caso se priorizó que los cambios de optimización únicamente se dieran en los valores de tiempo de retardo, ya que se considera más apropiado modificar este valor en lugar del Número de Curva, debido a que modificar factores que estén relacionados al uso y tipo de suelo conllevan a asumir cambios drásticos en áreas urbanas, rurales y naturales, que podrían ser poco realistas con la situación actual del terreno, por tal motivo se evita realizar estas modificaciones.

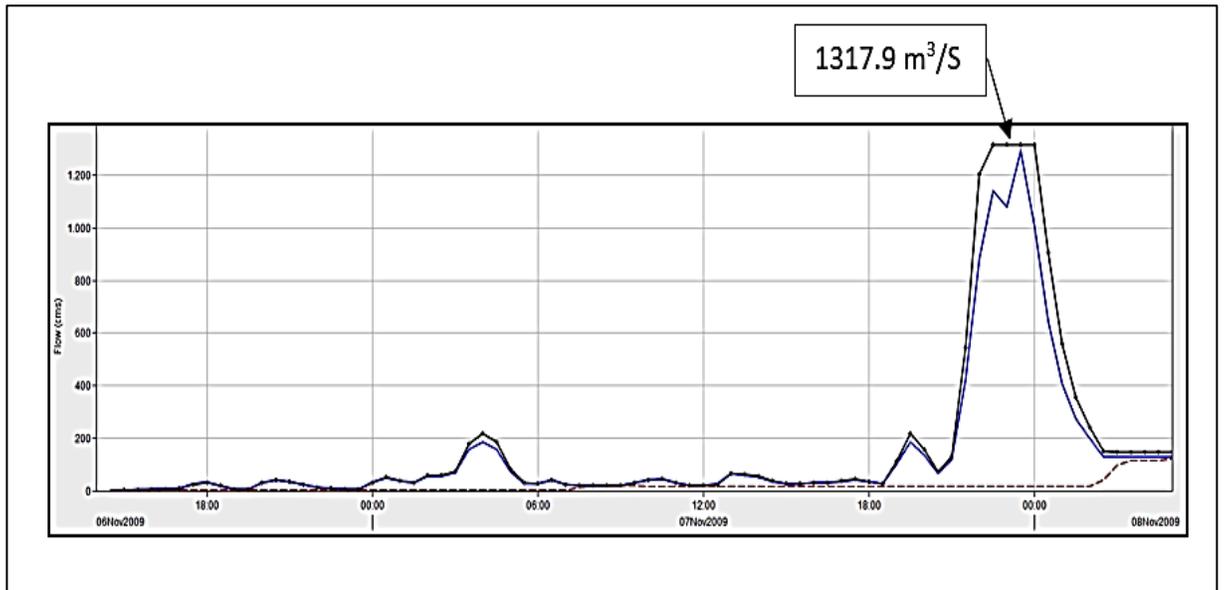
Project: Cuenca Acelhuate    Optimization Trial: Modelo Optimizado

Start of Trial: 06nov2009, 14:15    Basin Model: Acelhuate Actual  
 End of Trial: 08nov2009, 05:00    Meteorologic Model: Tormenta 1  
 Compute Time: 19ene2020, 03:45:47

Element	Parameter	Units	Initial Value	Optimized Value
SBC1	SCS Unit Hydrograph - Lag Time	MIN	21,84	21,840
SBC1	Recession - Initial Discharge	M3/S	0,25	0,25000

**Imagen 4-28: Parámetros modificados para la modelación en HEC HMS. Fuente: Elaboración propia.**

Aplicando las modificaciones se obtiene un hidrograma muy cercano en forma y valores al hidrograma teórico de calibración, lo cual indica que el modelo hidrológico está calibrado y se puede hacer proyecciones a otros escenarios principalmente cambiando su número de curva. Las modificaciones realizadas dieron como resultado un **caudal máximo de 1,317.9 m<sup>3</sup>/s**, este caudal es muy cercano al caudal máximo de calibración por lo que se puede concluir que por este motivo y porque las curvas son suficientemente parecidas en forma, el modelo resultante está calibrado a las condiciones requeridas.



**Imagen 4-29: Hidrograma resultante de la calibración del modelo. Fuente: Elaboración propia.**

**CAPITULO 5- MODELACIONES  
HIDRÁULICAS DE LA CUENCA  
DEL RIO ACELHUATE PARA  
ESCENARIOS DE  
IMPERMEABILIZACIÓN BASE Y  
AMPLIADA**

## 5.1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se detalla la clasificación que el Esquema Director categoriza al Área Metropolitana de San Salvador según el uso de suelo al que se encuentra sometido; además se introduce conceptos manejados en el documento referido atribuidos al área de estudio como los son: los tratamientos urbanísticos y porcentajes de impermeabilización; con los conceptos antes mencionados se dispondrá a realizar el cálculo del Número de Curva ponderado de las subcuencas en análisis.

También en este capítulo se hará una modelación hidráulica e hidrológica de cada subcuenca, utilizando datos físicos y geomorfológicos previamente determinados en capítulos anteriores; teniendo como base tres escenarios, cada uno con un porcentaje específico de impermeabilización proyectada, los cuales se han denominado como: **Actual**, **Base** y **Ampliado**; esto con el fin de conocer la respuesta hidrológica e hidráulica del área de la cuenca para diferentes tiempos y características; además, se desarrollará y explicará un procedimiento para obtener una lluvia de diseño, el cual servirá para realizar la modelación. Finalmente se presentará un análisis de resultados finales, con base a las gráficas y datos obtenidos de las modelaciones para los escenarios de impermeabilización antes mencionados.

## 5.2 CLASIFICACIÓN DE SUELOS SEGÚN EL ESQUEMA DIRECTOR

Según el Esquema Director, la clasificación de suelos está referida a la división del área metropolitana de San Salvador en cuatro grandes categorías:

- a) Los suelos para el desarrollo de actividades **Rurales**.
- b) Los suelos con características ambientales y que presentan algunas condiciones de amenazas naturales y antrópicas, que corresponden a **No Urbanizables**;
- c) Los suelos que son aptos para el desarrollo urbano, definidos como Suelo **Urbanizable**.
- d) Los suelos que ya están intervenidos conocidos como **Urbanos**.

### 5.2.1 SUELOS RURALES

Son suelos que por sus características físicas son orientados al aprovechamiento de la producción agropecuaria y para los cuales no se contempla su transformación urbanística a corto y mediano plazo. Forman parte los suelos agrícolas que recogen actuaciones de producción agropecuaria y agroindustrial y suelos con asentamientos humanos y equipamientos de soporte para las actuaciones del ámbito rural.

### **5.2.2 SUELOS NO URBANIZABLES**

Suelos excluidos de posibles procesos de urbanización o transformación territorial, en razón de las posibilidades de rehabilitación y/o restauración del medio ambiente y sus recursos naturales, de la prevención de riesgo por amenazas de origen natural y antrópico, de sus valores culturales como los arqueológicos, históricos y paleontológicos, o para la defensa de la fauna, flora o equilibrio ecológico.

### **5.2.3 SUELOS URBANIZABLES**

Son suelos que por sus condiciones físicas y de localización son considerados apropiados para su transformación urbanística, en atención a las necesidades de desarrollo urbano de la ciudad.

En estos suelos se debe de considerar la situación existente, la necesidad de producir un desarrollo urbano coherente en función de la estrategia a largo plazo establecido por el Esquema Director, localización adyacente al suelo urbano a fin de mantener su conurbación, que presenten potencial para el desarrollo de actividades habitacionales y económicas y que formen parte de reservas de suelo necesarias para el establecimiento de infraestructuras y equipamientos de interés nacional o metropolitano.

#### 5.2.4 SUELOS URBANOS

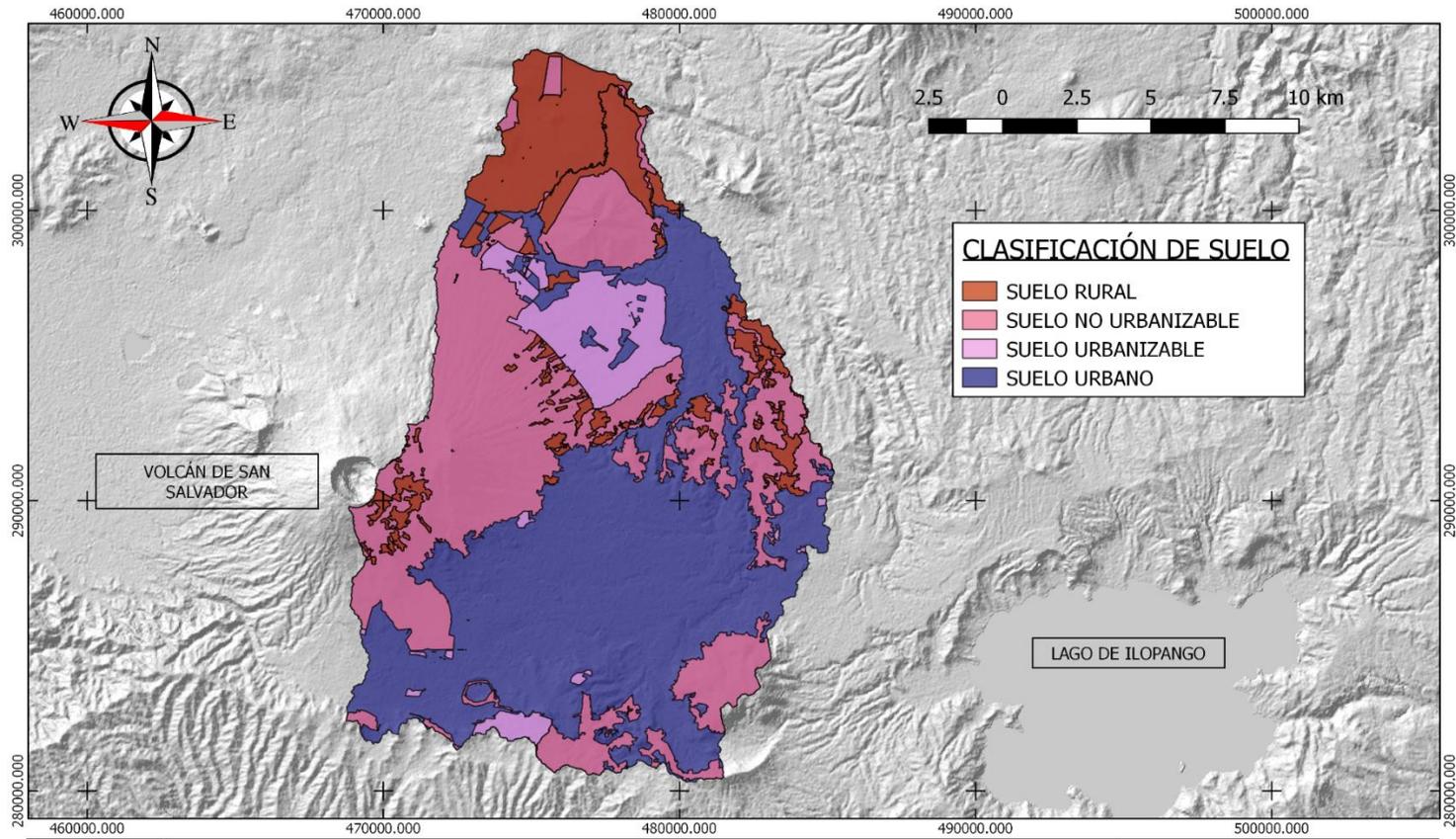
Son suelos que cuentan con los servicios básicos e infraestructuras necesarias (acceso rodado o caminos, abastecimiento de agua potable, drenajes de aguas negras y aguas lluvias y suministro de energía eléctrica) debiendo de tener estos servicios características adecuadas para servir a la edificación que sobre ellos exista o se requiera construir.

CLASIFICACIÓN DE SUELO	EXTENSIÓN (Km <sup>2</sup> )	PORCENTAJE DE EXTENSIÓN
Suelo Rural	35.17	12.75
Suelo No Urbanizable	95.98	34.80
Suelo Urbanizable	21.03	7.62
Suelo Urbano	123.64	44.83
<b>TOTALES</b>	<b>275.82</b>	<b>100.00</b>

**Tabla 5-1: Clasificación del suelo según normativa vigente del Esquema Director.**  
Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la Tabla 5-1, las zonas más destacables que se evidencian son el área urbana y el área no urbanizable, siendo respectivamente 44.83% y 34.80%, dejando un margen pequeño a zonas destinada a la expansión urbana (7.62%), lo que pudiera significar la implementación de acciones

destinadas al uso futuro de zonas no urbanizables, la consolidación de las zonas rurales en zonas urbanas o el crecimiento en altura principalmente en zonas urbanas consolidadas. En cuanto a la impermeabilización de la zona de estudio con base a la información de la Tabla 5-1 el suelo urbano por su naturaleza presenta una mayor impermeabilidad y junto al suelo rural, aunque en menor magnitud presenta una impermeabilidad baja, indican un área considerablemente saturada de edificaciones (obra urbana).



PROYECCIONES DE LOS IMPACTOS HIDROLÓGICOS BASADOS EN EL PLAN DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL VIGENTE: ESQUEMA DIRECTOR, EN EL ÁREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR (AMSS)

NOMBRES:  
 ESTRADA PONCE, JOSUÉ RODRIGO  
 LÓPEZ RECINOS, LIDIA YANET

MAPA 5.1: MAPA DE CLASIFICACIÓN DE SUELO SEGÚN ESQUEMA DIRECTOR EN LA CUENCA DEL RIO ACELHUATE EN PARTE ALTA Y MEDIA

FUENTE: ELABORADO POR GRUPO DE TESIS

### 5.3 IMPERMEABILIZACIÓN DEL SUELO

La Normativa de permeabilidad busca definir un Porcentaje de Impermeabilización del Suelo (PIS), el cual se refiere al área efectiva de un lote que debe tener un suelo natural y cobertura vegetal, sin sótanos, edificaciones, cubiertas ni estructuras o pavimentaciones de ningún tipo. Por ejemplo, si se tiene un terreno de 100 m<sup>2</sup> con un PIS del 90%, significa que se deberá dejar 10 m<sup>2</sup> de área libre sin impermeabilizar<sup>69</sup>.



**Ilustración 5-1: Porcentaje de impermeabilización.**  
**Fuente Resumen Ejecutivo Esquema director pag.76.**

<sup>69</sup> Esquema Director del Área Metropolitana de San Salvador/Editor Consejo de Alcaldes, Oficina de Planificación de Área Metropolitana de San Salvador (OPAMSS), 2016, 1a Edición, Página 77.

El Esquema Director plantea un rango de valores de impermeabilización, cada intervalo tiene un valor mínimo y un valor máximo, el valor mínimo corresponde a un porcentaje de impermeabilización base y el valor máximo a una impermeabilización ampliada.

#### **5.4 TRATAMIENTOS URBANÍSTICOS**

El plano de Tratamientos urbanísticos presenta un mayor detalle de usos de suelo, buscando orientar de manera diferenciada, las intervenciones que se puedan realizar en el territorio, según las características físicas y las dinámicas del ámbito de aplicación, acorde a la visión de ciudad adoptada en este Esquema Director. Cada uno de los tratamientos refiere a una parte específica del territorio, la cual podrá desarrollarse en diferentes modalidades de acuerdo a sus potenciales y limitantes territoriales existentes y futuras. Algunos tratamientos detallan una o más aptitudes, dependiendo de la complejidad de los mismos.

##### **5.4.1 TRATAMIENTOS DE REVITALIZACIÓN DE CORREDORES**

Los Corredores son zonas singulares de la ciudad ubicadas en las áreas de influencia inmediata de los principales ejes viales, por lo que se apuesta al tratamiento como ejes del nuevo desarrollo urbano, para generar una ciudad más compacta, con una densificación en altura, con un sistema de transporte público más eficiente y apostándole a una mixtura de usos de suelo.

La aptitud urbanística busca identificar la capacidad de la zona normada para revitalizarla tratamiento para realizar ciertas actividades específicas, en función de sus características. A continuación, se describe la definición de cada corredor.

**Corredor gubernamental, educativo y sanitario:** Son zonas en donde se concentran los equipamientos estructurales más importantes de carácter metropolitano e incluso nacional. Su característica principal consiste en garantizar a nivel público el acceso a servicios básicos como educación y la atención en el primer nivel de salud.

**Corredor comercio y servicios:** Zonas que reúnen algunas de las mejores condiciones urbanísticas, como ubicación estratégica, valor simbólico, ejes estructurales históricos de la ciudad, rangos altos de inversión a nivel metropolitano, entre otros, para incentivar la edificación en altura con mixtura de usos del suelo.

**Corredor internacional de comercio:** Zonas que cuentan con un adecuado nivel de infraestructura, donde se buscará consolidar las zonas aledañas a los grandes centros comerciales existentes para edificaciones que contengan mixtura de usos.

**Corredor industrial:** Zonas del territorio con clara vocación industrial, pero, que, por sus condiciones de infraestructura, servicios públicos y movilidad existente y proyectada, se están transformando a actividades comerciales; por tal razón, se

plantea respetar el derecho de permanencia de actividades industriales existentes, pero, facilitando la mixtura de usos a partir de edificaciones en altura.

**Corredor interior:** zonas de concentración media de actividades económicas, principalmente de tipo comercial que prestan servicios en radios de influencia y escala local o barrial; en la mayoría de estos corredores.

#### 5.4.2 TRATAMIENTO DE ESTABILIZACIÓN

Se aplica al tejido urbano consolidado fuera de la delimitación de los corredores, que ha mantenido sus características urbanas. Con el objetivo de facilitar la caracterización y consolidación de las dinámicas, tendencias económicas y actividades en los sectores con tratamiento de estabilización sobre la base del levantamiento de suelo efectuado en campo en el año 2014, se propuso una generalización de estas bolsas de suelo que permita una lectura inmediata de cada sector. El resultado de este análisis muestra cinco usos de suelo mayoritarios:

**Vivienda:** Sectores con uso predominantemente habitacional.

**Comercio y servicios:** Sectores con uso predominantemente de comercio y/o servicios.

**Industria:** Sectores con uso especializado de industria.

**Equipamiento:** Sectores con concentración de equipamientos (públicos o privados) e instituciones públicas de orden nacional, metropolitano o local.

**Áreas abiertas:** Sectores que concentran espacios verdes y áreas libres de la ciudad para la recreación.

#### 5.4.3 TRATAMIENTOS DE MITIGACIÓN EN BORDES URBANOS

Se aplicará a sectores con características ambientales que necesiten ser conservadas, sometidas a dinámicas importantes de presión al desarrollo urbano, ubicadas en los bordes del área urbana consolidada. Se caracterizan por presentar amenazas ambientales, así como también, la existencia de características ambientales que merecen ser conservadas.

En total se identifican dos sectores, Los Planes de Renderos y Cantón El Carmen, ambos en el Municipio de San Salvador.

Los lineamientos de cada zona identificada en tratamiento de mitigación en bordes urbanos son los siguientes:

**Mixto:** Debido a sus características existentes, estas zonas son aptas para llevar a cabo procesos de densificación en altura con usos de suelo mixtos, aunque con menor intensidad de uso del suelo que en los corredores.

**Habitacional 1:** Zonas de uso habitacional existente donde se permitirá vivienda con usos complementarios de bajo impacto urbanístico y ambiental.

**Habitacional 2:** Estas zonas poseen altos valores de peligrosidad por amenazas naturales y además desempeñan funciones ambientales importantes por lo que

se ha determinado conveniente permitir vivienda con estándares urbanísticos de carácter restrictivo.

**Ambiental:** Zonas que permitirán el desarrollo urbano de manera controlada habiendo realizado los estudios correspondientes para evitar afectaciones sobre los asentamientos humanos.

#### **5.4.4 TRATAMIENTO DE RECUPERACIÓN DE CENTROS HISTÓRICOS**

Las zonas que reciben este tratamiento se localizan en áreas del centro tradicional y representativo que, por haber sufrido procesos de deterioro en su espacio público y por la obsolescencia de sus edificaciones, requieren de acciones integrales para su transformación.

Este tratamiento se considera fundamental, pues permitirá partir de la solución paulatina de conflictos funcionales y de su adecuada articulación al resto de la ciudad, la recuperación de la zona más representativa de cada municipio y por ende supone un beneficio de gran incidencia para la productividad y competitividad de todo el AMSS.

#### **5.4.5 TRATAMIENTO DE CONSOLIDACIÓN**

Son ámbitos con bajos niveles de consolidación, altos niveles de precariedad urbana (baja dotación de servicios e infraestructura, altas densidades, hacinamiento, tramas urbanas irregulares e informalidad) y alto grado de exposición a amenazas ambientales.

#### **5.4.6 TRATAMIENTO DE RECUPERACIÓN AMBIENTAL**

Son zonas dentro del suelo clasificado como urbano, donde se permitirá el desarrollo urbano de manera controlada en función de preservar las características ambientales existentes y proteger asentamientos humanos expuestos a amenazas naturales. Para ello dichas áreas deberán ser sometidas a los estudios correspondientes para determinar zonas de retiro y demás medidas de mitigación que garanticen su preservación y mantenimiento.

Los estándares urbanísticos aplicables a estas zonas serán los del tratamiento urbanístico colindante más cercano al área de estudio, pero, incluyendo las consideraciones ambientales correspondientes. De manera que, si el sector analizado colinda o es parte de un sector con suelo mayoritariamente en tratamiento de estabilización, las normativas de usos de suelo, alturas de edificaciones y edificabilidad que aplicarán, son precisamente las que este tratamiento indique; sin embargo, Normativas como porcentaje de impermeabilización del suelo se verán afectados por lo que estudios de detalle determinen como zona de retiro.

#### **5.4.7 TRATAMIENTO DE CONSOLIDACIÓN EN ASENTAMIENTOS RURALES**

Son zonas que contienen usos habitacionales, equipamientos e infraestructuras dispersas e inmersas en el ámbito rural. Para dichos ámbitos se apuesta al

control del desarrollo orientado fundamentalmente a la preservación máxima del entorno rural.

El suelo rural edificado tiene una menor dinámica de desarrollo en comparación con el resto de la zona conurbada del AMSS, pero que sin duda merece un análisis para la priorización del mismo a efecto de poder normar y ordenar su desarrollo.

El tratamiento que se le propone será:

**Planes Especiales de Núcleos Rurales (PENR):** suelos mayores a 10 hectáreas, habitados, generalmente infradotados, dependientes del área urbana y vinculada a un eje vial colector; o superficies mayores a 20 hectáreas sin vinculación a vía colectora.

**Planes Especiales de Núcleos Rurales Ecoturísticos (PENRET):** suelos habitados ubicados en zonas ambientales frágiles con clara vocación ecoturística y una fuerte presión al desarrollo urbano, razón por la cual se permite el desarrollo de manera controlada, preservando las características ambientales.

**Núcleos rurales aislados:** asentamientos muy dispersos que no configuran una masa crítica de organización urbana.

#### **5.4.8 TRATAMIENTO DE DESARROLLO AGRÍCOLA**

Estos suelos comprenden el conjunto del espacio rural con aprovechamientos primarios dedicados a áreas de cultivo y para las que no se contempla su transformación urbanística a corto y mediano plazo.

#### **5.4.9 TRATAMIENTO DE EXPANSIÓN**

Son zonas donde se orienta y regula la transformación de terrenos actualmente no urbanizados pero que poseen aptitud para el desarrollo urbano. Por lo general, se trata de un conjunto de inmuebles o bolsas de suelo contiguo al área urbana.

Todos los tratamientos de expansión deberán ser desarrollados mediante planes especiales que identifiquen suelos aptos para intervención urbana, proponiendo una normativa que permita el desarrollo de los mismos, en coherencia con el entorno inmediato.

#### **5.4.10 TRATAMIENTO DE CONSERVACIÓN AMBIENTAL**

Los suelos de conservación rodean en su mayoría el área urbana, contienen altos valores ambientales en términos de su biodiversidad, flora, fauna, suelo, elementos paisajísticos y recurso hídrico. Se incluyen también espacios o zonas con alta peligrosidad debido a amenazas geomorfológicas e hidrometeorológicas.

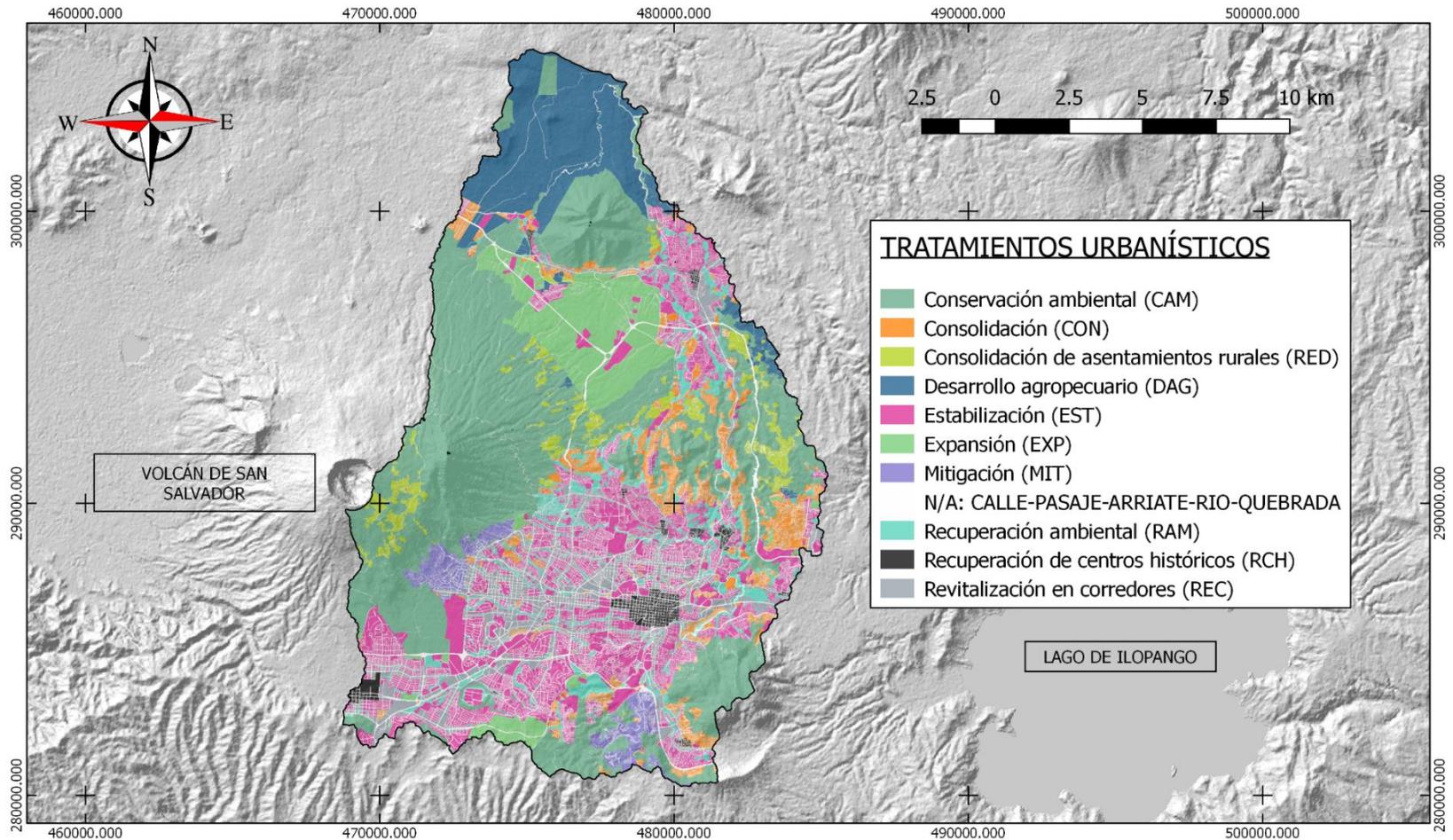
Por tanto, se plantea que, para promover la protección de los valores ambientales existentes, se prohíbe cualquier proceso de urbanización excepto aquellas

actividades compatibles con las características naturales de la zona, previa elaboración de los planes especiales correspondientes.

A continuación, se presenta una tabla con los valores de área que representa la porción de suelo destinada para cada tipo de tratamiento urbanístico a ser aplicado, el área se calculó en QGis (siguiendo métodos anterior mente descritos) notando que una gran parte está destinada a estabilización de zonas urbanas y para la conservación ambiental.

<b>TRATAMIENTO URBANÍSTICO</b>	<b>TOTAL, km<sup>2</sup></b>	<b>PORCENTAJE DE ÁREA</b>
<b>Revitalización en corredores</b>	17.79	6.45
<b>Estabilización</b>	44.22	16.03
<b>Mitigación</b>	6.27	2.27
<b>Recuperación de centros históricos</b>	3.72	1.35
<b>Consolidación</b>	14.99	5.44
<b>Recuperación ambiental</b>	14.28	5.18
<b>Consolidación de asentamientos rurales</b>	8.61	3.12
<b>Desarrollo agropecuario</b>	25.06	9.09
<b>Expansión</b>	19.34	7.01
<b>Conservación ambiental</b>	92.2	33.43
<b>Calle-pasaje-arriate-ríos</b>	29.32	10.63
<b>Total</b>	<b>275.82</b>	<b>100.00</b>

**Tabla 5-2: Determinación del área con el tipo de tratamiento definido por el Esquema Director de la cuenca media y alta del río Acelhuate. Fuente: Elaboración propia.**



PROYECCIONES DE LOS IMPACTOS HIDROLÓGICOS BASADOS EN EL PLAN DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL VIGENTE: ESQUEMA DIRECTOR, EN EL ÁREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR (AMSS)

NOMBRES:  
ESTRADA PONCE, JOSUÉ RODRIGO  
LÓPEZ RECINOS, LIDIA YANET

MAPA 5.2: MAPA DE TRATAMIENTOS URBANÍSTICOS EN LA CUENCA DEL RÍO ACELHUATE EN PARTE ALTA Y MEDIA

FUENTE: ELABORADO POR GRUPO DE TESIS

## 5.5 CÁLCULO DEL NÚMERO DE CURVA DE ESCENARIOS DE IMPERMEABILIZACIÓN

En base a los tratamientos descritos en la Normativa, se determinarán los valores de Número de Curva (**CN**) para los escenarios **BASE** y **AMPLIADA**, y servirán para hacer el análisis de proyecciones hidrológicas en los escenarios, con rangos de impermeabilización desde 0 hasta 100%.

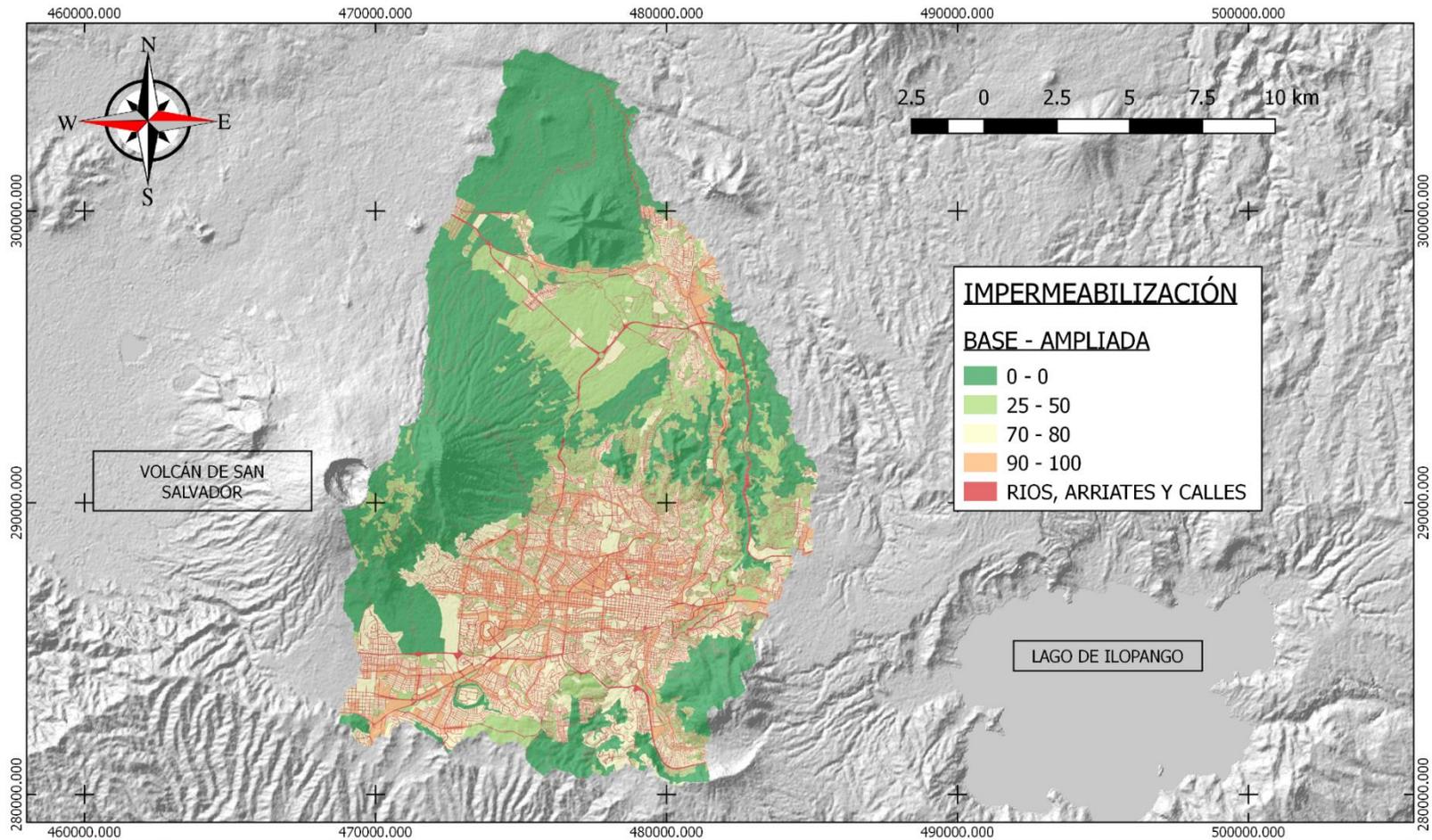
Estos valores servirán para la obtención del número de curva necesario para la modelación de un escenario, en el cual se aplicará la impermeabilización base y ampliada en la zona de la cuenca en estudio (Rio Acelhuate). Para ello se requiere analizar tres factores importantes, dos de ellos ya fueron analizados en el capítulo 3 de este documento, los cuales son el **uso de suelo** y el **tipo de suelo**. Tal como se determinó en el Capítulo anterior, estos valores se presentaron en forma de mapas o capas de vectores en el programa QGis, que posteriormente se le dio un proceso de unión en una única capa que contuviera tanto el valor de uso de suelo y el de tipo de suelo, y así usando una matriz (Tabla de Ven Te Chow) de Número de Curva, se obtiene su valor correspondiente; el tercer factor que se necesita es el **porcentaje de impermeabilidad** destinada para ser aplicada en el área de la cuenca, este valor se especifica en el Esquema Director en función de qué tipo de tratamiento urbanístico se refiera.

Cada tratamiento urbanístico considera un valor de impermeabilización base y ampliado según su finalidad; la conservación ambiental busca principalmente proteger las zonas en que el valor ambiental de un elemento sea de vital importancia como también la protección paisajística y recursos hidrológicos, por lo que la adición de elementos que pongan en riesgos los factores ambientales está prohibido, siendo el valor establecido de impermeabilización de cero; por otra parte, la revitalización de corredores incentiva el desarrollo de estructuras en esas zonas, ya que son puntos estratégicos con alto valor en la económico y social del sector buscando una mejor funcionabilidad entre los usos de suelo, por lo que se planea una impermeabilidad de hasta un 100%. A continuación, se presenta la lista de los demás tratamientos urbanísticos mencionados en el Esquema Director con sus respectivos porcentajes de impermeabilización.

TRATAMIENTO URBANÍSTICO	IMPERMEABILIZACIÓN	
	BASE (%)	AMPLIADA (%)
Revitalización en corredores	90	100
Estabilización	70	80
Mitigación	70	80
Recuperación de centros históricos	70	80
Consolidación	25	50
Recuperación ambiental	25	50
Consolidación de asentamientos rurales	25	50
Desarrollo agropecuario	0	0
Expansión	25	50

TRATAMIENTO URBANÍSTICO	IMPERMEABILIZACIÓN	
	BASE (%)	AMPLIADA (%)
Conservación ambiental	0	0
Calle-pasaje-arriate-ríos	100	100

**Tabla 5-3: Rangos de impermeabilización que se utilizaran para nuestra cuenca, tomados de los criterios del Esquema Director. Fuente: Resumen Ejecutivo Esquema Director 2016.**



PROYECCIONES DE LOS IMPACTOS HIDROLÓGICOS BASADOS EN EL PLAN DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL VIGENTE: ESQUEMA DIRECTOR, EN EL ÁREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR (AMSS)

NOMBRES:  
ESTRADA PONCE, JOSUÉ RODRIGO  
LÓPEZ RECINOS, LIDIA YANET

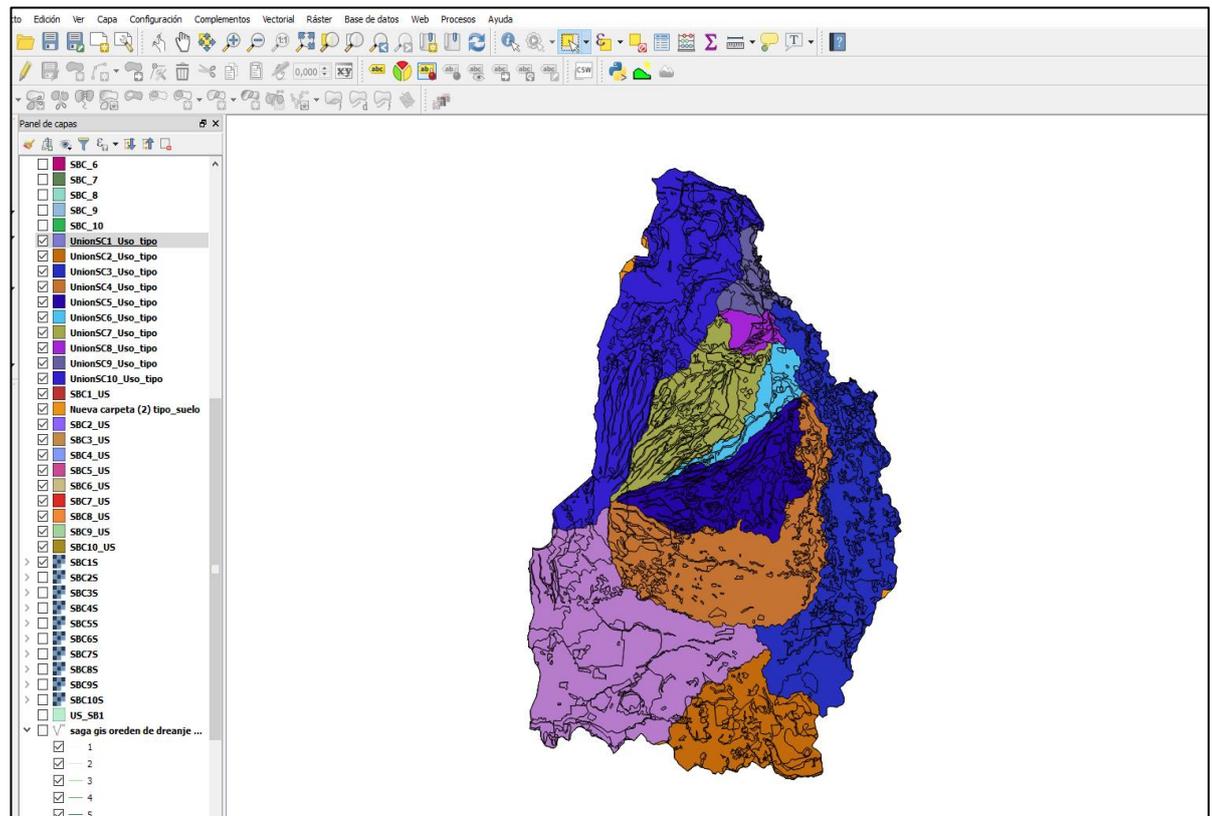
MAPA 5.3: MAPA DE IMPERMEABILIZACIÓN BASE Y AMPLIADA APLICADA EN LA CUENCA DEL RIO ACELHUATE EN PARTE ALTA Y MEDIA

FUENTE: ELABORADO POR GRUPO DE TESIS

Para conocer el comportamiento hidrológico de la cuenca en el escenario hipotético en que se ha aplicado una impermeabilización, presumiblemente mayor a la actual, es necesario conocer como ese cambio de impermeabilidad afecta el Número de Curva existente. Por lo tanto, se debe de realizar un proceso similar al usado en el cálculo de Número de Curva del Capítulo 3, pero con la diferencia que en este caso no se “intersectarán” solamente el tipo de suelo y el uso de suelo, sino que también el tratamiento urbanístico, ya que ahora el nuevo número de curva está en función del tratamiento planeado a un futuro.

Además, es de esperar que entre un escenario de impermeabilización base y ampliado ocurra una diferencia de Número de Curva ya que entre ambos escenarios hay diferentes valores de impermeabilización, aumentado el valor de número de curva de un escenario Ampliado con respecto a un escenario de impermeabilización Base.

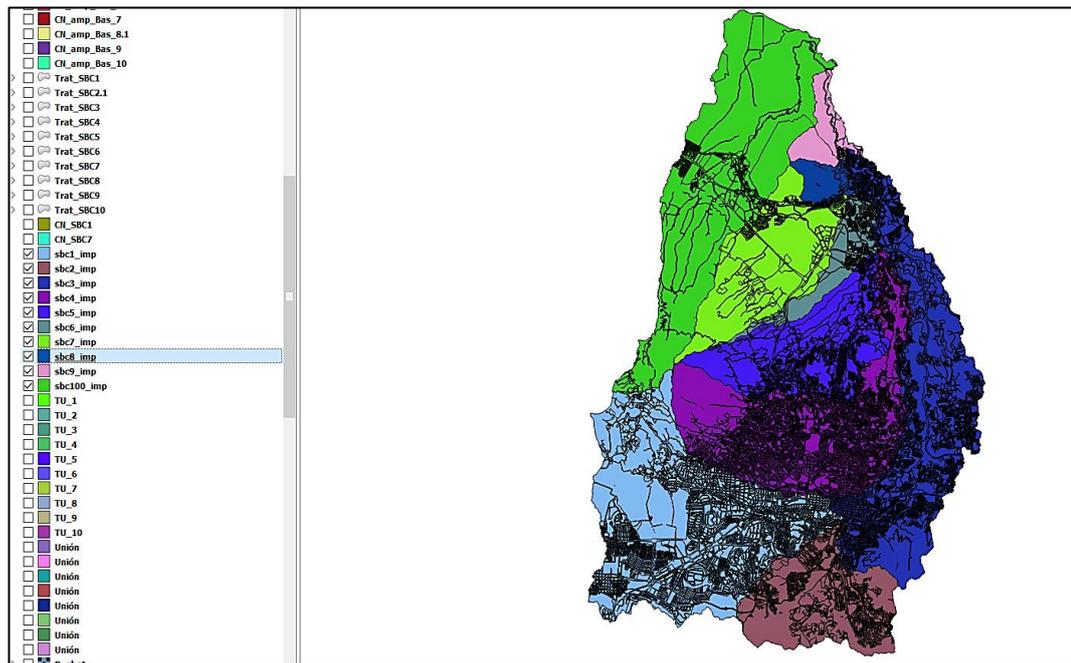
Primero se sigue el mismo proceso de intercepción de capas descrito en el Capítulo 3, en donde la herramienta “**unión**” en la pestaña vectorial, nos permitirá unir los datos de la tabla de atributos de la capa uso de suelo con la capa de tipo de suelo obteniendo el resultado antes visto en este documento, como se muestra en la ilustración siguiente (Ilustración 5-2).



**Ilustración 5-2: Aplicación de porcentajes de impermeabilidad a la cuenca de estudio, unión de capa uso de suelo y tipo de suelo. Fuente: Elaboración propia.**

Ahora se incluye además una capa que contiene información sobre el tratamiento urbanístico en la cuenca. La capa se cortó para que correspondiera al área de análisis y el mapa resultante se subdividió en las 10 subcuencas. Cada subcuenca cuenta con el mismo tipo de información, procurándose que coincidieran en área para evitar errores en el proceso.

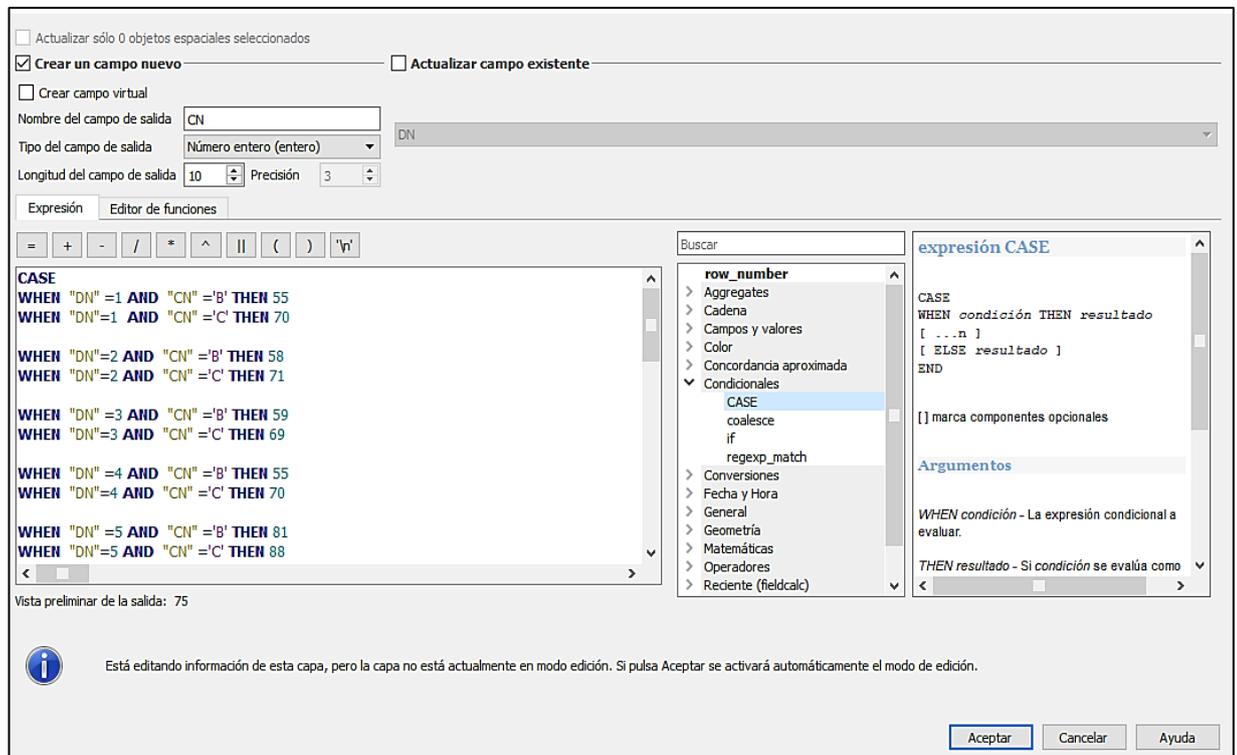
Por la gran cantidad de datos, se unieron datos parecidos en las tablas de atributos, para evitar posibles datos erróneos o datos vacíos que obstaculicen el proceso y hagan que se procese en largos lapsos de tiempo. La capa de tratamientos urbanísticos se puede ver en la Ilustración 5-3.



**Ilustración 5-3: Tratamientos urbanísticos de la cuenca alta y media del río Acelhuate.**  
Fuente: Elaboración propia.

Se aplica la herramienta “**unión**” entre la capa resultante de la unión de uso y tipo de suelo con la capa de tratamiento urbanístico. El resultado de esta unión será una nueva capa vectorial que contenga la información de número de curva actual y tratamiento urbanístico. La unión de estas tres capas generó una gran cantidad de datos (a comparación de la unión entre uso y tipo de suelo), por lo que se utilizó una herramienta contenida en la calculadora de campo. QGIS permite procesar líneas de programación simples para hacer cálculos con condiciones, y se encuentran con el nombre de “**condicionales**” (ilustración 5-4). Se usó la opción “**Case**” para programar que, cuando se cumplan ciertas condiciones se asigne un resultado. Por ejemplo, una línea de código impone que cuando el grupo hidrológico (tipo de suelo) sea “B” y el uso de suelo sea “Café” entonces que a ese polígono se le asigne un valor de

número de curva de 55, y así para todas las combinaciones posibles (Ilustración 5-4).



**Ilustración 5-4: Ejemplo de la introducción de valores para la obtención de las áreas urbanísticas de la cuenca, en base a los criterios del Esquema Director. Fuente: Elaboración propia**

Teniendo en cuenta que el porcentaje de impermeabilización actual está implícito en su número de curva, el razonamiento usado para el cálculo se basa principalmente en que si en un área que inicialmente presentaba un CN y posteriormente se le afecta con una adición de un área impermeable (CN=100), el cual sería por ejemplo la construcción de una infraestructura, el CN actual aumentará en proporción al área impermeabilizada, como se muestra en la siguiente fórmula:

$$CN' = CN(1 - \%imp) + 100 * \%imp \text{ (Ecuación 5.1)}$$

**Donde:**

**CN'** = nuevo número de curva

**CN** = número de curvas existente

**%imp.** = porcentaje de impermeabilización

De la intercepción de las capas de uso de suelo, tipo de suelo y tratamiento de suelo, se obtiene la información necesaria contenida en las tablas de atributos (ilustración 5-5) para la aplicación de la fórmula 5.1 y obtener el número de curva para un escenario de impermeabilización Base y Ampliada; ya con lo anterior, se introdujo la ecuación al programa QGis para que calculara todos los datos de la capa, obteniendo valores de CN en condiciones normales (CN\_A y CN\_B) y la extensión territorial que abarca.

DN	DES_TRA	imp_B	imp_A	CN_B	CN_A	AREA
75	Recuperación ambiental (RAM)	25	50	81	88	57384.48
75	Estabilización (EST)	70	80	93	95	39162.24
75	Consolidación de asentamientos rurales (R...	25	50	81	88	1518475.38
75	Conservación ambiental (CAM)	0	0	75	75	616130.62
75	N/A: CALLE-PASAJE-ARRIATE-RIO-QUEBR...	100	100	100	100	255986.97
75	Mitigación (MIT)	70	80	93	95	653165.89
75	Conservación ambiental (CAM)	0	0	75	75	15477.99
74	Expansión (EXP)	25	50	81	87	13695.35
74	Revitalización en corredores (REC)	90	100	97	100	35568.49
74	Recuperación de centros históricos (RCH)	70	80	92	95	280.19
74	Recuperación ambiental (RAM)	25	50	81	87	13695.35

**Ilustración 5-5: Ejemplo de cálculo de los CN en base al Esquema Director y los porcentajes de impermeabilidad. Fuente: Elaboración propia.**

Como se explicó en el capítulo anterior este proceso se realizó para cada subcuenca por separado, obteniendo un número de curva con condiciones de humedad intermedias. Ahora se debe de transformar el CN calculado a condiciones de suelo saturado como se vio en el Capítulo 3. Haciendo un ponderado de los resultados en función del área de cada subcuenca, se obtuvieron los resultados que aparecen en la siguiente Tabla 5-4:

Sub cuenca	CN ACTUAL	CN BASE	CN AMPLIADO
	NÚMERO DE CURVA PONDERADA	NUMERO DE CURVA PONDERADA	NUMERO DE CURVA PONDERADA
<b>SBC1</b>	86.95	91.65	93.35
<b>SBC2</b>	83.62	88.60	90.83
<b>SBC3</b>	83.88	87.80	90.02
<b>SBC4</b>	88.12	92.65	94.49
<b>SBC5</b>	81.20	84.14	87.00
<b>SBC6</b>	86.76	91.98	95.57
<b>SBC7</b>	81.45	85.20	88.81
<b>SBC8</b>	86.90	88.95	91.80
<b>SBC9</b>	87.16	87.90	90.07
<b>SBC10</b>	83.83	84.55	86.99

**Tabla 5-4: CN en los tres escenarios de impermeabilización. Fuente: Elaboración propia.**

## **5.6 ANÁLISIS PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL HIETOGRAMA DE DISEÑO**

Generalmente en una cuenca urbana todas las aguas lluvia provienen de las precipitaciones y a falta de registros detallados de lo que ocurre con los escurrimientos y otros procesos que se generan una vez que el agua precipita sobre el suelo, la información disponible sobre el comportamiento de la

precipitación en el espacio y el tiempo es muy valiosa para el análisis, modelación y simulación adecuada de los procesos a que pueden estar sometidas las aguas lluvias.

El crecimiento urbano altera de manera drástica las fases del ciclo hidrológico, incrementando el volumen y la velocidad del escurrimiento superficial, debido a la reducción de la infiltración en los suelos, por su impermeabilización. Es por ello que la estimación de crecidas en áreas semi rurales y cuencas urbanas, depende en gran parte del estado de desarrollo que estas experimenten: Uso de suelos, crecimiento urbano por el crecimiento poblacional y obtención de más recursos consecuencia de los primeros.

Por lo anterior, para la estimación de crecidas en zonas urbanas, es necesario la aplicación de métodos hidrológicos que transforman lluvias de diseño en escurrimiento, al tomar en cuenta las condiciones físicas actuales y/o futuras de las áreas semi rurales y urbanas. La aplicación de estos métodos comienza con el establecimiento de las curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF), las cuales representan las características relevantes de las tormentas que ocurren en la zona: su duración, su intensidad y su período de retorno.

Después del proceso de calibración desarrollado en el Capítulo 4, usando datos del evento lluvioso Tormenta Tropical IDA, en la modelación del programa HEC-HMS, con lo cual se obtuvo la respuesta hidrológica de la cuenca en estudio, se pasará a la determinación del evento de precipitación de diseño, el cual servirá para la continuación del análisis hidrológico de la

cuenca alta y media de la cuenca del río Acelhuate y que se desarrollará en el siguiente apartado.

#### **5.6.1 EL PERIODO DE RETORNO**

Para el diseño hidrológico deben definirse inicialmente el o los eventos de precipitación que alimentarán los modelos lluvia-escorrentía, utilizando usualmente una tormenta de diseño, que tiene asociada una intensidad media de lluvia ( $I$ ), un tiempo de duración ( $D$ ) y un Período de Retorno ( $F$  o  $Tr$ ).

Dado que la magnitud de un evento extremo es inversamente proporcional a su frecuencia de ocurrencia, se requiere definir el intervalo de recurrencia o período de retorno ( $Tr$ ).

El periodo de retorno se define como el tiempo medio entre ocurrencias para que un evento de precipitación supere una lluvia determinada en un intervalo de tiempo finito<sup>70</sup>. La adopción de la magnitud de un evento extremo dependerá del costo y del riesgo asociado a la falla de la obra que se pretende diseñar.

De manera probabilística, se puede ejemplificar el periodo de retorno como el lanzamiento de un dado, y ya que un dado tiene seis caras iguales, cada una con un valor que va desde uno al seis, al lanzarlo existe una probabilidad que el dado caiga en cualquiera de las seis caras, por lo que la probabilidad de que se obtenga una de ellas en un solo tiro es de  $1/6$ .

Un evento lluvioso, es equivalente al lanzamiento de un dado con la diferencia que este tiene infinitas caras, por lo que su probabilidad de ocurrencia es completamente nula. Es por ello que para un evento lluvioso se habla de intervalos de tiempo. Utilizando el dato tomado para este análisis, se tomará un valor finito de probabilidades de que el evento lluvioso ocurra y esta probabilidad sea  $1/50$ , teniendo en cuenta que, para este caso, la probabilidad el inverso es un periodo de retorno de 50 años.

La Tabla 5.5 presenta rangos de valores usuales de períodos de retorno ( $T_r$ ) de diseño de estructuras hidráulicas, tomando en cuenta que, para este

---

<sup>70</sup> Hidrología Aplicada. 1a Edición. A. Bateman (2007). Página 36

análisis, se ha tomado un valor de periodo de retorno de 50 años, correspondiente a un drenaje urbano con alcantarillas en ciudades grandes, y además teniendo en cuenta que en la cuenca del río Acelhuate, se cuenta con obras existentes diseñadas en su gran mayoría para periodos de retorno de 50 años.

<b>TIPO DE ESTRUCTURA</b>	<b>PERIODO DE RETORNO (AÑOS)</b>
<b>ALCANTARILLAS</b>	
<b>Volúmenes de tráfico bajos</b>	5-10
<b>Volúmenes de tráfico intermedios</b>	10-25
<b>Volúmenes de tráfico altos</b>	50-100
<b>PUENTES DE CARRETERAS</b>	
<b>Sistema secundario</b>	10-50
<b>Sistema primario</b>	50-100
<b>DRENAJE AGRICOLA</b>	5-50
<b>DRENAJE URBANO</b>	
<b>Alcantarillas en ciudades pequeñas</b>	2-25
<b>Alcantarillas en ciudades grandes</b>	25-50
<b>AEROPUERTOS</b>	
<b>Volúmenes de tráfico bajos</b>	5-10
<b>Volúmenes de tráfico intermedios</b>	10-25
<b>Volúmenes de tráfico altos</b>	50-100

**Tabla 5-5: Criterios de diseño generalizados para estructuras hidráulicas. Fuente: Chow, Maidment, Mays, 1994.**

### 5.6.2 CURVAS INTENSIDAD-DURACIÓN-FRECUENCIA (I-D-F)

Las curvas IDF son una de las formas más empleadas para resumir el comportamiento estadístico de las propiedades de las tormentas en un lugar determinado, poniendo énfasis en las propiedades que generan los mayores escurrimientos a ser transportados. Para una frecuencia o periodo de retorno fijo, se pueden encontrar los valores de la intensidad máxima de la lluvia que se puede esperar en cada intervalo de la duración de la tormenta.

El proceso de obtención de las curvas IDF consiste en el análisis de las series de intensidades máximas absolutas anuales de lluvias de igual duración a partir de datos de registros de lluvia continuos, a las cuales se le ajusta un modelo probabilístico para obtener las probabilidades de excedencia de los distintos eventos considerados. Repitiendo el proceso para distintas duraciones de lluvias se obtienen los periodos de retorno de las intensidades máximas asociadas a una duración de la tormenta.

Los resultados se presentan en forma de curvas, pudiéndose ajustar alguna expresión de tipo analítico. Estas curvas son de tipo exponencial, en que la intensidad, para una misma frecuencia, disminuye a medida que aumenta la duración de la tormenta. Las curvas están graficadas según el periodo de retorno, cuyos años pueden comprender desde 5 hasta 100 años o más, dependiendo de los registros de lluvia con los que se disponga.

El uso de las curvas IDF se sostiene en emplear eventos de lluvia que involucren una relación entre la intensidad de la lluvia, la duración y la frecuencia o periodo de retorno para el diseño de las obras, de manera de

asociar un riesgo de falla a la capacidad hidráulica<sup>71</sup>. En este sentido más que para la operación del sistema de drenaje, estos procedimientos están enfocados a las condiciones de seguridad, como son los vertederos, obras de descarga, sumideros, conducción, alcantarillas en caminos y colectores en general.

### 5.6.3 TORMENTA DE DISEÑO

Una tormenta de diseño puede definirse como un evento de lluvia, ya sea histórico o artificial, el cual es usado para diseñar o dimensionar un sistema de drenaje u otras obras hidráulicas. La lluvia de diseño supone que, el sistema es diseñado con una capacidad adecuada para funcionar con esa tormenta, frente a un evento similar o menor.

La distribución espacial y temporal de las lluvias es un factor importante en la definición de las tormentas de diseño. Las redes pluviográficas más o menos densas, la influencia de la topografía en el movimiento y deposición de la precipitación, etc., complica el análisis de la variación espacial; por lo que, para el análisis, se deberán de seleccionar aquellas estaciones de monitoreo de lluvia, que cuenten con datos suficientes para el análisis (registros completos) y si es posible con las curvas I-D-F ya determinadas y construidas; dado que estas curvas contienen información histórica de la pluviometría de

---

<sup>71</sup> Simulación continua para el diseño de drenaje urbano, Romina Aranda Monsalve. (2009), 1a. Edición, Página 17.

la cuenca, servirá como punto de partida para construir una tormenta de diseño en base a las tres primeras características mencionadas

#### 5.6.4 HIETOGRAMA DE DISEÑO UTILIZANDO LAS CURVAS IDF

Una de las formas más utilizada para representar las tormentas de diseño es a través de hietogramas, considerando que la variación en función del tiempo de la intensidad de la lluvia es de gran importancia en la determinación del escurrimiento de la cuenca, donde no sólo interesa el caudal máximo resultante, sino también, la distribución de los volúmenes de escorrentía.

Existen varias formas de desarrollar hietogramas de diseño con análisis de eventos de tormentas a partir de datos de lluvias observados; sin embargo, se puede recurrir al uso de las curvas IDF para desarrollar hietogramas de diseño.

Para una determinada duración, una curva IDF establece la relación entre la duración y la intensidad media máxima anual para esa misma duración (todo ello para un determinado nivel de probabilidad o período de retorno por tratarse de un fenómeno estocástico). Los tres elementos que componen las curvas IDF son:

- **Intensidad**, expresada normalmente en unidades de mm/h o mm/min.

- **Duración (minutos).** Es el tiempo durante el cual se mide la lluvia. El término duración en este caso representa el intervalo de tiempo donde se da la mayor intensidad dentro de un evento mayor.
- **Frecuencia (años).** Mediante el período de retorno se incluye la aleatoriedad del fenómeno.

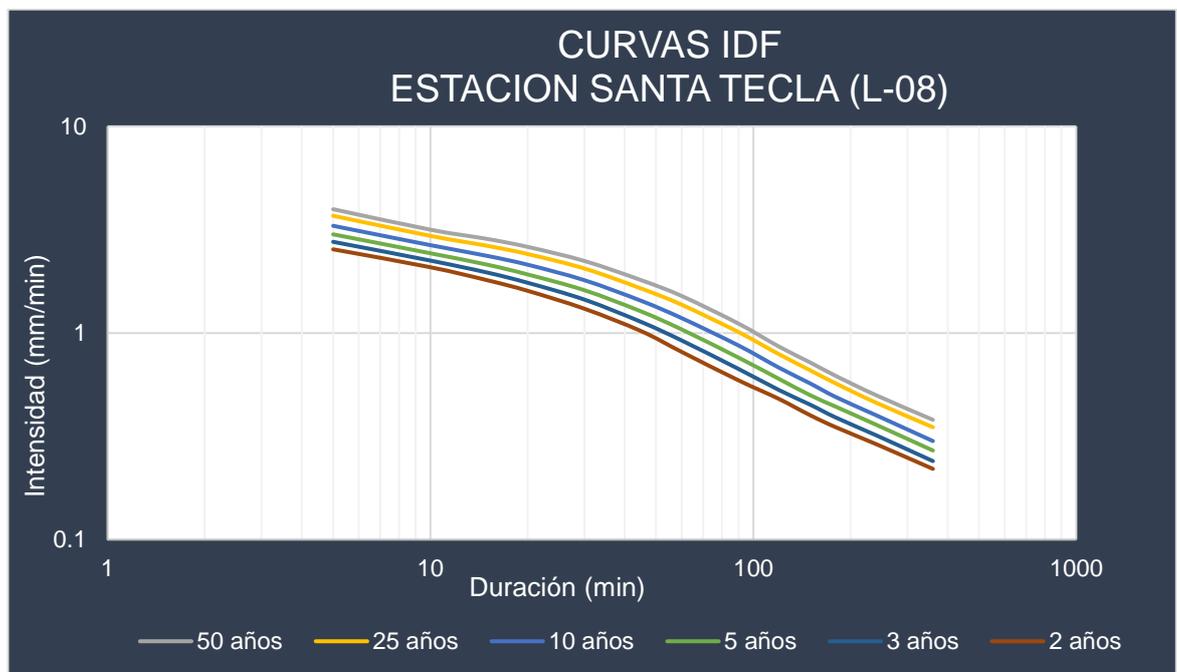
Utilizando las curvas, se obtienen hietogramas discretos con intervalos de cierta duración, donde para cada intervalo la intensidad media de la lluvia se obtiene tomando diferencias entre valores sucesivos de precipitación obtenidas directamente de la curva IDF y del periodo de retorno para diseño. Estas tormentas de diseño con distribuciones de tiempo sintéticas tienen su máxima intensidad al comienzo y decrecen en el tiempo lo que en general no refleja una distribución real; no obstante, esta distribución para tormentas de diseño tiene la ventaja de presentar intensidades para diferentes duraciones manteniendo constante el periodo de retorno para cualquiera de ellas, de manera que son útiles para sistemas en los que interesa diseñar elementos en cuencas de diferente tamaño, sometidas todas ellas a eventos con el mismo periodo de retorno, con tormentas que adecuan la intensidad para cada duración.

El salvador cuenta con una serie de estaciones pluviométricas, con las que se ha obtenido información histórica de los eventos lluviosos y con los cuales se han construido curvas I-D-F.

Las estaciones pluviométricas que tienen influencia en la zona de estudio son: **Procafé, Observatorio S.S e Ilopango**, estas se encuentran dentro de la

cuenca del río Acelhuate y tienen definidas sus curvas IDF con periodos de retorno de 5, 10, 15, 25, 50 y 100 años por medio de análisis realizados por parte de los técnicos del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN), quienes a su vez la pueden compartir dependiendo del propósito del estudio. La estación Beloso que se venía utilizando en los Capítulos anteriores, en esta instancia no aplica su uso, ya que no cuenta con las curvas I-D-F correspondientes al periodo de retorno seleccionado; optándose por sustituirla por la estación Observatorio S.S. la cual tiene influencia sobre la cuenca y cumple con los requerimientos necesarios para su uso, al igual que las otras dos estaciones pluviométricas, la estación Observatorio tiene la curva I-D-F con periodo de retorno entre 2 a 50 años.

Las curvas IDF de cada estación se muestran en las siguientes Ilustraciones:



**Ilustración 5-6: Curva I-D-F de estación Santa Tecla. Fuente: MARN.**

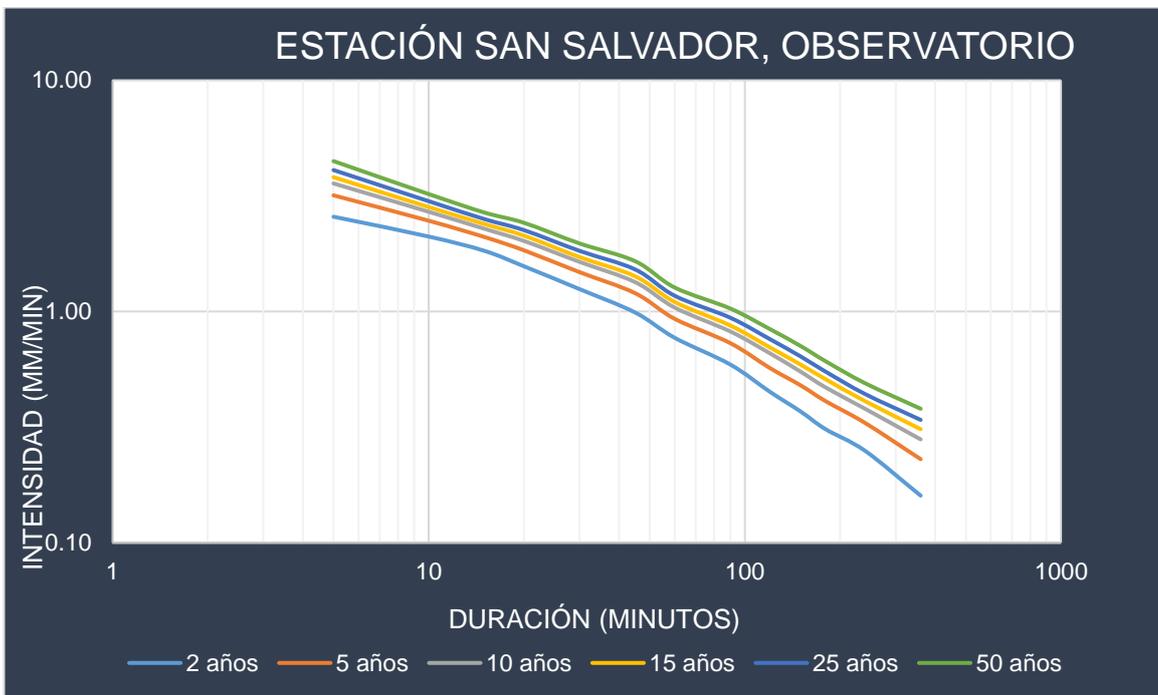


Ilustración 5-7: Curva I-D-F de estación Observatorio S.S. Fuente: MARN.

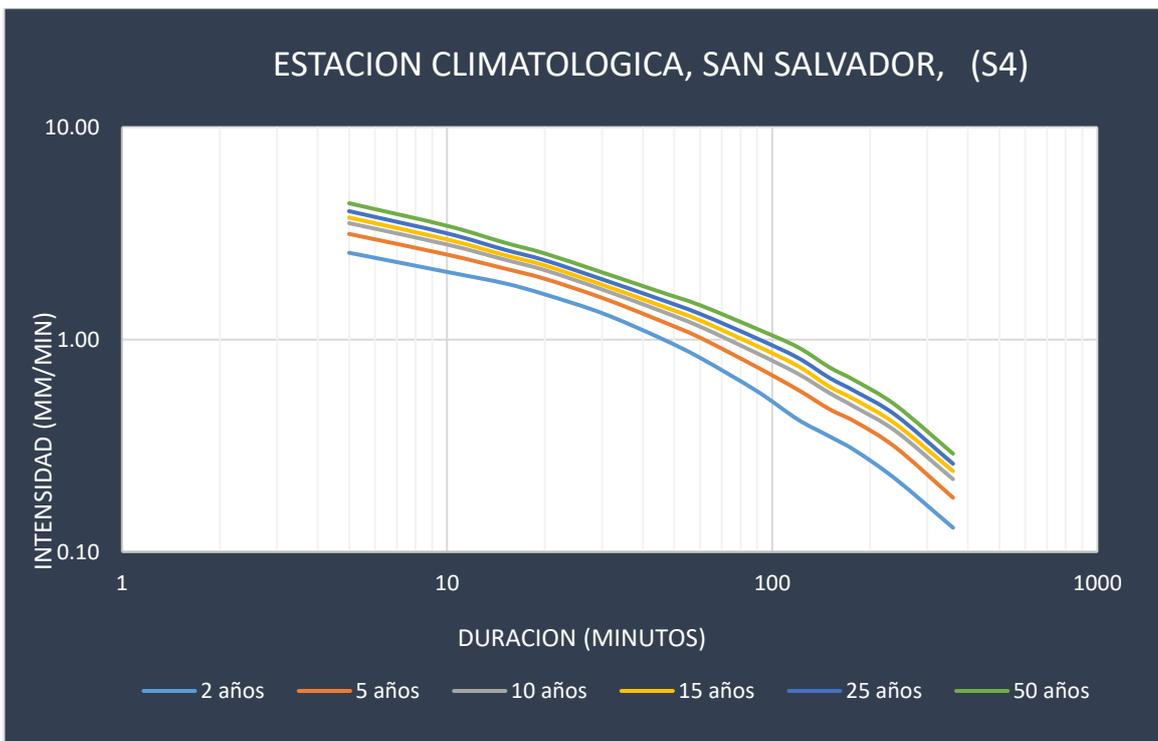


Ilustración 5-8: Curva I-D-F de estación Ilopango. Fuente: MARN.

### **METODO DEL BLOQUE ALTERNO**

Existen diversos métodos para la determinación de la tormenta de diseño, como lo puede ser el método del Hietograma triangular, Método de intensidad instantánea, entre otros, pero se considera que el que se aplica para esta investigación es el denominado método del **Bloque Alterno**.

Quizás fue el primero de los métodos basado en las curvas I-D-F y más usado por su sencilla aplicación, fue propuesto en 1957 por D.J. Keifer y H. H. Chu y ampliamente conocido como método de los Bloques Alternos por la forma en que se construye. Los autores obtuvieron las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia para determinar una tormenta de diseño en la ciudad de Chicago, de ahí que el método también sea conocido como Chicago Design Storm.

El método tiene en cuenta las lluvias máximas de duraciones individuales, la cantidad promedio de precipitación antecedente a la intensidad pico, y también el coeficiente de avance de la tormenta  $r$ .

Mediante el coeficiente de avance de tormenta se estima el instante en que se produce la máxima intensidad de lluvia  $tp$ , ya que este representa el cociente entre este, respecto a la duración total de la tormenta.

Si  $r = 0.5$  el pico de intensidad se produce a la mitad de duración de la tormenta, mientras que si  $r < 0.5$  estará adelantado y si  $r > 0.5$  el pico ocurre después de la mitad de tiempo de la tormenta. Para obtener un valor adecuado de  $r$  se recomienda seleccionar una serie de tormentas de duraciones distintas y calcular la media ponderada de los coeficientes de avance de acuerdo con cada duración de evento.

El hietograma se construye asumiendo que la intensidad media de un conjunto de bloques ha de ser igual a la intensidad obtenida mediante la curva I-D-F para cualquier intervalo de tiempo. Tras seleccionar el período de retorno de diseño, se lee la intensidad en la curva I-D-F correspondiente a la región en la cual se está trabajando para cada una de las duraciones. Los incrementos o bloques obtenidos se deben reordenar de manera que el bloque de intensidad máxima quede en el centro de la duración definida y el resto de los bloques se sitúen en orden decreciente alternativamente a derecha e izquierda del bloque central (Chow, et al., 1988).

El hietograma producido por este método especifica una altura de precipitación que ocurre en  $n$  intervalos de tiempo sucesivos sobre una duración total<sup>72</sup>.

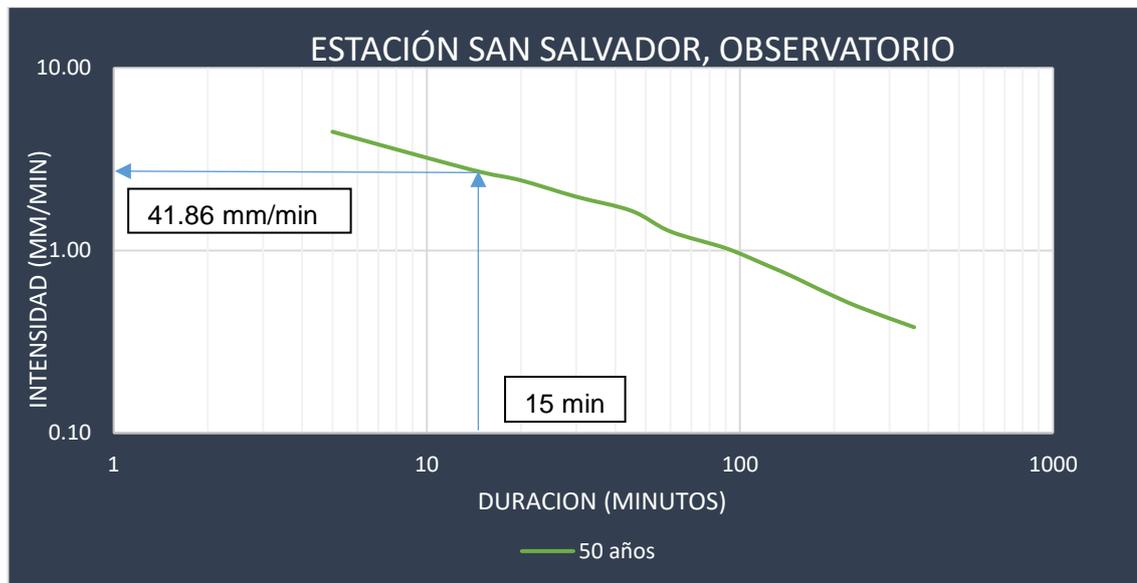
Para el uso de este método se selecciona el periodo de retorno de 50 años y, además, se establece intervalos de 15 minutos de tiempo que serán 15, 30, 45, 60...120 minutos para confeccionar un hietograma de lluvia de 2 horas; la selección del tiempo de duración de la tormenta se fundamenta en que una lluvia de dos horas refleja la duración característica de aguaceros típicos en la ciudad y por lo tanto resulta adecuado para el análisis<sup>73</sup>; posteriormente ser

---

<sup>72</sup> Hidrología aplicada, Ven Te Chow, 1994, 1ª Edición, Página 478

<sup>73</sup> Escenarios de Riesgos: Amenaza por inundaciones, MARN, 2012, 1ª Edición. Página 51.

leídas en las curvas IDF para cada duración. De esta manera se obtienen las intensidades de lluvia para cada intervalo de tiempo y de cada estación.



**Ilustración 5-9: Ejemplo de lectura de la intensidad de lluvia en la estación Observatorio S.S. Fuente: Elaboración propia.**

Para tabulación de datos, el tiempo se coloca en la primera columna mientras que la intensidad de lluvia en la segunda; en una tercera columna se calcula la precipitación **P** de cada intervalo, haciendo el producto de los valores del tiempo y las intensidades de lluvia para poder obtener el valor de lluvia en milímetros, esto se hace análogamente para todos los valores de tiempo (2 horas en total). Ahora se debe hacer una suposición que consiste en tomar los primeros 15 minutos de lluvia (primer dato de tabla) como el intervalo más lluvioso del total de tiempo, y así establecer la cuarta columna que contiene el dato denominado **ΔP** o intervalo de lluvia, este valor surge de la resta de un valor de precipitación **P** con respecto a su valor de lluvia anterior para tener la

cantidad de lluvia en milímetros en cada intervalo de tiempo. Los resultados de este proceso se pueden observar en las tablas siguientes:

<b>OBSERVATORIO S. S</b>			
<b>t (min)</b>	<b>I (mm/min)</b>	<b>P (mm)</b>	<b><math>\Delta P</math> (mm)</b>
<b>15</b>	2.79	41.85	41.85
<b>30</b>	1.95	58.5	16.65
<b>45</b>	1.72	77.4	18.90
<b>60</b>	1.34	80.4	3.00
<b>75</b>	1.17	87.75	7.35
<b>90</b>	1.03	92.7	4.95
<b>105</b>	0.94	98.7	6.00
<b>120</b>	0.87	104.4	5.70

**Tabla 5-6: Valores de lluvia obtenidos para una curva I-D-F de la estación Observatorio S.S. Fuente: Elaboración propia.**

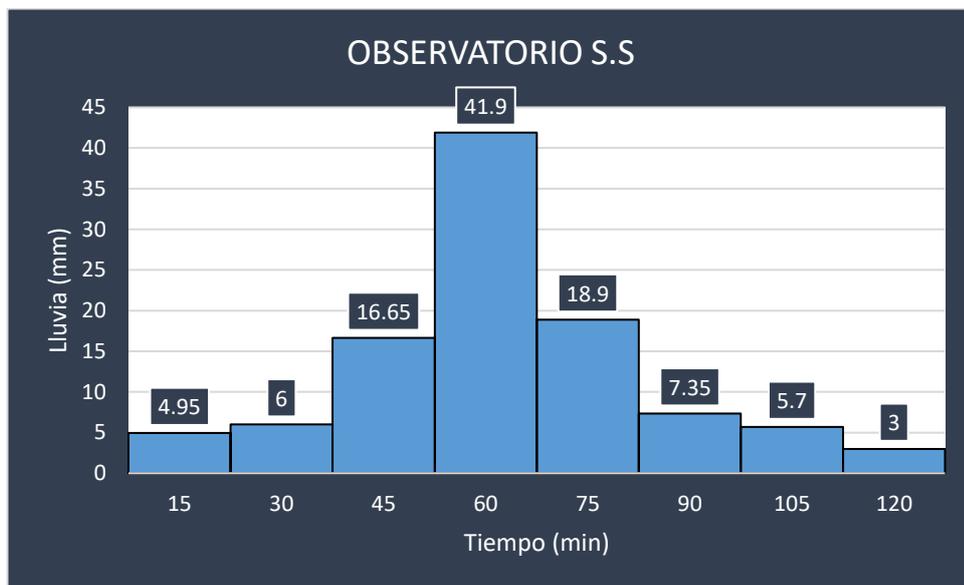
<b>PROCAFÉ</b>			
<b>t (min)</b>	<b>I (mm/min)</b>	<b>P (mm)</b>	<b><math>\Delta P</math> (mm)</b>
<b>15</b>	2.9	43.5	43.50
<b>30</b>	2.28	68.4	24.90
<b>45</b>	1.85	83.25	14.85
<b>60</b>	1.59	95.4	12.15
<b>75</b>	1.35	101.25	5.85
<b>90</b>	1.15	103.5	2.25
<b>105</b>	1.01	106.05	2.55
<b>120</b>	0.9	108	1.95

**Tabla 5-7: Valores de lluvia obtenidos para una curva I-D-F de la estación Procafé. Fuente: Elaboración propia**

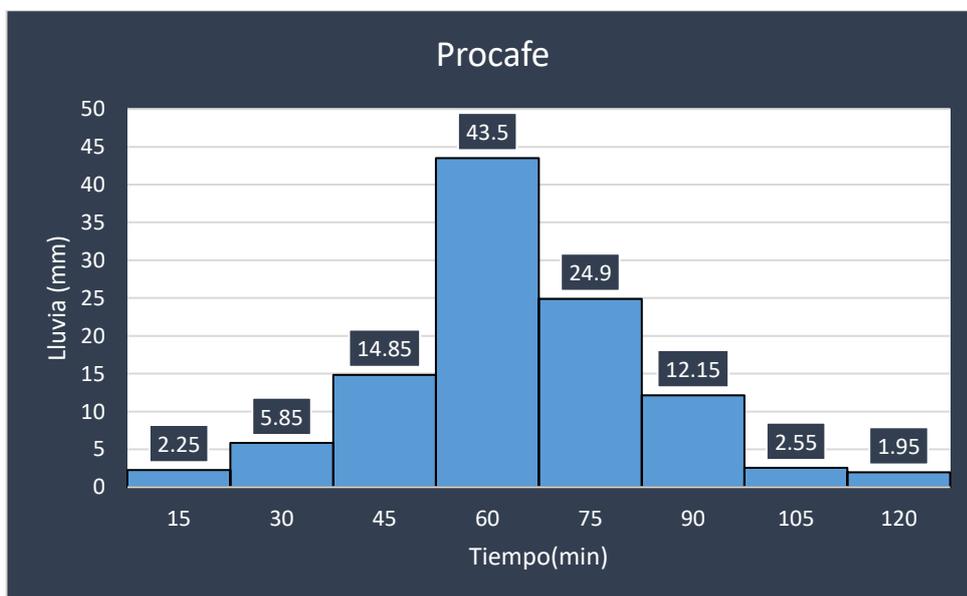
<b>ILOPANGO</b>			
<b>t (min)</b>	<b>I (mm/min)</b>	<b>P (mm)</b>	<b><math>\Delta P</math> (mm)</b>
<b>15</b>	2.96	44.4	44.40
<b>30</b>	2.09	62.7	18.30
<b>45</b>	1.75	78.75	16.05
<b>60</b>	1.53	91.8	13.05
<b>75</b>	1.35	101.25	9.45
<b>90</b>	1.15	103.5	2.25
<b>105</b>	1.05	110.25	6.75
<b>120</b>	0.94	112.8	2.55

**Tabla 5-8: Valores de lluvia obtenidos para una curva I-D-F de la estación Ilopango.  
Fuente: Elaboración propia**

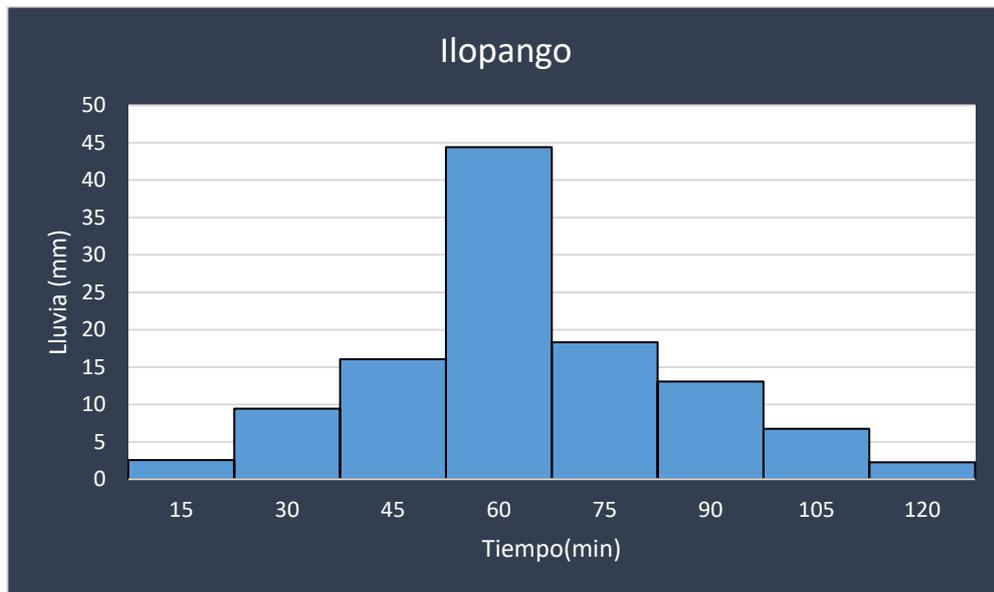
Si es necesario, se debe hacer un reordenamiento de los valores de  $\Delta P$  de forma decreciente. Para construir el hietograma con los valores de  $\Delta P$  se procede estableciendo como centro del hietograma el valor de precipitación ocurrido en el intervalo más lluvioso, es decir los primeros 15 minutos, como se estableció anteriormente. A la derecha se coloca el segundo intervalo más lluvioso y luego a la izquierda el valor de lluvia ocurrido en el tercer intervalo más lluvioso, hasta colocar todos alternadamente. Los hietogramas resultantes se muestran a continuación:



**Ilustración 5-10 : Hietograma de diseño de estación Observatorio S.S.**  
Fuente: Elaboración propia.



**Ilustración 5-11: Hietograma de diseño de estación Procafé.**  
Fuente: Elaboración propia.



**Ilustración 5-12: Hietograma de diseño de estación Ilopango.**  
Fuente: Elaboración propia

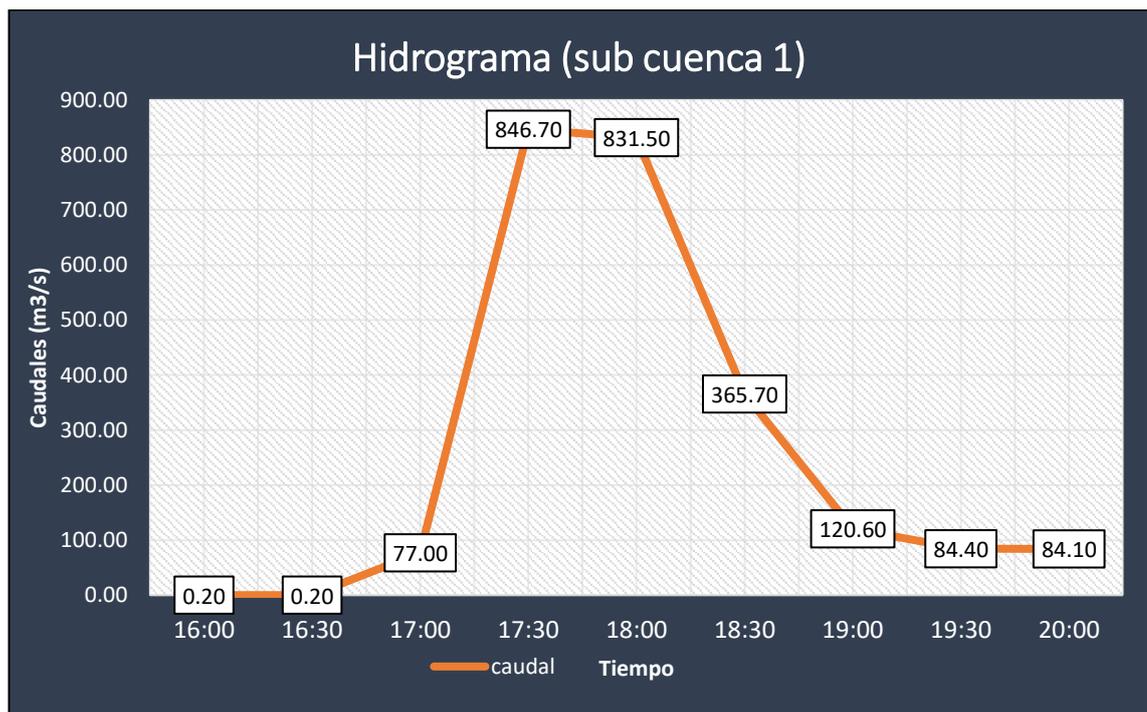
## 5.7 MODELACION DE ESCENARIO BASE Y AMPLIADO EN HEC-HMS

En este punto, después de haber calculado los Números de Curva para cada escenario de impermeabilización (Base y Ampliado), se deben de crear dos nuevos modelos preservando los valores calibrados, e introducir para cada uno de los escenarios los valores de Número de Curva de su respectivo estado de impermeabilización; además, en el apartado anterior se determinaron hietogramas de diseño que servirán para simular una lluvia de diseño de 50 años de periodo de retorno, y para efectos de la corrida del programa, se establecerá una fecha que abarcará desde el 01 enero de 2000 a las 00:00 hasta las 23:30 horas de ese mismo día, considerando las 2 horas estipuladas y el resto del tiempo se rellenará con ceros, esto se hará con la finalidad de no bloquear el programa durante la simulación.

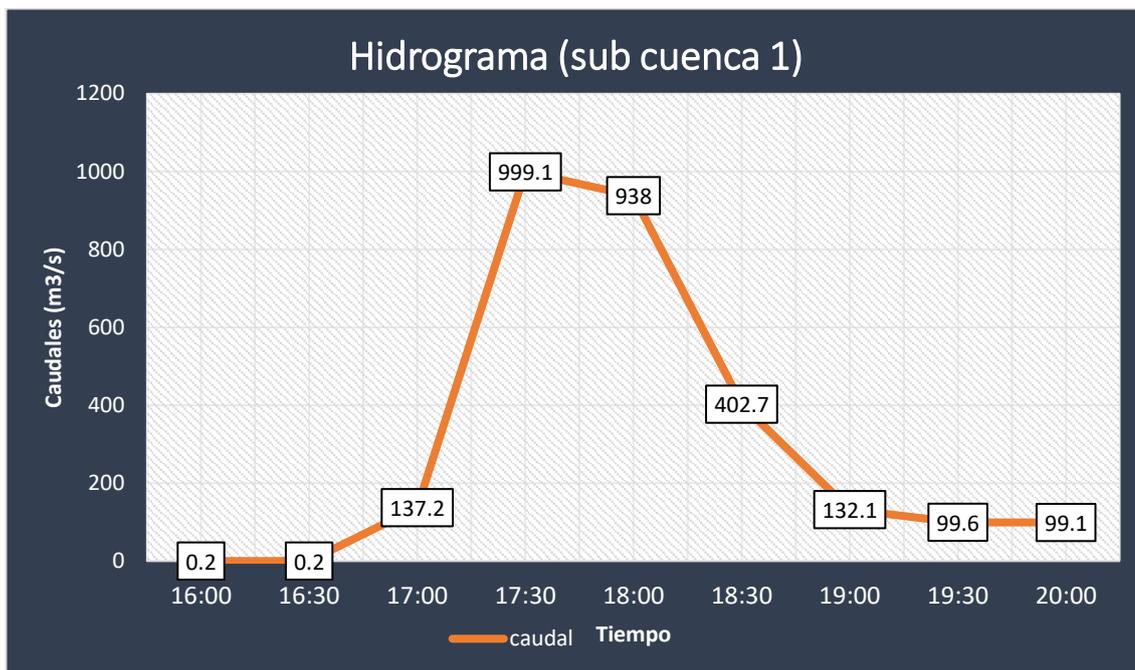
Los nuevos 3 registros de lluvia de diseño se deberán de distribuir en las 10 subcuencas que conforman el área de estudio.

La distribución se realizará siguiendo los pasos establecidos en el método de polígonos de Thiessen (explicado en capítulo).

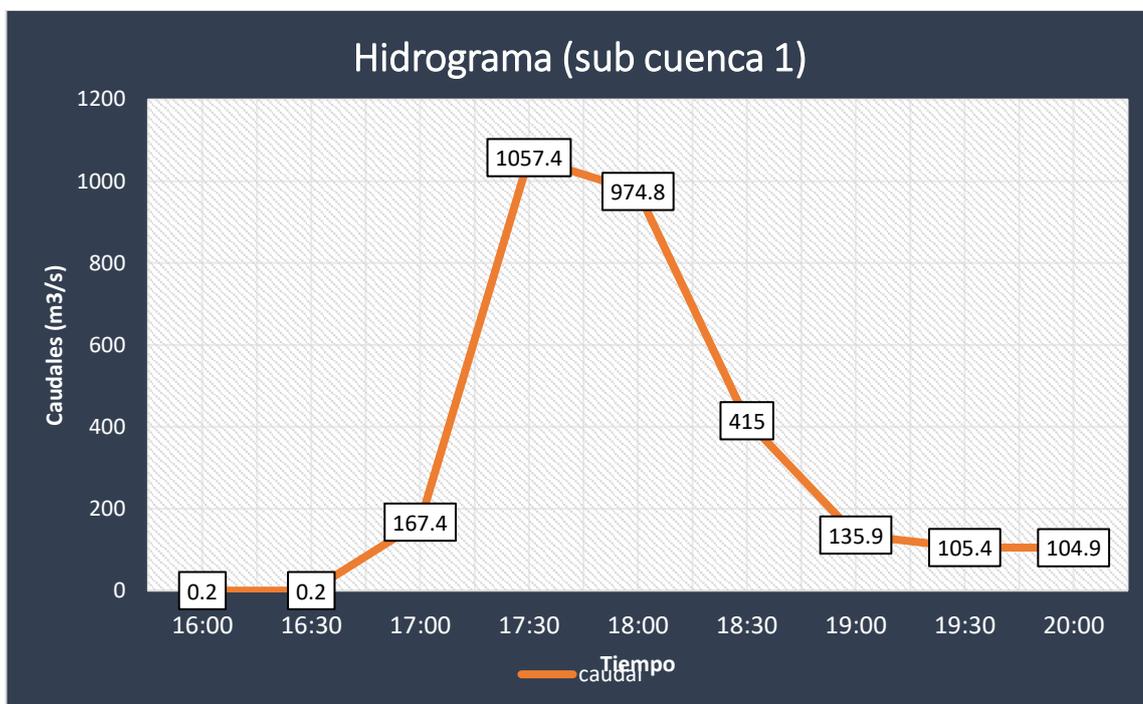
Introduciendo los valores al modelo calibrado se procede a realizar la corrida de ambos modelos (modelo de impermeabilización Base y Ampliado). En los resultados obtenidos para la subcuenca 1(SB 1), los cuales pueden observarse en las gráficas siguientes:



**Ilustración 5-13: Curva de caudal pico de escenario Actual en la Sub cuenca 1.**  
Fuente: Elaboración propia.

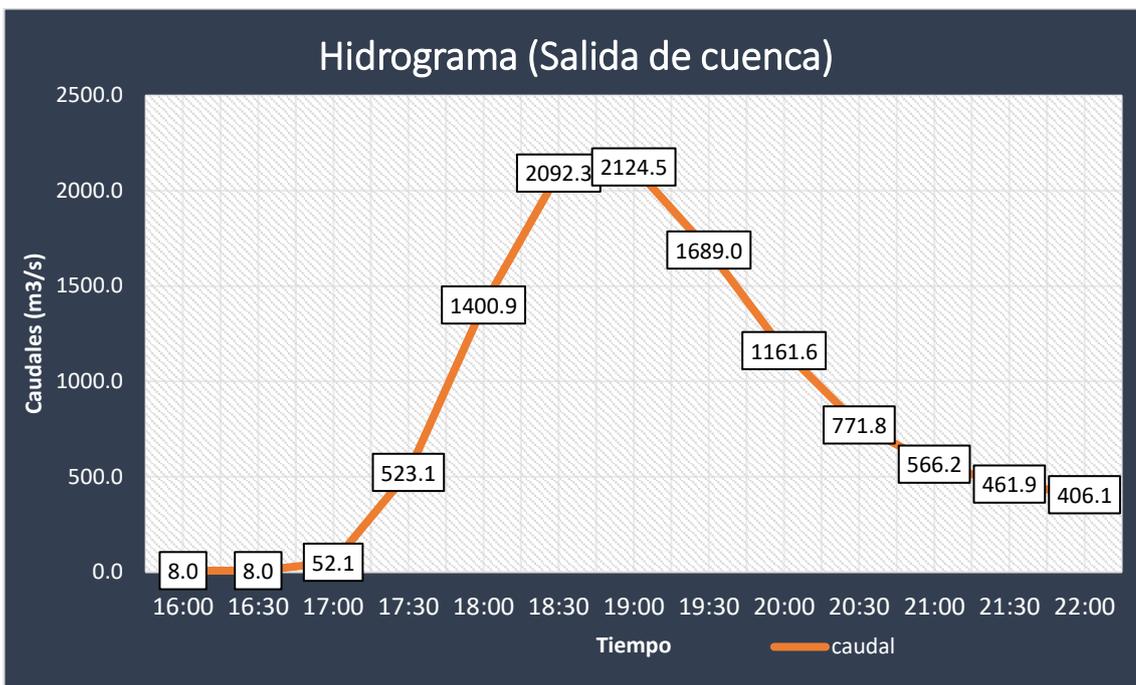


**Ilustración 5-14: Curva de caudal pico de escenario de impermeabilización Base en la subcuenca 1. Fuente: Elaboración propia.**

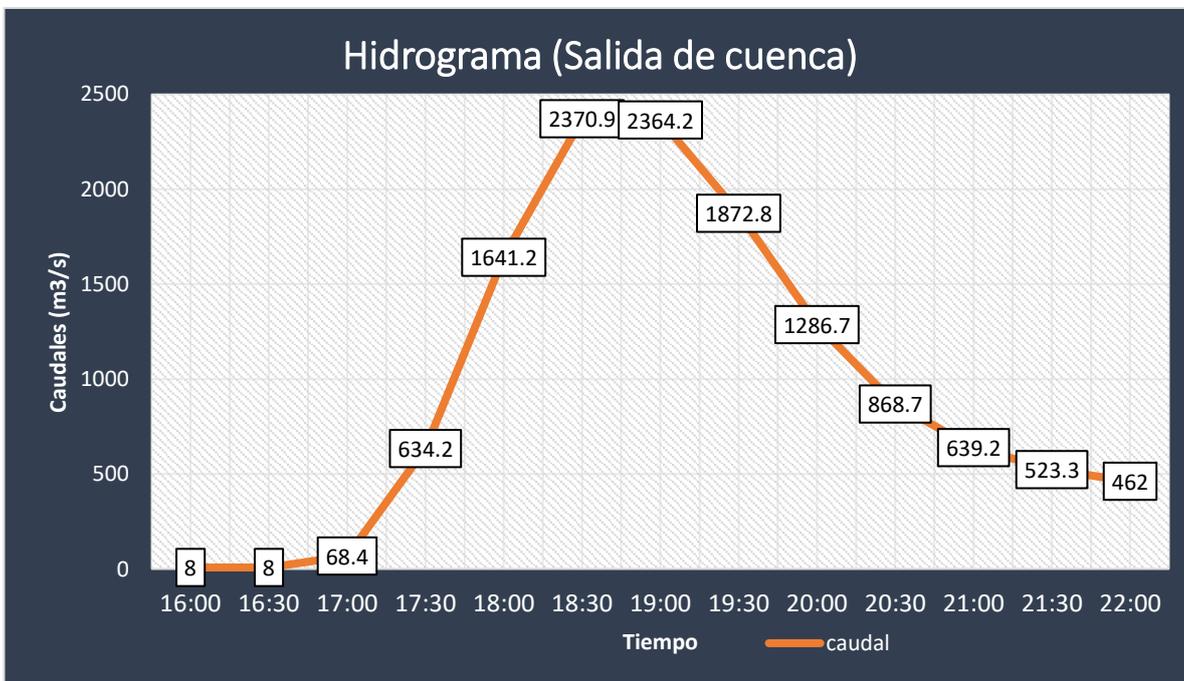


**Ilustración 5-15: Curva de caudal pico de escenario de impermeabilización Ampliada en la subcuenca 1. Fuente: Elaboración propia.**

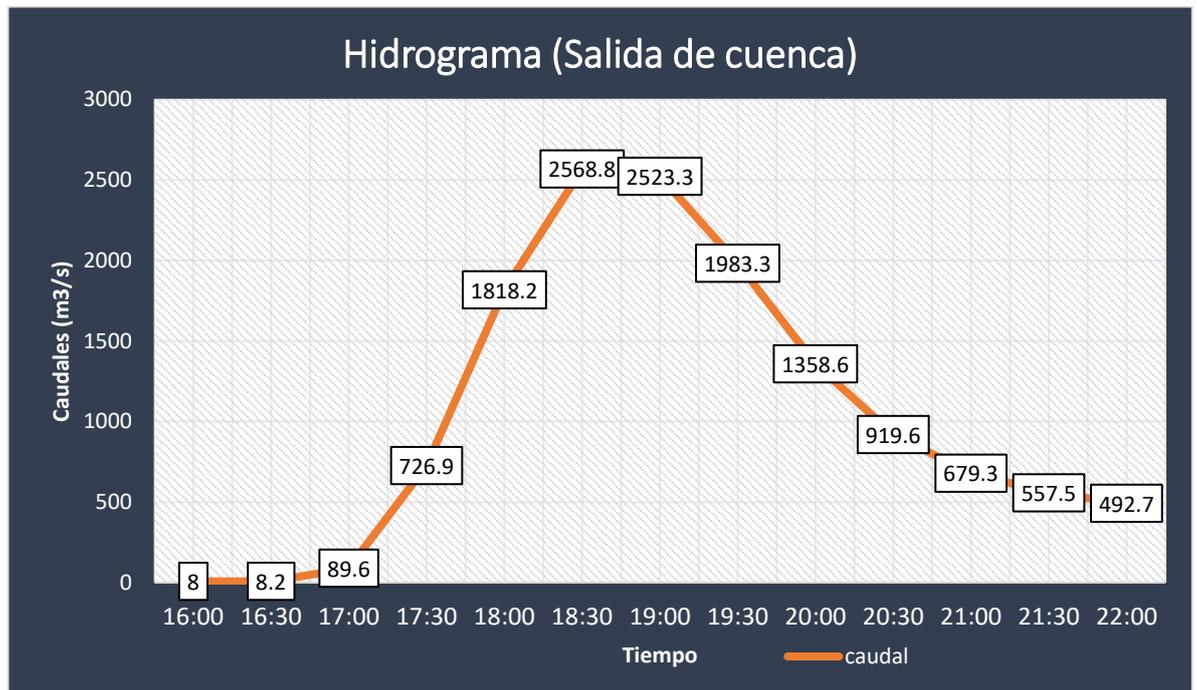
Se puede notar un aumento en el caudal pico entre el escenario Base y el escenario Ampliado de 999.1 m<sup>3</sup>/s y 1,057.4 m<sup>3</sup>/s respectivamente, con respecto al escenario Actual que es de 846.7 m<sup>3</sup>/s; el caudal pico se da a las 17:30 horas del tiempo de simulación para el escenario Base y para el escenario Ampliado. No obstante, en donde se nota la diferencia mayor es en el punto de salida, aquí se puede observar que el caudal pico ocurrido es de **2,124.50 m<sup>3</sup>/s a las 18:30 horas del tiempo de simulación para un escenario de Actual**, mientras que **en un escenario de impermeabilización Base es de 2,370.90 m<sup>3</sup>/s siendo un 11.11% mayor al caudal actual. El caudal pico registrado en un escenario de impermeabilización Ampliado como resultado 2,568.80 m<sup>3</sup>/s a las 18:00 del tiempo de simulación**, también significa un aumento notable con respecto al caudal en una situación Actual, como se observa en las siguientes imágenes:



**Ilustración 5-16: Curva de caudal pico de escenario Actual en punto de salida. Fuente: Elaboración propia.**



**Ilustración 5-17: Curva de caudal pico de escenario de impermeabilización base en punto de salida. Fuente: Elaboración propia.**



**Ilustración 5-18: Curva de caudal pico de escenario de impermeabilización ampliada en punto de salida. Fuente: Elaboración propia.**

Lo anterior, puede significar que al aumentar los valores de número de curva debido al tratamiento urbanístico planeado y planteado en el Esquema Director provoque un aumento en el caudal dadas las condiciones en ambos escenarios, siendo más evidente el aumento aguas abajo de la cuenca del río Acelhuate. Aunque el tratamiento busque proteger zonas consideradas de alto valor ambiental, las acciones generadas en aquellas áreas que están urbanizadas provocan un efecto en el caudal futuro que generen eventos de inundaciones a zonas colindantes a ríos y quebradas. Además, nada asegura que las áreas protegidas en un futuro y a través de reformas de leyes pasen a un tratamiento de expansión urbana cada vez más necesario, debido a la demanda habitacional futura. Por lo tanto, estos valores, más que por su valor

numérico, su importancia recae en la confirmación del aumento del caudal y por ende de los niveles de agua por efecto de la creciente fenómenos de lluvia torrenciales y determinar que se necesitan más y mejores obras hidráulicas para prevenir estos efectos.

A continuación, se presenta una tabla resumen de todos los caudales obtenidos:

SUB CUENCA	CAUDAL PICO (m <sup>3</sup> /s)		
	ESCENARIO ACTUAL	ESCENARIO BASE	ESCENARIO AMPLIADO
<b>SBC1</b>	846.7	999.1	1057.4
<b>SBC2</b>	333.0	397.4	427.6
<b>SBC3</b>	458.7	515.4	550.0
<b>SBC4</b>	588.2	659.9	693.0
<b>SBC5</b>	282.4	316.9	352.4
<b>SBC6</b>	97.1	115.6	130.1
<b>SBC7</b>	317.2	364.5	412.3
<b>SBC8</b>	66.1	78.6	85.2
<b>SBC9</b>	107.7	110.2	117.5
<b>SBC10</b>	518.0	542.3	592.5

**Tabla 5-9: Caudales picos de cada subcuenca en los tres escenarios de análisis.  
Fuente: Elaboración propia.**

	ESCENARIO ACTUAL	ESCENARIO BASE	ESCENARIO AMPLIADO
CAUDAL PICO m <sup>3</sup> /s	2,124.50	2,370.90	2,568.80
HORA CAUDAL PICO	19:00	18:30	18:30

**Tabla 5-10: Resumen de caudales pico obtenidos en la salida de la cuenca por medio de la modelación en HEC HMS. Fuente: Elaboración propia.**

## 5.8 MODELACION HIDRÁULICA

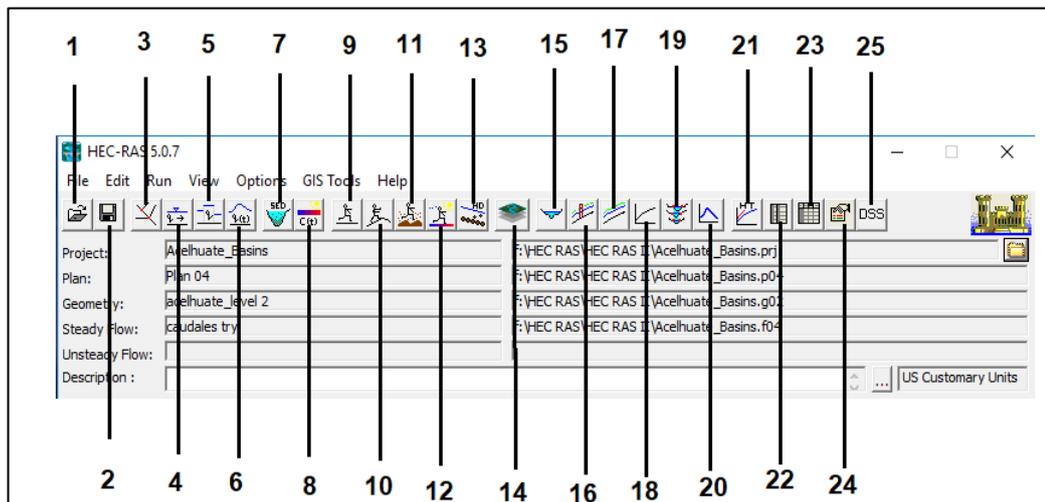
La modelación hidráulica en ríos y canales es el proceso por el cual se simula el nivel que alcanza el agua a lo largo del cauce, a partir de una determinada lluvia (Real o de Diseño); en este caso se simulan los niveles que alcanzan los eventos analizados, correspondientes a diferentes periodos de retorno; así como, los niveles alcanzados en diferentes eventos ocurridos, los cuales permiten calibrar el modelo al lograr representar de una forma cercana a la realidad.

Para la realización de la modelación hidráulica se utilizó el software HEC-RAS también creado por el Ejército de los Estados Unidos de Norteamérica (U.S. Army).

Este programa presenta módulos para la simulación de caudales con flujo permanente y no permanente.

En el caso de los cauces analizados, se trabajará con el módulo permanente por ser de interés únicamente el caudal pico.

El interfaz de usuario presenta los elementos que se utilizarán en la modelación fisiográfica, los principales de ellos son la geometría del cauce y tipo de flujo, pero además el programa HEC-RAS presenta en su pantalla principal una barra de opciones, el cual provee de un acceso rápido a las herramientas más frecuentemente usadas; la descripción de cada una de ellas se detalla en la siguiente ilustración.



**Ilustración 5-19: Interfaz de usuario de programa HEC RAS. Fuente: Elaboración propia.**

Nº	NOMBRE DE COMANDO	FUNCIÓN
1	Open proyect	Permite abrir un proyecto previamente realizado
2	Save proyect	Guarda el proyecto actual
3	Geometric data	Permite editar o ingresar información geométrica del cauce
4	Steady flow data	Permite editar o ingresar información de caudal permanente
5	Cuasi-Steady flow data	Permite editar o ingresar información de caudal casi permanente
6	Unsteady flow data	Permite editar o ingresar información de caudal no permanente
7	Sediment data	Permite editar o ingresar información de sedimentos en el flujo
8	Water quality data	Permite ingresar o editar información sobre calidad de agua
9	Steady flow analysis	Realiza la simulación de flujo permanente
10	Unsteady flow analysis	Realiza la simulación de flujo no permanente
11	Sediment analysis	Realiza la simulación de sedimentos en el flujo
12	Water quality analysis	Realiza la simulación de calidad de agua
13	Hydraulic design functions	Realiza diseños hidráulicos computacionales
14	Ras mapper	Realiza mapas de nivel de agua
15	Cross sections	Permite visualizar la sección transversal de un perfil
16	Profile plot	Permite visualizar el perfil de superficie de agua
17	General profile plot	Permite visualizar las variables a lo largo del canal
18	Rating curve	Permite ver las curvas computacionales de la simulación
19	XYZ perspective plot	Da una visualización en 3D de una sección de canal
20	Stage and flow hydrographs	Grafica flujo hidrológico
21	Hydraulic properties	Gráfica y tabula propiedades hidráulicas
22	Detailed output table	Permite ver detalles de salida de secciones transversales, puentes, etc.

23	Profile summary table	Permite visualizar un sumario de salida de múltiples perfiles
24	Sum errors, warn, notes	Sumario de errores, advertencias y notas
25	View DSS	Tienda de datos.

Tabla 5-11: Herramientas disponibles en HEC RAS. Fuente: Elaboración propia.

### 5.8.1 PROCESO DE MODELACIÓN EN HEC-RAS

El primer paso para el desarrollo de un modelo hidráulico en HEC RAS es establecer el directorio en donde el programa guardará el proyecto en su totalidad, para esto se debe de iniciar un nuevo proyecto (**New project**) y seleccionar la carpeta en el disco duro deseado, donde se creará la carpeta con el título respectivo, como se muestra en la Imagen 5-1

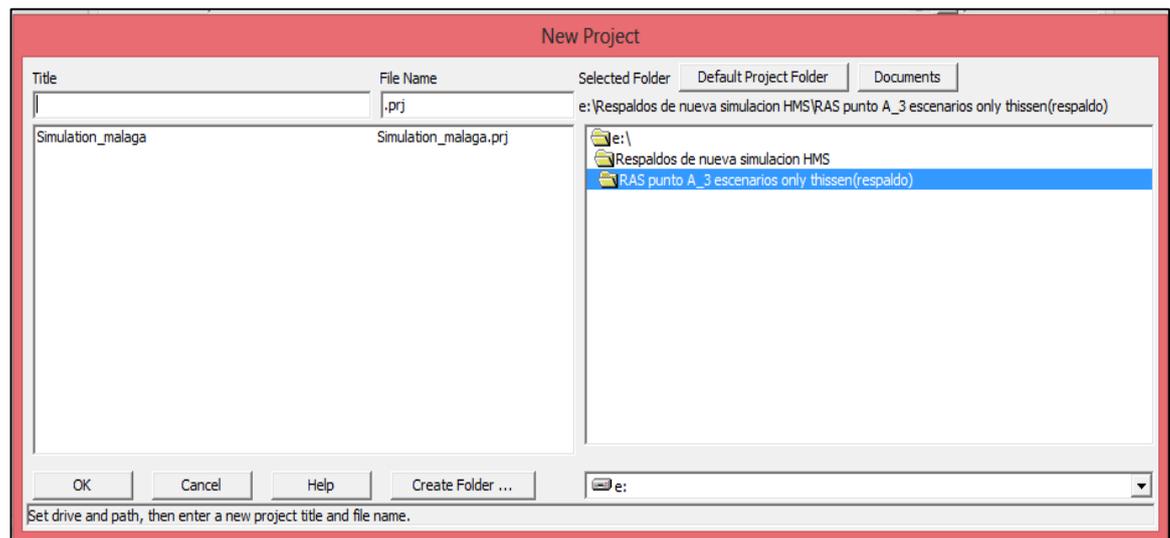
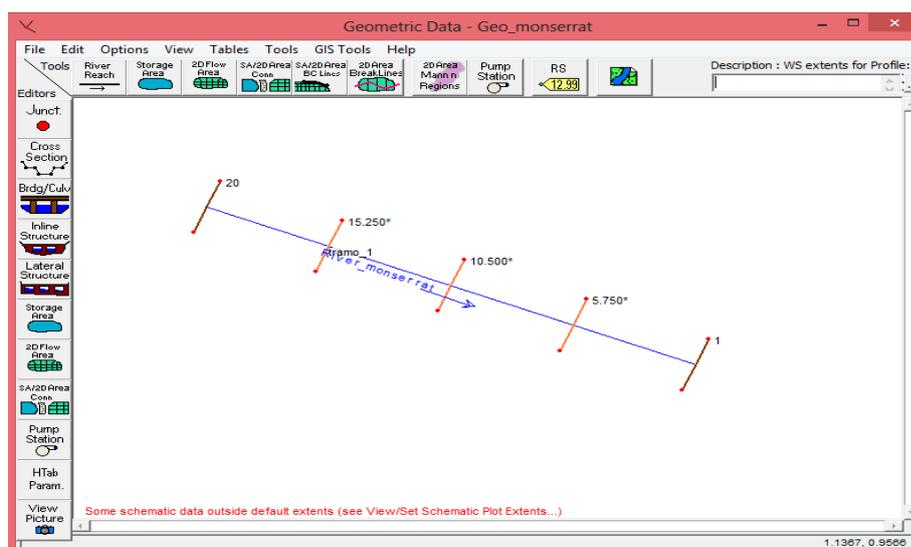


Imagen 5-1: Creación de modelación hidráulica en HEC RAS. Fuente: Elaboración propia.

El siguiente paso es la introducción de la información geométrica necesaria, que consiste en una capa de mapa de fondo, información de conectividad de

sistema de ríos, información de la sección transversal e información de estructuras hidráulicas (puentes) si es requerido. La información geométrica se ingresa seleccionando en la pestaña **Edit** en la barra de menú de HEC-RAS, luego **Geometric Data** (imagen 5-2).

Se establece un tramo de río en donde se determinará el sentido de la corriente, además de la cantidad y posición de las secciones transversales que se analizarán. La información básica requerida en cada sección esta mostrada en el editor de sección trasversal, esta información consta de información de elevación de un punto y su respectiva posición en un plano de coordenadas, la distancia entre una sección trasversal y la siguiente, el valor de numero de Manning del contornos del perfil, la definición de los puntos que conforman el canal principal y datos que por defecto están en la asignación de valores como los son el coeficiente de contracción y de expansión que serán de 0.1 y 0.3 respectivamente.



**Imagen 5-2: Editor geométrico de HEC RAS. Fuente: Elaboración propia.**

Una vez dibujado el eje del canal, se debe de ingresar la información correspondiente del perfil del cauce, es decir, los datos de la sección transversal; se ingresa el número de Manning, que será de 0.019 ya que la sección está conformada de roca lisa y de concreto con poca vegetación (imagen 5-3). Si se analizaran varios perfiles iguales o muy parecidos a lo largo de un canal, en la pestaña **Options** de la ventana **Cross Section Data** se puede realizar copias de la misma sección, cambiando solamente la altura de los puntos de la sección simulando una pendiente.

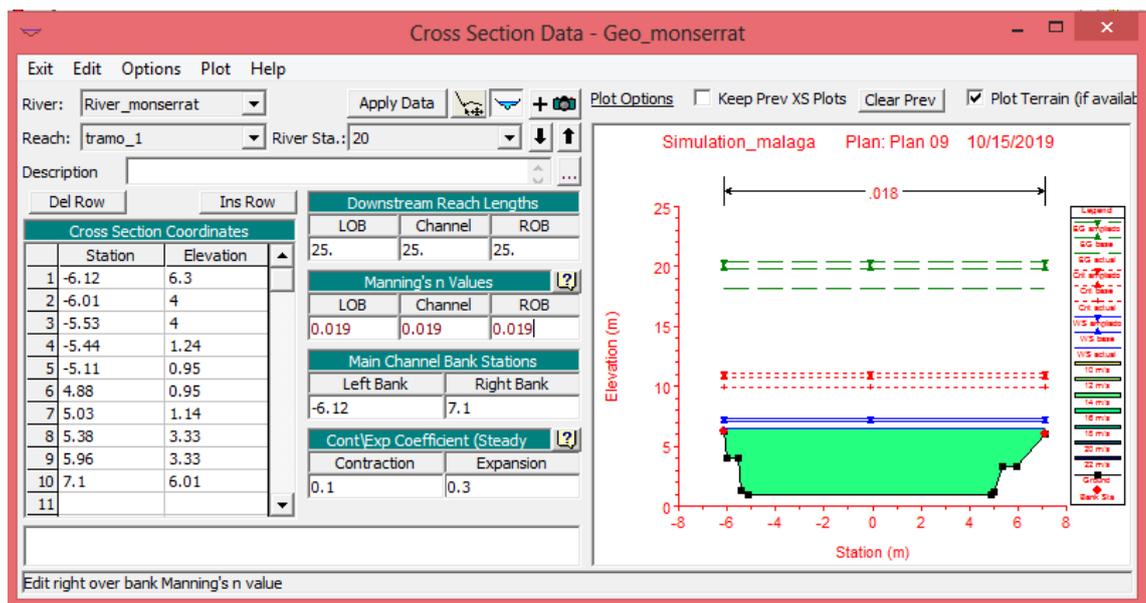


Imagen 5-3: Creación de tramo de análisis en HEC RAS. Fuente: Elaboración propia

Esta acción crea un perfil de río en el punto aguas abajo, ahora se deben de crear más secciones aguas arriba, para formar un canal continuo a lo largo del cauce; se puede realizar ingresando los datos de cada sección transversal teniendo en cuenta que se debe de ir ajustando la altura de las cotas para simular una pendiente,

Ya que el tramo de río analizado es asumiblemente uniforme, se procederá a crear secciones transversales uniformes haciendo uso de las herramientas disponibles en el programa HEC-RAS. Después de haber ingresado la sección transversal que esté aguas abajo y la que se encuentra aguas arriba, se accede en la pestaña **Tools** y seleccionando la opción **XS Interpolation**, se mostrará una pantalla que permitirá crear por medio de interpolación una serie de secciones transversales intermedias indicando principalmente la distancia entre cada una de ellas (Imagen 5-4).

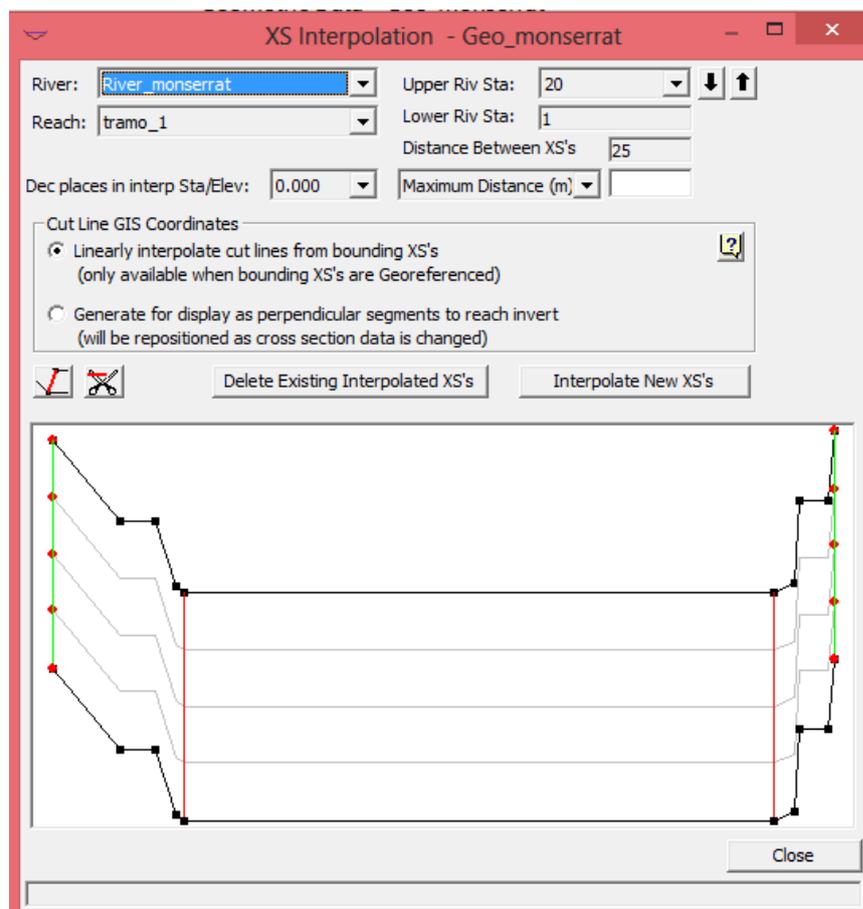
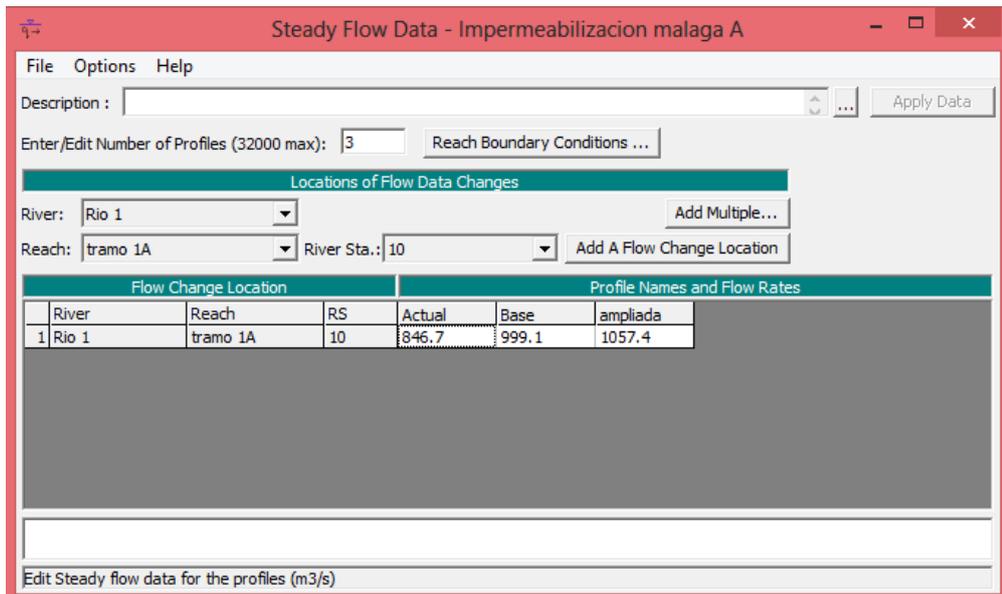


Imagen 5-4: Creación de canal simétrico en HEC RAS. Fuente: Elaboración propia.

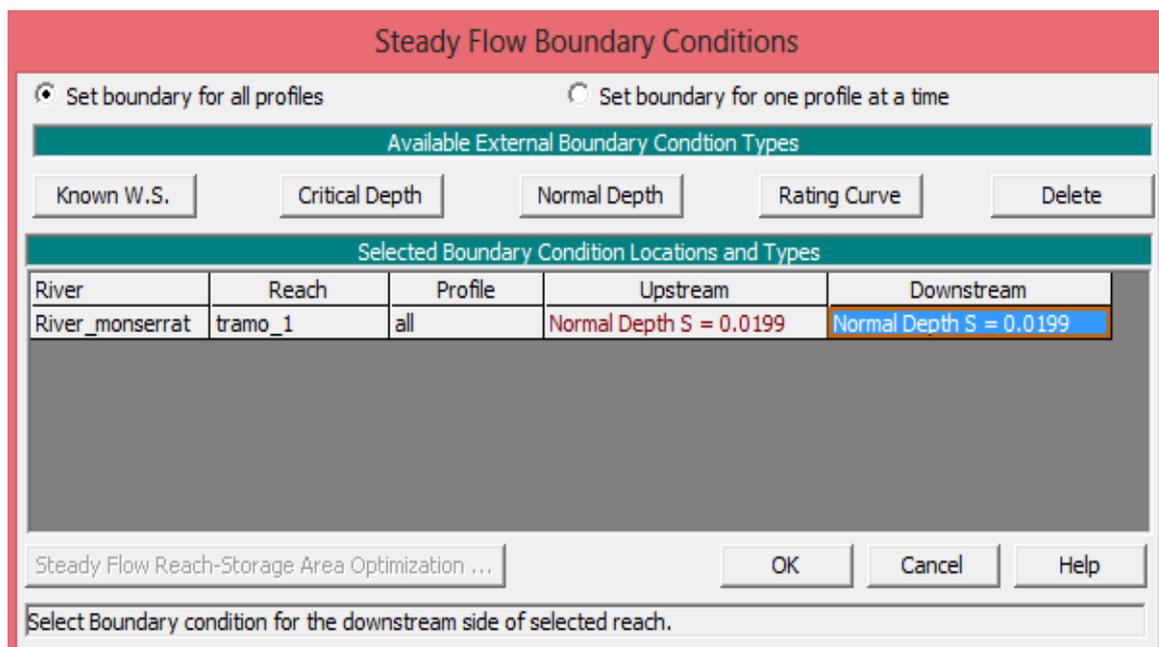
Una vez ingresada la información de geometría del cauce, la información debe de ser grabada en un archivo en el disco duro. Lo anterior se realiza seleccionando la opción **Save Geometric Data** desde el menú de Edición. Esta acción permitirá al usuario brindar un título al conjunto de datos geométricos y poder ser cargado al proyecto.

A continuación, se debe definir el tipo de flujo con el cual se realizará la simulación, en este caso se trabajará con un **flujo permanente** ya que solo se modelará los caudales pico, por lo tanto, se seleccionará en la pestaña de trabajo la opción **Steady Flow Data**, en donde aparecerá una interfaz para definir el número de caudales a analizar, el máximo número que el programa permite analizar es de 32,000 diferentes caudales (dependerá de la versión), pero en este caso se trabajaran tres caudales correspondiente a los tres escenarios de impermeabilización los cuales son: impermeabilización Actual, impermeabilización Base e impermeabilización Ampliada. Los caudales que se deberán ingresar son los resultantes de la modelación hidrológica para cada escenario de impermeabilización. El archivo de la cuenca y la información geométrica del tramo en análisis se incorporan por defecto junto a la asignación de datos de flujo para ser procesados en la posterior corrida del programa.



**Imagen 5-5: Introducción de datos de flujo en HEC RAS. Fuente: Elaboración Propia.**

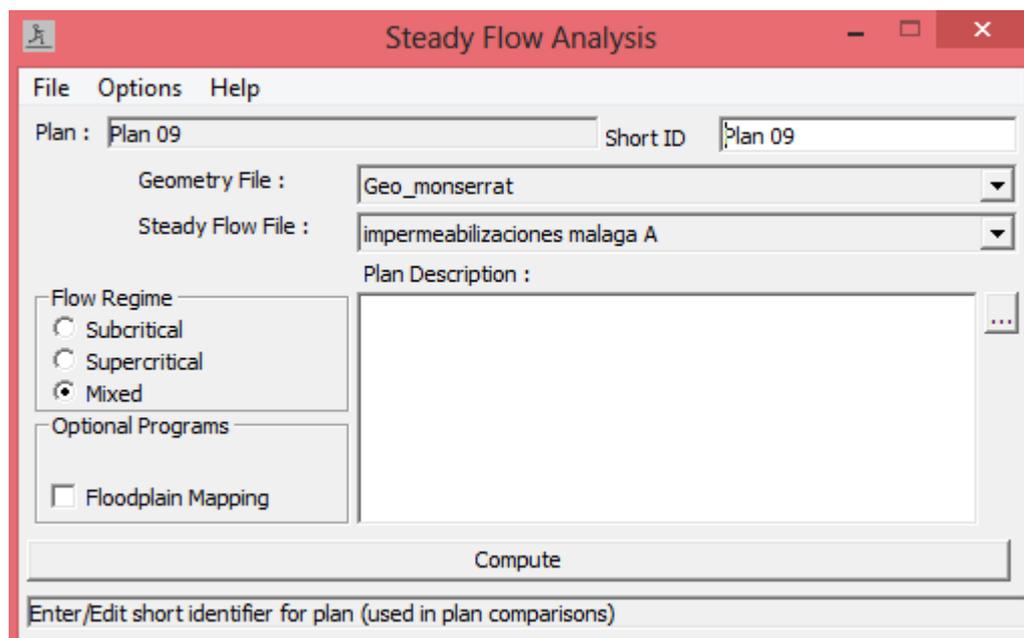
Se debe de especificar la pendiente del tramo que se está analizando, esto se define seleccionando **Reach Boundary Conditions**, luego la pantalla mostrada permite ingresar la altura de agua, la altura de agua critica, la curva característica del caudal, entre otros; eso dependerá de la información disponible, en este caso se ingresará la pendiente del tramo **Normal Depth**, el cual tiene un valor de **1.99 %** en el tramo en análisis.



**Imagen 5-6: Determinación de las condiciones de frontera en HEC RAS. Fuente: Elaboración propia.**

Ahora se debe de guardar el archivo de análisis de flujo, esto se realiza seleccionando la pestaña **File** en la pantalla **Steady Flow Data** con la opción **Save Flow Data As**, esto hará que se guarde en la carpeta el archivo de caudal y se agregue a la pantalla de análisis principal.

Por último, se debe de agregar un plan de simulación, es decir definir todo el conjunto de datos que fueron ingresados anteriormente como lo son la geometría del tramo, los caudales, y ahora especificar el régimen de flujo. Se debe de seleccionar en los botones de **Steady Flow Analysis**, aparecerá una pantalla donde se podrá visualizar y además cambiar el archivo de flujo y de geometría. Para correr el programa se debe de seleccionar la opción **Compute** y el programa empezará a analizar los diferentes niveles y caudales.



**Imagen 5-7: Simulación de modelo hidráulico en HEC RAS. Fuente: Elaboración propia.**

Los resultados de la modelación consisten en una serie de perfiles donde se puede visualizar la altura que alcanzó el agua en la sección transversal por causa del caudal establecido, representada con una línea azul continua y un relleno color celeste.

### 5.9 RESULTADO DE MODELACIÓN HIDRÁULICA

Los resultados que brinda la modelación hidrológica e hidráulica se pueden analizar en diferentes sectores ubicados en la cuenca del río Acelhuate. Se realizará un comparativo de diferentes subcuencas con características de permeabilidades diferentes para apreciar las variaciones en cuanto a caudales y altura de agua alcanzadas en las zonas de interés. El sector en donde se enfocará el análisis hidráulico e hidrológico será en los puntos donde el

volumen total de caudal en cada subcuenca es drenado, se denominará a este punto como **Punto de salida de la cuenca.**

El primer punto de interés se ubica en el punto de salida de la subcuenca 1 (SBC1), esta sub cuenca, se caracteriza por tener un valor de numero de curva de 86.95, siendo uno de los valores más altos de las sub cuencas en estudio, indicando que posee una alta densidad de área urbana en ella. Este punto es de alto valor de interés ya que como se mencionó en los antecedentes de este documento esta zona es propensa a desbordamiento que ya ha provocado la pérdida de vidas humanas.

Según los resultados de la modelación en el programa HEC-HMS el caudal máximo obtenido generado por la escorrentía superficial ocurrida en la sub cuenca 1 (SBC1) **es de 846.7 m<sup>3</sup>/s** para las condiciones de impermeabilización Actuales, además utilizando el programa HEC-RAS para simular la respuesta de altura de agua en la sección transversal del tramo de rio en el punto de análisis al verse afectado por el caudal máximo **de 5.06 metros.**

Como se detalló anteriormente, en secciones pasadas de este documento, hay ciertas modificaciones que se planean dar en las condiciones del suelo, volviéndose a un estado de área con mayor impermeabilización, por lo que dar una comparativa de los caudales, velocidades de flujo y alturas alcanzada en las crecida, brinda un punto de vista más claros para ver los cambios del comportamiento hidráulico y así evaluar los efectos consecuentes en la zona; los resultados son comparados con otros caudales y altura para condiciones

proyectadas a valores futuros de impermeabilidad, implementados debido al crecimiento urbano en el área de la cuenca del río Acelhuate. Siguiendo el mismo proceso de modelación; a continuación, se presentan los valores obtenidos en la Tabla 5-12:

SUB CUENCA 1			
ESCENARIO	CAUDAL (m <sup>3</sup> /s)	ALTURA (m)	VELOCIDAD (m/s)
Actual	846.7	5.06	14.44
Base	999.1	5.62	15.11
Ampliada	1057.4	5.83	15.34

Tabla 5-12: Resultados del análisis en los tres escenarios en subcuenca 1.  
Fuente: Elaboración propia.

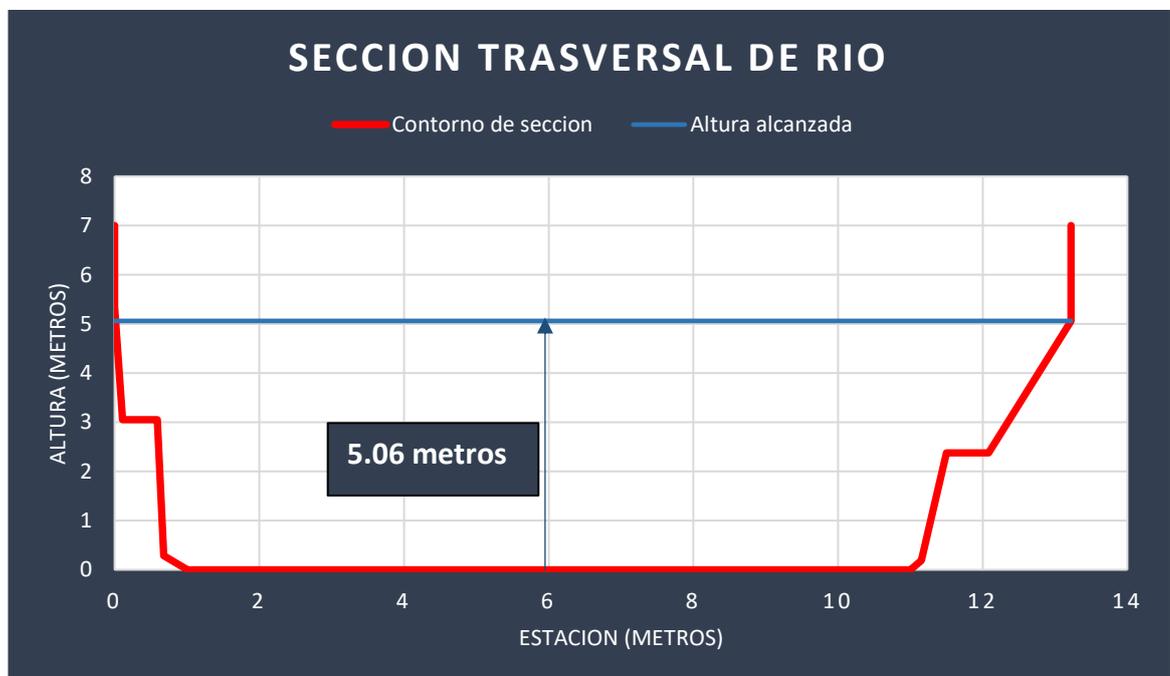
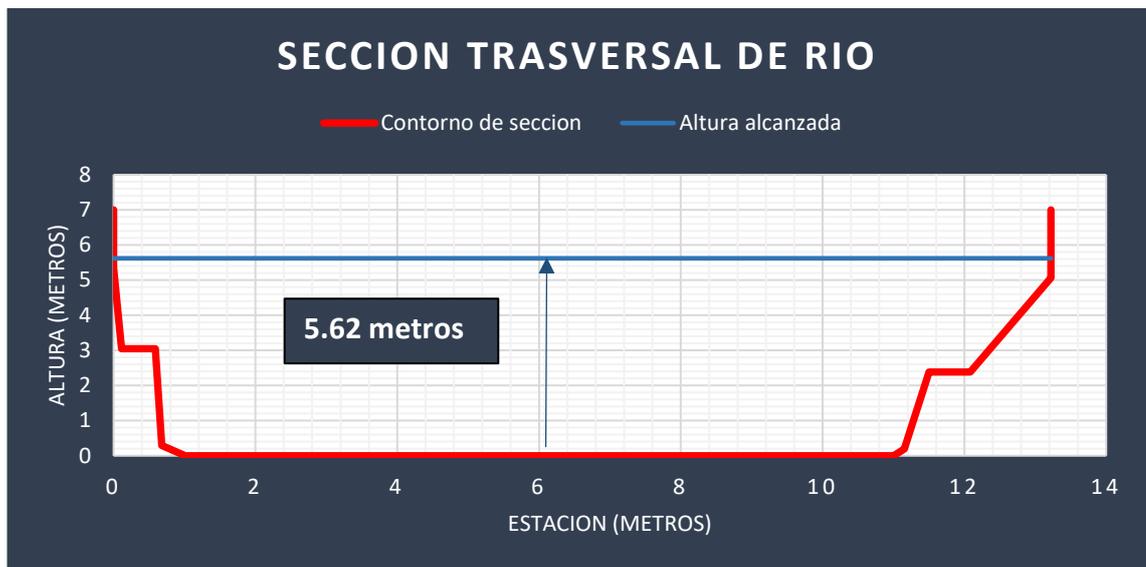
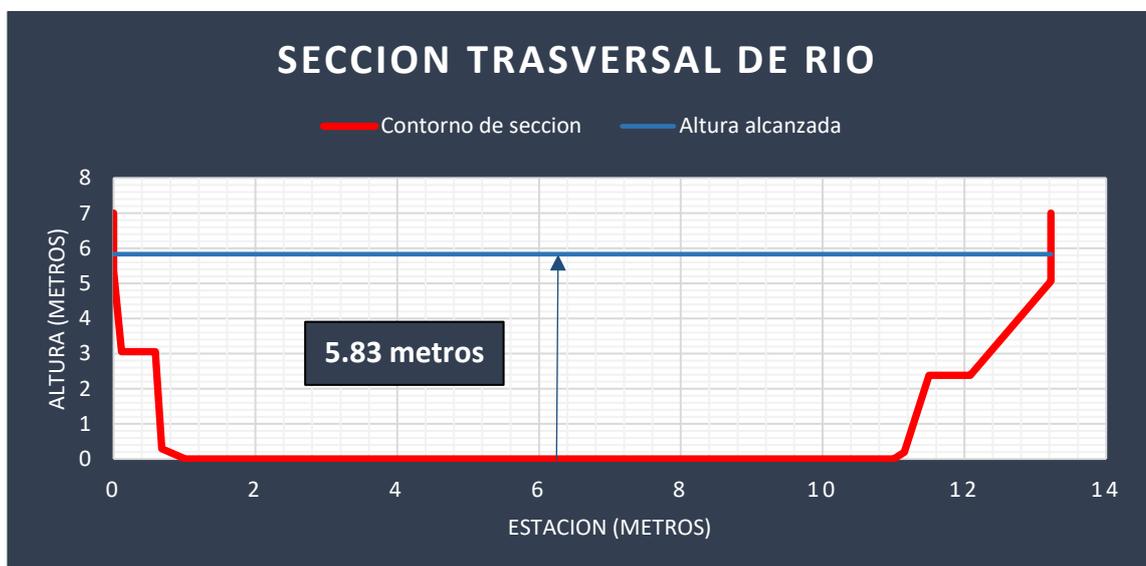


Ilustración 5-20: Resultado de modelación HEC RAS para escenario de impermeabilidad actual en la subcuenca 1. Fuente: Elaboración propia.



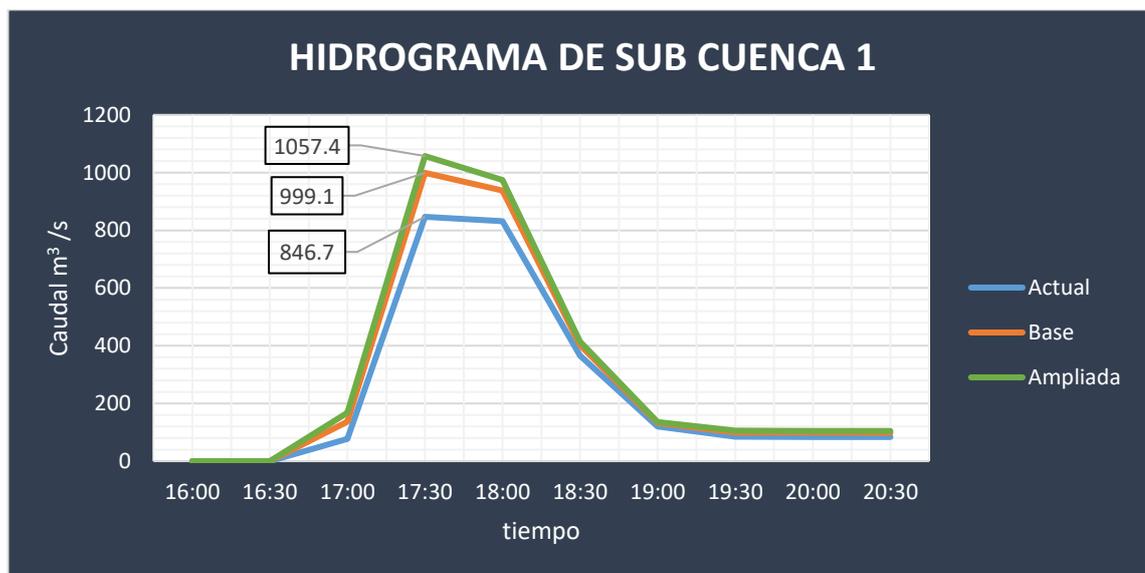
**Ilustración 5-21: Resultado de modelación HEC-RAS para escenario de impermeabilidad Base en la subcuenca 1. Fuente: Elaboración propia.**



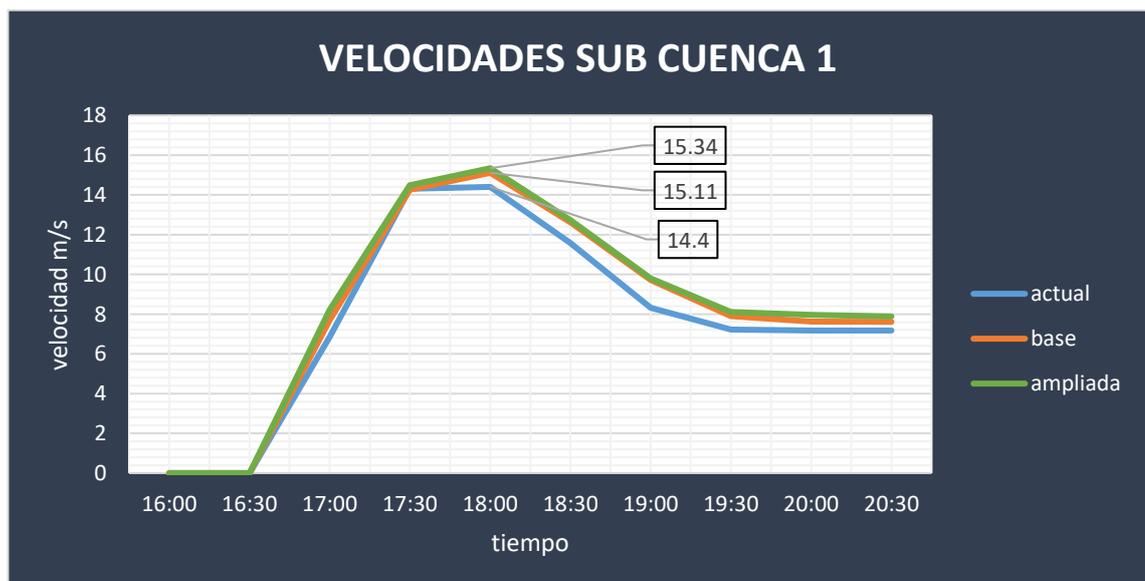
**Ilustración 5-22: Resultado de modelación HEC-RAS para escenario de impermeabilidad ampliada en la subcuenca 1. Fuente: Elaboración propia.**

Además, se puede observar con mayor detalle el comportamiento de la tormenta en el punto de análisis a través del hidrograma que brinda el

programa HEC HMS y haciendo una intercepción de curvas de hidrogramas para los diferentes escenarios de impermeabilización se puede tener un mejor panorama del impacto generado por la tendencia de crecimiento de área urbana en la subcuenca 1 (Ilustración 5-23).



**Ilustración 5-23: Hidrograma de subcuenca 1 para tres escenarios de análisis, Actual Base y Ampliado. Fuente: Elaboración propia.**

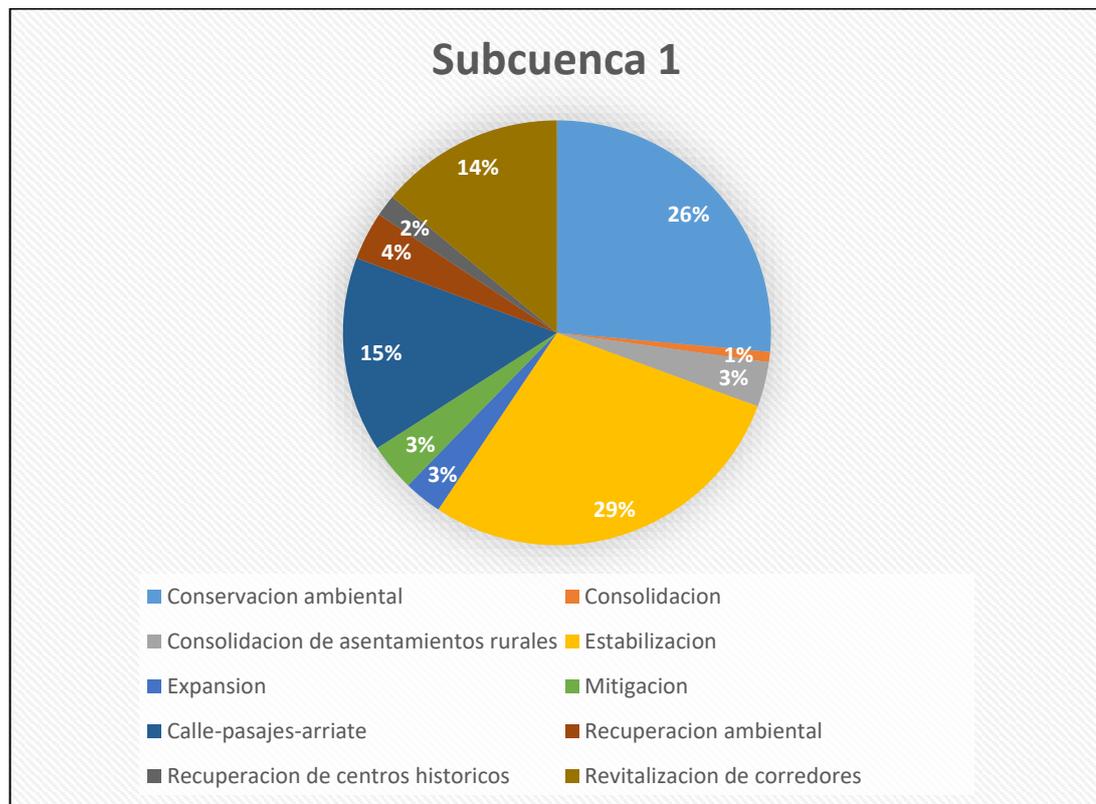


**Ilustración 5-24: Grafica de velocidades en subcuenca 1. Fuente: Elaboración propia.**

Como puede observarse, la tormenta evaluada genera un caudal pico en todos los escenarios de impermeabilización, modelados de la misma manera, presentando una tendencia similar en su comportamiento a lo largo de la duración en el tiempo; se debe de notar que existe un incremento escalonado del caudal en cada uno de los escenarios de impermeabilización evaluados; siendo el de menor caudal el escenario Actual, y el de mayor caudal el escenario de impermeabilización Ampliada; además, se visualiza que hay un incremento mayor entre el hidrograma Actual y el hidrograma Base (15.25%), a comparación del incremento que existe entre el hidrograma Base y Ampliado (5.51%).

<b>SUB CUENCA 1</b>			
<b>TRATAMIENTO URBANÍSTICOS</b>	<b>IMPERMEABILIZACIONES BASE - AMPLIADA</b>	<b>ÁREA (km<sup>2</sup>)</b>	<b>PORCENTAJE DE ÁREA (%)</b>
<b>Conservación ambiental</b>	0-0	14.26	26.44
<b>Consolidación</b>	25-50	0.42	0.78
<b>Consolidación de asentamientos rurales</b>	25-50	1.84	3.41
<b>Estabilización</b>	70-80	15.49	28.72
<b>Expansión</b>	25-50	1.56	2.89
<b>Mitigación</b>	70-80	1.95	3.62
<b>Calle-pasajes-arriate</b>	100-100	8.01	14.85
<b>Recuperación ambiental</b>	25-50	1.98	3.67
<b>Recuperación de centros históricos</b>	70-80	0.89	1.65
<b>Revitalización de corredores</b>	90-100	7.53	13.96
<b>Total</b>		<b>53.93</b>	<b>100</b>

**Tabla 5-13: Porcentajes de área de los tratamientos urbanísticos en la subcuenca 7.**  
Fuente: Elaboración propia.



**Ilustración 5-25: Representación de los porcentajes de áreas de tratamiento urbanístico de subcuenca 1. Fuente: Elaboración propia.**

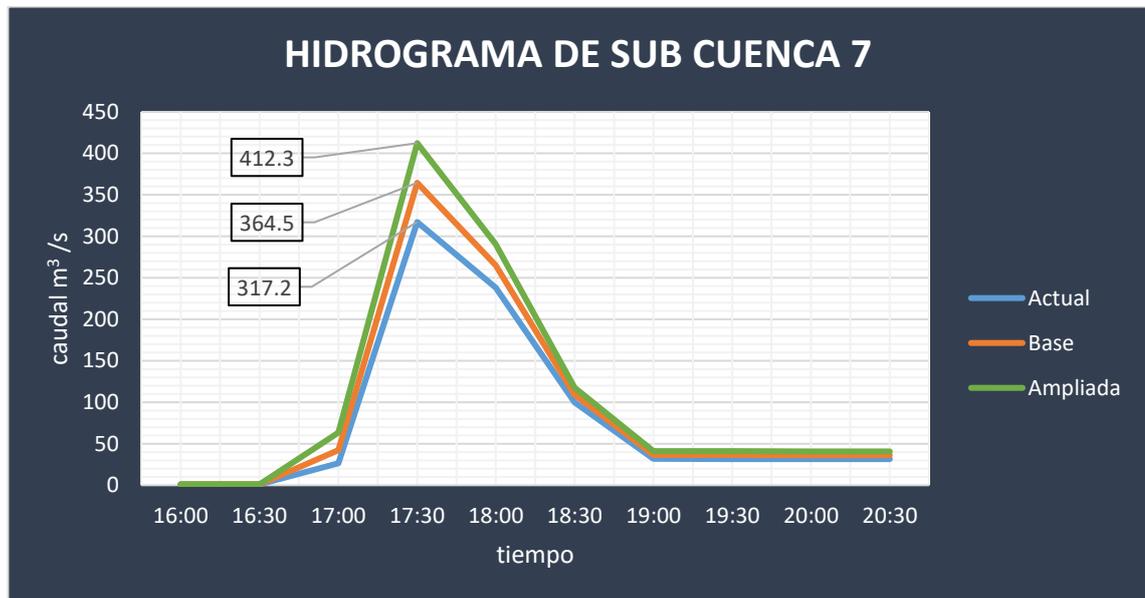
Como puede verse en la Ilustración 5-25, un total del 47% del área de la **subcuenca 1**, tiene una impermeabilización base mayor al 70%, indicando una fuerte impermeabilización en este escenario en particular, con respecto a la situación existente (escenario Actual) por su parte, en el escenario Ampliado se puede notar en la Tabla 5.13, que la implementación de los valores de impermeabilización correspondientes, provoca un aumento de un 10% de impermeabilidad en el terreno, con respecto a los valores de impermeabilización del escenario Base.

Otro punto importante de analizar es la **subcuenca 7**, cuyo valor de CN es 81.45 y un área de escurrimiento de **22.49 km<sup>2</sup>**, siendo evidentemente menor que la **sub cuenca 1** en cuanto a CN y área. Esta zona de la cuenca se caracteriza por ser áreas con predominante suelo natural o no urbanizado, evidenciándose en el valor de número de curva de la subcuenca. El análisis de este punto tiene por objetivo conocer el comportamiento de la esorrentía pluvial en esta zona con mayor área natural y además determinar el impacto generado al cambiar estado inicial de impermeabilización en la subcuencas.

Los resultados obtenidos muestran que el caudal generado para la tormenta simulada en la **subcuenca 7** es **de 317.2 m<sup>3</sup>/s** para condiciones Actuales; este resultado es comparado con valores de impermeabilización futuros de la zona de la cuenca del río Acelhuate, observando que la tendencia de crecimiento del caudal al aumentar los valores de numero de curva se mantiene, como se puede observar en la Tabla 5.14:

SUB CUENCA 7	
ESCENARIO	CAUDAL (m <sup>3</sup> /s)
Actual	317.2
Base	364.5
Ampliado	412.3

**Tabla 5-14: Caudales resultantes en la subcuenca 7. Fuente: Elaboración propia.**



**Ilustración 5-26: Hidrograma de subcuenca 7 para tres escenarios de análisis, Actual Base y Ampliado. Fuente: elaboración propia.**

Se observa en la ilustración 5-26 que al igual que en el punto de interés anterior, se mantiene una tendencia similar en la forma acampanada del hidrograma, mostrando caudales picos máximos en todos los casos. Además, se mantiene un comportamiento creciente en los valores de caudales de los hidrogramas según se cambie a un escenario con mayor impermeabilidad de suelo.

En el análisis de la **subcuenca 7**, se presenta la limitante de no contar con las secciones transversales del río de ese punto por lo que la velocidad de fluido y la altura de agua no han sido posible establecerlas. En los hidrogramas presentados en la gráfica anterior se registra un incremento de caudal de 12.97% entre los escenarios **Actual** y **Base**; y un incremento de 11.59% entre los escenarios **Base** y **Ampliado**.

SUB CUENCA 7			
Tratamiento Urbanísticos	Impermeabilizaciones Base - Ampliada	Área (km <sup>2</sup> )	Porcentaje de área (%)
Conservación ambiental	0-0	8.58	38.72
Consolidación	25-50	0.29	1.31
Consolidación de asentamientos rurales	25-50	0.65	2.93
Desarrollo agropecuario	0-0	0.21	0.95
Estabilización	70-80	1.32	5.96
Expansión	25-50	9.81	44.27
Calle-pasajes-arriate	100-100	1.04	4.69
Recuperación ambiental	25-50	0.09	0.41
Revitalización de corredores	90-100	0.17	0.77
<b>Total</b>		<b>22.16</b>	<b>100</b>

Tabla 5-15: Porcentajes de área de los tratamientos urbanísticos en la subcuenca 7.  
Fuente: Elaboración propia.

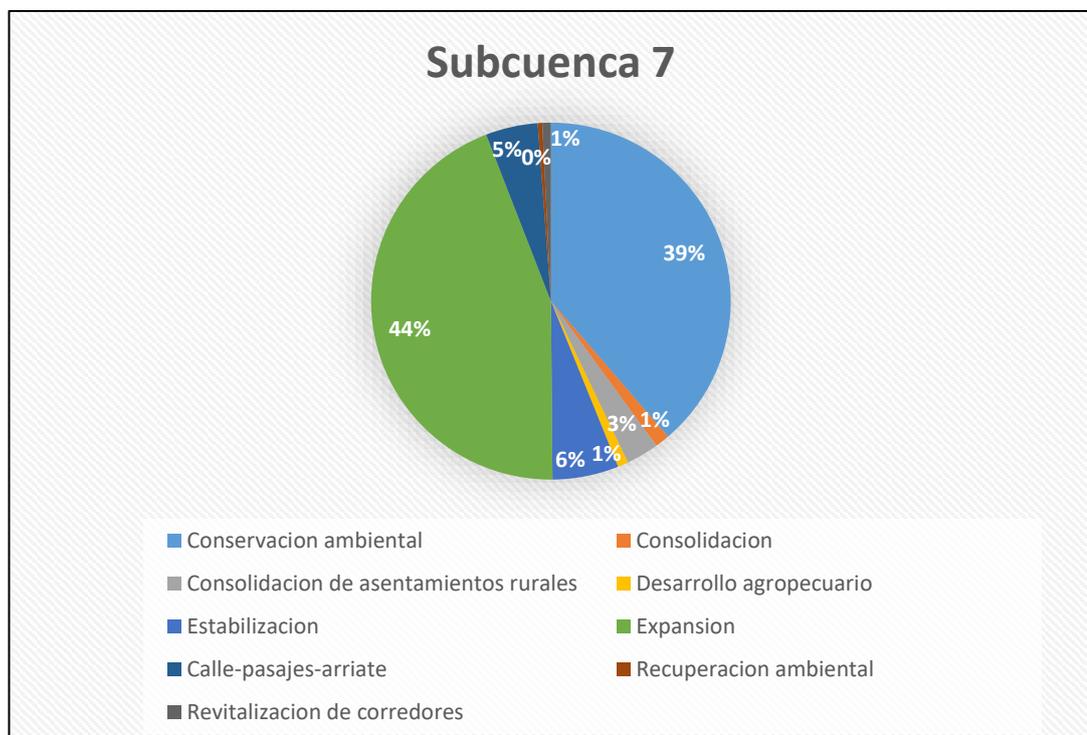


Ilustración 5-27: Representación de los porcentajes de áreas de tratamiento urbanístico de la sub cuenca 7. Fuente: Elaboración propia.

Además, en esta **subcuenca 7** hay un mayor impacto generado por el incremento de impermeabilización **Actual-Ampliada**, siendo este incremento del 23.06%, mientras que en la **sub cuenca 1** solo es del 18%. Evidenciando un mayor incremento de caudal en aquellas subcuencas menos urbanizadas al ser intervenidas incrementándole la resistencia a la infiltración de agua pluvial, que aquellas ya plenamente urbanizadas.

Finalmente, se analiza el punto de salida de la cuenca Acelhuate representada con un elemento **Sink** en el esquema, siendo a la vez el **punto de salida** de la **subcuenca 10 (SBC 10)** ubicada 1 kilómetro aguas debajo de la Urbanización Valle Del Sol, municipio de Apopa; se escogió este punto ya que interesa saber el caudal generado por la tormenta y la altura alcanzada en la sección del tramo del río generado a causa del total de escorrentía de la cuenca en análisis.

El área se caracteriza por una zona poco urbanizada con escasa población rural a sus alrededores, en su mayoría son parcelas con vegetación media-alta, pasto y zonas de cultivo. Los cauces de los ríos son naturales y de amplias secciones transversales. En este punto se espera que pase el total acumulado de la escorrentía ocurrida aguas arriba de la cuenca, ya considerando las pérdidas de volumen de agua pluvial por infiltración hacia las aguas de las capas subterráneas. Los resultados obtenidos indican un caudal en el punto de salida de la cuenca Acelhuate es de **2,124.5 m<sup>3</sup>/s**; además la altura agua alcanzada en una sección trasversal del río Acelhuate

en el punto de salida es de **6.35 metros** para un escenario de impermeabilización Actual.

PUNTO DE SALIDA			
ESCENARIO	CAUDAL (m <sup>3</sup> /s)	ALTURA (m)	VELOCIDAD (m/s)
<b>Actual</b>	2,124.5	6.35	10.63
<b>Base</b>	2,370.9	6.65	11.07
<b>Ampliada</b>	2,568.8	6.88	11.41

**Tabla 5-16: Resultados del análisis en los tres escenarios en subcuenca 1. Fuente: Elaboración propia.**



**Ilustración 5-28: Resultado de modelación HEC RAS para escenario de impermeabilidad Actual en la salida de la cuenca. Fuente: Elaboración propia.**

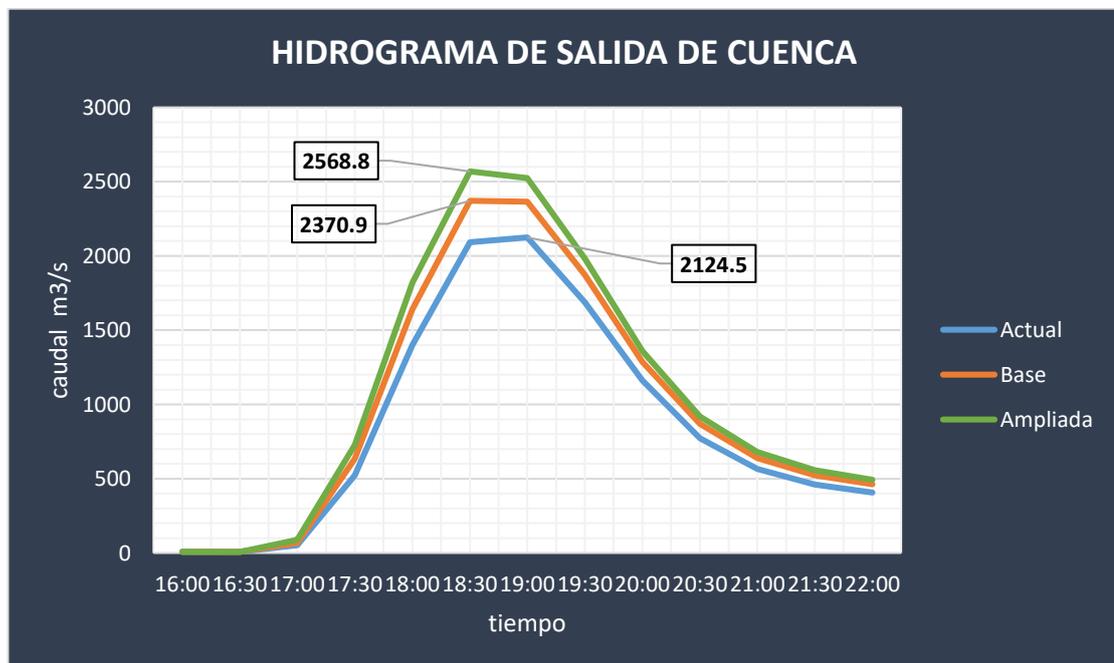


**Ilustración 5-29:** Resultado de modelación HEC RAS para escenario de impermeabilidad Base en la salida de la cuenca. Fuente: Elaboración propia.

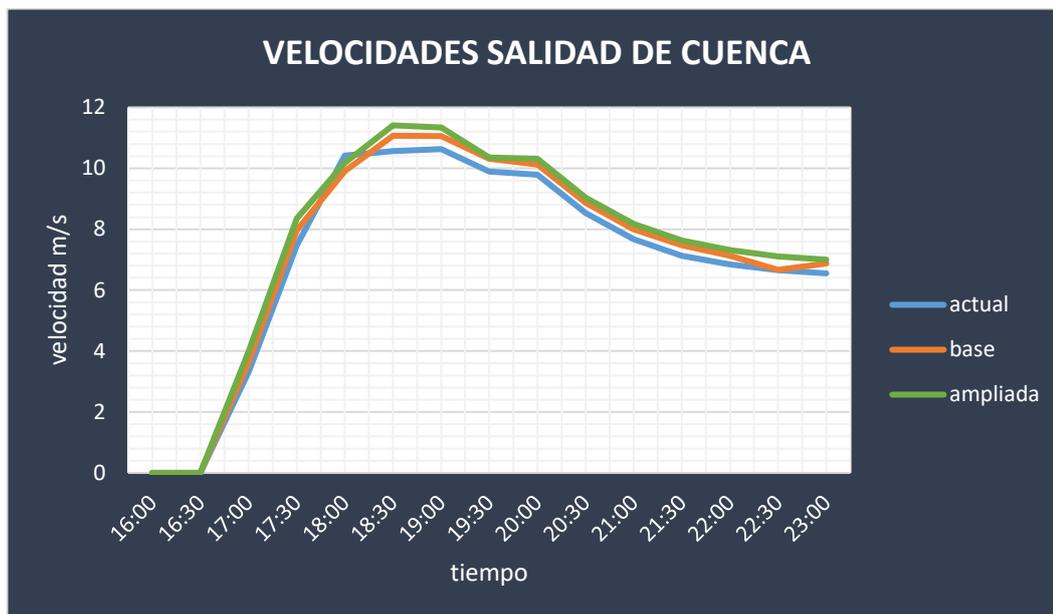


**Ilustración 5-30:** Resultado de modelación HEC RAS para escenario de impermeabilidad Ampliada en la salida de la cuenca. Fuente: Elaboración propia.

En los resultados de los caudales de la tabla 5.16 se puede observar que en la transición entre un estado de impermeabilización Actual y uno Base, el aumento de caudal es de 10.39%, mientras que en la transición Base-Ampliada es de 7.70%, siendo por lo tanto ligeramente más significativo el incremento de caudal aplicando los tratamientos urbanísticos para un escenario de permeabilidad Base y por esta causa los impactos hidrológicos en general en la cuenca serán también ligeramente de mayor importancia al querer establecer en toda el área un plan de desarrollo urbanístico bajo el régimen de impermeabilización Base, pero además se debe de tomar en cuenta que la impermeabilización ampliada también genera impactos hidrológicos que deben de tratarse para evitar efectos perjudiciales en la zona.



**Ilustración 5-31: Hidrograma de análisis para punto de salida para tres escenarios de análisis, Actual. Base y Ampliado. Fuente: Elaboración propia.**



**Ilustración 5-32: Grafica de velocidades en punto de salida de la cuenca. Fuente: Elaboración propia.**

### 5.10 ANÁLISIS DE RESULTADOS

La impermeabilización del suelo de la cuenca del rio Acelhuate está reglamentada en los lineamientos de permeabilidad indicada en el Esquema Director para el Área Metropolitana de San Salvador siendo además los resultados obtenidos basados en información del año 2016 en el cual fue vigente la Normativa del Esquema Director.

Los efectos según los porcentajes de impermeabilidad dados por la Normativa del Esquema director y las áreas que estarán sometidas a estos porcentajes son los siguientes:

Porcentaje de Imp.	Tratamiento urbanístico	Área	Total	Porcentaje de área	Porcentaje de Imp.> 0%	Porcentaje de Imp.> 50%
0-0	Conservación ambiental	92.2	117.26	42.5		
	Desarrollo agropecuario	25.06				
25-50	Consolidación	14.99	57.22	20.75	20.75	
	Consolidación de asentamientos rurales	8.61				
	Recuperación ambiental	14.28				
70-80	Expansión	19.34	54.21	19.65	19.65	19.65
	Estabilización	44.22				
	Mitigación	6.27				
90-100	Recuperación de centros históricos	3.72	17.79	6.45	6.45	6.45
	Revitalización en corredores	17.79				
100-100	Calle-pasaje-arriate-ríos	29.32	29.32	10.63	10.63	10.63
<b>Total</b>		<b>275.82</b>		<b>100.0</b>	<b>57.48</b>	<b>36.73</b>

**Tabla 5-17: Porcentajes de impermeabilización de toda la cuenca. Fuente: Elaboración propia.**

Teniendo presente los incrementos de caudal y velocidad ya antes expuestos, se puede analizar que el **57.5%** del área de la cuenca tendrá variaciones en el porcentaje de impermeabilidad, siendo las áreas más preocupantes las que tienen un porcentaje de impermeabilización arriba del 50%, que en total suman **101.32 km<sup>2</sup>**, es decir un 26.1 % del área (no incluyendo calles, ríos o arriates).

Los cambios que se muestran en los resultados obtenidos **no son iguales en todas las subcuencas**, sin embargo, todas generarán grandes volúmenes de escorrentía que serán afluentes a la cuenca. Por ejemplo, las subcuencas ubicadas en aquellas zonas que conforman la Área Metropolitana de San salvador y las grandes ciudades aguas arriba en la cuenca, al ser sometidas

a un cambio de permeabilidad provocaría que el uso de suelo en la zona cambie a impermeabilidad de más del 70%, mientras que otras zonas menos urbanizadas la impermeabilización es menor

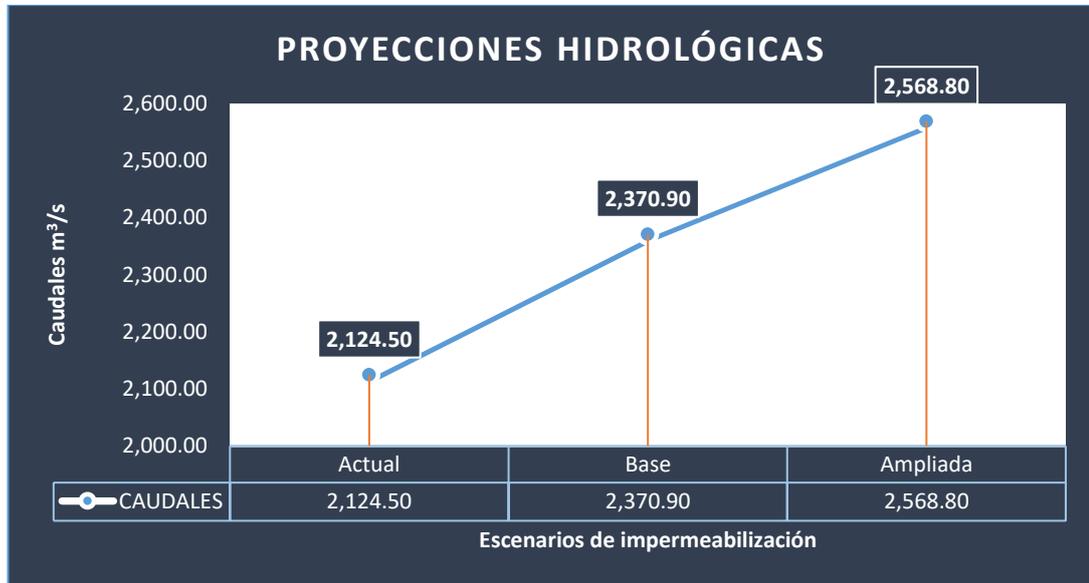
Los impactos hidrológicos más evidentes se verán aguas abajo en la cuenca, ya que son áreas con mayores zonas naturales, en donde, la alteración de la permeabilidad, como ya se mostró, generará un aumento de caudal.

El análisis anterior se realizó tomando en cuenta que el área de conservación ambiental se mantendría intacta y constante a lo largo del proceso de impermeabilización, esto significa que el **42.5%** del área total de la cuenca no estará sometida a ninguna variación de impermeabilidad; estas zonas en donde el Esquema Director no considera cambios en la impermeabilización vuelve el análisis reservado en sus resultados, debido a que a medida que la demanda de espacio urbano aumente y el surgimiento de nuevas zonas rurales crezca, se podría considerar cambiar la clasificación de estas zonas y convertirse en áreas urbanizables lo que no se recomienda en ninguno de los casos ya que este cambio ocasionaría que la permeabilidad de las subcuencas aumente y que un estado de impermeabilización ampliada impacte de manera más significativa en el incremento de caudales por lo que el análisis debe repetirse con información actualizada.

### ***Resultado hidrológico.***

Según las modelaciones de las proyecciones hidrológicas en base a los cambios en la permeabilidad de la cuenca del Rio Acelhuate, se obtienen los

caudales máximos que la cuenca tendrá como respuesta en los tres escenarios analizados, los cuales se pueden apreciar en la ilustración 5-33:



**Ilustración 5-33: Representación de los cambios en caudal en los diferentes escenarios de impermeabilización. Fuente, Elaboración propia.**

**Escenario Actual:** La respuesta para las condiciones actuales muestran un caudal de **2,124.50m<sup>3</sup>/s**, en estas condiciones la cuenca se demuestra que la cuenca ya presenta problemas con la cantidad de agua que vierten sus afluentes y por la velocidad de las mismas, esto sin tomar en cuenta que a la fecha, la cuenca puede presentar cambios en las condiciones actuales en su impermeabilización debido a asentamientos urbanos no censados y construcciones aledañas que se han efectuado sin el permiso permanente además de asentamientos rurales dentro de las zonas destinadas a conservación ambiental.

**Escenario Base:** Resultado de la aplicación de un porcentaje de cambio en la impermeabilización de la condición Actual a una impermeabilización Base, se obtiene un aumento en el caudal de **246.4m<sup>3</sup>/s** respecto a los resultados del escenario Actual, lo que representa que las problemáticas ya existentes en las zonas media y baja de la cuenca se agudizarán. Al aplicar este porcentaje de impermeabilización también tendrá cambio de velocidad que incrementará de **10.63 m/s a 11.07 m/s**, una crecida con este caudal y esta velocidad, vendrá acompañada de arrastre de grandes objetos entre estas ramas, arboles, rocas, desechos sólidos, desprendimiento de tierra etc., impactará de manera directa a las estructuras existentes y pondrá en peligro su ya desgastado funcionamiento.

**Escenario Ampliado:** En esta proyección se ha considerado zonas donde la impermeabilización alcanza hasta el 100% y otras zonas que representaban áreas permeables serán afectadas aplicándose un porcentaje de impermeabilidad, los resultados obtenidos muestran un aumento en **444.30m<sup>3</sup>/s** a partir de las condiciones actuales; indicando que la capacidad hidráulica de la cuenca en puntos donde ya se tienen problemas de desbordamiento, agravará aún más los problemas inminentes de inundaciones, que podrían abarcar mayor extensión en la zona dependiendo de la topografía del lugar y al determinar la velocidad de flujo en el punto (11.41 m/s), se evidencia que aumenta con respecto al escenario actual, exponiendo a que las zonas de riesgo mayormente afectadas con respecto a escenarios anteriores, se vuelvan zonas potenciales de riesgo.

Aunque uno de los lineamientos de la Normativa busca proteger zonas consideradas de alto valor ambiental dando un porcentaje de impermeabilidad de 0%, las acciones generadas en aquellas áreas que están urbanizadas provocan un efecto en el caudal futuro que generaran eventos de inundaciones a zonas colindantes a ríos y quebradas, de tal manera que las zonas en riesgo de inundación, desbordamiento, socavación, pueden aumentar de forma crítica.

***Resultados Hidráulicos:***

Para este apartado se tomaron dos puntos de análisis, uno corresponde a la zona de La Málaga, que es una de las más afectadas debido a los eventos de desbordamiento del río en eventos lluviosos pasados, es un punto donde se tiene información topográfica actualizada; por lo que, se pueden comparar los resultados de alturas máximas, con las alturas que corresponden a la sección del canal, que en el análisis es llamada como Sub Cuenca 1.

<b>ESCENARIO</b>	<b>ALTURA (m)</b>	<b>VELOCIDAD (m/s)</b>
<b>Actual</b>	5.06	14.44
<b>Base</b>	5.62	15.11
<b>Ampliada</b>	5.83	15.34

**Tabla 5-18: resultados de subcuenca 1, correspondiente a la zona de la Colonia La Málaga. Fuente, Elaboración propia.**

El análisis hidráulico en la sección transversal de esta subcuenca, muestra que para un escenario de impermeabilización Actual el valor máximo de la altura alcanzada por las aguas pluviales modeladas es de **5.06 metros** sobre el punto más bajo de la sección, este dato indica que la capacidad máxima de la sección está cerca del límite y que corre el riesgo de producirse inundaciones, ya que la altura máxima de la sección del rio canal en ese punto es de es **5.35 metros**.

La altura alcanzada para los escenarios Base y Ampliada alcanzan los **5.62 metros** y **5.83 metros** respectivamente, indicando que para estos estados de impermeabilización la sección hidráulica no es suficiente para soportar la caudal punta de una tormenta de una duración de 2 horas y un Periodo de retorno de 50 años y que en el punto crítico del evento lluvioso las zonas más desfavorables se verán afectadas. No obstante y según la investigación en esta zona, se ha construido un muro de mampostería de 1 metro de altura, lo cual no es suficiente, ya que la carga hidráulica excedente afectara zonas propensas a desbordamientos e inundación.

La altura que alcanzará la crecida del cauce vendrá acompañada de un comportamiento turbulento de las aguas además de arrastre de materiales con lo que impactará lo que encuentre a su paso.

El segundo punto analizado corresponde al **punto de salida de la cuenca**, para analizar el punto de drenaje de la cuenca, se toma en cuenta que la sección del canal es natural por lo que la altura en este punto puede variar.

ESCENARIO	ALTURA (M)	VELOCIDAD (m/s)
Actual	6.35	10.63
Base	6.65	11.07
Ampliada	6.88	11.41

**Tabla 5-19: Resultados del punto de salida de la cuenca. Fuente, Elaboración propia**

En este punto se espera que pase el total acumulado de escorrentía ocurrida aguas arriba de la cuenca, ya considerando las pérdidas de volumen de agua pluvial por infiltración hacia las aguas de las capas subterráneas, sin embargo, debido a que en esta zona se cuenta con secciones naturales la carga excedente minará las paredes de los taludes que conforman el canal hidráulico, por lo que habrán desprendimientos de masa de suelo debido a la socavación, inundaciones en zonas con alturas menores al tirante encontrado en el análisis de este punto, arrastre de vegetación en grandes cantidades y cumulo de desechos provenientes de aguas arriba.

Con el análisis anterior se hacen las consideraciones siguientes:

- En la zona de las sub cuencas con características predominantemente urbanizadas y en donde se tenga grandes planes de expansión de desarrollo económico a través del impulso de la construcción de nuevas residencias habitacionales, centros comerciales, desarrollo en ejes primarios de carreteras, etc. se continúen con la aplicación de obras de control de escorrentía, esto hará reducir o evitar el impacto de futuras

inundaciones, sobre todo en puntos de salida de las sub cuencas en donde el volumen de la escorrentía total es drenado.

- Se considera que lo adecuado, es la aplicación de “Medidas Estructurales”, que consisten en estructuras de retención de volúmenes de material, las cuales se propone desarrollar en las laderas de ríos de zonas urbanas y áreas que están afectadas por constante erosión debido a la lluvia.
- Las causas de la erosión de los suelos en el Área Metropolitana de San Salvador y de acuerdo con las características de los suelos son hundimientos, derrumbes y cárcavas en las zonas urbanas, provocando problemas de conectividad vial y desplazamientos forzados de familias que viven en las cercanías; para estas situaciones se debe de tratar los cauces urbanos, reforzando las paredes de los mismos; asimismo, se pueden realizar estructuras de protección que modifiquen la morfología del cauce, con el objetivo de incrementar su capacidad en áreas urbanas, tales como el ensanchamiento de la sección o aumentar la profundidad del fondo del canal para reducir el impacto resultante para el mismo nivel de descarga.
- Para el desarrollo urbano futuro, es necesario la implementación de sistemas de drenajes sostenibles, los cuales deben enfocarse en el desarrollo de medidas preventivas, como sistemas de infiltración, sistemas de transporte permeable de escorrentía, implementación de drenes, etc., para ello se recomienda la aplicación de alternativas siguientes: SUDS (Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible), BMPs

(Best Management Practices), MPC (Mejores Prácticas de Control), BPAs (Buenas Prácticas Ambientales), TEDUS (Técnicas de Drenaje Urbano Sostenible), LID (Low Impact Development), WSUD (Diseño Urbano Sensible al Agua)

- Aplicar un sistema multicapa que cubre los techos de un edificio o bien una estructura con vegetación sobre una capa drenaje. Este método puede considerarse en el diseño de un edificio y de esa forma tener un método de recolección de agua pluvial; así también, en los techos de viviendas residenciales, lo cual tendrá la misma función.
- Para zonas rurales, se considera que la implementación de Cunetas verdes, los cuales consisten en captación e infiltración del agua lluvia al subsuelo, que podría atenuar el incremento de caudal aguas abajo, cuyas zonas son las más afectadas
- Para los valores de impermeabilización adoptados por el Esquema Director vigente, se considera que, de ser aplicados, se soliciten medidas de atenuación a los efectos hidrológicos que tendrán sobre los drenajes tanto primarios como en secundarios.
- Para zonas industriales y comerciales se necesita incentivar la aplicación de tecnologías verdes que favorezcan el desarrollo sin afcción ambiental, obteniendo certificaciones de desarrollo sostenible, con lo que se garantice la disminución de contaminación ambiental que se impulse
- Metodologías de uso y manejo eficiente del agua, tratamiento y reutilización de las aguas grises, depuración y descontaminación de

aguas negras, almacenamiento de agua pluvial, reforestación, responsabilidad social, reciclaje y reducción de desperdicios con el mejoramiento de sus procesos de producción.

Toda modificación en el porcentaje de impermeabilidad tendrá un impacto no solamente hídrico, sino en el resto del medio ambiente, en el sector económico y también social, por lo que se proponen las consideraciones siguientes:

- El enfoque de los planes de desarrollo debe considerar la sostenibilidad como eje transversal, es por ello que los planes de sensibilización y educación social en el cual se incluyan temas del uso eficiente del agua, manejo de la basura, cultura de limpieza.
- En el país, aunque se han elaborado algunas estrategias como el cierre de botaderos a cielo abierto u otras medidas en beneficio al medio ambiente, a la fecha no cuenta con una gestión adecuada de los residuos sólidos por lo que, implementar una gestión holística de los residuos ayudará en la problemática de contaminación de la cuenca y los drenajes primarios y secundarios.
- Reforzar los planes de reforestación en zonas de recarga hídrica ayudará a alimentar los acuíferos y disminuirán la escorrentía superficial, principalmente en las zonas altas de la cuenca.
- En zonas recreativas y vías de poco tráfico, es adecuada la implementación de pavimentos permeables, los cuales ayudan a la disminución de escorrentía superficial, alimentan el subsuelo (Infiltración) y se pueden usar en zonas muy urbanizadas.

# **CAPITULO 6- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## 6.1 CONCLUSIONES

En el desarrollo de la presente investigación, se muestra que la cuenca del río Acelhuate presenta problemas relacionados con la escorrentía superficial, la continua expansión del desarrollo urbano, la disminución de la cobertura vegetal y boscosa, el incremento del área impermeabilizada y las prácticas de cortes y rellenos en el crecimiento de urbano, han alterado aspectos morfológicos y como consecuencia principal han modificado drásticamente las escorrentía superficial, cuyo incremento aporta volumen en exceso al río Acelhuate, abonado a ello el Cambio Climático producto del calentamiento global, se acentúan con tormentas de mayor intensidad y menor duración.

De los resultados obtenidos en la investigación se puede concluir lo siguiente:

- Al evaluar las condiciones actuales de la cuenca del Río Acelhuate, se confirma que producto del desarrollo desproporcional y desordenado que ha tenido la zona de estudio, ésta se encuentra en un estado crítico de afectación por los fenómenos hidrológicos históricos y actuales, por lo que, al haber un aumento descontrolado en la impermeabilización del suelo, vendrá a abonar a la problemática existente.
- La aplicación de la normativa de impermeabilización descrita en el Esquema Director, afectará negativamente la situación actual en la zona de estudio, sin embargo; debido a su carácter enfocado a la regulación ordenada del desarrollo Metropolitano, podrá implementarse, teniendo presente que según los resultados, ya se

tiene una situación crítica previa, por lo que será necesario, que se apliquen medidas correctivas a las condiciones iniciales, y luego se deberán aplicar medidas de atenuación en cada escenario contemplado en los lineamientos de impermeabilización, teniendo a consideración la limitación de la expansión territorial haciendo apuesta al crecimiento urbano en altura y tomando en cuenta, todas las consideraciones hechas en esta investigación (las expuestas en capítulo 5). De no realizarse previamente medidas correctivas a las condiciones actuales, la zona de estudio seguirá presentando problemas de desbordamiento de ríos, inundaciones, erosión y desprendimiento de taludes etc. Al momento de aplicación de la normativa.

- Al implementar un porcentaje ampliado de impermeabilización, la cuenca tendrá un aumento en el caudal de **444.3 m<sup>3</sup>/s** respecto al caudal con las condiciones actuales, además tendrá una disminución en el tiempo en que ocurre la crecida del cauce por un evento hidrológico y un aumento en la velocidad de flujo del cauce principal, según estos resultados, la cuenca no tendrá la capacidad de respuesta en zonas urbanas donde las secciones hidráulicas están diseñadas para caudales menores, de igual manera en las zonas aledañas al río principal donde topográficamente son llanuras, muchas de ellas tienen asentamientos poblacionales, por lo que, este aumento de flujo y aumento de velocidad tendrán un alto impacto debido a que tendrán una alta capacidad de erosionar los cauces naturales además de un

riesgo inminente por el transporte de grandes volúmenes de materiales aguas abajo.

- 
- El aumento de altura en el tirante hidráulico resultante para un escenario ampliado de impermeabilización, es mayor a los tirantes hidráulicos máximos del cauce del río principal en puntos donde la cuenca presenta problemas críticos de inundación y desbordamiento, por lo que al aplicar estos porcentajes ampliados de impermeabilidad, se requerirá una mayor aplicación de medidas de control de la escorrentía, drenaje sostenibles, obras de mitigación para problemas ya existentes y los que se generen con este aumento de caudal, teniendo presente que según esta investigación, la impermeabilización ampliada representa el escenario más crítico en las proyecciones de impactos hidrológicos de la cuenca.
- Queda demostrado que aumentar la impermeabilización del suelo, afectará directamente a la cuenca, y que, en caso en que no se tomen medidas de control de escorrentía o medidas de mitigación a nivel de toda la cuenca, se comprometerá la seguridad de las zonas de mayor afectación, las cuales corresponden a las zonas bajas de la cuenca y zonas adyacentes a la misma, estas zonas son habitadas por comunidades de bajos recursos o predominantemente rural y que su expansión urbana no se ve reflejada en la mancha de crecimiento urbano de la cuenca, por lo que se debe buscar métodos de censo y control de esta población para que sean parte del análisis de la

problemática de la cuenca, además de generar información actualizada del AMSS con los que se pueda realizar un análisis más exacto.

- La variación de caudal debido al cambio en el porcentaje de impermeabilidad en el AMSS no será uniforme en todos los sectores, su variación dependerá directamente del grado de urbanismo que tenga cada sub cuenca analizada; con base a los resultados obtenidos se demuestra que en aquellas sub cuencas con mayor extensión urbana sufren de un aumento mayor de caudal en comparación de las que presentan mayor área natural y esto depende también del escenario de impermeabilización tratado.
- Mantener las áreas de conservación ambiental sin impermeabilizaciones, ni cambios en su uso del suelo, principalmente porque representan los sectores que brindan un equilibrio en la cuenca urbana, y promueven ambientaciones, manejo de agua superficial y subsuperficial de forma natural.

## 6.2 RECOMENDACIONES

En esta investigación se analizaron las proyecciones de impermeabilidad basadas en el Plan de Ordenamiento Territorial Vigente Esquema Director del COAMSS-OPAMSS, y dichas proyecciones se trabajaron en 3 escenarios hidrológicos diferentes, y de esta experiencia se detallan a continuación las siguientes recomendaciones:

- La obtención de los resultados fueron producto de toda la base de datos que se formó con la información que brindaron las instituciones que apoyaron la presente investigación; los cuales fueron de vital importancia para su desarrollo. En el caso de los registros de lluvia, mediciones topográficas de secciones transversales de ríos y mediciones constantes del nivel de agua, alcanzado durante la precipitación en algunos puntos del área de análisis, como por ejemplo el punto de salida de la cuenca; fueron limitantes para un desarrollo ideal del trabajo, ya que todavía no se cuenta con monitoreos constantes de las estaciones meteorológicas en diversos puntos del Area Metropolitana de San Salvador y alrededores, por lo que, se remarca la importancia se recomienda fortalecer la red de medición de precipitaciones y además, mejorar la obtención de datos de aforo de ríos, para poder disponer de una red de datos actualizada y veraz, ya que, como se vio en esta investigación no se pudieron contar con datos de aforos de tormentas por lo que se requirió optar por otros métodos teóricos para obtenerlos.

- Para la obtención de datos de usos de suelos, geología, expansión urbana entre otros, fueron proporcionados por la OPAMSS para uso exclusivo de la investigación, por lo que, se recomienda aumentar información digital disponible y adquirible para próximas investigaciones, de esta manera será más fácil la obtención de datos.
- Debido a que la investigación fue realizada con información con la que se desarrolló la Normativa (año 2016), se recomienda, para futuras investigaciones académicas, realizar las proyecciones con información actual para conocer la situación real a la fecha de la cuenca del Rio Acelhuate, tomando en cuenta los resultados obtenidos en esta investigación.
- En esta investigación se tomó como área de análisis la cuenca del Rio Acelhuate en su parte media y alta, por lo que se recomienda hacer el análisis correspondiente de la parte baja de la cuenca y así tener una investigación y caracterización más completa para toda la cuenca, ofreciendo más insumos técnicos sobre la topografía de la cuenca y ríos, uso de suelos, tipos de suelo, información del sistema de drenaje, etc. A futuros trabajos e investigaciones para tener un análisis más amplio de la situación del AMSS y poder evaluar los fenómenos ocurridos en la cuenca del Rio Acelhuate de manera más precisa
- No se cuenta con datos de aforo de caudales en ciertos puntos de la zona de estudio, de los que podemos mencionar el punto de salida del área de la cuenca bajo análisis ubicado aguas arriba del municipio de Aguilares al Norte del departamento de San Salvador. Dichas

mediciones de caudales nos darían referencias más exactas de los datos obtenidos, por lo que se recomienda un monitoreo y medición constante de estos, de tal manera que se pueda obtener más fácilmente a través de las instituciones encargadas.

- Los programas que utilizados en la investigación son QGis, HEC-HMS y HEC-RAS, los cuales son de adquisición libre y de gran utilidad en el análisis hidráulico e hidrológico de las cuencas; sin embargo, la poca información disponible para implementar el uso de estos softwares, conlleva tiempo extra de aprendizaje para su correspondiente uso, por lo que se recomienda la creación de guías para la elaboración de análisis de cuencas adaptadas a las características propias del país y se alienta a los lectores a aprender de manera personal el uso de ellos y a una futura investigación el uso de estos, para el análisis tomando como referencias las aportaciones hechas en este documento.

## **SIGLAS**

AAE: Áreas Abiertas Exteriores

AAU: Áreas Abiertas Urbanas

AC: Área de Conservación

AE: Área Ecológica

AMSS: Área Metropolitana de San Salvador

ANP: Área Natural Protegida

CMNUCC: Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático

COAMSS: Consejo de Alcaldes del Área Metropolitana de San Salvador

CPM: Centro de Pronóstico Meteorológico

DIGESTYC: Dirección General de Estadística y Censos de El Salvador

EHPM: Encuesta de Hogares de Propósitos Múltiples

FUNDAUNGO: Fundación Dr. Guillermo Manuel Ungo

GRASS: Geographic Resources Analysis Support System

HEC-HMS: Hydrologic Engineering Center - The Hydrologic Modeling System

HEC-RAS: Hydrologic Engineering Center - River Analysis System

MARN: Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales

OMM: Organización Mundial de Meteorología

OPAMSS: Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador

PNODT: Plan Nacional de Ordenamiento y Desarrollo Territorial

QGIS: Quantum Geographical Information System

S.C.S.: Servicio de conservación de Suelos

SNET: Servicio Nacional de Estudios Territoriales

UCA: Universidad Centroamericana José Simeón Cañas

UNESCO: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization

ZPR: Zona de Protección de Río

## ABREVIATURAS

A.D.: Anno Domini

CN: Numero de curva

CO<sub>2</sub>: Dióxido de carbono

DC.: Después de Cristo

Dpto.: Departamento

Em: Elevación media

GEI: Gases de efecto invernadero

HAB: Habitante

Imp: Impermeabilización

Lc: Longitud de cauce

m.s.n.m.: Metro sobre el nivel del mar

Pág.: Página

PIS: Porcentaje de Impermeabilización del Suelo

S.f.: Sin fecha

S.S.: san salvador

SBC.: Sub cuenca

Tlag.: Tiempo de retardo

U.S.: Estados Unidos

$\Delta P$ : Intervalo de Precipitación

## UNIDADES DE MEDIDA

°C: Grados Celsius

cm: Centímetro

Hr: Horas

Km/km<sup>2</sup>: kilometro por kilómetro cuadrado

km: Kilometro

km<sup>2</sup>/ km<sup>2</sup>: Kilometro por kilometro

km<sup>2</sup>: Kilómetro cuadrado

Kms: kilómetros

m/m: metro por metro

m/s: metro por segundo

m: Metro

m<sup>3</sup>/s: metro cubico por segundo

m<sup>3</sup>: Metro cubico

Min: Minutos

mm/min: milímetro por minuto

mm: Milímetro

## BIBLIOGRAFÍA

- Análisis del nivel de contaminación de las aguas del río Acelhuate en el tramo zoológico-río arenal Monserrat y propuesta de un sistema de tratamiento. Gloria Oriana Pavlova Claros Ramírez nidia Guadalupe Menjívar Alfaro. Año 2010.
- Análisis Morfométrico de la cuenca y de la red de drenaje del Río Zadorra y sus afluentes aplicados a la peligrosidad de crecidas. Matauco A. (2004).
- Balance hídrico integrado y dinámico de El Salvador Documentos Técnicos del PHI-LAC, N°2. UNESCO, 2006.
- Cálculo de la precipitación neta mediante el método S.C.S. dpto. Geología Salamanca España f. Javier. (S.F).
- Caracterización de las condiciones meteorológicas en El Salvador. Luis García, Ricardo Zimmermann, Lorena soriano, Carlos Pérez, Pablo Ayala (1998) [climate\\_data.org](http://climate_data.org): san salvador.
- Causas y efectos del Cambio Climático generados por el sistema de producción industrial actual; los esfuerzos de la comunidad internacional para contrarrestarlo y los compromisos adquiridos por los países desarrollados como los principales contaminadores, periodo 1990-2007, Artiga S. & Menjívar A. & Aquino K., 2010, Ciudad Universitaria, San Salvador, El Salvador
- Conceptos básicos de Morfometría de Cuencas Hidrográficas, Cardona B. (s.f).

- Correlación y Regresión lineal. Instituto Aragonés de Ciencias de la Salud, C. Laguna, 1ª Edición, (s.f.).
- Curvas de calibración de caudales de las estaciones hidrológicas de la cuenca Coatán a la cuenca madre vieja, correspondiente a la vertiente del pacífico para el periodo 2010-2013, Walfred C. Estrada, 2016.
- Determinación empírica de los parámetros que modelan el tránsito de avenidas, por el método de Muskingum, en zonas de clima mediterráneo de Chile central. Revista Aqua-LAC (2009), 1ª edición.
- Diseño hidráulico de obras complementarias en caminos rurales. SAGARPA (2016), 1º edición.
- El Salvador zona agrícola. Secretaría general, organización de los estados americanos Washington. d. c. (1974)
- Estudio hidrológico e hidrogeológico, área natural protegida, el espino – bosque los pericos. SALVANATURA (2012).
- Escenarios de Riesgos y Amenazas por inundación, cuenca alta del Rio Acelhuate, Arenal Monserrat, Arenal Mejicanos, Arenal Tutunichapa, quebrada El Garrobo, MARN, 2012, 1º Edición.
- Esquema Director del Área Metropolitana de San Salvador, OPAMSS, 2013, Primera Edición.
- Evaluación de daños y pérdidas en el salvador ocasionados por la tormenta tropical Agatha junio 2010. CEPAL. Subsede de México (2011)
- Fundamentos de hidrología de superficie, Aparicio Mijares, 1992, 1ª. Edición

- Gestión Territorial, información relevante al AMSS. OPAMMS 2012
- HEC-HMS. Manual elemental. dpto. Geología. Universidad de Salamanca, España. F. Javier. s. (2014).
- Hidrología Aplicada. A. Bateman (2007). 1a Edición.
- Hidrología para ingenieros, Linsley, Kohler y Paulus, 1977, 2a Edición
- Hidrología aplicada, Ven Te Chow, 1997, Traducción e impresión en Bogotá, Colombia
- Hydrologic modeling system HEC-HMS user's manual. Bill s., mike b., tom b., matt f. & Greg k. (2018).
- Hydrologic modeling system HEC-HMS. J Fleming. (2003).
- Hydrologic Modeling System HEC-HMS, W. Scharffenberger, 2016
- Impactos de cambios de uso de suelo en la escorrentía superficial en la cuenca del Arenal Montserrat en la ciudad de San Salvador en el periodo 1992-2009, Ing. Msc. Adriana María Erazo Chica, 2010, 1ª Edición.
- Insumos técnicos para la modelación probabilística de riesgos de inundaciones en la cuenca del río Sucio utilizando el modelo Capra (Tesis de Pregrado). Benítez M. (2016). Universidad de El Salvador. El Salvador.
- La tormenta e-12 dejó bajo el agua una décima parte de El Salvador. Artículo El Faro (2011)
- Manual de consideraciones técnicas hidrológicas e hidráulicas para estructura vial de Centroamérica, DACGER, (2016).

- Manual de utilización del programa HEC-HMS, Universitat politècnica de Catalunya (2014). 1ª, Edición.
- Mapa geológico 1:100,000, [misión geológica alemana, 1978.
- Material de apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura de hidrología civ-233. Cahuana a. & Yugar w. (2009).
- Método para elaborar curvas de calibración en cauces aluviales, A. Preciado, 1969, 1ª Edición
- Plan Nacional de Ordenamiento Territorial - zonificación ambiental y usos de suelos de la subregión del área metropolitana de San Salvador
- Principios fundamentales de la hidrología superficial. 1ª edición, Agustín b. & Antonio j. (2006).
- Simulación continua para el diseño de drenaje urbano, Romina Aranda Monsalve. (2009), 1a. Edición
- Theoretical geomorphology, Adrian E. Scheidegger (1961), 3ª edición.
- Tormenta Agatha la más extrema del 2010. Artículo MARN (2010)
- “Tragedia en la colonia Málaga”. elsalvador.com, (2008)
- Tránsito de Avenidas, conceptos básicos, F. Javier Sánchez., 2013.
- Utilización del modelo “HEC-HMS” en sistemas de pronósticos hidrológicos y verificación de los datos obtenidos por el modelo CMPORH, en la cuenca del Rio Sucio (Tesis de Pregrado). Universidad de El Salvador. Carrillo C. & Mejía N. (2016).

- Valoración económica del recurso hídrico como un servicio ambiental de las zonas de recarga en la subcuenca del río Acelhuate. Msc. Ricardo Calles (2014)

## ANEXOS

**Anexo 1.** Registro de lluvia de la estación Ilopango correspondiente a la tormenta IDA.

ILOPANGO		
FECHA	HORA	LLUVIA REGISTRADA (mm)
06/11/2009	14:15	0.00
06/11/2009	14:30	0.20
06/11/2009	14:45	0.00
06/11/2009	15:00	0.00
06/11/2009	15:15	0.00
06/11/2009	15:30	0.00
06/11/2009	15:45	0.00
06/11/2009	16:00	0.00
06/11/2009	16:15	0.40
06/11/2009	16:30	1.60
06/11/2009	16:45	2.10
06/11/2009	17:00	1.00
06/11/2009	17:15	0.10
06/11/2009	17:30	0.00
06/11/2009	17:45	0.00
06/11/2009	18:00	0.00
06/11/2009	18:15	0.00
06/11/2009	18:30	0.00
06/11/2009	18:45	0.00
06/11/2009	19:00	0.00
06/11/2009	19:15	0.00
06/11/2009	19:30	0.60
06/11/2009	19:45	0.70
06/11/2009	20:00	2.77
06/11/2009	20:15	1.60
06/11/2009	20:30	0.10
06/11/2009	20:45	0.10
06/11/2009	21:00	0.00
06/11/2009	21:15	0.00
06/11/2009	21:30	0.10

ILOPANGO		
FECHA	HORA	LLUVIA REGISTRADA (mm)
06/11/2009	21:45	1.90
06/11/2009	22:00	1.70
06/11/2009	22:15	0.40
06/11/2009	22:30	0.20
06/11/2009	22:45	0.40
06/11/2009	23:00	0.60
06/11/2009	23:15	0.40
06/11/2009	23:30	0.20
06/11/2009	23:45	0.00
07/11/2009	0:00	0.20
07/11/2009	0:15	0.00
07/11/2009	0:30	0.30
07/11/2009	0:45	0.10
07/11/2009	1:00	0.20
07/11/2009	1:15	0.00
07/11/2009	1:30	0.40
07/11/2009	1:45	1.50
07/11/2009	2:00	3.90
07/11/2009	2:15	1.00
07/11/2009	2:30	0.90
07/11/2009	2:45	2.10
07/11/2009	3:00	1.90
07/11/2009	3:15	2.10
07/11/2009	3:30	5.40
07/11/2009	3:45	2.10
07/11/2009	4:00	3.40
07/11/2009	4:15	2.90
07/11/2009	4:30	2.60
07/11/2009	4:45	4.90
07/11/2009	5:00	0.40

ILOPANGO		
FECHA	HORA	LLUVIA REGISTRADA (mm)
07/11/2009	5:15	0.60
07/11/2009	5:30	0.20
07/11/2009	5:45	0.20
07/11/2009	6:00	0.50
07/11/2009	6:15	0.20
07/11/2009	6:30	0.30
07/11/2009	6:45	0.10
07/11/2009	7:00	0.10
07/11/2009	7:15	1.10
07/11/2009	7:30	3.30
07/11/2009	7:45	1.40
07/11/2009	8:00	0.10
07/11/2009	8:15	0.10
07/11/2009	8:30	0.00
07/11/2009	8:45	0.00
07/11/2009	9:00	0.00
07/11/2009	9:15	0.00
07/11/2009	9:30	0.00
07/11/2009	9:45	0.00
07/11/2009	10:00	0.00
07/11/2009	10:15	0.00
07/11/2009	10:30	0.00
07/11/2009	10:45	0.00
07/11/2009	11:00	0.00
07/11/2009	11:15	0.00
07/11/2009	11:30	0.00
07/11/2009	11:45	0.00
07/11/2009	12:00	0.00
07/11/2009	12:15	0.30
07/11/2009	12:30	0.50
07/11/2009	12:45	0.00
07/11/2009	13:00	0.30
07/11/2009	13:15	0.50
07/11/2009	13:30	0.60
07/11/2009	13:45	0.30
07/11/2009	14:00	0.20

ILOPANGO		
FECHA	HORA	LLUVIA REGISTRADA (mm)
07/11/2009	14:15	0.90
07/11/2009	14:30	1.20
07/11/2009	14:45	0.00
07/11/2009	15:00	0.00
07/11/2009	15:15	0.00
07/11/2009	15:30	0.00
07/11/2009	15:45	0.00
07/11/2009	16:00	0.00
07/11/2009	16:15	0.30
07/11/2009	16:30	0.40
07/11/2009	16:45	0.70
07/11/2009	17:00	0.70
07/11/2009	17:15	0.10
07/11/2009	17:30	0.00
07/11/2009	17:45	0.00
07/11/2009	18:00	0.30
07/11/2009	18:15	0.10
07/11/2009	18:30	1.80
07/11/2009	18:45	2.80
07/11/2009	19:00	5.60
07/11/2009	19:15	2.70
07/11/2009	19:30	3.90
07/11/2009	19:45	3.20
07/11/2009	20:00	4.30
07/11/2009	20:15	0.40
07/11/2009	20:30	0.50
07/11/2009	20:45	0.90
07/11/2009	21:00	7.10
07/11/2009	21:15	7.60
07/11/2009	21:30	6.20
07/11/2009	21:45	13.60
07/11/2009	22:00	22.20
07/11/2009	22:15	17.10
07/11/2009	22:30	20.60
07/11/2009	22:45	16.80
07/11/2009	23:00	28.10

ILOPANGO		
FECHA	HORA	LLUVIA REGISTRADA (mm)
07/11/2009	23:15	14.70
07/11/2009	23:30	13.10
07/11/2009	23:45	10.70
08/11/2009	0:00	7.80
08/11/2009	0:15	2.50
08/11/2009	0:30	0.70
08/11/2009	0:45	2.60
08/11/2009	1:00	9.20
08/11/2009	1:15	9.20
08/11/2009	1:30	5.20
08/11/2009	1:45	3.80
08/11/2009	2:00	1.80

ILOPANGO		
FECHA	HORA	LLUVIA REGISTRADA (mm)
08/11/2009	2:15	1.00
08/11/2009	2:30	0.60
08/11/2009	2:45	0.40
08/11/2009	3:00	0.40
08/11/2009	3:15	0.60
08/11/2009	3:30	0.87
08/11/2009	3:45	0.19
08/11/2009	4:00	0.41
08/11/2009	4:15	0.50
08/11/2009	4:30	0.60
08/11/2009	4:45	0.10
08/11/2009	5:00	0.00

**Anexo 2.** Registro de lluvia de la estación Procafé correspondientes a la tormenta IDA.

PROCAFE		
FECHA	HORA	LLUVIA REGISTRADA (mm)
06/11/2009	14:15	0.20
06/11/2009	14:30	0.00
06/11/2009	14:45	5.20
06/11/2009	15:00	7.00
06/11/2009	15:15	0.80
06/11/2009	15:30	1.00
06/11/2009	15:45	0.20
06/11/2009	16:00	1.20
06/11/2009	16:15	1.20
06/11/2009	16:30	0.30
06/11/2009	16:45	0.10
06/11/2009	17:00	0.60
06/11/2009	17:15	0.50
06/11/2009	17:30	2.60

PROCAFE		
FECHA	HORA	LLUVIA REGISTRADA (mm)
06/11/2009	17:45	1.60
06/11/2009	18:00	2.00
06/11/2009	18:15	0.40
06/11/2009	18:30	0.00
06/11/2009	18:45	0.00
06/11/2009	19:00	0.00
06/11/2009	19:15	0.00
06/11/2009	19:30	0.50
06/11/2009	19:45	0.90
06/11/2009	20:00	2.10
06/11/2009	20:15	0.90
06/11/2009	20:30	1.40
06/11/2009	20:45	0.50
06/11/2009	21:00	0.70

PROCAFE		
FECHA	HORA	LLUVIA REGISTRADA (mm)
06/11/2009	21:15	0.70
06/11/2009	21:30	0.30
06/11/2009	21:45	0.10
06/11/2009	22:00	0.20
06/11/2009	22:15	0.20
06/11/2009	22:30	0.00
06/11/2009	22:45	0.20
06/11/2009	23:00	0.00
06/11/2009	23:15	0.00
06/11/2009	23:30	0.00
06/11/2009	23:45	0.40
07/11/2009	0:00	2.60
07/11/2009	0:15	1.90
07/11/2009	0:30	1.00
07/11/2009	0:45	1.20
07/11/2009	1:00	0.10
07/11/2009	1:15	0.30
07/11/2009	1:30	0.70
07/11/2009	1:45	0.70
07/11/2009	2:00	1.90
07/11/2009	2:15	0.30
07/11/2009	2:30	0.30
07/11/2009	2:45	0.90
07/11/2009	3:00	1.90
07/11/2009	3:15	4.70
07/11/2009	3:30	3.30
07/11/2009	3:45	2.10
07/11/2009	4:00	2.60
07/11/2009	4:15	0.50
07/11/2009	4:30	0.10
07/11/2009	4:45	0.10
07/11/2009	5:00	0.20
07/11/2009	5:15	0.00
07/11/2009	5:30	0.20
07/11/2009	5:45	0.40
07/11/2009	6:00	0.60

PROCAFE		
FECHA	HORA	LLUVIA REGISTRADA (mm)
07/11/2009	6:15	1.20
07/11/2009	6:30	0.20
07/11/2009	6:45	0.00
07/11/2009	7:00	0.00
07/11/2009	7:15	0.00
07/11/2009	7:30	0.00
07/11/2009	7:45	0.20
07/11/2009	8:00	0.00
07/11/2009	8:15	0.00
07/11/2009	8:30	0.00
07/11/2009	8:45	0.00
07/11/2009	9:00	0.00
07/11/2009	9:15	0.50
07/11/2009	9:30	0.60
07/11/2009	9:45	0.50
07/11/2009	10:00	0.90
07/11/2009	10:15	1.10
07/11/2009	10:30	0.00
07/11/2009	10:45	0.00
07/11/2009	11:00	0.00
07/11/2009	11:15	0.00
07/11/2009	11:30	0.00
07/11/2009	11:45	0.00
07/11/2009	12:00	0.00
07/11/2009	12:15	0.00
07/11/2009	12:30	0.00
07/11/2009	12:45	0.40
07/11/2009	13:00	0.00
07/11/2009	13:15	0.00
07/11/2009	13:30	0.40
07/11/2009	13:45	0.40
07/11/2009	14:00	0.40
07/11/2009	14:15	0.00
07/11/2009	14:30	0.00
07/11/2009	14:45	0.00
07/11/2009	15:00	0.00

PROCAFE		
FECHA	HORA	LLUVIA REGISTRADA (mm)
07/11/2009	15:15	0.00
07/11/2009	15:30	0.20
07/11/2009	15:45	0.00
07/11/2009	16:00	0.10
07/11/2009	16:15	0.10
07/11/2009	16:30	0.00
07/11/2009	16:45	0.20
07/11/2009	17:00	0.10
07/11/2009	17:15	0.70
07/11/2009	17:30	0.30
07/11/2009	17:45	0.30
07/11/2009	18:00	0.10
07/11/2009	18:15	0.10
07/11/2009	18:30	0.10
07/11/2009	18:45	0.10
07/11/2009	19:00	4.60
07/11/2009	19:15	5.40
07/11/2009	19:30	1.00
07/11/2009	19:45	1.00
07/11/2009	20:00	0.90
07/11/2009	20:15	0.10
07/11/2009	20:30	0.20
07/11/2009	20:45	1.20
07/11/2009	21:00	3.30
07/11/2009	21:15	1.90
07/11/2009	21:30	17.20
07/11/2009	21:45	12.40
07/11/2009	22:00	15.50

PROCAFE		
FECHA	HORA	LLUVIA REGISTRADA (mm)
07/11/2009	22:15	13.10
07/11/2009	22:30	13.70
07/11/2009	22:45	5.80
07/11/2009	23:00	7.00
07/11/2009	23:15	9.10
07/11/2009	23:30	29.80
07/11/2009	23:45	14.90
08/11/2009	0:00	4.80
08/11/2009	0:15	3.10
08/11/2009	0:30	11.20
08/11/2009	0:45	4.20
08/11/2009	1:00	1.80
08/11/2009	1:15	1.00
08/11/2009	1:30	2.60
08/11/2009	1:45	1.10
08/11/2009	2:00	0.70
08/11/2009	2:15	0.10
08/11/2009	2:30	0.10
08/11/2009	2:45	0.00
08/11/2009	3:00	0.00
08/11/2009	3:15	0.00
08/11/2009	3:30	0.10
08/11/2009	3:45	0.10
08/11/2009	4:00	0.00
08/11/2009	4:15	0.00
08/11/2009	4:30	0.00
08/11/2009	4:45	0.00
08/11/2009	5:00	0

**Anexo 3.** Registro de lluvia de la estación Beloso correspondientes a la tormenta IDA.

BELLOSO		
FECHA	HORA	LLUVIA REGISTRADA (mm)
06/11/2009	14:15	0.30
06/11/2009	14:30	2.30
06/11/2009	14:45	1.40
06/11/2009	15:00	0.35
06/11/2009	15:15	0.45
06/11/2009	15:30	0.00
06/11/2009	15:45	0.00
06/11/2009	16:00	0.75
06/11/2009	16:15	1.05
06/11/2009	16:30	0.00
06/11/2009	16:45	0.00
06/11/2009	17:00	2.85
06/11/2009	17:15	3.15
06/11/2009	17:30	1.05
06/11/2009	17:45	0.15
06/11/2009	18:00	0.00
06/11/2009	18:15	0.00
06/11/2009	18:30	0.00
06/11/2009	18:45	0.00
06/11/2009	19:00	0.00
06/11/2009	19:15	0.00
06/11/2009	19:30	0.60
06/11/2009	19:45	1.05
06/11/2009	20:00	2.70
06/11/2009	20:15	1.65
06/11/2009	20:30	1.05
06/11/2009	20:45	1.05
06/11/2009	21:00	0.90
06/11/2009	21:15	0.60
06/11/2009	21:30	0.00
06/11/2009	21:45	0.00
06/11/2009	22:00	0.60

BELLOSO		
FECHA	HORA	LLUVIA REGISTRADA (mm)
06/11/2009	22:15	0.60
06/11/2009	22:30	0.00
06/11/2009	22:45	0.00
06/11/2009	23:00	0.00
06/11/2009	23:15	0.00
06/11/2009	23:30	0.00
06/11/2009	23:45	0.60
07/11/2009	0:00	0.90
07/11/2009	0:15	0.90
07/11/2009	0:30	0.47
07/11/2009	0:45	0.43
07/11/2009	1:00	0.30
07/11/2009	1:15	0.60
07/11/2009	1:30	0.73
07/11/2009	1:45	1.07
07/11/2009	2:00	4.05
07/11/2009	2:15	4.35
07/11/2009	2:30	1.07
07/11/2009	2:45	0.23
07/11/2009	3:00	4.25
07/11/2009	3:15	6.45
07/11/2009	3:30	4.60
07/11/2009	3:45	8.00
07/11/2009	4:00	5.00
07/11/2009	4:15	9.75
07/11/2009	4:30	6.53
07/11/2009	4:45	0.67
07/11/2009	5:00	0.15
07/11/2009	5:15	0.45
07/11/2009	5:30	0.15
07/11/2009	5:45	0.45
07/11/2009	6:00	0.60

BELLOSO		
FECHA	HORA	LLUVIA REGISTRADA (mm)
07/11/2009	6:15	2.10
07/11/2009	6:30	0.45
07/11/2009	6:45	0.45
07/11/2009	7:00	0.00
07/11/2009	7:15	0.00
07/11/2009	7:30	0.00
07/11/2009	7:45	0.00
07/11/2009	8:00	0.00
07/11/2009	8:15	0.00
07/11/2009	8:30	0.00
07/11/2009	8:45	0.00
07/11/2009	9:00	0.00
07/11/2009	9:15	0.00
07/11/2009	9:30	0.00
07/11/2009	9:45	0.00
07/11/2009	10:00	0.15
07/11/2009	10:15	0.45
07/11/2009	10:30	0.00
07/11/2009	10:45	0.00
07/11/2009	11:00	0.00
07/11/2009	11:15	0.00
07/11/2009	11:30	0.00
07/11/2009	11:45	0.00
07/11/2009	12:00	0.00
07/11/2009	12:15	0.30
07/11/2009	12:30	1.30
07/11/2009	12:45	6.60
07/11/2009	13:00	2.00
07/11/2009	13:15	0.30
07/11/2009	13:30	2.40
07/11/2009	13:45	1.80
07/11/2009	14:00	0.45
07/11/2009	14:15	0.45
07/11/2009	14:30	0.00
07/11/2009	14:45	0.30
07/11/2009	15:00	0.45

BELLOSO		
FECHA	HORA	LLUVIA REGISTRADA (mm)
07/11/2009	15:15	0.45
07/11/2009	15:30	0.15
07/11/2009	15:45	1.05
07/11/2009	16:00	0.60
07/11/2009	16:15	0.40
07/11/2009	16:30	0.67
07/11/2009	16:45	0.73
07/11/2009	17:00	1.50
07/11/2009	17:15	0.90
07/11/2009	17:30	0.00
07/11/2009	17:45	0.00
07/11/2009	18:00	0.45
07/11/2009	18:15	0.15
07/11/2009	18:30	0.15
07/11/2009	18:45	0.70
07/11/2009	19:00	5.10
07/11/2009	19:15	7.25
07/11/2009	19:30	3.33
07/11/2009	19:45	1.87
07/11/2009	20:00	1.65
07/11/2009	20:15	0.15
07/11/2009	20:30	0.30
07/11/2009	20:45	1.40
07/11/2009	21:00	5.50
07/11/2009	21:15	9.90
07/11/2009	21:30	15.77
07/11/2009	21:45	17.43
07/11/2009	22:00	46.75
07/11/2009	22:15	43.95
07/11/2009	22:30	29.40
07/11/2009	22:45	30.30
07/11/2009	23:00	49.95
07/11/2009	23:15	45.95
07/11/2009	23:30	20.20
07/11/2009	23:45	17.00
08/11/2009	0:00	14.05

<b>BELLOSO</b>		
<b>FECHA</b>	<b>HORA</b>	<b>LLUVIA REGISTRADA (mm)</b>
08/11/2009	0:15	8.85
08/11/2009	0:30	3.83
08/11/2009	0:45	3.17
08/11/2009	1:00	12.35
08/11/2009	1:15	9.15
08/11/2009	1:30	3.53
08/11/2009	1:45	3.57
08/11/2009	2:00	8.35
08/11/2009	2:15	1.65
08/11/2009	2:30	1.30
08/11/2009	2:45	0.70
08/11/2009	3:00	0.10
08/11/2009	3:15	0.30
08/11/2009	3:30	0.50
08/11/2009	3:45	0.40
08/11/2009	4:00	0.60
08/11/2009	4:15	0.90
08/11/2009	4:30	0.75
08/11/2009	4:45	0.15
08/11/2009	5:00	0.00

**Anexo 4.** Intensidad de precipitación máxima anual (absoluta) en mm/min en diferentes periodos de la estación Ilopingo; datos utilizados para curvas IDF.

AÑO	INTENSIDAD mm/min												
	5	10	15	20	30	45	60	90	120	150	180	240	360
1953	1.98	1.95	1.87	1.66	1.36	1.06	0.81	0.69	0.33	0.27	0.23	0.18	0.14
1954	3.00	2.10	1.56	1.53	1.11	0.78	0.66	0.45	0.34	0.24	0.21	0.17	0.10
1955	2.48	2.05	1.97	1.84	1.61	1.29	1.01	0.69	0.52	0.43	0.38	0.30	0.20
1956	2.12	2.03	2.00	1.78	1.36	1.01	0.78	0.57	0.44	0.37	0.31	0.24	0.24
1957	2.26	2.06	1.68	1.40	1.19	0.85	0.66	0.52	0.40	0.27	0.23	0.14	0.12
1958	2.38	1.89	1.65	1.43	1.16	0.84	0.68	0.49	0.38	0.32	0.27	0.21	0.14
1959	3.68	2.94	2.63	2.48	2.01	1.44	1.11	0.76	0.59	0.48	0.42	0.32	0.15
1960	2.02	2.00	1.91	1.52	1.29	0.91	0.72	0.55	0.44	0.36	0.31	0.24	0.19
1961	2.66	2.16	1.91	1.67	1.47	1.10	0.84	0.37	0.30	0.27	0.26	0.23	0.20
1962	2.58	2.25	1.97	1.62	1.41	1.08	0.85	0.59	0.46	0.38	0.32	0.24	0.17
1963	2.44	2.00	1.72	1.54	1.32	1.05	0.88	0.64	0.52	0.38	0.33	0.26	0.09
1964	2.22	2.02	1.89	1.82	1.54	1.23	0.99	0.67	0.50	0.42	0.20	0.14	
1965	3.42	2.83	2.27	1.88	1.38	0.94	0.74	0.51	0.40	0.33	0.28	0.22	
1966	2.05	2.02	1.68	1.51	1.34	0.95	0.74	0.47	0.41	0.34	0.28	0.12	
1967	3.14	1.90	1.49	1.28	1.01	0.80	0.70	0.59	0.48	0.40	0.34	0.16	0.07
1968	2.40	2.37	2.31	2.07	1.64	1.22	0.98	0.78	0.74	0.71	0.60	0.20	
1969	1.60	1.47	1.31	1.10	0.98	0.86	0.80	0.58	0.45	0.37	0.31	0.15	
1970	2.66	2.33	2.19	2.01	1.60	1.25	0.98	0.71	0.58	0.51	0.46	0.36	0.32
1971	2.74	2.37	1.97	1.54	1.47	1.08	0.82	0.57	0.44	0.37	0.32	0.25	0.04
1972	2.12	1.64	1.42	1.30	0.99	0.70	0.53	0.37	0.30	0.24	0.21	0.17	
1973	3.94	2.82	2.06	1.86	1.67	1.23	1.00	0.76	0.36	0.35	0.21	0.16	0.06
1974	2.00	1.94	1.64	1.46	1.25	0.93	0.76	0.51	0.39	0.32	0.27	0.26	0.20
1975	2.08	1.84	1.79	1.56	1.39	1.34	1.22	0.85	0.65	0.54	0.46	0.35	0.24
1976	3.46	2.43	1.81	1.48	1.11	0.83	0.71	0.54	0.46	0.37	0.31	0.24	0.19
1977	2.50	1.72	1.51	1.30	0.95	0.73	0.55	0.43	0.33	0.26	0.24	0.22	0.18
1978	2.70	1.75	1.55	1.31	1.30	0.97	0.78	0.64	0.52	0.45	0.39	0.21	0.16
1979	2.28	2.18	1.88	1.68	1.27	1.11	0.87	0.64	0.61	0.50	0.43	0.34	0.23
1980	2.22	2.12	2.09	2.06	1.61	1.10	0.84	0.58	0.47	0.40	0.34	0.26	0.17

**Anexo 5.** Intensidad de precipitación máxima anual (absoluta) en mm/min en diferentes periodos de la estación Procafé; datos utilizados para curvas IDF.

AÑO	INTENSIDAD mm/min												
	5	10	15	20	30	45	60	90	120	150	180	240	360
1954	2.64	2.28	2.52	2.42	2.00	1.44	1.14	0.85	0.65	0.59	0.51	0.41	0.30
1955	1.86	1.73	1.46	1.28	1.05	0.71	0.54	0.40	0.32	0.27	0.24	0.19	0.14
1956	3.56	2.89	2.34	1.94	1.80	1.67	1.32	0.98	0.75	0.61	0.52	0.40	0.31
1957	2.20	1.89	1.53	1.56	1.26	0.88	0.67	0.45	0.36	0.30	0.25	0.21	0.15
1958	2.74	2.03	1.49	1.18	0.83	0.69	0.59	0.42	0.56	0.49	0.44	0.38	0.28
1959	2.12	1.71	1.49	1.36	1.11	0.79	0.61	0.43	0.36	0.31	0.28	0.22	0.16
1960	2.42	2.03	1.40	1.10	1.01	0.77	0.58	0.45	0.35	0.30	0.32	0.27	0.22
1961	1.62	1.33	1.22	1.08	0.83	0.69	0.56	0.46	0.35	0.34	0.30	0.26	0.20
1962	2.06	1.49	1.38	1.34	1.27	1.11	0.91	0.68	0.52	0.43	0.37	0.28	0.19
1963	2.60	2.29	2.09	1.98	1.77	1.35	1.03	0.70	0.54	0.44	0.37	0.34	0.24
1964	2.40	2.27	2.27	1.78	1.36	0.94	0.78	0.56	0.44	0.36	0.33	0.26	0.19
1965	2.48	2.28	2.01	1.71	1.33	0.93	0.70	0.47	0.41	0.33	0.32	0.27	0.18
1966	2.28	1.92	1.89	1.87	1.58	1.26	1.02	0.78	0.65	0.53	0.45	0.35	0.27
1967	2.56	2.36	2.00	1.77	1.26	1.25	1.17	0.94	0.71	0.59	0.52	0.42	0.31
1968	2.14	1.89	1.50	1.42	1.25	1.15	1.07	0.83	0.74	0.60	0.51	0.41	0.30
1969	1.64	1.42	1.28	1.15	0.89	0.76	0.66	0.52	0.44	0.40	0.36	0.30	0.28
1970	2.80	2.51	2.04	1.62	1.13	0.88	0.70	0.62	0.47	0.38	0.33	0.27	0.19
1971	3.36	2.66	2.32	2.10	1.56	1.20	0.75	0.53	0.41	0.33	0.28	0.24	0.17
1972	2.56	1.78	1.45	1.20	0.91	0.74	0.60	0.53	0.44	0.35	0.30	0.24	0.17
1973	3.18	2.29	1.93	1.76	1.41	1.05	0.90	0.64	0.50	0.42	0.36	0.29	0.21
1974	2.84	2.24	1.89	1.70	1.37	0.96	0.75	0.55	0.45	0.43	0.40	0.38	0.35
1975	2.38	2.17	1.88	1.79	1.73	1.27	0.97	0.67	0.52	0.42	0.35	0.26	0.21
1976	3.40	2.42	1.87	1.54	1.39	1.10	0.87	0.63	0.38	0.31	0.27	0.21	0.18
1977	2.44	2.07	1.61	1.28	0.94	0.66	0.50	0.43	0.38	0.36	0.38	0.32	0.24
1978	2.72	2.36	2.24	1.85	1.29	0.87	0.67	0.48	0.38	0.32	0.27	0.23	0.21
1979	2.72	1.95	1.90	1.68	1.45	1.02	0.80	0.59	0.47	0.39	0.33	0.26	0.19
1980	3.16	2.57	2.17	1.93	1.95	1.56	1.49	1.15	0.88	0.75	0.63	0.49	0.33
1981	2.84	2.24	1.84	1.58	1.35	1.09	0.89	0.59	0.45	0.36	0.32	0.24	0.20
1982	2.80	2.40	2.27	2.30	1.84	1.48	1.14	0.50	0.41	0.35	0.30	0.24	0.16
1983	2.76	1.80	1.66	1.50	1.46	1.24	0.96	0.64	0.49	0.41	0.36	0.28	0.21
1984	3.60	2.80	2.46	2.24	1.58	1.14	0.91	0.70	0.54	0.46	0.40	0.32	0.23

**Anexo 6.** Intensidad de precipitación máxima anual (absoluta) en mm/min en diferentes periodos de la estación S.S.; datos utilizados para curvas IDF.

AÑO	INTENSIDAD mm/min												
	5	10	15	20	30	45	60	90	120	150	180	240	360
1955	2.00	1.82	1.80	1.49	1.06	0.73	0.60	0.45	0.34	0.34	0.20	0.18	0.11
1956	2.98	2.47	1.94	1.55	1.35	1.07	0.82	0.58	0.46	0.40	0.36	0.30	0.20
1957	2.78	2.04	1.90	1.74	1.47	1.13	0.86	0.57	0.48	0.41	0.35	0.29	0.27
1958	3.54	2.37	1.98	1.88	1.33	0.99	0.78	0.52	0.43	0.34	0.30	0.24	0.16
1959	2.26	2.13	1.83	1.56	1.24	0.94	0.74	0.50	0.38	0.32	0.28	0.24	0.21
1960	2.82	2.29	1.96	1.73	1.51	1.22	0.98	0.71	0.58	0.43	0.37	0.29	0.20
1961	2.76	2.71	2.53	2.22	1.63	1.13	0.87	0.68	0.56	0.46	0.42	0.34	0.24
1962	2.68	2.11	1.85	1.42	1.20	1.01	0.77	0.59	0.33	0.30	0.18	0.16	0.10
1963	2.82	2.63	2.56	2.48	1.99	1.48	1.12	0.75	0.57	0.46	0.40	0.22	0.12
1964	2.74	2.05	1.72	1.44	1.01	0.68	0.59	0.53	0.46	0.26	0.23	0.19	0.15
1965	2.36	1.97	1.84	1.49	1.33	1.11	0.89	0.62	0.48	0.40	0.34	0.26	0.19
1966	2.66	2.48	2.21	1.83	1.30	1.07	0.84	0.67	0.32	0.27	0.22	0.15	0.08
1967	2.00	1.81	1.73	1.73	1.39	1.01	0.76	0.53	0.42	0.34	0.29	0.22	0.21
1968	2.08	1.99	1.66	1.49	1.33	1.32	1.23	1.22	1.03	0.87	0.74	0.56	0.38
1969	2.12	1.61	1.39	1.14	1.03	0.84	0.66	0.45	0.34	0.27	0.26	0.19	0.06
1970	2.78	2.00	1.98	1.94	1.56	1.67	0.81	0.63	0.47	0.39	0.33	0.26	0.19
1971	2.02	1.96	1.81	1.52	1.30	1.15	0.99	0.88	0.77	0.64	0.55	0.43	0.37
1972	2.18	2.08	1.87	1.60	1.17	0.94	0.81	0.60	0.46	0.37	0.31	0.16	0.14
1973	3.78	2.79	1.92	1.03	0.99	0.67	0.50	0.35	0.32	0.24	0.18	0.15	0.12
1974	3.16	2.06	1.58	1.36	0.95	0.69	0.53	0.56	0.48	0.43	0.38	0.33	0.25
1975	3.26	2.00	1.80	1.45	1.19	1.06	0.92	0.69	0.54	0.44	0.39	0.30	0.21
1976	2.78	2.37	1.98	1.68	1.27	0.95	0.74	0.65	0.50	0.40	0.33	0.25	0.07
1977	2.34	1.92	1.65	1.36	1.07	0.78	0.61	0.41	0.33	0.34	0.30	0.28	0.21
1978	3.02	2.71	2.28	1.84	1.29	1.06	0.87	0.73	0.57	0.46	0.39	0.31	0.22
1979	2.82	2.19	1.89	1.73	1.40	1.14	0.92	0.71	0.54	0.45	0.38	0.34	0.09
1980	2.04	1.72	1.53	1.22	1.02	0.76	0.59	0.40	0.31	0.26	0.21	0.21	0.11
1981	2.06	1.89	1.56	1.50	1.38	1.06	0.83	0.59	0.46	0.38	0.32	0.18	0.16
1982	2.46	1.96	1.56	1.30	1.05	0.76	0.58	0.45	0.38	0.34	0.29	0.22	0.23
1983	5.42	3.64	2.70	2.17	2.02	1.46	1.10	0.75	0.40	0.32	0.28	0.22	0.16
1984	2.14	1.96	1.67	1.70	1.36	0.98	0.91	0.51	0.49	0.39	0.33	0.32	0.12
1985	2.20	1.93	1.55	1.48	1.23	1.07	0.72	0.65	0.49	0.40	0.32	0.26	0.17

**Anexo 7.** Datos de hidrograma de las sub cuencas del rio Acelhuate en su parte alta y media, resultante de la modelación para un escenario de impermeabilización actual.

FECHA	HORA	CAUDALES (m <sup>3</sup> /s)									
		SBC 1	SBC 2	SBC 3	SBC 4	SBC 5	SBC 6	SBC 7	SBC 8	SBC 9	SBC 10
01-ene-00	16:00	0.20	0.20	0.50	0.50	0.50	1.20	1.00	1.20	1.20	1.20
01-ene-00	16:30	0.20	0.20	0.50	0.50	0.50	1.20	1.00	1.20	1.20	1.20
01-ene-00	17:00	77.00	33.70	15.10	72.30	22.60	13.10	26.40	7.90	16.10	14.10
01-ene-00	17:30	846.70	333.00	174.30	551.00	282.40	95.80	317.20	66.10	107.70	179.60
01-ene-00	18:00	831.50	262.70	441.60	588.20	259.50	97.10	238.00	35.60	55.80	480.00
01-ene-00	18:30	365.70	111.90	458.70	278.90	117.20	45.90	100.10	13.20	19.90	518.00
01-ene-00	19:00	120.60	35.30	290.50	103.00	39.50	17.20	31.70	6.60	10.70	344.60
01-ene-00	19:30	84.40	33.20	154.20	58.40	28.20	9.70	31.60	6.60	10.70	188.40
01-ene-00	20:00	84.10	33.00	76.80	57.30	28.00	9.70	31.40	6.50	10.60	97.00
01-ene-00	20:30	83.70	32.80	45.80	56.20	27.90	9.60	31.30	6.50	10.50	51.80
01-ene-00	21:00	83.30	32.70	45.60	55.20	27.80	9.60	31.00	6.40	10.50	51.60
01-ene-00	21:30	82.70	32.50	45.40	54.10	27.60	9.50	30.80	6.40	10.40	51.30
01-ene-00	22:00	82.30	32.40	45.20	53.10	27.40	9.40	30.70	6.40	10.40	51.10
01-ene-00	22:30	81.90	32.20	45.00	52.10	27.30	9.40	30.50	6.40	10.30	50.80
01-ene-00	23:00	81.60	32.10	44.80	51.10	27.20	9.40	30.40	6.30	10.30	50.60

**Anexo 8.** Datos de hidrograma de las sub cuencas del rio Acelhuate en su parte alta y media, resultante de la modelación para un escenario de impermeabilización base.

FECHA	HORA	CAUDALES (m <sup>3</sup> /s)									
		SBC 1	SBC 2	SBC 3	SBC 4	SBC 5	SBC 6	SBC 7	SBC 8	SBC 9	SBC 10
01-ene-00	16:00	0.20	0.20	0.50	0.50	0.50	1.20	1.00	1.20	1.20	1.20
01-ene-00	16:30	0.20	0.20	0.50	0.70	0.50	1.30	1.00	1.20	1.20	1.20
01-ene-00	17:00	137.20	60.00	23.60	118.20	32.90	22.20	42.10	13.70	17.40	18.20
01-ene-00	17:30	999.10	397.40	213.80	650.40	316.90	115.60	364.50	78.60	110.20	219.80
01-ene-00	18:00	938.00	300.40	509.20	659.90	283.90	111.00	264.90	40.30	56.70	542.30
01-ene-00	18:30	402.70	124.80	515.40	305.70	126.20	50.90	109.30	14.50	20.10	536.80
01-ene-00	19:00	132.10	39.70	322.40	112.10	42.20	18.90	36.40	7.80	11.00	324.30
01-ene-00	19:30	99.60	39.60	170.50	65.90	31.60	11.50	36.30	7.80	10.90	168.70
01-ene-00	20:00	99.10	39.40	84.90	65.60	31.40	11.50	36.10	7.80	10.90	82.70
01-ene-00	20:30	98.70	39.20	51.50	65.30	31.30	11.40	35.90	7.70	10.80	54.10
01-ene-00	21:00	98.20	39.00	51.30	65.00	31.20	11.40	35.60	7.70	10.70	53.90
01-ene-00	21:30	97.60	38.80	51.00	64.70	30.90	11.30	35.40	7.60	10.70	53.60
01-ene-00	22:00	97.10	38.60	50.80	64.30	30.80	11.20	35.30	7.60	10.60	53.40
01-ene-00	22:30	96.70	38.40	50.50	64.00	30.70	11.20	35.10	7.60	10.60	53.20
01-ene-00	23:00	96.20	38.30	50.30	63.70	30.50	11.10	34.90	7.50	10.50	52.90

**Anexo 9.** Datos de hidrograma de las sub cuencas del rio Acelhuate en su parte alta y media resultante de la modelación para un escenario de impermeabilización ampliada.

FECHA	HORA	CAUDALES (m <sup>3</sup> /s)									
		SBC 1	SBC 2	SBC 3	SBC 4	SBC 5	SBC 6	SBC 7	SBC 8	SBC 9	SBC 10
01-ene-00	16:00	0.20	0.20	0.50	0.50	0.50	1.20	1.00	1.20	1.20	1.20
01-ene-00	16:30	0.20	0.20	0.50	2.10	0.50	2.10	1.00	1.30	1.20	1.20
01-ene-00	17:00	167.40	76.20	29.90	143.50	46.00	31.60	63.20	18.20	21.70	24.20
01-ene-00	17:30	1057.40	427.60	240.00	693.00	352.40	130.10	412.30	85.20	117.50	248.90
01-ene-00	18:00	974.80	316.80	550.00	687.00	307.70	119.70	290.60	42.60	59.40	592.50
01-ene-00	18:30	415.00	130.20	548.00	315.40	134.60	54.00	117.80	15.10	20.90	577.70
01-ene-00	19:00	135.90	42.80	340.40	115.30	44.90	19.80	41.20	8.50	11.70	346.40
01-ene-00	19:30	105.40	42.60	179.70	68.80	35.10	13.00	41.00	8.50	11.70	179.90
01-ene-00	20:00	104.90	42.40	89.50	67.50	35.00	12.90	40.80	8.40	11.60	88.10
01-ene-00	20:30	104.40	42.20	54.90	66.20	34.80	12.90	40.60	8.30	11.50	59.10
01-ene-00	21:00	103.90	42.00	54.70	64.90	34.60	12.80	40.30	8.30	11.40	58.90
01-ene-00	21:30	103.30	41.80	54.40	63.70	34.40	12.70	40.10	8.30	11.40	58.60
01-ene-00	22:00	102.80	41.60	54.20	62.50	34.20	12.60	39.90	8.20	11.30	58.30
01-ene-00	22:30	102.30	41.40	53.90	61.30	34.10	12.60	39.70	8.20	11.30	58.10
01-ene-00	23:00	101.80	41.20	53.70	60.10	33.90	12.50	39.50	8.10	11.20	57.80

**Anexo 10.** Datos de hidrograma del punto de salida de la cuenca del río Acelhuate en su parte alta y media, resultante de la modelaciones para los tres escenarios de impermeabilización

		CAUDALES (m <sup>3</sup> /s)		
FECHA	HORA	ESCENARIO ACTUAL	ESCENARIO BASE	ESCENARIO AMPLIADO
01-ene-00	16:00	8.00	8.00	8.00
01-ene-00	16:30	8.00	8.00	8.20
01-ene-00	17:00	52.10	68.40	89.60
01-ene-00	17:30	523.10	634.20	726.90
01-ene-00	18:00	1,400.90	1,641.20	1,818.20
01-ene-00	18:30	2,092.30	2,370.90	2,568.80
01-ene-00	19:00	2,124.50	2,364.20	2,523.30
01-ene-00	19:30	1,689.00	1,872.80	1,983.30
01-ene-00	20:00	1,161.60	1,286.70	1,358.60
01-ene-00	20:30	771.80	868.70	919.60
01-ene-00	21:00	566.20	639.20	679.30
01-ene-00	21:30	461.90	523.30	557.50
01-ene-00	22:00	406.10	462.00	492.70
01-ene-00	22:30	376.90	430.20	458.70
01-ene-00	23:00	361.10	413.50	440.50

**Anexo 11.** Puntos de sección transversal en el punto de salida de la cuenca del rio Acelhuate.

<b>PUNTO</b>	<b>COORDENADAS (m)</b>	<b>ELEVACIONES (m)</b>
1	-100.000	19.161
2	-88.345	19.223
3	-88.265	19.223
4	-61.618	19.124
5	-36.070	19.000
6	-29.947	10.084
7	-29.074	9.000
8	-27.919	9.018
9	-22.931	9.094
10	-18.411	9.025
11	-17.844	9.015
12	-17.109	9.000
13	-12.325	4.495
14	-11.694	4.000
15	0.000	4.000
16	5.014	4.000
17	11.256	4.000
18	12.976	5.811
19	15.086	9.000
20	20.784	13.817
21	20.978	14.000
22	21.254	14.209
23	28.213	19.000
24	34.742	19.113
25	44.615	20.020
26	56.273	20.770
27	59.538	20.756
28	62.816	20.776
29	67.560	20.836
30	71.697	20.982
31	76.695	21.219
32	87.174	21.944
33	100.000	22.767

**Anexo 12.** Puntos de sección transversal en el punto de salida de la subcuenca 1, usada para la calibración del modelo.

PUNTO	COORDENADAS (m)	ELEVACIONES (m)
1	-6.120	8.990
2	-6.120	7.340
3	-6.010	5.040
4	-5.530	5.040
5	-5.440	2.280
6	-5.110	1.990
7	4.880	1.990
8	5.030	2.180
9	5.380	4.370
10	5.960	4.370
11	7.100	7.050
12	7.100	8.990

**Anexo 13.** Registro de caudales (teóricos) calculados, usados para realizar la calibración del moldeo hidrológico en el programa HEC-HMS

FECHA	HORA	CAUDAL (m <sup>3</sup> /s)	FECHA	HORA	CAUDAL (m <sup>3</sup> /s)
06/11/2009	14:30	0.206	06/11/2009	21:00	33.219
06/11/2009	15:00	0.861	06/11/2009	21:30	22.955
06/11/2009	15:30	3.474	06/11/2009	22:00	12.391
06/11/2009	16:00	5.062	06/11/2009	22:30	7.376
06/11/2009	16:30	6.885	06/11/2009	23:00	4.238
06/11/2009	17:00	8.930	06/11/2009	23:30	3.848
06/11/2009	17:30	22.955	07/11/2009	0:00	31.402
06/11/2009	18:00	31.402	07/11/2009	0:30	50.293
06/11/2009	18:30	19.883	07/11/2009	1:00	37.941
06/11/2009	19:00	5.062	07/11/2009	1:30	29.627
06/11/2009	19:30	5.062	07/11/2009	2:00	56.990
06/11/2009	20:00	31.402	07/11/2009	2:30	58.140
06/11/2009	20:30	41.900	07/11/2009	3:00	71.391

FECHA	HORA	CAUDAL (m <sup>3</sup> /s)
07/11/2009	3:30	179.844
07/11/2009	4:00	215.922
07/11/2009	4:30	183.514
07/11/2009	5:00	81.712
07/11/2009	5:30	29.627
07/11/2009	6:00	26.205
07/11/2009	6:30	39.900
07/11/2009	7:00	22.955
07/11/2009	7:30	18.415
07/11/2009	8:00	18.415
07/11/2009	8:30	18.415
07/11/2009	9:00	17.698
07/11/2009	9:30	29.627
07/11/2009	10:00	41.900
07/11/2009	10:30	44.974
07/11/2009	11:00	28.755
07/11/2009	11:30	20.634
07/11/2009	12:00	18.415
07/11/2009	12:30	24.558
07/11/2009	13:00	66.444
07/11/2009	13:30	62.830
07/11/2009	14:00	55.851
07/11/2009	14:30	36.021
07/11/2009	15:00	26.205
07/11/2009	15:30	25.376
07/11/2009	16:00	29.627

FECHA	HORA	CAUDAL (m <sup>3</sup> /s)
07/11/2009	16:30	28.755
07/11/2009	17:00	36.021
07/11/2009	17:30	42.915
07/11/2009	18:00	35.077
07/11/2009	18:30	27.044
07/11/2009	19:00	109.942
07/11/2009	19:30	215.922
07/11/2009	20:00	158.459
07/11/2009	20:30	72.650
07/11/2009	21:00	130.080
07/11/2009	21:30	544.238
07/11/2009	22:00	1,202.708
07/11/2009	22:30	1,317.900
07/11/2009	23:00	1,317.900
07/11/2009	23:30	1,317.900
08/11/2009	0:00	1,317.900
08/11/2009	0:30	902.974
08/11/2009	1:00	558.662
08/11/2009	1:30	354.022
08/11/2009	2:00	240.074
08/11/2009	2:30	149.876
08/11/2009	3:00	146.498
08/11/2009	3:30	144.821
08/11/2009	4:00	144.821
08/11/2009	4:30	146.498
08/11/2009	5:00	144.821

## Anexo 14. Afectaciones en el país tras las tormentas tropicales Amanda y Cristóbal.



### EL SALVADOR

#### Panorama de impacto: Tormenta Tropical Amanda y Tormenta Tropical Cristóbal

Al 8 de junio 2020

Las tormentas tropicales Amanda y Cristóbal golpearon a El Salvador en rápida sucesión entre el 31 de mayo y el 6 de junio, causando lluvias, vientos fuertes y daños provocados por las inundaciones. Muchas zonas recibieron más de 500 mm de lluvia, y algunas zonas registraron hasta 800 mm, casi el equivalente a las precipitaciones registradas en las Bahamas durante el huracán Dorian en 2019.

Protección Civil ha respondido a más de 2.000 incidentes que han dejado a casi 30.000 familias (casi 150.000 personas) afectadas y 27 fallecidos.

Las tormentas llegan mientras El Salvador, donde viven 643.000 personas con necesidades humanitarias según el reciente Panorama Regional de Necesidades Humanitarias, enfrenta la crisis COVID-19 que está

agravando las vulnerabilidades existentes. El PMA estima que hay unas 350.000 personas en situación de inseguridad alimentaria en los municipios más afectados.

Estos eventos suponen una gran presión sobre los recursos y la capacidad de respuesta en El Salvador, lo que ha dado lugar a solicitudes de asistencia internacional.

**149,8K**  
PERSONAS AFECTADAS POR TORMENTAS

**12,6K**  
PERSONAS EN 352 ALBERGUES

**2,8K**  
HECTÁREAS DE CULTIVOS DAÑADOS O PERDIDOS

**392**  
ESCUELAS DAÑADAS POR TORMENTAS

#### PERSONAS AFECTADAS\*



Departamento	Número de personas afectadas
1. San Salvador	28K
2. San Miguel	24,3K
3. La Libertad	21,1K
4. Santa Ana	15K
5. La Paz	9,2K
6. Sonsonate	9,2K
7. San Vicente	8,3K
8. Ahuachapán	7,2K
9. La Unión	6,7K
10. Usulután	6,2K
11. Morazán	4,9K
12. Chalatenango	3,4K
13. Cuscatlán	3,1K
14. Cabañas	2,4K

#### PERSONAS ALBERGADAS



Departamento	Número de personas albergadas
1. San Salvador	4,4K
2. San Miguel	3,8K
3. La Libertad	2,5K
4. Sonsonate	474
5. San Vicente	390
6. La Unión	195
7. La Paz	174
8. Ahuachapán	168
9. Santa Ana	143
10. Cuscatlán	95
11. Usulután	87
12. Morazán	53
13. Chalatenango	36
14. Cabañas	9

#### IMPACTO EN SEGURIDAD ALIMENTARIA



Departamento	Cultivos dañados/perdidos (hectáreas)
1. Sonsonate	2,3K
2. La Libertad	249
3. Usulután	176
4. Santa Ana	80
5. Morazán	4,2
6. San Miguel	2,1
7. Ahuachapán	0
8. Cabañas	0
9. Chalatenango	0
10. Cuscatlán	0
11. La Paz	0
12. La Unión	0
13. San Salvador	0
14. San Vicente	0

#### IMPACTO EN EDUCACIÓN



Departamento	Número de escuelas afectadas
1. San Miguel	55
2. La Libertad	53
3. Santa Ana	53
4. Usulután	41
5. Sonsonate	38
6. La Unión	27
7. Chalatenango	24
8. Ahuachapán	22
9. Cabañas	22
10. San Vicente	21
11. San Salvador	12
12. Cuscatlán	9
13. La Paz	8
14. Morazán	7

**Anexo 15.** Mapa geológico del área metropolitana de San Salvador, Geo portal de la OPAMSS.

