

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



**ESTUDIO TÉCNICO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE  
MEDIDAS ENFOCADAS A LA REDUCCIÓN DEL  
IMPACTO HIDROLÓGICO EN  
LA MICROCUENCA TUTUNICHAPA**

PRESENTADO POR

**MARROQUÍN AGUILAR, CARLOS MIGUEL  
SEGOVIA CRUZ, LUÍS ALEJANDRO  
TURCIOS RIVAS, WALTER ERNESTO**

PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE

**INGENIERO CIVIL**

CIUDAD UNIVERSITARIA, AGOSTO 2025

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

RECTOR:

**M. Sc. JUAN ROSA QUINTANILLA**

SECRETARIO GENERAL:

**LIC. PEDRO ROSALÍO ESCOBAR CASTANEDA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

DECANO:

**ING. LUIS SALVADOR BARRERA MANCÍA**

SECRETARIO:

**ARQ. RAÚL ALEXANDER FABIÁN ORELLANA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

DIRECTOR:

**M.Eng.Ing. CARLOS ALBERTO ESCOBAR FLORES**

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE  
INGENIERÍA CIVIL**

**TRABAJO DE GRADO MODALIDAD TRABAJO DE INVESTIGACIÓN,  
PREVIO A LA OPCIÓN DE:**

**INGENIERO CIVIL**

**TÍTULO:**

**ESTUDIO TÉCNICO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE  
MEDIDAS ENFOCADAS A LA REDUCCIÓN DEL IMPACTO  
HIDROLÓGICO EN  
LA MICROCUENCA TUTUNICHAPA**

**PRESENTADO POR:**

**MARROQUÍN AGUILAR, CARLOS MIGUEL  
SEGOVIA CRUZ, LUÍS ALEJANDRO  
TURCIOS RIVAS, WALTER ERNESTO**

TRABAJO DE GRADO APROBADO POR:

DOCENTES ASESORES:

**INGRA. LEDY MARISELA ESQUIVEL DE VALDEZ**

**INGRA. INGRID ALTAGRACIA ALFARO LÓPEZ**

San Salvador, Agosto 2025

## **AGRADECIMIENTOS**

Queremos expresar nuestro profundo agradecimiento a nuestras asesoras, Ing. Ledy Marisela Esquivel de Valdez e Ing. Ingrid Altagracia Alfaro López, quienes con su acompañamiento constante y orientación profesional hicieron posible el desarrollo de este trabajo de graduación.

A la Ing. Ledy Marisela Esquivel de Valdez quien nos brindó de su apoyo desde la elección del tema hasta la revisión final, su guía fue fundamental para la correcta ejecución de cada uno de los capítulos del trabajo de graduación.

A la Ing. Ingrid Altagracia Alfaro López, por habernos facilitado los datos de lluvia necesarios para los análisis hidrológicos desarrollados, así como por su disposición en todo momento para apoyarnos con los recursos técnicos requeridos. También extendemos nuestro agradecimiento al Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN), por proporcionar información histórica de precipitación que fue clave para la modelación y evaluación del comportamiento hidrológico de la microcuenca Tutunichapa.

Asimismo, reconocemos y agradecemos el apoyo de nuestro jurado evaluador, Ing. Edwin Escobar e Ing. Julissa Cortez, por su valioso tiempo, aportes técnicos y disposición para evaluar nuestro trabajo.

A todos ustedes, gracias por su apoyo incondicional, su confianza y por formar parte de este importante logro académico en nuestras vidas.

## DEDICATORIA

Agradezco a Dios, por la vida y por acompañarme en cada etapa de esta, gracias por rodearme de personas que me apoyaron, por guiar mis decisiones y darme la perseverancia y la sabiduría necesarias para llegar hasta aquí.

A mi madre, Marleny Aguilar, por su amor incondicional, su compañía y por ser un ejemplo de esfuerzo y dedicación. Gracias por estar conmigo en todo momento, al levantarme temprano o desvelarme, con una comida lista, una palabra de aliento o simplemente con tu presencia, gracias por sembrar en mí los valores que me ayudaron a llegar hasta aquí, este logro es tanto mío como tuyo.

A mi padre, Miguel Marroquín, y a mis hermanas, Karen Marroquín, Katia Marroquín y Fátima Marroquín, por su amor, por su compañía y por las palabras de ánimo que siempre llegaron en el momento indicado. Su compañía llenó de alegría y motivación esta como muchas etapas de mi vida.

A mi novia, Alba Depaz, por su cariño, amor, comprensión y por estar a mi lado desde el inicio de la carrera hasta su finalización. Tu amor, alegría y apoyo han sido una fuente de motivación, gracias por siempre creer en mí.

A mis compañeros de proyecto, Luis Alejandro Segovia Cruz y Walter Ernesto Turcios Rivas, por el compromiso, el esfuerzo y dedicación que nos permitió culminar de forma exitosa este trabajo de graduación.

**Carlos Miguel Marroquín Aguilar**

## DEDICATORIA

A Dios, por brindarme la dicha de alcanzar un nuevo logro en mi vida, guiándome con sabiduría e inteligencia para superar cada desafío que implicó esta etapa.

A mis padres, Roberto Antonio Segovia Mejía y Sofía del Carmen Cruz de Segovia, por acompañarme siempre con su apoyo incondicional. Gracias por inculcarme los valores de perseverancia, humildad y gratitud, que no solo me ayudaron a adquirir conocimientos académicos, sino un crecimiento personal en todos los aspectos.

A mis hermanos y amigos, quienes estuvieron a mi lado en los momentos difíciles, ofreciéndome palabras de aliento, ánimo, o simplemente el consuelo de su compañía. Y también a todos aquellos que celebraron mis logros con entusiasmo, dándome ese empuje adicional para seguir avanzando y demostrar que siempre se puede llegar más lejos.

A mis compañeros de proyecto, Carlos Miguel Marroquín Aguilar y Walter Ernesto Turcios Rivas, por su compromiso, responsabilidad y dedicación, cualidades que nos permitieron culminar exitosamente este trabajo de graduación.

**Luis Alejandro Segovia Cruz**

## DEDICATORIA

A Dios, por guiarme en cada paso de este trayecto y darme la fortaleza necesaria en los momentos difíciles, por brindarme sabiduría en los momentos de duda y por todas las dádivas que ha derramado sobre mi vida. Sin sus eternas bendiciones, este logro no habría sido posible.

A mis padres, Walter Antonio Turcios González y Ana Cristina Rivas de Turcios, cuyo amor, esfuerzo, apoyo y sacrificio han sido fundamentales para que hoy culmine esta meta. Gracias por enseñarme el valor del trabajo, la responsabilidad y la perseverancia. Este logro también es de ustedes, porque siempre han estado a mi lado. También agradecer a mis hermanos, Marcela Ivonne Turcios Rivas y Fredy Edgardo Turcios Rivas, por su apoyo constante y comprensión incondicional. A mi compañero fiel, mi perro Lucas, quien con su silenciosa compañía y mirada en esas largas noches de estudio me brindo apoyo. Gracias por ser parte esencial de mi vida.

A mis familia, primos, amigos y seres queridos que me han acompañado en este camino. Gracias por cada palabra de ánimo, cada momento compartido y cada gesto que me impulsó a continuar. Su presencia, cercana o a la distancia, me ha llenado de motivación para culminar este logro.

A mis compañeros de tesis, Carlos Miguel Marroquín Aguilar y Luís Alejandro Segovia Cruz, por su entrega, compromiso, responsabilidad y compañerismo durante todo el desarrollo de este trabajo. Juntos enfrentamos desafíos, compartimos aprendizajes y construimos una experiencia que siempre recordaré con gratitud y orgullo.

A todos ustedes, gracias por ser parte de esta etapa tan significativa en mi vida.

**Walter Ernesto Turcios Rivas**

## ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS .....	V
INTRODUCCIÓN .....	XXI
CAPÍTULO I: GENERALIDADES .....	1
1.1. ANTECEDENTES.....	2
1.1.1. Antecedentes Históricos .....	2
1.1.2. Antecedente Legales .....	5
1.1.3. Instituciones Involucradas.....	8
1.1.4. Manuales y Guías Técnicas.....	9
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	12
1.3. OBJETIVOS .....	14
1.3.1. Objetivo General .....	14
1.3.2. Objetivos Específicos.....	14
1.4. ALCANCES .....	15
1.5. LIMITACIONES .....	16
1.6. JUSTIFICACIÓN.....	17
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	19
2.1. El Ciclo Hidrológico Natural .....	20
2.2. Componentes Del Ciclo Hidrológico .....	21
2.2.1. La precipitación .....	21
2.2.2. Escurrimiento .....	32
2.2.3. Evapotranspiración .....	35
2.2.4. Infiltración.....	36
2.3. Definición de Impacto Hidrológico .....	38
2.4. Origen de Impacto Hidrológico .....	38

2.4.1. Deforestación y Cambio en el Uso del Suelo .....	39
2.4.2. Prácticas Agrícolas no Sostenibles .....	43
2.5. Consecuencias del impacto hidrológico.....	44
2.5.1. Erosión y deslizamientos del suelo .....	46
2.5.2. Inundaciones.....	48
2.5.3. Escasez de Agua y Sequías .....	49
2.5.4. Pérdida de la biodiversidad .....	50
2.5.5. Contaminación del Recurso Hídrico.....	52
2.5.6. Impacto Social, Económico y Cultural .....	53
2.6. Mitigación del Impacto Hidrológico .....	56
2.6.1. Instituciones Involucradas en la Gestión del Agua.....	57
2.7. Caracterización Hidrológica de una Cuenca Hidrográfica .....	59
2.7.1. Descripción de las características morfométricas de una cuenca .....	59
2.7.2. Descripción de las características relacionadas con el drenaje de una cuenca.....	71
2.8. Métodos de Transformación de Escorrentía a Caudal.....	83
2.8.1. Caudal máximo mediante método racional .....	83
2.8.2. Método Curva Numero (CN) .....	85
2.9. Análisis de inundaciones .....	89
2.10. Descripción de Softwares Aplicables al Análisis Hidrológico y de inundaciones .....	94
2.10.1. HEC-RAS .....	94
2.10.2. HEC-HMS .....	94
2.10.3. QGIS .....	95
2.10.4. GOOGLE EARTH .....	95

2.11. Marco legal en El Salvador relacionado con la regulación del impacto hidrológico de las construcciones .....	95
2.11.1. Ley de Medio Ambiente .....	97
2.11.2. Reglamento General de la Ley de Medio Ambiente .....	98
2.11.3. Ley de Urbanismo y Construcción .....	101
2.11.4. Reglamento a La Ley de Urbanismo y Construcción .....	102
2.11.5. Código de Salud.....	104
2.11.6. Ley de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Área Metropolitana de San Salvador y los Municipios Aledaños.....	106
2.11.7. Reglamento a la Ley de Desarrollo y Ordenamiento territorial del Área Metropolitana de San Salvador y de los Municipios Aledaños con sus Anexos.....	110
2.11.8. Ley General de Recursos Hídricos .....	124
2.11.9. Ley de Protección Civil, Prevención y Mitigación de Desastres.....	132
2.12. Estructuras Hidráulicas con Aplicación a la Mitigación Del Impacto Hidrológico. ....	134
2.12.1. Diseño de Estructuras Hidráulicas .....	134
2.12.2. Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible (SUDS) .....	138
2.13. Estrategias de Implementación.....	148
2.13.1. Casos de Éxito Internacionales.....	148
<b>CAPÍTULO III: ESTUDIO HIDROLOGICO DE LA MICROCUENCA TUTUNICHAPA EN EL AÑO 2024.....</b>	<b>161</b>
3.1. Descripción de las Características Morfométricas de la Microcuenca Tutunichapa .....	162
3.1.1. Delimitación de la microcuenca.....	162
3.1.2. Características geométricas de la microcuenca.....	163

3.1.4. Longitud axial .....	164
3.1.5. Ancho medio de la microcuenca .....	165
3.1.6. Pendiente media de la microcuenca .....	166
3.1.7. Factor de forma.....	167
3.1.8. Coeficiente de compacidad .....	168
3.2. Descripción de las características relacionadas con el drenaje de la microcuenca Tutunichapa .....	169
3.2.1. Patrón de drenaje.....	169
3.2.2. Orden de las corrientes .....	170
3.2.3. Longitud del cauce principal.....	172
3.2.4. Pendiente media del cauce principal.....	173
3.2.5. Tiempo de concentración .....	174
3.2.6. Curva hipsométrica .....	177
3.3. Identificación de las estaciones con influencia en la microcuenca Tutunichapa a través del método de los polígonos de Thiessen..	178
3.4. Cálculo de Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) ....	182
3.5. Caudal máximo instantáneo .....	190
3.5.1. Método de curva número SCS .....	190
3.5.2. Cálculo de hietograma para cada estación meteorológica con el método de bloques alternos. ....	195
3.5.3. Hietograma de la microcuenca.....	199
3.5.4. Cálculo de caudal instantáneo máximo a través de modelación hidrológica para el año 2024.....	203
3.6. Demanda de Agua Potable y Producción de Aguas Residuales, para la Microcuenca Tutunichapa .....	206
3.6.1. Consumo habitacional de agua potable .....	206
3.6.2. Producción habitacional de aguas residuales .....	210

3.7. Interpretación del comportamiento hidrológico de la microcuenca Tutunichapa, en conjunto con la demanda de agua potable y la producción de aguas residuales.....	210
CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE ESCENARIOS HIDROLÓGICOS PARA LA MICROCUENCA TUTUNICHAPA .....	214
4.1. Metodología para la elección de medidas de mitigación del impacto hidrológico en la microcuenca Tutunichapa.....	215
4.1.1. División de la microcuenca Tutunichapa por zonas de estudio .....	216
4.1.2. Evolución del comportamiento hidrológico de la microcuenca Tutunichapa y proyección futura .....	218
4.1.3. Análisis comparativo de escenarios hidrológico para la microcuenca Tutunichapa .....	235
CAPÍTULO V: PROPUESTA DE MEDIDAS DE MITIGACIÓN APLICABLES POR CADA ZONA DE ESTUDIO EN LA MICROCUENCA TUTUNICHAPA.....	243
5.1. Medidas de Mitigación Aplicables por Cada Zona de la Microcuenca Tutunichapa para el año 2024. ....	244
5.1.1. Medidas para zona 3 de la microcuenca Tutunichapa .....	244
5.1.2. Medidas para zona 2 de la microcuenca Tutunichapa .....	249
5.1.3. Medidas para zona 1 de la microcuenca Tutunichapa .....	253
5.2. Identificación de zonas vulnerables a inundación en la microcuenca Tutunichapa .....	261
CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	268
6.1. Conclusiones .....	269
6.2. Recomendaciones .....	272
REFERENCIAS.....	274
ANEXO A .....	281

Obtención de las características morfométricas de la microcuenca mediante Software Qgis .....	281
Delimitación de la microcuenca .....	281
Área de la microcuenca .....	291
Perímetro de la microcuenca .....	291
Longitud axial .....	293
Pendiente media de la microcuenca .....	294
Obtención de las características hidrológicas de la microcuenca mediante Software Qgis .....	297
Orden de las corrientes .....	297
Longitud del cauce principal .....	298
Pendiente media del cauce principal .....	300
ANEXO B .....	317
ANEXO C .....	328

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> <i>El Ciclo Hidrológico</i> .....	21
<b>Figura 2</b> <i>Instrumento de Medición, Pluviómetro</i> .....	24
<b>Figura 3</b> <i>Instrumento de Medición, Pluviógrafo</i> .....	25
<b>Figura 4</b> <i>Estación Meteorológica Automática</i> .....	26
<b>Figura 5</b> <i>Hietograma de Precipitación</i> .....	27
<b>Figura 6</b> <i>Gráfico Curva Masa</i> .....	28
<b>Figura 7</b> <i>Esquema del Método Polígonos de Thiessen</i> .....	30
<b>Figura 8</b> <i>Esquema Método de Curvas Isoyetas</i> .....	31
<b>Figura 9</b> <i>Grafica de Escurrimiento a través de un Hidrograma Unitario</i> .....	34
<b>Figura 10</b> <i>Corte Trasversal de Relieve A</i> .....	60
<b>Figura 11</b> <i>Clasificación de Cuenca por Área</i> .....	61
<b>Figura 12</b> <i>Longitud Axial de una Cuenca</i> .....	62
<b>Figura 13</b> <i>Grafica de Variación de Pendiente (S)</i> .....	64
<b>Figura 14</b> <i>Curva Hipsométrica</i> .....	65
<b>Figura 15</b> <i>Patrones de Drenaje más Comunes</i> .....	73
<b>Figura 16</b> <i>Ejemplo de Orden de Corrientes</i> .....	75
<b>Figura 17</b> <i>Cause más Largo</i> .....	76
<b>Figura 18</b> <i>Pendiente del Cauce Principal</i> .....	77
<b>Figura 19</b> <i>Pendiente Compensada por Método de Áreas</i> .....	78
<b>Figura 20</b> <i>Usos de Suelo</i> .....	87
<b>Figura 21</b> <i>Coeficientes de Escorrentía de acuerdo al Uso de Suelo</i> 115	
<b>Figura 22</b> <i>Bóveda Ubicada en Residencial Brisas de San Francisco</i> .....	138
<b>Figura 23</b> <i>Superficies Permeables</i> .....	142
<b>Figura 24</b> <i>Pozo y Zanja de Infiltración</i> .....	144
<b>Figura 25</b> <i>Franja Filtrante</i> .....	147
<b>Figura 26</b> <i>Metodología de los Cuatro Pilares</i> .....	150
<b>Figura 27</b> <i>Mapa de Ubicación de la Microcuenca</i> .....	163
<b>Figura 28</b> <i>Longitud Axial de la Microcuenca</i> .....	164

<b>Figura 29</b> <i>Pendiente Media de la Microcuenca en Porcentaje (%)</i> ..	166
<b>Figura 30</b> <i>Pendiente Media de la Microcuenca en Grados Sexagesimales (°)</i> .....	167
<b>Figura 31</b> <i>Mapa de Patrón de Drenaje Microcuenca Tutunichapa</i> ..	170
<b>Figura 32</b> <i>Orden de Corrientes Microcuenca Tutunichapa</i> .....	171
<b>Figura 33</b> <i>Cauce Principal Microcuenca Tutunichapa</i> .....	172
<b>Figura 34</b> <i>Perfil del Cauce Principal a través de Software Qgis</i> .....	173
<b>Figura 35</b> <i>Perfil del Cauce Principal a través de Software Qgis</i> .....	177
<b>Figura 36</b> <i>Mapa de Ubicación de Estaciones Meteorológicas</i> .....	179
<b>Figura 37</b> <i>Calculadora de Coordenadas</i> .....	180
<b>Figura 38</b> <i>Polígonos de Thiessen, con estaciones cercanas a la microcuenca Tutunichapa</i> .....	181
<b>Figura 39</b> <i>Salida de los Polígonos de Thiessen Delimitados por la Microcuenca</i> .....	182
<b>Figura 40</b> <i>Curvas IDF Escala Natural Estación Meteorológica Santa Tecla</i> .....	188
<b>Figura 41</b> <i>Curvas IDF Escala Logarítmica Estación Meteorológica Santa Tecla</i> .....	189
<b>Figura 42</b> <i>Tipos de Uso de Suelo de la Microcuenca Tutunichapa</i> .	191
<b>Figura 43</b> <i>Mapa de Texturas de Suelo de la Microcuenca Tutunichapa</i> .....	193
<b>Figura 44</b> <i>Hietograma Estación Meteorológica El Boquerón</i> .....	196
<b>Figura 45</b> <i>Estación Meteorológica San Salvador</i> .....	198
<b>Figura 46</b> <i>Hietograma Estación Meteorológica UES</i> .....	199
<b>Figura 47</b> <i>Hietograma Microcuenca Tutunichapa</i> .....	203
<b>Figura 48</b> <i>Pantallazo de Salida Programa HEC HMS, Modelación Hidrológica</i> .....	204
<b>Figura 49</b> <i>Hidrograma De La Microcuenca Tutunichapa</i> .....	205
<b>Figura 50</b> <i>Consumos Específicos de Agua</i> .....	208
<b>Figura 51</b> <i>Mapa de División por Zonas de la Microcuenca Tutunichapa</i> .....	216
<b>Figura 52</b> <i>Mapa de Uso de Suelos Urbanización de 1995</i> .....	220

<b>Figura 53</b> <i>Simulación Hidrológica de la Microcuenca Tutunichapa, año 1995</i> .....	223
<b>Figura 54</b> <i>Hidrograma de la Microcuenca Tutunichapa Correspondiente al Año 1995</i> .....	224
<b>Figura 55</b> <i>Mapa de Área Urbanizable de la Microcuenca Tutunichapa</i> .....	228
<b>Figura 56</b> <i>Pantallazo de Salida Programa HEC HMS, Modelación Hidrológica</i> .....	230
<b>Figura 57</b> <i>Hidrograma de la Microcuenca Tutunichapa Escenario de Zonas Urbanizables</i> .....	231
<b>Figura 58</b> <i>Pantallazo de salida, zona 1 de la microcuenca Tutunichapa, volumen de escorrentía directa</i> .....	240
<b>Figura 59</b> <i>Pantallazo de salida, zona 2 de la microcuenca Tutunichapa, volumen de escorrentía directa</i> .....	240
<b>Figura 60</b> <i>Pantallazo de salida, zona 3 de la microcuenca Tutunichapa, volumen de escorrentía directa</i> .....	241
<b>Figura 61</b> <i>Captura de Pantalla de la Herramienta “Medir” en Qgis Para Obtención de Longitud de Calle</i> .....	245
<b>Figura 62</b> <i>Mapa de Ubicaciones Propuestas para Lagunas de Infiltración</i> .....	259
<b>Figura 63</b> <i>Clasificación de Riesgo por Inundación (Altura de Inundación vs Pendiente)</i> .....	261
<b>Figura 64</b> <i>Captura de Pantalla de Qgis Mostrando las Alturas de Inundación (Zona 1 de la Microcuenca)</i> .....	262
<b>Figura 65</b> <i>Captura de Pantalla de Qgis Mostrando las Alturas de Inundación (Zona 2 de la Microcuenca)</i> .....	264
<b>Figura 66</b> <i>Captura de Pantalla de Qgis Mostrando las Alturas de Inundación (Zona 3 de la Microcuenca)</i> .....	265
<b>Figura 67</b> <i>Captura de Pantalla de Qgis Mostrando las Alturas de Inundación (Zona 3 de la Microcuenca)</i> .....	266

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> <i>Fuentes, Consecuencias en Diferentes Ámbitos y Medidas de Mitigación del Impacto Hidrológico</i> .....	55
<b>Tabla 2</b> <i>Clasificación de Cuenca Según su Porcentaje de Pendiente</i> .....	65
<b>Tabla 3</b> <i>Clases de Valores de Factor Forma para una Cuenca</i> .....	69
<b>Tabla 4</b> <i>Factor de Compacidad</i> .....	70
<b>Tabla 5</b> <i>Velocidad según Pendiente Media del Cauce Principal</i> .....	79
<b>Tabla 6</b> <i>Velocidad según Pendiente Media del Cauce Principal y Tipo de Terreno</i> .....	80
<b>Tabla 7</b> <i>Categorías del Índice de Retención y Regulación Hídrica (IRH)</i> .....	155
<b>Tabla 8</b> <i>Índice de Uso de Agua Superficial (IUA)</i> .....	155
<b>Tabla 9</b> <i>Índice de Vulnerabilidad por Desabastecimiento (IVH)</i> .....	156
<b>Tabla 10</b> <i>Distribución de Subzonas Hidrográficas con Estrés Hídrico a Nivel de Área Hidrográfica</i> .....	157
<b>Tabla 11</b> <i>Características Geométricas</i> .....	164
<b>Tabla 12</b> <i>Longitud de Cada Orden de Corriente</i> .....	171
<b>Tabla 13</b> <i>Cuadro Resumen de Tiempos de Concentración</i> .....	176
<b>Tabla 14</b> <i>Estaciones Meteorológicas Cercana a la Microcuenca Tutunichapa</i> .....	178
<b>Tabla 15</b> <i>Estación Meteorológica Santa Tecla, Datos Históricos</i> .....	183
<b>Tabla 16</b> <i>Cuadro Resumen de la Suma de las Variables Probabilísticas de Gumbel</i> .....	185
<b>Tabla 17</b> <i>Cuadro de Intensidades de Lluvia en Función a la Duración y el Periodo de Retorno</i> .....	187
<b>Tabla 18</b> <i>Porcentaje de Área de los Usos de Suelo de la Microcuenca</i> .....	192
<b>Tabla 19</b> <i>Cálculo de Curva Número Promedio</i> .....	194
<b>Tabla 20</b> <i>Distribución Temporal de Precipitación para una Tormenta de Diseño</i> .....	195

<b>Tabla 21</b> <i>Estación Meteorológica San Salvador</i> .....	197
<b>Tabla 22</b> <i>Estación Meteorológica UES</i> .....	198
<b>Tabla 23</b> <i>Cálculo de Intensidad Ponderada para Estaciones Meteorológicas</i> .....	199
<b>Tabla 24</b> <i>Tiempo y Precipitación para Hietograma</i> .....	202
<b>Tabla 25</b> <i>Características por zona de la Microcuenca Tutunichapa</i>	217
<b>Tabla 26</b> <i>Cálculo de Curva Número Promedio para el año 1995</i> .....	221
<b>Tabla 27</b> <i>Cálculo de Curva Número Promedio</i> .....	229
<b>Tabla 28</b> <i>Comparación de escenarios 1995, 2024 y crecimiento urbano máximo</i> .....	235
<b>Tabla 29</b> <i>Comparación caudal pico por escenarios</i> .....	235
<b>Tabla 30</b> <i>Comparación escorrentía directa por escenarios</i> .....	236
<b>Tabla 31</b> <i>Comparación infiltración por escenarios</i> .....	236
<b>Tabla 32</b> <i>Cálculo de Curva Número Promedio</i> .....	239
<b>Tabla 33</b> <i>Áreas para Posible Aplicación de Pavimentos Permeables</i> .....	248
<b>Tabla 34</b> <i>Áreas Reducidas para Posible Aplicación de Pavimentos Permeables</i> .....	248
<b>Tabla 35</b> <i>Aporte de Infiltración por Cada Zona</i> .....	260

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación (2. 1).....	28
Ecuación (2. 2).....	29
Ecuación (2. 3).....	31
Ecuación (2. 4).....	62
Ecuación (2. 5).....	63
Ecuación (2. 6).....	67
Ecuación (2. 7).....	68
Ecuación (2. 8).....	68
Ecuación (2. 9).....	68
Ecuación (2. 10).....	68
Ecuación (2. 11).....	69
Ecuación (2. 12).....	79
Ecuación (2. 13).....	80
Ecuación (2. 14).....	81
Ecuación (2. 15).....	81
Ecuación (2. 16).....	81
Ecuación (2. 17).....	82
Ecuación (2. 18).....	82
Ecuación (2. 19).....	82
Ecuación (2. 20).....	165
Ecuación (2. 21).....	175
Ecuación (2. 22).....	175
Ecuación (2. 23).....	184
Ecuación (2. 24).....	184
Ecuación (2. 25).....	184
Ecuación (2. 26).....	184
Ecuación (2. 27).....	186
Ecuación (2. 28).....	186
Ecuación (2. 29).....	186

## INTRODUCCIÓN

La microcuenca Tutunichapa, ubicada en el Área Metropolitana de San Salvador, enfrenta desde hace décadas un marcado desequilibrio en su ciclo hidrológico debido al acelerado proceso de urbanización que ha convertido cerca del 77 % de su superficie en áreas impermeables; como resultado, el incremento en los volúmenes y la velocidad de la escorrentía superficial reduce la infiltración de agua y agrava los eventos de inundación, al tiempo que la contaminación generada por residuos en cauces y el envejecimiento de la red de drenaje deterioran la calidad de vida de los habitantes y la capacidad de respuesta de las instituciones. Por otra parte, la creciente frecuencia e intensidad de fenómenos meteorológicos extremos, potenciada por el cambio climático, evidencia la necesidad urgente de contar con un marco técnico y normativo que oriente tanto la planificación de nuevas obras como la adaptación de las existentes, a fin de mitigar el impacto hidrológico y proteger el entorno urbano.

En este sentido, el presente estudio técnico tiene como objetivo general fomentar la creación de un reglamento que permita reducir el impacto hidrológico en la microcuenca Tutunichapa. Para alcanzarlo, se plantean cuatro objetivos específicos: en primer lugar, identificar las principales fuentes de alteración hidrológica en la cuenca; en segundo lugar, diagnosticar su situación actual mediante un análisis hidrológico e hidráulico detallado; y finalmente, definir, por zonas, las medidas más adecuadas para minimizar el impacto que la escorrentía genera en la microcuenca.

Para cumplir con los objetivos propuestos, la investigación se estructura en cinco apartados interrelacionados. En primer lugar, se desarrolla una exhaustiva revisión bibliográfica y marco teórico que reúne los fundamentos del ciclo hidrológico, métodos de estimación de escorrentía y mejores prácticas de mitigación —tales como los Sistemas Urbanos de

Drenaje Sostenible (SUDS)—, así como estudios de caso comparables. A continuación, se analiza el marco legal salvadoreño, incluyendo normas ambientales, urbanísticas y de recursos hídricos, con el fin de identificar las restricciones vigentes para la impermeabilización del suelo y las responsabilidades institucionales. Seguidamente, se lleva a cabo el estudio hidrológico de la microcuenca (año base 2024), donde se delimitan sus características morfométricas y de drenaje, se elaboran curvas intensidad–duración–frecuencia y se modelan caudales de diseño mediante herramientas como SCS-CN y HEC-HMS.

Posteriormente, se realiza un análisis de escenarios y delimitación de zonas de riesgo al comparar condiciones históricas (1995) y actuales (2024), así como proyecciones de crecimiento urbano, lo que permite identificar subáreas vulnerables a inundaciones. Finalmente, el documento ofrece una propuesta de medidas de mitigación —entre las que se incluyen pavimentos permeables, obras de retención, drenaje sostenible y reforestación— y esboza el reglamento técnico que facilitará su aplicación práctica por parte de municipalidades y organismos reguladores. De este modo, el trabajo no solo diagnostica los factores que generan el impacto hidrológico en la microcuenca Tutunichapa, sino que también brinda herramientas normativas y técnicas para promover un desarrollo urbano sostenible.

## **CAPÍTULO I: GENERALIDADES**

## **1.1. ANTECEDENTES**

### **1.1.1. Antecedentes Históricos**

La microcuenca Tutunichapa al estar ubicada en el AMSS, ha sufrido la expansión del desarrollo urbano, aumentando el área impermeabilizada y modificando en gran medida la escorrentía superficial de la microcuenca, haciendo que se presenten desafíos hidrológicos significativos que afectan no solo el entorno natural, sino también, la calidad de vida de los habitantes quienes deben enfrentarse a las principales afectaciones como las inundaciones, los desbordamientos de ríos y daño en infraestructura e incluso pérdidas humanas. Las inundaciones son causadas por varios factores que a su vez están interrelacionados, entre los cuales se han identificado los siguientes:

Tomando de base lo visto en Google Earth y el uso de suelos, el 77% de la microcuenca Tutunichapa se encuentra urbanizado, la mayor parte de esta microcuenca está situada en el municipio de San Salvador Centro. Este grado de urbanización ha provocado una transformación significativa del suelo, resultando en la conversión de zonas verdes en áreas urbanas con alta densidad poblacional. Esta transformación ha conducido a la implementación de superficies impermeables, lo que ha disminuido la capacidad natural del suelo para la infiltración de agua de lluvia, en consecuencia, se ha observado una alteración drástica en el régimen de escorrentía superficial, caracterizada por un aumento en el volumen y la velocidad del flujo. Además, se ha reducido la evapotranspiración y la infiltración, dos procesos críticos en el ciclo hidrológico.

La ausencia de una institución responsable del mantenimiento y gestión de la red de aguas lluvias en San Salvador ha originado deficiencias estructurales en la infraestructura pluvial, atribuibles a la falta de mantenimiento, el agotamiento de la vida útil de los sistemas, el aumento de los caudales debido al rápido crecimiento urbano y el taponamiento de colectores por

contaminación proveniente de las urbanizaciones y calles. Esta contaminación también se transfiere a las quebradas, deteriorando la calidad del agua y contribuyendo a problemas adicionales como la escasez de agua potable (OPAMSS, 2021). Hasta el año 2018, la Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador (OPAMSS) incorporó en sus proyectos urbanísticos obras para el control de la escorrentía, tales como sistemas de detención diseñados para captar y almacenar temporalmente el flujo superficial, con el objetivo de liberarlo en periodos más prolongados. Además, se han publicado documentos técnicos como la *“Guía de Hábitats Urbanos Sostenibles”* y la *“Guía Técnica para el Diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenibles en el Área Metropolitana de San Salvador”*.

El cambio climático intensifica la cantidad e intensidad de las lluvias en El Salvador, lo que provoca eventos de precipitación más severos y un mayor riesgo de inundaciones y desbordamientos de ríos. Además, incrementa la frecuencia y severidad de eventos climáticos extremos, como tormentas y huracanes, que pueden causar daños graves a comunidades y ecosistemas. Algunos problemas de inundación en la microcuenca Tutunichapa registrados son los siguientes:

Hundimiento en la calle principal de la colonia y calle Tutunichapa III (SNET, 2002).

Fuertes lluvias ocasionaron problemas de inundaciones urbanas en: La colonia Santa Eugenia, Colonia Médica, Bulevar Tutunichapa y la 2da avenida norte en San Salvador, una de las causas fue tragantes tapados por basura. (SNET, 2009)

Lluvias de gran intensidad provocaron la crecida en quebradas y ríos de la capital ocasionando daños en varias viviendas de la Comunidad Tutunichapa IV. (SNET, 2009)

Desbordamiento de la quebrada Las Lajas (SNET, 2011)

Desbordamiento del Arenal Tutunichapa, no hubo necesidad de evacuar personas y no hubo daños en las viviendas, pero se realizó limpieza de basura y vegetación que obstaculizaba el drenaje del agua acumulada (SNET, 2012)

Basura y ripio en la quebrada Las Lajas dejó al menos diez vehículos dañados y varias casas inundadas cerca de la colonia Escalón. La correntada se extendió hasta la Avenida Másferrer Norte, dejando una estela de lodo, piedras, palos y adoquines arrancados de tajo de la comunidad Las Lajas. En el reporte se indicó que en la orilla de la quebrada se observaron promontorios de ripio (restos de ladrillos, arena, cemento, y tierra) producto de las construcciones que se desarrollan en la zona. Además, los residentes del lugar manifestaron que en esa zona llegan vehículos a dejar ripio y basura, tanto en la quebrada como en las calles y terrenos baldíos cerca de la quebrada. (elsalvador.com, 2015)

Inundaciones urbanas por colapso de la red de drenaje en AMSS, en: Colonia Flor Blanca y pasos a desnivel de 49 Av. Norte y 49 Av. Sur. (SNET, 2018)

Desbordamiento de la quebrada Las Lajas a la altura de la comunidad Tutunichapa, dejando al menos 20 viviendas afectadas (3 pasajes inundados). El máximo acumulado en la zona fue de 51.0 mm en estación Boquerón. (SNET, 2018)

En la Alameda Juan Pablo II y el Parque Infantil ciudadanos reportan en redes sociales varios árboles desplomados y que han cortado el cable del tendido eléctrico. Protección Civil anunció el desplazamiento de varios equipos para remover los árboles en la colonia Guatemala, en la 5 de noviembre. También se reporta en Avenida Tutunichapa la caída de un árbol sobre la parte trasera de un vehículo, en las cercanías del Centro Judicial Isidro Menéndez. En el parque de la Asamblea Legislativa también reportan un árbol derribado. Las inundaciones también se sumaron a las emergencias.

El río Urbina superó el nivel del puente de la 10 Avenida Norte en San Salvador y obligó a detener el tránsito. (ElMundo, 2022)

La tormenta tropical Julia hizo colapsar parte de un pasaje en la colonia El Bosque ubicado a la orilla del río El Arenal. (LPG, 2022)

La colonia El Bosque, a pocos metros de la alcaldía de San Salvador, fue una de las más afectadas, residentes se vieron obligados a evacuar debido a la crecida del río Urbina. El paso por el puente del Urbina, en el sector conocido como El Arenal fue restringido, así como el paso sobre la avenida Cuscatancingo, vía que conduce hacia el centro histórico de San Salvador. Otros puntos en los que el agua se acumuló fueron la colonia La Rábida (cerca a El Bosque), la colonia Santa Eugenia (cerca al mercado San Miguelito) la colonia Los Naranjos (cerca al mercado La Tiendona), sobre la alameda Juan Pablo II, la 49 avenida norte, entre otras. (elsalvador.com, 2023)

### **1.1.2. Antecedente Legales**

Los antecedentes históricos dejan en evidencia los desafíos que enfrenta la microcuenca ante los impactos hidrológicos, especialmente en el manejo de las aguas pluviales. Identificar las medidas necesarias que se adecuen a cada tipo de proyecto para enfrentar estos desafíos, requiere una comprensión detallada del marco legal e institucional que regula la gestión del territorio; ya que, la existencia de herramientas legales y su correcta implementación, son determinantes para la mitigación de los impactos hidrológicos, debido a que son herramientas que permiten regular la impermeabilización del territorio, las extracciones de agua para consumo humano, la necesidad de agua de importación y la disposición de las aguas residuales, lo que está directamente relacionado con las medidas para mitigar cualquier problemática relacionada con la alteración del ciclo hidrológico.

Código Municipal y Ordenanza de San Salvador: Tiene por objeto desarrollar los principios constitucionales referentes a la organización, funcionamiento y ejercicio de las facultades autónomas de los municipios. (Gobierno de San Salvador, 2015)

Ley de Medio Ambiente: Esta ley establece el marco general para la protección y conservación del medio ambiente en El Salvador. Incluye disposiciones específicas para la gestión de recursos hídricos, que abarcan el manejo de aguas lluvias y el control de la contaminación en cuencas hidrográficas. La ley promueve el uso sostenible del territorio y fomenta la implementación de medidas preventivas contra desastres naturales, como las inundaciones. (CEPAL, 2012)

Reglamento General de la Ley de Medio Ambiente (2000): Tiene por objeto desarrollar las normas y preceptos contenidos en la Ley del Medio Ambiente, a la cual se adhiere como su instrumento ejecutorio principal. (Reglamento General de la ley de Medio Ambiente, 1998)

Ley de Protección Civil, Prevención y Mitigación de Desastres: Este marco legal fortalece las capacidades del país para prevenir y mitigar los efectos de los desastres naturales, incluyendo inundaciones. Establece las responsabilidades de las instituciones públicas y privadas en la gestión del riesgo, y promueve la preparación y respuesta efectiva ante emergencias climáticas. (Ley de Protección Civil, 2005)

Ley de Urbanismo y Construcción. El Viceministerio de Vivienda y Desarrollo Urbano, será el encargado de formular y dirigir la Política Nacional de Vivienda y Desarrollo Urbano; así como de elaborar los Planes Nacionales y Regionales y las disposiciones de carácter general a que deben sujetarse las urbanizaciones, parcelaciones y construcciones en todo el territorio de la República (Ley de Urbanismo y Construcción, 1991)

Reglamento a la Ley de Urbanismo y Construcción: Este reglamento establece los lineamientos técnicos para el desarrollo urbanístico, que

incluyen la planificación y construcción de sistemas de drenaje pluvial. Exige que los proyectos de desarrollo urbano incorporen infraestructuras adecuadas para manejar las aguas lluvias, reduciendo el riesgo de inundaciones a través de sistemas de retención, infiltración y recolección. (Reglamento a la Ley de Urbanismo y construcción , 2012)

Código de Salud: Incluye disposiciones sobre el manejo de aguas residuales y pluviales para prevenir la contaminación y asegurar condiciones sanitarias adecuadas en áreas urbanas. Establece normas para el diseño y mantenimiento de sistemas de alcantarillado que son esenciales para el manejo efectivo de aguas lluvias. (Eregulations, 1998)

Ley de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Área Metropolitana de San Salvador y los Municipios Aledaños: Esta ley busca coordinar el desarrollo y la ordenación del territorio en la región metropolitana, enfocándose en el uso eficiente y sostenible del suelo. Se enfatiza la necesidad de integrar la gestión de aguas lluvias en la planificación urbana para minimizar el impacto de las inundaciones. La ley establece pautas para la zonificación, uso del suelo y regulación de nuevas construcciones, asegurando que incluyan medidas para el manejo de aguas lluvias y la preservación de áreas verdes. (OPAMSS, 2023)

Reglamento a la Ley de Desarrollo y Ordenamiento territorial del Área Metropolitana de San Salvador y de los Municipios Aledaños con sus Anexos: El presente Reglamento tiene por objeto establecer las disposiciones que regularán el funcionamiento de las Instituciones creadas por la Ley de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Área Metropolitana de San Salvador; establecer los procedimientos para la formulación de los diferentes Instrumentos de Planificación del Desarrollo Urbano del AMSS, estableciendo los mecanismos para su aprobación, aplicación y/o ejecución; regular el Régimen Urbanístico del suelo, determinando los requisitos que deberán cumplir las distintas clases de suelo, parcelación y reparcelaciones, así como

también, los tipos de Actuación Urbanística y valoraciones del Suelo Urbano y Rural. (OPAMSS, 2023)

Ley General de Recursos Hídricos: Tiene el propósito que el acceso al agua potable, de calidad, segura, suficiente y a un costo accesible y asequible para todos, es decir un derecho fundamental para los seres humanos. Estas acciones van intrínsecamente relacionado al derecho a la salud y a la vida, es importante un agua limpia para el buen desarrollo y existencia de una sociedad. (ASA, 2022)

### **1.1.3. Instituciones Involucradas**

Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN): Lidera la gestión ambiental y de recursos hídricos en el país. El MARN es responsable de coordinar políticas nacionales para la conservación de cuencas hidrográficas y trabaja en la implementación de proyectos para la adaptación al cambio climático, que incluyen medidas para mejorar la resiliencia ante inundaciones.

Dirección General de Protección Civil: Coordina la gestión de riesgos de desastres y la respuesta a emergencias climáticas. Esta institución desarrolla planes de contingencia y realiza actividades de sensibilización comunitaria para preparar a la población ante eventos hidrometeorológicos extremos.

Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador (OPAMSS): Esta oficina es fundamental para la regulación del desarrollo urbano en el área metropolitana de San Salvador. La OPAMSS se encarga de la evaluación y aprobación de proyectos urbanísticos, asegurando que cumplan con las normativas de manejo de aguas lluvias y contribuyan a mitigar el riesgo de inundaciones. Además, implementa planes de ordenamiento territorial que integran estrategias de manejo de cuencas y mejora del drenaje pluvial.

Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA): Aunque su enfoque principal es el agua potable y saneamiento, ANDA tiene un papel importante en la planificación y desarrollo de infraestructuras de drenaje pluvial. Trabaja en colaboración con otras instituciones para asegurar que las redes de alcantarillado puedan manejar adecuadamente las aguas lluvias y reducir el riesgo de inundaciones urbanas.

El Ministerio de Obras Públicas y de Transporte de El Salvador (MOPT): Es una institución estatal que opera principalmente en el sector de infraestructura vial creado bajo decreto legislativo en 1917.

La Autoridad Salvadoreña del Agua (ASA): Es una institución comprometida con la protección y preservación del vital recurso hídrico en El Salvador. Con una visión clara y una misión en mente, la ASA se ha propuesto dos objetivos estratégicos de gran importancia y trascendencia para el futuro de la nación.

Viceministerio de Vivienda y Desarrollo Urbano: Este Viceministerio tiene como propósitos principales formular y dirigir la Política Nacional de Vivienda y Desarrollo Urbano; así como elaborar los planes nacionales y regionales y las disposiciones de carácter general a que deban sujetarse las urbanizaciones, parcelaciones, asentamientos en general y construcciones en todo el territorio de la República.

#### **1.1.4. Manuales y Guías Técnicas**

Guía para la Gestión Integrada de Cuencas Hidrográficas: Promueve un enfoque holístico y sostenible para la gestión de cuencas, integrando aspectos ambientales, sociales y económicos. Esta guía fomenta la participación comunitaria y la colaboración interinstitucional para mejorar la resiliencia de las cuencas hidrográficas ante eventos climáticos extremos, como las lluvias intensas que afectan la microcuenca Tutunichapa. (Global Water Partnership, 2012)

Estrategia Nacional del Manejo de Cuencas Hidrográficas de El Salvador: Ha sido elaborada por la Dirección General de Ordenamiento Forestal, Cuencas y Riegos (DGFCR) a través del Área de Cuencas Hidrográficas y Conservación de Suelos, con el apoyo técnico de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO- El Salvador) y la participación de diversos actores. (Dirección General de Ordenamiento Forestal, 2017)

Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres: Establece estrategias y acciones para reducir la vulnerabilidad de las comunidades a desastres naturales, incluyendo inundaciones. El plan incluye medidas para fortalecer la infraestructura de drenaje pluvial y mejorar la capacidad de respuesta ante emergencias relacionadas con lluvias intensas. (MINSAL, 2017)

Guía de Buenas Prácticas para el Manejo de Aguas Lluvias: Esta guía, desarrollada por organizaciones locales e internacionales, ofrece recomendaciones para la implementación de infraestructuras verdes, como techos verdes, jardines de lluvia y pavimentos permeables, que ayudan a reducir la escorrentía superficial y mejorar la infiltración del agua de lluvia. (MARN, 2017)

Guía Hábitats Urbanos Sostenibles: La guía de edificaciones sostenibles formulada por la Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador, con la colaboración del Green Building Council de El Salvador, apuesta a la mejora del medio ambiente urbano de la metrópoli con la implementación gradual de la normativa HAUS en las distintas etapas de los proyectos o desarrollos urbanísticos, ya sea desde el diseño, construcción o el funcionamiento de los mismos. (OPAMSS, 2021)

Resumen Ejecutivo Guía Técnica de Diseño SUDS: El principal objetivo de este resumen ejecutivo es facilitar al usuario un informe con los principales puntos reflejados en la guía de manera que pueda hacerse una idea de las

diferentes técnicas de drenaje urbano sostenibles recomendadas para el AMSS y de los pasos a seguir en su diseño. (OPAMSS, 2021)

## 1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El municipio de San Salvador Centro, y su distrito San Salvador es un sector de los más pobladas en la Republica de El Salvador con una cantidad de 316,90 habitantes de acuerdo al VI Censo de población y V de vivienda 2007. El aumento en la población en esta área ha provocado la necesidad de la construcción de diferentes obras civiles y equipamientos como construcción de viviendas, edificios de apartamentos, edificios de oficina, naves industriales, centros turísticos, calles, edificios de uso público como hospitales y escuelas, lo cual si bien es cierto ha contribuido a una mejora significativa en la calidad de vida de las personas, pero a su vez, ha generado una serie de alteraciones al ciclo hidrológico, contribuyendo a la ocurrencia de ciertos eventos climáticos extremos en el territorio.

Uno de los problemas que se pretende abordar en la investigación es el evidente impacto hidrológico que se ha creado en los últimos años, considerando para la investigación a la Subcuenca Tutunichapa y poder identificar los causantes de los problemas hídricos que se presentan en ella y proponer mejoras en los proyectos nuevos y existentes. Históricamente las comunidades en esta microcuenca presentan casos de inundaciones en épocas de lluvia, por ejemplo, la comunidad Tutunichapa que de acuerdo al Registro Histórico de Inundaciones del MARN se tiene bajo constante vigilancia en épocas de lluvia ya que se han reportado inundaciones y desbordes de ríos en épocas anteriores. Y los problemas de esta zona no se limita a esto, ya que también se tiene reportes de quejas en el servicio de agua potable, el cual suele ser interrumpido constantemente dejando a la comunidad sin agua durante horas o incluso días. Diversos factores que deben ser considerados, como las medidas tecnológicas implementadas, las normativas y leyes que regulan la urbanización y la construcción, la calidad de la gestión urbana que permite integrar cuatro procesos interrelacionados: planificación, administración, regulación y financiamiento del desarrollo urbano, y la falta de mantenimiento de la red de aguas. Por lo tanto, el tema

de la generación de inundaciones debe ser abordado en los aspectos políticos, sociales, económicos, culturales, tecnológicos y ambientales, ya que todos participan en él.

El desarrollo urbano es muy importante para poder tener una mejor calidad de vida, lo que puede incluir acceso a servicios básicos tales como centros de salud y educación, la construcción de infraestructura que contribuya a una mejora en la economía nacional, entre otros; sin embargo, es importante valorar al medio ambiente y buscar un desarrollo sostenible que brinde equilibrios principalmente al ciclo hidrológico, ya que en la actualidad se conocen tanto sistemas constructivos, de drenaje y materiales de construcción que pueden asegurar una mitigación al impacto hidrológico.

## **1.3. OBJETIVOS**

### **1.3.1. Objetivo General**

Presentar un estudio técnico que diagnostique el comportamiento hidrológico de la microcuenca Tutunichapa y permita formular medidas de mitigación del impacto hidrológico, a partir del análisis de escenarios y la aplicación de herramientas de modelación hidrológica.

### **1.3.2. Objetivos Específicos**

1. Identificar las principales fuentes de impacto hidrológico en la microcuenca Tutunichapa a partir de su evolución urbana, características morfométricas y uso del suelo.
2. Determinar el estado actual y diagnóstico de la microcuenca Tutunichapa a través de un análisis hidrológico.
3. Proponer medidas para la reducción del impacto hidrológico basadas en un análisis comparativo de escenarios hidrológicos en la microcuenca Tutunichapa.
4. Identificar zonas vulnerables a inundaciones dentro de la microcuenca Tutunichapa mediante modelación hidrológica.

## 1.4. ALCANCES

- El área de estudio estará limitada a la microcuenca Tutunichapa, la cual está ubicada en el occidente de San Salvador. Esta delimitación está hecha con el objetivo de proponer medidas concretas en la reducción del impacto hidrológico de la microcuenca.
- La investigación se desarrollará con un enfoque bibliográfico y técnico, basado en el análisis de información proveniente de fuentes oficiales como el MARN, el uso de software de simulación hidrológica como HEC-HMS y QGIS, no se realizará trabajo de campo o toma directa de mediciones in situ.
- Se determinará el estado actual de la microcuenca utilizando los métodos aprobados por las normas técnicas o leyes correspondientes a cada estudio.
- Se identificará las medidas de gestión hidrológicas existentes, documentando políticas, regulaciones, tecnologías y prácticas de construcciones utilizadas para mitigar el impacto hidrológico en la microcuenca Tutunichapa con el fin de tener un panorama más completo de todas las acciones que actualmente se aplican.
- El estudio determinara medidas de mitigación del impacto hidrológico para mejorar la gestión de aguas lluvias en la microcuenca Tutunichapa, sin embargo, no se analizarán los componentes hidráulicos existentes en la microcuenca,

## 1.5. LIMITACIONES

- Los datos a utilizar para el estudio hidrológico (Curvas IDF, mapas de suelos, censos de población, modelos de elevación, etc.) serán los proporcionados por entidades de la República de El Salvador. La disponibilidad y resolución de esta información influyeron directamente en los resultados obtenidos.
- Para el análisis de microcuenca no se utilizarán programas o software de pago, únicamente programas gratuitos o programas que ofrecen licencias estudiantiles gratuitas.
- La precisión de los análisis hidrológicos como la delimitación de la microcuenca y el cálculo de características morfométricas está condicionada por el nivel de detalle de los Modelos Digitales de Elevación y mapas de uso del suelo utilizados.

## 1.6. JUSTIFICACIÓN

La microcuenca Tutunichapa, ubicada en la subcuenca del río Acelhuate y la cuenca del río Lempa, forma parte de la región hidrográfica del Pacífico. Específicamente, se encuentra en la cuenca del Arenal Monserrat, en el occidente de la ciudad de San Salvador. El crecimiento y desarrollo urbano en el Área Metropolitana de San Salvador (AMSS) han generado numerosos beneficios, como la creación de empleo, la mejora en el acceso a bienes y servicios, y el desarrollo de infraestructura. Sin embargo, este crecimiento también ha traído consigo importantes desafíos hidrológicos.

La expansión urbana ha aumentado significativamente la demanda de agua y ha provocado una gran impermeabilización de suelos en la microcuenca Tutunichapa. En base a la vista en Google Earth aproximadamente el 77% de esta microcuenca está urbanizado, principalmente en el municipio de San Salvador Centro. La transformación de zonas verdes en áreas urbanas con alta densidad poblacional ha reducido la capacidad natural del suelo para la infiltración de agua de lluvia. Esto ha llevado a una notable alteración del régimen de escorrentía superficial, caracterizada por un incremento en el volumen y la velocidad del flujo de agua, además, se ha observado una disminución en la evapotranspiración y la infiltración, procesos críticos en el ciclo hidrológico.

Estas alteraciones han dado lugar a problemas significativos, incluyendo inundaciones más frecuentes y severas, olas de calor, desbordamientos de ríos, y daños a la infraestructura. Estos eventos han resultado en pérdidas económicas considerables, estimadas en promedio por evento de \$59,000. (Banco Interamericano del Desarrollo , 2016)

La contaminación de cuerpos de agua y la modificación del hábitat natural también son consecuencias de la expansión urbana desmedida. La vulnerabilidad de las infraestructuras y los sistemas naturales frente a estos

cambios en el ciclo hidrológico es evidente, subrayando la necesidad urgente de implementar medidas que mitiguen el impacto hidrológico.

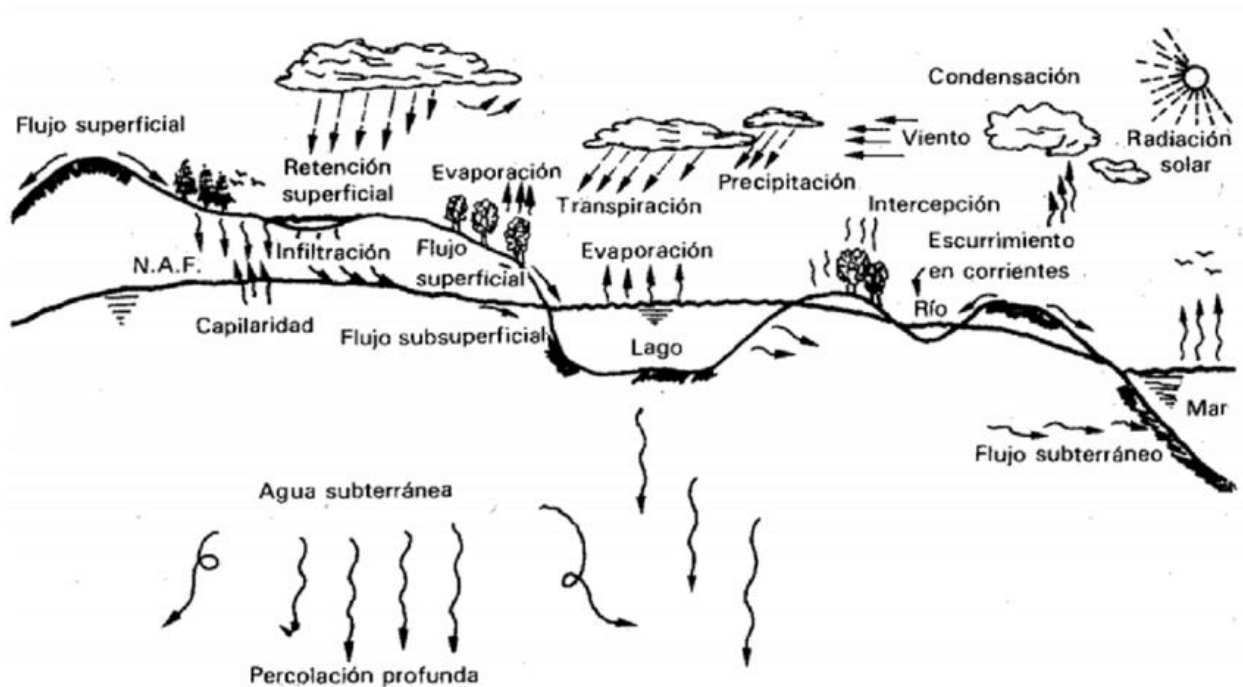
Para abordar estos desafíos, se propone una reglamentación que busca identificar y gestionar los principales impactos hidrológicos en la microcuenca Tutunichapa. Además de realizar un planteamiento que muestre la importancia de implementar medidas enfocadas en la reducción del impacto hidrológico como es el uso de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), que no solo contribuirán a la protección del medio ambiente, sino que también ofrecerán beneficios económicos y sociales significativos para los habitantes del área. La implementación efectiva de estas medidas permitirá alcanzar un equilibrio entre el desarrollo urbano y la sostenibilidad ambiental, beneficiando tanto a constructores como a municipalidades en la gestión de los desafíos hidrológicos actuales.

## **CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO**

## 2.1. El Ciclo Hidrológico Natural

El ciclo hidrológico es un proceso continuo y sin fin del agua existente en el mundo, es un proceso físico en el cual se estudian las diferentes fases por donde el agua se traslada y cambia en sus estados, no tiene un principio o un fin, pero se puede tomar como punto de partida la evaporación para mejorar su comprensión. El agua que se encuentra sobre la superficie terrestre se evapora, luego al enfriarse el vapor de agua se condensa y cae hacia la tierra en forma de lluvia, granizo o nieve, el agua precipitada se dispersa de muchas formas, puede volver a evaporarse o ser interceptada por las plantas o construcciones, luego fluye por la superficie hasta las corrientes o se infiltra, incluso puede permanecer en la superficie en forma de nieve hasta que al llegar a su punto de fusión puede fluir e incorporarse hacia las corrientes. (Aparicio Mijares, 1992)

El agua interceptada la mayor parte es retenida temporalmente en las cercanías donde cae y regresa eventualmente a la atmosfera por evaporación. De la precipitación que llega a las corrientes, una parte se infiltra y otra llega hasta los océanos y otros grandes cuerpos de agua. El agua es utilizada por los animales y las plantas, la mayor parte del agua utilizada por las especies vivas sólo fluye a través de su cuerpo. Del agua infiltrada una parte es absorbida por las plantas y luego transpirada hacia la atmosfera y otra parte fluye bajo la superficie de la tierra hacia las corrientes, el mar u otros cuerpos de agua o bien hacia zonas más profundas del suelo, proceso que se conoce como percolación, para ser almacenada como agua subterránea y luego aflorar en manantiales, ríos o el mar.

**Figura 1***El Ciclo Hidrológico*

Nota: Se puede observar las diferentes etapas del ciclo hidrológico (Aparicio Mijares, 1992)

## 2.2. Componentes Del Ciclo Hidrológico

### 2.2.1. La precipitación

La precipitación es la fuente principal del agua en la superficie terrestre, el agua cae de las nubes generadas debido al efecto de la temperatura, la presión y su peso específico, la precipitación puede expresarse en función de cómo cae a la superficie, en estado sólido el granizo o la escarcha, en estado líquido, lluvia o rocío, y en forma de vapor como neblina. Para que se formen las nubes el agua que se evapora debe elevarse hasta que la presión y la temperatura sean necesarias para que exista condensación, es decir, hasta

que se dé el punto de rocío. Cuando una masa de aire asciende, se ve sujeta a una presión gradualmente decreciente; entonces se expande y disminuye su temperatura.

Cuando la temperatura disminuye lo suficiente como para quedar por abajo del punto de rocío, puede comenzar la condensación, esta se da al unirse varias gotas que forman las nubes cuyo diámetro está entre 5 y 100 micras para formar gotas más grandes; sin embargo, para que esta unión se presente en cantidades significativas sin la intervención de otros elementos, es necesario que la supersaturación o sea temperaturas más bajas del punto de rocío sea mayor de la que normalmente se produce en la atmósfera; en esas condiciones se tendrán núcleos de condensación que es la unión de varias gotas uniformes. En realidad, estos núcleos se forman, con las condiciones de supersaturación comunes, alrededor de porciones muy pequeñas de naturaleza mineral u orgánica presentes en la atmósfera y provenientes de erosión orográfica, humos de combustiones naturales o artificiales, polen y, en lugar destacado, cristales de sal marina.

De esta manera se forman gotas más grandes con diámetros de 100 a 500 micras que tienen ya suficiente peso para caer bajo la acción de la fuerza de gravedad. Durante su caída las gotas crecen aún más en virtud de su coalescencia, con lo que pueden alcanzar diámetros de 5 a 7 mm o mayores. (Aparicio Mijares, 1992)

La precipitación más común en El Salvador es la lluvia, el tipo de lluvia dependerán de la humedad del aire y de la influencia del aire ascendente en función a la masa de aire. Los tipos de lluvia derivan de las condiciones que las provocan, se tienen: la ciclónica, orográfica y la convectiva.

Las lluvias orográficas se originan al chocar el aire contra una cadena montañosa y se ve obligado a ascender, al ascender se enfría y se originan

precipitaciones, como producto de los vientos cargados con aire húmedo que condensan el vapor y forman nubes y precipitaciones.

Las lluvias convectivas se producen en zonas llanas y se generan por elevación del aire caliente en función a la radiación solar, condensan vapor en zonas frías, siendo acompañadas, algunas veces, por efectos de descarga eléctrica.

Las Lluvias ciclónicas o también conocidas como frontales se originan cuando entran en contacto dos masas de aire con distinta temperatura. El aire frío se desplaza hasta quedar por debajo del aire caliente, el cual hace que se eleve y al hacerlo, se enfría y da lugar a precipitaciones, estas lluvias son comunes en las zonas templadas del planeta.

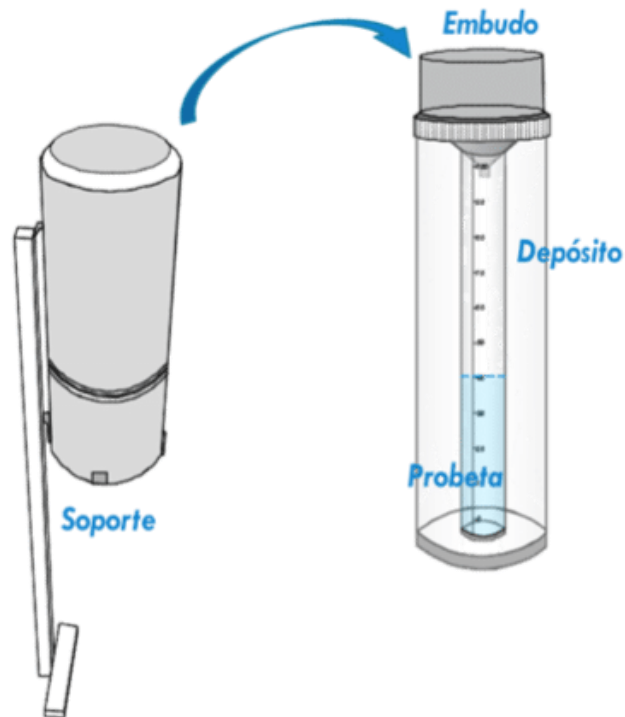
### **Aparatos para la medición de precipitación**

Entre los aparatos que se tienen para medir la precipitación están los pluviómetros, pluviógrafos y equipos modernos como lo son las estaciones meteorológicas automáticas.

Pluviómetros: están formados por un recipiente de área transversal cilíndrico graduado, al que descarga un embudo que capta el agua de lluvia, se acostumbra a colocar en el embudo un par de mallas para evitar la entrada de basura u otros objetos, estos dispositivos miden en mm de lluvia, un mm de lluvia es equivalente a derramar un litro de agua sobre un metro cuadrado de superficie.

**Figura 2**

*Instrumento de Medición, Pluviómetro*

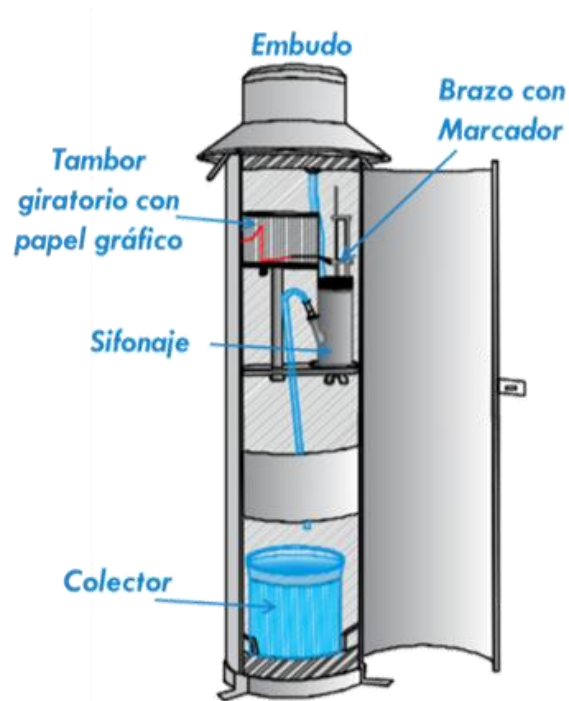


Nota: Se puede observar cómo se mide la cantidad de la precipitación mediante el llenado de una probeta. (IMN, 2022)

Pluviógrafos: son semejantes a los pluviómetros, con la diferencia de que tienen un mecanismo para producir un registro continuo de precipitación. Este mecanismo está formado por un tambor que gira a velocidad constante sobre el que se coloca un papel graduado especialmente. En el recipiente se coloca un flotador que se une mediante un juego de varillas a una plumilla que marca las alturas de precipitación en el papel, el registro que se obtiene de un pluviógrafo se llama pluviograma. (Aparicio Mijares, 1992)

**Figura 3**

*Instrumento de Medición, Pluviógrafo*



*Nota: Se observa el interior de un pluviógrafo en el cual dentro se encuentra el mecanismo que permite graficar los registros meteorológicos. (IMN, 2022)*

Estaciones meteorológicas automáticas: miden y registran datos meteorológicos, los cuales son almacenados y transmitidos de forma automática, sin la necesidad de la presencia de personal. Utiliza sensores conectados a una unidad central que almacena y procesa la información. Tiene un sistema de alimentación (batería, regulador, panel solar) y de protección eléctrica. Puede tener componentes de comunicación para transmisión de datos. Este equipo se instala en una torre de 2 m o 10 m, dependiendo de los parámetros a medir. (IMN, 2022)

#### Figura 4

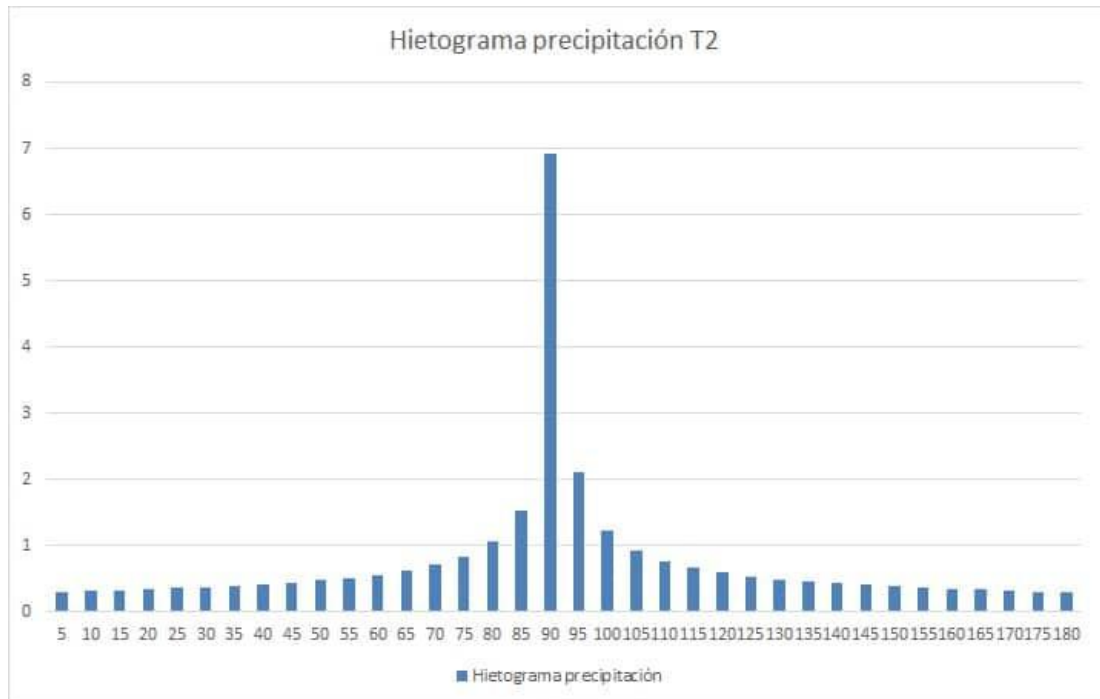
##### Estación Meteorológica Automática



*Nota: Vista de una estación meteorológica que puede medir distintos parámetros como lluvia acumulada, temperatura, humedad del aire, entre otros parámetros. (IMN, 2022)*

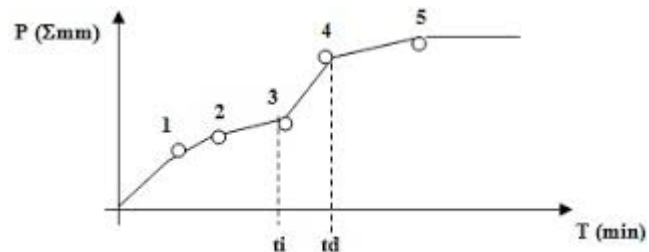
Algunas formas graficas que se tienen para representar precipitación son las siguientes:

Hietogramas: son gráficos de barras que representan la cantidad de lluvia recibida por un pluviómetro y pluviógrafo medida normalmente en mm, en intervalos de tiempo generalmente iguales a lo largo de la duración de la tormenta. En este grafico se puede obtener información importante como los momentos de mayor y menor cantidad de lluvia.

**Figura 5***Hietograma de Precipitación*

*Nota: Ejemplo de un hietograma de precipitación donde se observa una intensidad mayor para tiempos de 90 min. (IMN, 2022)*

Curva masa de precipitación: esta curva representa la cantidad de lluvia acumulada recibida por un pluviógrafo, desde el inicio de la tormenta hasta su finalización, dicha curva siempre es creciente, y la pendiente en cualquier punto y tiempo de la curva es igual a la intensidad de la lluvia en ese instante.

**Figura 6***Gráfico Curva Masa*

*Nota: Se puede notar en la figura que se puede obtener una relación entre la precipitación y el tiempo que esta dura. (Aparicio Mijares, 1992)*

### **2.2.1.1. Métodos para el Cálculo de Lluvia Ponderada**

En el apartado anterior se observó que existen distintos aparatos y representaciones gráficas que se usan para medir y representar la lluvia en el punto donde está instalado dicho aparato; por lo que, para encontrar la lluvia ponderada en una cuenca o en el área de estudio de un proyecto es necesario calcularla mediante métodos que involucran las estaciones dentro o cercanas a la cuenca, para ello existen tres métodos para este análisis, el método aritmético, método de polígonos de Thiessen y el método de las isoyetas.

#### **Método aritmético**

El método aritmético consiste en obtener el promedio aritmético de las precipitaciones registradas en cada estación, es el más simple de todos, ya que no considera la ubicación de las estaciones ni la manera en que se distribuye la lluvia en la cuenca.

$$\bar{h}_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_{pi}$$

Ecuación (2. 1)

Donde:

$\bar{h}_p =$  *Altura de precipitación media*

$h_{pi} =$  *Altura de precipitación registrada en la estación*

$n =$  *Número de estaciones*

### ***Método de los polígonos de Thiessen***

El método de los polígonos de Thiessen consiste en unir las estaciones pluviográficas por medio de líneas rectas, formando triángulos con las más cercanas, posteriormente se trazan mediatrices de los lados de los triángulos, mismas que por geometría se unirán en un solo punto, determinando una serie de polígonos irregulares alrededor de una estación, de forma que el perímetro de los polígonos delimite el área de influencia de cada uno de ellos. Este método sí toma en cuenta la distribución de las estaciones, pero no los factores topográficos

$$\bar{h}_p = \frac{1}{A_T} \sum_{i=1}^n A_i h_{pi} \quad \text{Ecuación (2. 2)}$$

Donde:

$\bar{h}_p =$  *Altura de precipitación media*

$h_{pi} =$  *Altura de precipitación registrada en la estación*

$A_i =$  *Área de influencia de la estación*

$A_T =$  *Área total de la cuenca*

$n =$  *Número de estaciones*

**Figura 7**

*Esquema del Método Polígonos de Thiessen*



Nota: En la figura la representación de las estaciones se hace con puntos de color verde, mientras que las líneas punteadas representan los triángulos para trazar las mediatrices y posteriormente las líneas de negro sólido representan los polígonos de influencia de cada estación. (Calixto, 2022)

### ***Método curvas isoyetas***

El método más preciso es el de las isoyetas, ya que, a diferencia de los polígonos de Thiessen, en este si se toman en cuenta los factores topográficos, si las curvas son trazadas de manera correcta. Este método consiste en trazar en base a la información de las estaciones, líneas que unen puntos de igual altura de precipitación, como si se estuvieran trazando curvas de nivel en topografía, su cálculo es similar a la ecuación de los polinos de Thiessen, pero ahora el peso el área  $A'$ , entre cada dos isoyetas y la cantidad que pesa es la altura de precipitación promedio entre las dos curvas.

$$\bar{h}_p = \frac{1}{A_T} \sum_{i=1}^{n'} A'_i \bar{h}_{pi}$$

Ecuación (2. 3)

Donde:

$\bar{h}_p$  = Altura de precipitación media

$h_{pi}$  = Altura de precipitación registrada en la estación

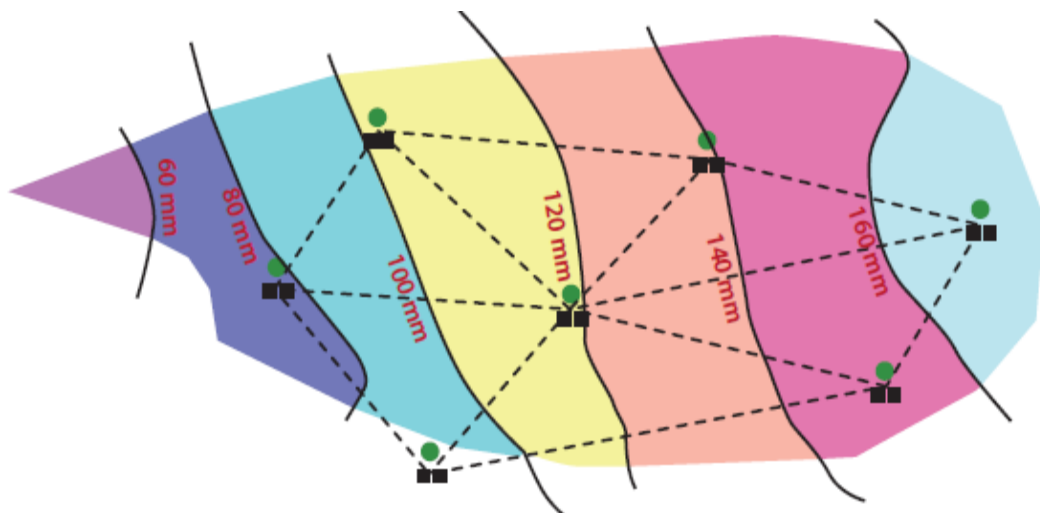
$A'_i$  = Áreas consideradas

$A_T$  = Área total de la cuenca

$n$  = Número de áreas

### Figura 8

Esquema Método de Curvas Isoyetas



Nota: Se observan las curvas isoyetas que confinan áreas en las cuales se toma una determinada altura de precipitación (Calixto, 2022)

### **2.2.2. Escurrimiento**

El escurrimiento se define como el agua proveniente de la precipitación que circula sobre o bajo la superficie terrestre y que llega a una corriente para finalmente ser drenada hasta la salida de la cuenca. Se tienen tres tipos de escurrimiento, el escurrimiento superficial, escurrimiento subsuperficial y escurrimiento subterráneo. (Aparicio Mijares, 1992)

Una vez que la precipitación alcanza la superficie del suelo, se infiltra hasta que las capas superiores del mismo se saturan. Posteriormente, se comienzan a llenar las depresiones del terreno y, al mismo tiempo, el agua comienza a escurrir sobre su superficie. Este escurrimiento se produce mientras el agua no llegue a cauces bien definidos. Una vez que llega a un cauce bien definido se convierte en escurrimiento en corrientes. El flujo sobre el terreno, junto con el escurrimiento en corrientes, forma el escurrimiento superficial. (Aparicio Mijares, 1992)

Una parte del agua de precipitación que se infiltra escurre cerca de la superficie del suelo a esta parte del escurrimiento se le llama escurrimiento subsuperficial, la otra parte, que se infiltra hasta niveles inferiores al freático, se denomina escurrimiento subterráneo. De los tres tipos de escurrimiento, el superficial es el que llega más rápido hasta la salida de la cuenca, por ello está relacionado directamente con una tormenta particular y entonces se dice que proviene de la precipitación en exceso o efectiva y que constituye el escurrimiento directo. (Aparicio Mijares, 1992)

El escurrimiento subterráneo es el que de manera más lenta llega hasta la salida de la cuenca puede tardar incluso años en llegar y en general, difícilmente se le puede relacionar con una tormenta particular. Al producirse bajo el nivel freático, es el único que alimenta a las corrientes cuando no hay lluvias y por eso se dice que forma el escurrimiento base, al igual que el escurrimiento subsuperficial. (Aparicio Mijares, 1992)

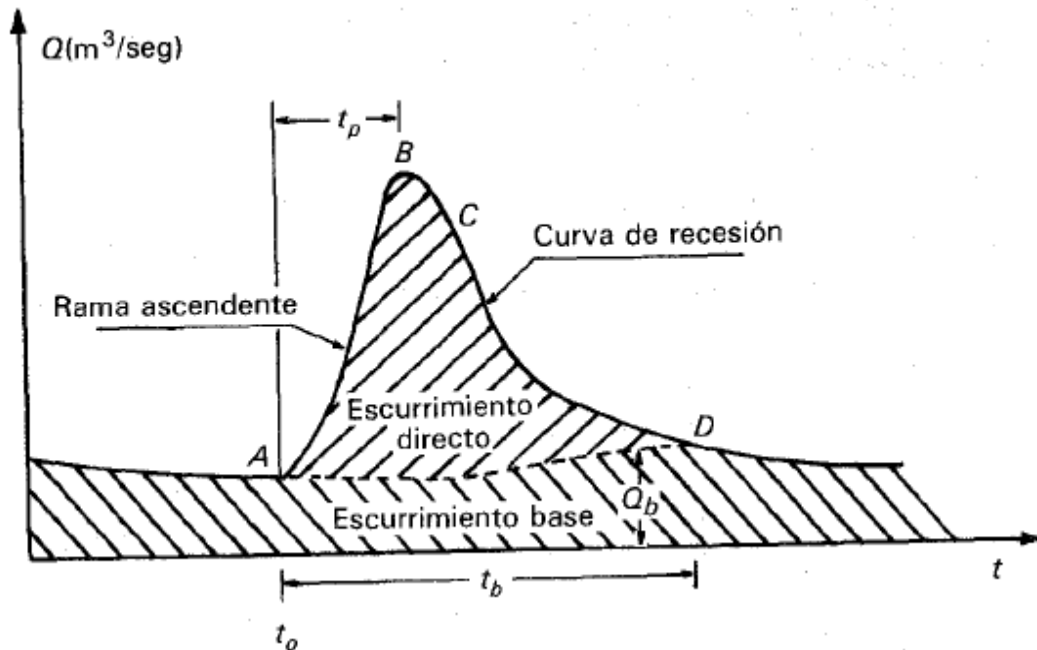
El escurrimiento subsuperficial puede ser casi tan rápido como el superficial o casi tan lento como el subterráneo, dependiendo de la permeabilidad de los estratos superiores del suelo, por ello es difícil distinguirlo de los otros dos. Cuando es relativamente rápido se le considera junto con el escurrimiento superficial, y cuando es relativamente lento se le considera parte del subterráneo. El agua puede comenzar su viaje hacia la corriente como flujo superficial e infiltrarse en el camino, terminando como escurrimiento subsuperficial o subterráneo, o puede comenzar siendo escurrimiento subsuperficial y emerger a la superficie si en su camino se encuentra con un estrato muy permeable que aflora en una ladera. (Aparicio Mijares, 1992)

La forma gráfica de representar el escurrimiento es a través de un hidrograma, que relaciona el gasto con el tiempo, en el eje de las Y se coloca el gasto, que es el volumen de escurrimiento por unidad de tiempo, y en el eje X el tiempo, el área bajo el hidrograma es el volumen total escurrido, el área bajo el hidrograma y arriba de la línea de separación entre caudal base y directo es el volumen de escurrimiento directo. (Aparicio Mijares, 1992).

En la **Figura 9**, se puede observar cómo existe un escurrimiento base que se toma como el escurrimiento continuo y un escurrimiento directo que es aquel que sobrepasa el antes mencionado.

**Figura 9**

*Grafica de Escurrimiento a través de un Hidrograma Unitario*



Nota: (Aparicio Mijares, 1992)

Entendiéndose que para la gráfica anterior se puede definir:

- **A:** Punto inicial del hidrograma, representa el caudal base antes del evento de precipitación. En este punto, el escurrimiento es solo el flujo base del río o cuenca.
- **B:** Pico del hidrograma, es el punto donde se alcanza el caudal máximo ( $Q_p$ ) debido a la escorrentía generada por la lluvia. Este punto indica el momento de mayor respuesta de la cuenca ante el evento de precipitación.
- **C:** Inicio de la curva de recesión, marca el punto donde comienza a disminuir el caudal después de haber alcanzado su máximo en B.

- **D:** Punto final de la curva de recesión, donde el caudal retorna a su nivel base. Representa el final del evento de escorrentía directa.
- **Q<sub>b</sub>:** Caudal base, es el flujo de agua que existía antes del evento de lluvia y que se mantiene después del evento, proveniente de fuentes subterráneas o aportes de flujo base.
- **t<sub>p</sub>:** Tiempo al pico, es el tiempo transcurrido entre el inicio del hidrograma (A) y el punto de máximo caudal (B). Es un parámetro clave en el análisis de respuesta hidrológica de la cuenca.
- **t<sub>0</sub>:** Tiempo de inicio del escurrimiento, es el momento en que la escorrentía comienza a aumentar debido a la precipitación.
- **t<sub>b</sub>:** Tiempo base del hidrograma, representa el intervalo total desde el inicio del escurrimiento (t<sub>0</sub>) hasta que el caudal retorna al flujo base (D). Indica la duración total del evento de escurrimiento directo.

### ***2.2.3. Evapotranspiración***

La evaporación es el proceso por el cual el agua en su estado líquido pasa al estado de vapor, se produce básicamente por el aumento de energía cinética que experimentan las moléculas de agua cercanas a la superficie de un suelo húmedo o una masa de agua, producido por la radiación solar, el viento y las diferencias en presión de vapor. La variación de intensidad solar recibida en la superficie produce una variación de la temperatura en está modificando la energía cinética de las moléculas, a alta temperaturas, más moléculas escapan a la superficie, debido a que hay mayor energía cinética. Este aumento de energía cinética provoca que algunas moléculas de agua lleguen a la atmósfera, al mismo tiempo, algunas de las moléculas que ya se encuentran en la atmósfera se condensan y regresan al cuerpo de agua.

La evaporación será entonces igual a la cantidad de agua que logre salir de la zona de intercambio y la atmosfera. Para que se dé la evaporación se necesita una fuente de energía que normalmente es la radiación solar, para evaporar un gramo de agua se requieren 540 calorías a 100 grados Celsius o 600 calorías a 0 grados Celsius. De igual forma debe haber una diferencia entre la presión de saturación de vapor existente en la capa que limita el agua y el aire y la presión de vapor de aire actual a la temperatura del aire.

Por otro lado, la transpiración es la pérdida de agua hacia la atmosfera en forma de vapor dependiente de las acciones físicas y fisiológicas de las plantas, la evapotranspiración es el conjunto de los dos fenómenos tanto la evaporación como la transpiración. (Aparicio Mijares, 1992)

#### **2.2.4. Infiltración**

Es el movimiento del agua que se encuentra sobre superficie del suelo y penetra en él, producido por la acción de las fuerzas gravitacionales y capilares. La diferencia entre el volumen de agua que llueve en una cuenca y el que escurre en su salida recibe el nombre de pérdidas, las cuales están constituidas por la evapotranspiración y la infiltración, la porción más considerable de las pérdidas está dada por la infiltración, por lo que es costumbre calcularlas conjuntamente como pérdidas. En general, el volumen de infiltración es mayor que el de escurrimiento durante una tormenta, en especial en cuencas con un grado de urbanización bajo.

Supóngase que el tipo de suelo, cobertura vegetal, la intensidad de la lluvia son constantes, y que el suelo al inicio de la tormenta está seco, de tal manera que su capacidad de infiltración es mayor que la intensidad de la lluvia en esos primeros instantes de la tormenta. Bajo estas condiciones, se infiltraría toda la lluvia, es decir en esta parte del proceso las fuerzas producidas por la capilaridad predominan sobre las gravitatorias, al avanzar el tiempo, si la lluvia continúa se originan charcos y comienza a producir flujo

sobre la superficie, si la lluvia sigue siendo intensa, las fuerzas capilares pierden importancia frente a las gravitatorias, ya que el contenido de humedad del suelo aumenta y la capacidad de infiltración disminuye con el tiempo.

Además, bajo estas condiciones, la infiltración se hace independiente de la variación en el tiempo de la intensidad de la lluvia, en tanto que ésta sea mayor que la capacidad de transmisión del suelo, de manera que, bajo las condiciones anteriores, la capa saturada que en el tiempo de encharcamiento era muy delgada y estaba situada en la superficie del suelo se ensancha a medida que su límite inferior, denominado frente húmedo, baja. Entonces, dado que cada vez una mayor parte del suelo está saturada, las fuerzas capilares pierden importancia hasta que llega un momento que, al estar todo el medio saturado, el movimiento del agua se produce sólo por la acción de la gravedad y la capacidad de infiltración se hace constante.

La descripción anterior es, de rigor, válida solamente para una columna de suelo homogénea donde el nivel freático esté muy profundo; sin embargo, se verifica con una precisión aceptable en la mayoría de los casos prácticos. Si después de que aparecen los primeros charcos la tormenta se calma, hasta hacerse menor que la capacidad de infiltración, el tirante de agua existente sobre la superficie del suelo disminuye hasta desaparecer y el agua contenida en los charcos también se infiltra, y un pequeño porcentaje se evapora.

Cuando ya no hay agua sobre la superficie del terreno, el contenido de humedad de las capas de suelo cercanas al frente húmedo se difunde, haciendo que dicho frente avance hacia arriba hasta que la superficie deja de estar saturada. (Aparicio Mijares, 1992)

### **2.3. Definición de Impacto Hidrológico**

El impacto hidrológico es la alteración o modificación del ciclo hidrológico y de las características de los cuerpos de agua debido a la ejecución de actividades humanas, las fuentes de este impacto pueden ser por ejemplo, por la expansión urbana, ya que la construcción de presas, calles, urbanizaciones alteran los patrones de drenaje, el volumen de los caudales, la morfología del suelo, etc.

Un ejemplo de impacto hidrológico es la contaminación del agua, que deteriora la calidad y dificulta el consumo humano, se sabe que “a nivel nacional solamente el 26 % de los ríos cumplen con aptitud para uso de riego y apenas el 17 % cumple con aptitud para potabilización” (MARN, 2014), este es solo un ejemplo a nivel del El Salvador; pero a nivel mundial, el mayor impacto hidrológico es el cambio climático, que trae como principal componente un aumento de temperaturas, lo que genera mayor evaporación de los cuerpos de agua y del suelo y por ende una mayor cantidad de vapor de agua en la atmosfera, lo que puede llevar a precipitaciones más intensas provocando eventos climáticos cada vez más intensos y menos predecible, provocando inundaciones entre otras consecuencias.

### **2.4. Origen de Impacto Hidrológico**

El impacto hidrológico en una cuenca hidrográfica es el resultado de una serie de intervenciones humanas que alteran el ciclo hidrológico natural del agua, modificando enormemente los factores y características de una cuenca. Estas actividades pueden tener consecuencias graves en el ecosistema, así como también en la disponibilidad de agua potable, la agricultura, las afectaciones en infraestructura de las ciudades y en el bienestar de las comunidades que dependen de estos recursos.

El entendimiento del origen del impacto hidrológico es importante para el desarrollo de estrategias de mitigación. Entre los principales factores que originan este impacto se encuentran la deforestación y el cambio en el uso del suelo, como las prácticas agrícolas no sostenibles, la urbanización y el desarrollo infraestructural, así como también la extracción de agua subterránea sin control. Cada uno de los factores mencionados contribuye de manera diferente a la alteración del ciclo hidrológico, generando problemas como la erosión, la contaminación, las inundaciones, los escasos de agua, olas de calor, y la pérdida de biodiversidad.

#### ***2.4.1. Deforestación y Cambio en el Uso del Suelo***

La deforestación es el proceso en el que se reduce la superficie forestal afectando la flora y los suelos, para diversos fines, con el cual se afecta el equilibrio ecológico y el ciclo hidrológico en las cuencas hidrográficas. Esto causa que terrenos forestales se conviertan en áreas destinadas a la agricultura, la urbanización, la explotación maderera y otras actividades humanas. Además, la deforestación también aumenta la pérdida de cobertura vegetal, alterando la dinámica del agua en los ecosistemas, con efectos que pueden perdurar a largo plazo o pueden ser difíciles de retroceder. (climate.selectra.com, 2024)

El cambio en el uso del suelo, asociado estrechamente con la deforestación, se refiere a la transformación de la tierra para adaptarla a nuevas funciones, las cuales son en su mayoría el desarrollo urbano y la construcción de infraestructuras. Estas actividades tienen un impacto profundo en los patrones naturales de uso del suelo, afectando no solo la biodiversidad y los servicios ecosistémicos, sino también la capacidad de las cuencas para regular el flujo de agua.

A medida que los bosques son talados y el uso de suelo es modificado, el ciclo hidrológico sufre alteraciones significativas. La pérdida de vegetación

reduce la capacidad del suelo para infiltrar agua, lo que a su vez disminuye la recarga de acuíferos y aumenta el escurrimiento superficial, especialmente si el nuevo uso del suelo es del tipo urbano, ya que la impermeabilización es casi que en su totalidad. Además, la eliminación de árboles y plantas disminuye la cantidad de agua que se evapora y transpira, lo que puede alterar los patrones de precipitación y el balance hídrico de una región. (naturefund.de, 2018)

En las siguientes secciones, se examinarán en detalle las principales causas de la deforestación y el cambio de uso del suelo, su impacto en el ciclo hidrológico, y las estrategias que se pueden implementar para mitigar estos efectos.

#### **2.4.1.1. Causas de la Deforestación y el Cambio en el Uso de Suelo**

El principal factor de deforestación en todas las regiones es la agricultura. La conversión de bosques en tierras de cultivo es el principal motor de la pérdida de bosques. Según la FAO<sup>1</sup>, provoca al menos el 50% de la deforestación mundial, principalmente para la producción de palma aceitera y soja. Además, el 40% de la deforestación mundial se da debido al pastoreo del ganado.

Otra de las grandes causas de deforestación es el desarrollo urbano y de infraestructuras, esto agregando la construcción y el gran crecimiento que día a día presentan los caminos urbanos y las carreteras las cuales representan la tercera causa de deforestación mundial, con algo más del 6% del total.

---

<sup>1</sup> Food and Agriculture Organization of the United Nations, *Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales*, Italia, 2016

Sin embargo, la tala ya sea para combustible o construcción, hecha de manera ilegal o insostenible es otro de los componentes que contribuye a la deforestación que cada vez se presenta con más frecuencia debido a que la demanda es masiva y se suele sobreexplotar las áreas forestales.

La deforestación y la degradación forestal son tanto una causa como una consecuencia del cambio climático. Los bosques se ven afectados por fenómenos extremos como incendios, sequías e inundaciones todas estas consecuencias de la modificación del ciclo hidrológico. Además, la pérdida de masa forestal es perjudicial para el clima porque los bosques son esenciales para el suministro de aire limpio, la regulación del ciclo hidrológico, la prevención de la pérdida de biodiversidad y la erosión del suelo. (europarl.europa.eu, 2022)

#### ***2.4.1.2. Impacto de la Deforestación y el Cambio en el Uso de Suelos en el Ciclo Hidrológico***

La deforestación y el uso inadecuado de los suelos son factores que afectan significativamente el ciclo hidrológico. Los árboles desempeñan un papel crucial en este ciclo, ya que regulan la cantidad de agua en el suelo mediante la absorción y liberación controlada del agua. Sin embargo, cuando los árboles son talados, este proceso se interrumpe, disminuyendo la capacidad del suelo para retener agua, lo que puede incrementar el riesgo de inundaciones debido a la menor capacidad del suelo para absorber agua. De igual manera, el uso inadecuado del suelo, como la urbanización descontrolada o la agricultura intensiva, reduce las áreas de infiltración, provocando una mayor escorrentía superficial y afectando la recarga de los acuíferos.

Ambos factores también impactan en la calidad del agua. La ausencia de cobertura vegetal expone el suelo a la erosión y sedimentación, lo que puede bloquear cuerpos de agua y disminuir su capacidad de flujo. Además,

sin raíces que estabilicen el terreno, aumenta el riesgo de deslizamientos, mientras que los productos químicos utilizados en prácticas agrícolas o en la tala pueden contaminar las fuentes de agua superficiales y subterráneas.

La deforestación y el mal uso del suelo también influyen en el clima regional. La pérdida de vegetación reduce la humedad atmosférica y la formación de nubes, disminuyendo las precipitaciones. Asimismo, incrementa la temperatura, lo que acelera la evaporación y reduce la disponibilidad de agua en la región.

Para mitigar estos impactos, es esencial implementar acciones de conservación y manejo sostenible de los suelos, así como programas de reforestación y restauración de hábitats naturales. Estas medidas no solo ayudan a restaurar el equilibrio del ciclo hidrológico, sino que también contribuyen a reducir los efectos del cambio climático, disminuyendo la frecuencia e intensidad de sequías e inundaciones que afecta tanto a los ecosistemas como a los asentamientos humanos. (comunidadplanetaazul.com, 2023)

#### ***2.4.1.3. Deforestación y Cambio de Uso de Suelos para Urbanización y Desarrollo Infraestructural***

La urbanización, que transforma terrenos naturales en áreas residenciales, comerciales e industriales, afecta negativamente el ciclo hidrológico. Este proceso reduce la infiltración del agua en el suelo, elimina la vegetación que ayuda a la evapotranspiración y nivela irregularidades del terreno que almacenan agua. Como resultado, se interrumpe el ciclo hidrológico natural, lo que provoca un aumento en los caudales punta, mayor escorrentía, más inundaciones y una reducción en los caudales base de los ríos.

En cuanto a la calidad del agua, la urbanización conlleva a la acumulación de residuos en las cuencas urbanas, los cuales son arrastrados hacia los cuerpos de agua durante la época de lluvias. Esto causa un aumento en la contaminación del agua, afectando su temperatura, reduciendo la biodiversidad acuática y representando riesgos para la salud. Además, las descargas de aguas residuales directas a afluentes dentro de la microcuenca, desagües directos a las calles y la contaminación del agua lluvia de escorrentía, debido a la existencia de comercios que vierten aguas grises y aceites como en el caso de talleres de mecánica automotriz, contribuyen significativamente a la degradación de los ríos. Por otro lado, la escorrentía sobre superficies impermeables aumenta la temperatura del agua, lo que pone en peligro a la biodiversidad sensible a cambios en su hábitat.

La geomorfología de los cauces también se ve alterada, con erosión en las zonas de vertido por el aumento de caudales y sedimentación aguas abajo. Estos cambios modifican la sección transversal de los cauces, aumentando la necesidad de reforzarlos con estructuras de concreto para evitar salidas de su cauce que posteriormente traen inundaciones y erosión.

Finalmente, la urbanización afecta los hábitats naturales al erosionar los cauces y desplazar comunidades biológicas. Sin embargo, un enfoque más sostenible en la urbanización, que incluya sistemas de drenaje urbano sostenible, podría mitigar estos impactos, promoviendo una menor impermeabilización del suelo y una mejor gestión de contaminantes. (iagua.es, 2016)

#### **2.4.2. Prácticas Agrícolas no Sostenibles**

Las prácticas agrícolas no sostenibles se refieren a métodos de cultivo y manejo del suelo que dañan el medio ambiente, agotan los recursos naturales y degradan la tierra a largo plazo. El monocultivo (cultivo continuo de una sola especie vegetal en un área), el uso excesivo de pesticidas y

fertilizantes químicos, la deforestación para abrir nuevas tierras de cultivo y la sobreexplotación de los recursos hídricos para riego son algunas de estas prácticas.

Estas prácticas pueden causar erosión del suelo, pérdida de biodiversidad, contaminación del agua por agroquímicos y disminución de la fertilidad del suelo. Además, el uso excesivo de agua para riego puede agotar las fuentes de agua subterránea. (vermiduero.es, 2024)

Las prácticas agrícolas no sostenibles pueden aumentar el escurrimiento superficial, la sedimentación de ríos y lagos y la alteración de los ciclos hidrológicos naturales en una cuenca hidrográfica. Esto puede hacer que la cuenca sea más susceptible a fenómenos como inundaciones y sequías, lo que puede tener un impacto en los ecosistemas y las comunidades humanas que dependen de estos recursos.

La adopción de prácticas agrícolas sostenibles, como la agroforestería, la rotación de cultivos, el uso de fertilizantes orgánicos, y la gestión eficiente del agua, es esencial para mitigar estos impactos y promover la salud a largo plazo de los ecosistemas agrícolas y acuáticos. (FAO, 2014)

## **2.5. Consecuencias del impacto hidrológico**

El impacto hidrológico, que es el resultado de actividades humanas como las descritas anteriormente, tiene muchas consecuencias que afectan tanto al medio ambiente como a los asentamientos humanos. Estas consecuencias se manifiestan a través de procesos que alteran el ciclo hidrológico natural, lo que puede conducir a la degradación de recursos hídricos, la pérdida de biodiversidad y la afectación directa a la calidad de vida de las personas.

El entendimiento de estas consecuencias es necesario para el desarrollo de estrategias de mitigación y adaptación, especialmente en regiones vulnerables donde los cambios en el ciclo hidrológico pueden tener efectos adversos. Entre las principales consecuencias del impacto hidrológico se encuentran la contaminación de las aguas superficiales, la disminución de la evapotranspiración, el aumento de las extracciones de agua para consumo, la necesidad de importar agua de una cuenca a otra, olas de calor, reducción de la infiltración, entre otras. Todas estas consecuencias están interrelacionadas y pueden iniciar una serie de efectos en cadena que amplifican el impacto total.

En este sentido, es importante destacar que las consecuencias del impacto hidrológico no son uniformes y pueden variar significativamente dependiendo de factores como el clima, la topografía, cobertura vegetal, grado de urbanización, el tipo de suelo y el uso del suelo en la cuenca afectada. Por ejemplo, en regiones montañosas, la deforestación puede conducir a deslizamientos de tierra y pérdida de suelo fértil, mientras que, en áreas urbanas, la impermeabilización del suelo debido a la construcción puede aumentar el riesgo de inundaciones.

La gestión de estos impactos requiere un enfoque integrado que considere tanto las causas como las consecuencias del impacto hidrológico. Esto incluye la implementación de medidas de conservación del suelo, la restauración de ecosistemas degradados, y la adopción de prácticas de manejo sostenible del agua.

En las siguientes secciones se abordarán en detalle las principales consecuencias del impacto hidrológico, con un enfoque en la erosión y los deslizamientos del suelo, las inundaciones, la escasez de agua, la pérdida de biodiversidad, y los impactos sociales, económicos y culturales asociados. Cada una de estas secciones proporcionará un análisis de cómo estos

procesos se desarrollan, sus implicaciones a largo plazo, y las posibles estrategias de mitigación que pueden implementarse para reducir su impacto.

### ***2.5.1. Erosión y deslizamientos del suelo***

La erosión es un proceso natural en el que el suelo o la roca se desgasta y se transporta debido a la acción del agua. Aunque este fenómeno ocurre de manera natural, las actividades humanas, como la deforestación y las prácticas agrícolas inadecuadas, pueden acelerarlo abundantemente. Existen varios tipos de erosión hídrica, cada uno con características específicas. La erosión laminar implica la remoción uniforme de capas delgadas de suelo superficial debido al flujo superficial no concentrado. Por otro lado, la erosión en surcos se caracteriza por la formación de pequeños canales de unos pocos centímetros de profundidad, creados por el flujo concentrado de agua. Finalmente, la erosión en cárcavas forma canales de gran tamaño, también resultantes del flujo concentrado.

#### ***2.5.1.1. Causas de la Erosión***

Las actividades humanas que más contribuyen a la aceleración de la erosión hídrica incluyen la deforestación, el sobrepastoreo, las prácticas agrícolas inadecuadas (como la explotación de la tierra o la siembra a favor de la pendiente), la construcción de caminos y otras infraestructuras, y los incendios. Estas acciones dejan el suelo desnudo y expuesto al impacto directo de la lluvia y la escorrentía, lo que provoca que la erosión se de en mayor medida.

Los efectos negativos de la erosión hídrica son múltiples y preocupantes. La pérdida de suelo fértil es uno de los más evidentes, lo que lleva a una disminución de la productividad agrícola. Además, la sedimentación de ríos y embalses es una consecuencia común, que incrementa el riesgo de inundaciones y deslizamientos de tierra en zonas

habitadas. Las infraestructuras, como caminos y puentes, también sufren daños en sus cimientos debido a la erosión. A nivel ecológico, se produce una pérdida significativa de biodiversidad. En casos extremos, la erosión puede llegar a provocar la desertificación, transformando áreas previamente fértiles en terrenos áridos y estériles. (agrawdata.com, 2024)

### ***La Erosión como una consecuencia del impacto hidrológico***

La erosión es una consecuencia significativa del impacto hidrológico, especialmente en áreas donde la cobertura vegetal es poca y las pendientes son pronunciadas. En suelos desnudos, la capacidad de infiltración se ve severamente afectada debido a la poca o nula retención de agua lluvia. Esto ocurre porque la ausencia de vegetación y la compactación del suelo reducen la capacidad del terreno para absorber el agua, lo que incrementa la escorrentía superficial.

La disminución en la infiltración no solo reduce la recarga hídrica de los acuíferos, sino que también propicia el arrastre de sedimentos hacia cuerpos de agua, lo que contribuye a la alteración de los ecosistemas acuáticos. Además, el aumento de la escorrentía puede incrementar la frecuencia e intensidad de las inundaciones en las zonas bajas y contribuir a la inestabilidad del terreno en áreas más elevadas. Esto último puede facilitar procesos de deslizamiento, aunque el enfoque principal radica en cómo la alteración al ciclo hidrológico incrementa la vulnerabilidad de las cuencas.

Por lo tanto, la erosión debida a la modificación de la dinámica del agua en el terreno se convierte en consecuencia muy peligrosa, dentro de los impactos hidrológicos más comunes. Comprender esta relación es fundamental para identificar estrategias de mitigación que permitan restaurar la capacidad de infiltración de los suelos, disminuir la escorrentía y proteger las zonas vulnerables frente a eventos hidrometeorológicos extremos. (udep.edu.pe, 2024)

### **2.5.2. Inundaciones**

Las inundaciones son el resultado de una combinación de factores naturales y actividades humanas que han alterado el ciclo hidrológico de manera significativa. En regiones donde las precipitaciones son intensas, los suelos profundos y ricos en materia orgánica, facilitan la infiltración del agua, minimizando el riesgo de inundaciones. Sin embargo, en áreas más secas, los suelos suelen ser menos capaces de absorber grandes volúmenes de agua, especialmente durante lluvias intensas.

Uno de los factores clave que contribuye a las inundaciones es la deforestación, que altera el ciclo hidrológico al reducir la capacidad del suelo para infiltrar agua. Esto se combina con la expansión de áreas urbanas, donde la impermeabilización del suelo (a través de superficies como techos, pavimentos y carreteras) impide que el agua se infiltre en el subsuelo y llegue a los mantos acuíferos, aumentando así el escurrimiento superficial. Este exceso de agua en la superficie incrementa significativamente el riesgo de inundaciones, especialmente en zonas urbanas que tienen sistemas de drenajes obstruidos por desechos o sobrecargado.

Además, el cambio climático ha intensificado las precipitaciones en muchas regiones, creando condiciones en las que los suelos ya saturados o impermeabilizados no pueden absorber el agua adicional. Esto no solo contribuye al aumento de inundaciones, sino que también provoca la erosión y el debilitamiento de las infraestructuras. La eliminación o alteración de las pocas zonas verdes en las ciudades, que históricamente actuaban como mitigadores naturales para las inundaciones, ha incrementado aún más esta situación.

Finalmente, al inicio de las temporadas de lluvias, los suelos pueden encontrarse deshidratados y la vegetación aún no ha crecido lo suficiente, lo que dificulta la infiltración del agua y favorece el escurrimiento superficial que

lleva consigo la crecida de los afluentes de agua como ríos y quebradas y que junto con la mala planificación urbana juega un papel crucial en las inundaciones que afectan los asentamientos humanos en sus orillas. Este conjunto de factores como la deforestación, urbanización, cambio climático, y la pérdida de ecosistemas naturales como los bosques o tierras con vegetación abundante, contribuyen de manera decisiva a la ocurrencia de inundaciones. (forestal.udec, 2016)

### **2.5.3. Escasez de Agua y Sequías**

La sequía es un fenómeno climático que se caracteriza por la escasez temporal de agua en comparación con el suministro habitual durante un periodo determinado. Aunque este fenómeno tiene causas naturales, en la actualidad, las actividades humanas han aumentado la frecuencia e intensidad con la que estas se dan, generando un desequilibrio significativo en el ciclo hidrológico que afecta tanto a los ecosistemas como a las sociedades.

Las causas de la sequía pueden dividirse en dos categorías principales: las naturales y las de origen antropogénico (es decir, derivada de las actividades humanas). La segunda es parte del impacto hidrológico en las cuencas, provocado por la deforestación y la degradación del suelo, urbanización desmedida, y contaminación del recurso hídrico.

La deforestación y la expansión urbana llevan a la impermeabilización del suelo, contribuyendo al incremento del escurrimiento superficial haciendo a un lado la recarga hídrica de los mantos acuíferos. Este cambio en el uso del suelo, impulsado por el desarrollo humano, es un factor clave en el incremento de la sequía, ya que reduce la capacidad de las cuencas hidrográficas para retener y almacenar agua. Además, la agricultura y ganadería intensiva y el uso no sostenible de los recursos hídricos han llevado a la sobreexplotación de acuíferos, disminuyendo aún más la disponibilidad

de agua en zonas urbanas durante periodos de escasas de lluvia, generando la necesidad en muchas ciudades de abastecerse con agua de importación (traída desde otras cuencas, como es el caso del gran Salvador en El Salvador).

Por otro lado, la sequía como consecuencia del impacto hidrológico también se evidencia en la disminución de los caudales de los ríos, afectando la biodiversidad acuática.

En el ámbito socioeconómico, la sequía inducida por actividades humanas genera tensiones en la gestión de los recursos hídricos, afectando la producción agrícola, la generación de energía hidroeléctrica y el abastecimiento de agua potable, problemas muy presentes en la actualidad. Esta situación no solo incrementa los costos económicos, sino que también aumenta las desigualdades sociales y territoriales, especialmente en regiones donde el acceso al agua ya es limitado.

Finalmente, la escasez de agua y las sequías representan un desafío crítico en el contexto actual, donde las actividades humanas han amplificado los efectos naturales de estos fenómenos. La sequía como impacto hidrológico no solo afecta la disponibilidad de agua, sino que también transforma los ecosistemas y altera las dinámicas sociales y económicas, subrayando la necesidad urgente de implementar prácticas sostenibles y de gestión integrada de los recursos hídricos. (iagua.es, 2024)

#### **2.5.4. *Perdida de la biodiversidad***

La disminución del agua dulce disponible representa una amenaza significativa para la biodiversidad, ya que los ecosistemas dependen de este recurso para su equilibrio y funcionamiento. La reducción en la disponibilidad de agua impacta de forma directa en la supervivencia de especies acuáticas y terrestres, limitando su acceso a fuentes esenciales para su desarrollo y

reproducción. Esto puede desencadenar la pérdida de hábitats, reducción en las poblaciones de fauna y flora, y en casos extremos, la extinción de especies vulnerables.

Además, la falta de agua agrava la degradación de los ecosistemas, incrementando la susceptibilidad a eventos como incendios forestales en zonas propensas a sequías. Estos incendios no solo destruyen extensas áreas de vegetación, sino que también contribuyen a la pérdida acelerada de especies y a la alteración del ciclo natural del agua. Por lo tanto, la conservación de los recursos hídricos es esencial para proteger la biodiversidad y asegurar la resiliencia de los ecosistemas ante condiciones climáticas adversas.

El cambio en el ciclo hidrológico incide significativamente en la pérdida de biodiversidad, al alterar la disponibilidad de agua dulce esencial para los ecosistemas. Factores como la deforestación, la agricultura intensiva y las actividades industriales no solo disminuyen las zonas de biodiversidad, sino que también aumentan el consumo de agua, afectando a especies que dependen de este recurso para su supervivencia. La reducción de la cobertura vegetal disminuye la capacidad del suelo para retener agua, limitando la infiltración y recarga de acuíferos, lo que afecta la permanencia de hábitats naturales.

Además, el aumento de las temperaturas y la disminución de las precipitaciones intensifican la pérdida de especies, al reducir los espacios de vida y las fuentes de agua. Esta situación se agrava cuando los cuerpos de agua, como ríos y lagos, se secan o disminuyen su caudal, provocando el desplazamiento o desaparición de especies acuáticas y terrestres. Por tanto, la alteración del ciclo hidrológico debido a actividades humanas incrementa la vulnerabilidad de los ecosistemas, afectando a especies que habitan en este. (forestal.udec, 2016)

### **2.5.5. Contaminación del Recurso Hídrico**

La contaminación del recurso hídrico tiene un impacto significativo en el ciclo hidrológico, interfiriendo en varias etapas clave de este proceso natural. Cuando los cuerpos de agua, como ríos, lagos y acuíferos, se contaminan, se alteran los procesos naturales de infiltración, evaporación, y escorrentía, lo que puede generar efectos negativos en el ciclo hidrológico.

Primero, la infiltración del agua en el suelo puede verse seriamente comprometida cuando el agua se contamina con productos químicos, metales pesados, y otros contaminantes, su capacidad para ser absorbida por el suelo se reduce, ya que estos contaminantes pueden sellar la superficie del suelo o modificar su estructura, haciéndolo menos permeable. Esto no solo disminuye la recarga de acuíferos, sino que también aumenta la escorrentía superficial, lo que puede causar inundaciones y erosión del suelo.

En segundo lugar, la contaminación afecta la evaporación y la transpiración, dos procesos clave en la circulación del agua desde la superficie terrestre hacia la atmósfera. Los contaminantes presentes en el agua pueden alterar la calidad del agua evaporada, afectando la formación de nubes y, en consecuencia, los patrones de precipitación. Además, la vegetación que participa en la transpiración puede estar en riesgo si el agua contaminada se utiliza para riego, lo que afecta la capacidad de las plantas para contribuir al ciclo hidrológico.

La escorrentía, otro proceso vital, también se ve afectada ya que la escorrentía contaminada puede transportar sedimentos, nutrientes, y otros contaminantes a cuerpos de agua más grandes, como ríos y lagos, incrementando la contaminación y afectando la calidad del agua. Esta agua contaminada puede infiltrarse en acuíferos, haciendo que la contaminación se propague a fuentes de agua que son vitales para el suministro de agua potable o agrícola.

En resumen, la contaminación del recurso hídrico afecta el ciclo hidrológico al interferir en la infiltración, evaporación, transpiración, y escorrentía. Estos efectos tienen un impacto profundo en la disponibilidad y calidad del agua, en los ecosistemas acuáticos, y en la salud de las comunidades que dependen de estas fuentes de agua. (UDLAP, 2024)

### ***2.5.6. Impacto Social, Económico y Cultural***

Los cambios en el ciclo hidrológico ocasionados por factores naturales y humanos generan consecuencias significativas en múltiples aspectos de la vida cotidiana. Estos impactos se reflejan en los ámbitos social, económico y cultural, afectando tanto a las comunidades locales como a la dinámica general de las sociedades.

#### **Impacto Social**

Las alteraciones en el ciclo hidrológico afectan gravemente a las comunidades, especialmente a las más vulnerables. La escasez de agua, las inundaciones y los deslizamientos provocan desplazamientos forzados, pérdida de viviendas y dificultades en el acceso a servicios básicos. La contaminación de las fuentes hídricas limita el acceso a agua potable, lo que incrementa los problemas de salud pública y facilita la propagación de enfermedades. La tensión social se agudiza ante la competencia por recursos limitados, generando conflictos y movilizaciones sociales para exigir soluciones y acceso equitativo al agua. (BUENDÍA, 2007)

### **Impacto Económico**

El sector agrícola es uno de los más afectados, ya que la disminución de agua y las inundaciones generan pérdidas de cultivos, reduciendo la capacidad de producción y afectando la seguridad alimentaria. La industria también se ve comprometida cuando la infraestructura sufre daños por inundaciones o erosión, lo que incrementa los costos de reparación y mantenimiento. Además, los desastres naturales demandan inversiones públicas en reconstrucción, lo que desplaza recursos destinados a áreas prioritarias como educación o salud. Esto impacta de manera más severa a las poblaciones de bajos ingresos, quienes dependen en gran medida del apoyo gubernamental en situaciones de crisis. (ayudaenaccion.org, 2020) (forbes.com, 2024)

### **Impacto Cultural**

El cambio en el ciclo hidrológico afecta el patrimonio cultural de las comunidades, especialmente cuando la pérdida de tierras ancestrales obliga a abandonar prácticas agrícolas tradicionales y formas de vida vinculadas a los ciclos del agua. Las festividades y rituales relacionados con el agua también se ven amenazados, lo que interrumpe la transmisión de conocimientos ancestrales y fragmenta la identidad cultural. Esta pérdida de conexión con el entorno natural impacta la cohesión social y el sentido de pertenencia dentro de las comunidades afectadas. (iadb.org, 2023)

**Tabla 1**

*Fuentes, Consecuencias en Diferentes Ámbitos y Medidas de Mitigación del Impacto Hidrológico*

<b>Fuentes del Impacto Hidrológico</b>	<b>Consecuencias</b>	<b>Impacto Social</b>	<b>Impacto Económico</b>	<b>Impacto Cultural</b>	<b>Medidas de Mitigación</b>
Escasez de agua	Reducción en el acceso a agua potable	Enfermedades, desplazamientos	Pérdida de cultivos y baja productividad. Aumento en el costo del agua	Pérdida de prácticas culturales relacionadas con el agua	Mejorar la gestión del agua, promover la reforestación
Inundaciones	Daños a infraestructura pública y privada, además de desplazamientos	Pérdida de infraestructura pública y privada, pérdida de vidas humanas, inseguridad	Daños a infraestructura y cultivos	Destrucción de lugares culturales	Implementar sistemas de drenaje eficientes. Mejorar la gestión de los desechos sólidos
Contaminación del agua	Riesgo de enfermedades de origen hídrico	Aumento de enfermedades diarreicas, cólera, leptospirosis y propagación de vectores como dengue y malaria.	Costos en tratamiento de agua. Aumento al costo de la vida por tener que comprar agua para consumo.	Alteración de prácticas culturales relacionadas con el agua limpia	Regulación de descargas contaminantes

## 2.6. Mitigación del Impacto Hidrológico

La mitigación del impacto hidrológico son las acciones, obras y estrategias implementadas para reducir y prevenir los efectos negativos que las actividades humanas traen al ciclo hidrológico y a los recursos hídricos. Es esencial un trabajo integral por parte de los habitantes y de las instituciones involucradas para garantizar la sostenibilidad de los recursos hídricos y lograr reproducir de la manera más fielmente posible el ciclo hidrológico natural, cuando se han producido alteraciones en el territorio.

Actividades humanas como el vertido de desechos sólidos e industriales, el uso de fertilizantes y pesticidas, deforestación, la extracción de agua subterránea desmedida y el cambio de uso de suelos debido el alto nivel de urbanización, han alterado el ciclo hidrológico, por lo que la participación ciudadana y las instituciones juegan un papel importante para la construcción de obras de mitigación como los SUDS que captan, infiltran y retengan la escorrentía superficial, modificando así el caudal que alcanza la descarga.

Algunas de las medidas de mitigación del impacto hidrológico que se pueden tomar son las siguientes:

- **Implementación de sistemas de recolección de agua de lluvia:** Consiste en la instalación de infraestructuras que captan y almacenan el agua pluvial para su uso posterior, generar infiltración o retención y drenaje controlado, reduciendo la dependencia de fuentes tradicionales aliviando la presión sobre los sistemas de gestión del agua (Chile, 2020) en el primer caso; favoreciendo la recarga acuífera en el segundo y minimizando los riesgos de inundaciones en el tercero.
- **Reutilización de aguas grises:** Implica el tratamiento y reutilización de aguas residuales domésticas relativamente limpias,

como las provenientes de lavabos y duchas, para aplicaciones como el riego o la descarga de inodoros, disminuyendo la demanda de agua potable (TradeSafe, 2024), además de reducir los caudales de descarga a cuerpos de agua.

- **Uso de tecnologías de riego eficientes:** La adopción de sistemas de riego inteligentes que utilizan datos meteorológicos y sensores de humedad optimiza el uso del agua en la agricultura, reduciendo el desperdicio y mejorando la eficiencia hídrica (TradeSafe, 2024).
- **Tratamiento adecuado de aguas residuales:** Garantizar que las aguas residuales sean tratadas correctamente antes de su vertido en cuerpos de agua es esencial para prevenir la contaminación y proteger los recursos hídricos (Fundacion, 2024).
- **Reducción del uso de pesticidas y fertilizantes químicos:** Limitar el uso de estos productos y optar por alternativas naturales ayuda a prevenir la contaminación del agua subterránea y superficial, promoviendo prácticas agrícolas más sostenibles. (EPA, 2024)
- **Restauración y conservación de ecosistemas hídricos:** es fundamental para mantener el equilibrio del ciclo hidrológico y garantizar la disponibilidad de agua dulce. Además de la protección de bosques y humedales, la integración de construcciones verdes y estructuras de control de escorrentías, como techos verdes, jardines de lluvia, humedales artificiales y otros, permite reducir el impacto de la urbanización en los sistemas naturales, favoreciendo la retención y filtración del agua. (Chile, 2020)

### ***2.6.1. Instituciones Involucradas en la Gestión del Agua***

La mitigación del impacto hidrológico requiere la intervención de diversas instituciones encargadas de la gestión del agua, la regulación del uso del suelo y la planificación de medidas para reducir los efectos del impacto hidrológico que dan origen a fenómenos como inundaciones, sequías y

erosión de suelos. Estas entidades desempeñan un papel fundamental en la gestión integral de los recursos hídricos, promoviendo estrategias para la conservación del ciclo hidrológico y la reducción de riesgos ambientales.

- **Autoridad Salvadoreña del Agua (ASA):** es la institución encargada de la gestión, regulación y protección de los recursos hídricos del país. Su función principal es garantizar el uso sostenible y equitativo del agua, promoviendo políticas y normativas que verifican la calidad de vertidos de aguas residuales a cuerpos de aguas y aprovechamiento responsable del recurso hídrico, además de promover medidas de adaptación ante eventos extremos como sequías o crecidas.
- **Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA):** es la entidad responsable del abastecimiento de agua potable a las poblaciones, de la calidad de agua que entra a los sistemas de acueductos además de verificar la calidad de los vertidos de aguas residuales las cuales no se permiten sin previo tratamiento.
- **Sistemas descentralizados:** en algunos casos las instituciones encargadas del abastecimiento del agua y de verificar la calidad de los vertidos son municipalidades son las responsables de manejar su propio servicio de conducción y de tratamiento, además de intervenir en la gestión del agua. Sin embargo, en otros casos los encargados son las mismas comunidades a través de las juntas de agua.
- **Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG):** Aunque no tiene competencia directa sobre la calidad de las aguas residuales de riego, establece normativas y buenas prácticas principalmente

en la extracción de agua para riego, esto con el fin de generar un uso adecuado en aguas utilizadas en actividades agrícolas, buscando minimizar impactos ambientales.

- Ministerio de Salud (MINSAL): es el responsable de vigila el cumplimiento de la calidad del agua para consumo humano, a fin de prevenir enfermedades de origen hídrico.
- Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN): es el responsable de asegurar que la calidad del agua se mantenga dentro de los niveles establecidos según sus reglamentos técnicos.

## **2.7. Caracterización Hidrológica de una Cuenca Hidrográfica**

La caracterización hidrológica de una cuenca hidrográfica es esencial para comprender el comportamiento del agua en una región específica porque permite analizar los procesos relacionados con el ciclo hidrológico. La configuración de las corrientes, la pendiente del terreno y el tiempo que tarda el agua en cruzar a través del cauce principal, son algunos de los aspectos que se consideran en esta caracterización. A continuación, se detallarán los elementos principales que permiten un entendimiento de las dinámicas hídricas de la cuenca, como el patrón de drenaje, el orden de las corrientes, la longitud y la pendiente del cauce principal, y el tiempo de concentración.

### ***2.7.1. Descripción de las características morfométricas de una cuenca***

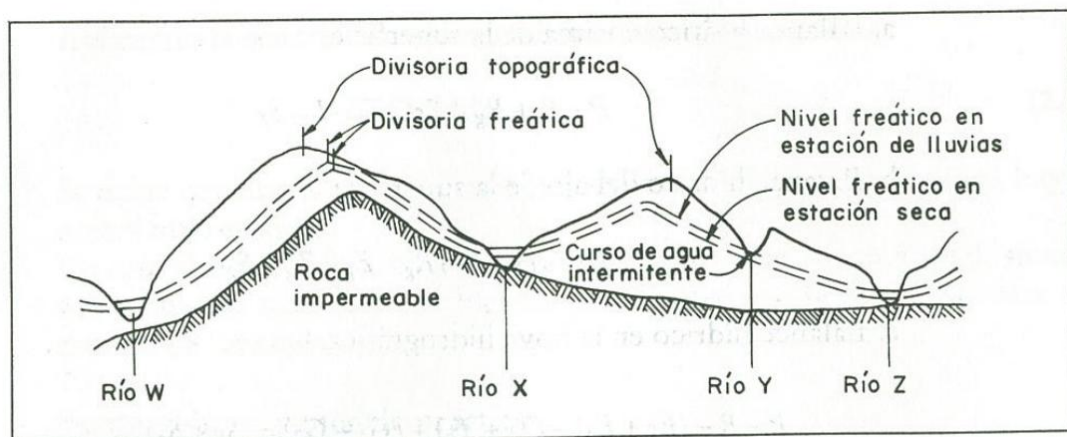
#### ***2.7.1.1. Delimitación de una cuenca***

Los escurrimientos forman una red hidrográfica a través de las líneas divisorias naturales del terreno que corresponden a las áreas más elevadas de la montaña, las cuales reciben el nombre de parteaguas (Ver **Figura 10**)

Estas dividen una cuenca de otra adyacente, por lo que se puede decir que la división entre una cuenca hidrográfica y otra está formada por la superficie de montañas que drenan a un cauce común y desaguan en una misma corriente principal.

**Figura 10**

*Corte Transversal de Relieve A*



*Nota: Se muestra la división topográfica entre una cuenca y otra, llamada parteaguas. (Mosalve Sáenz, 1999)*

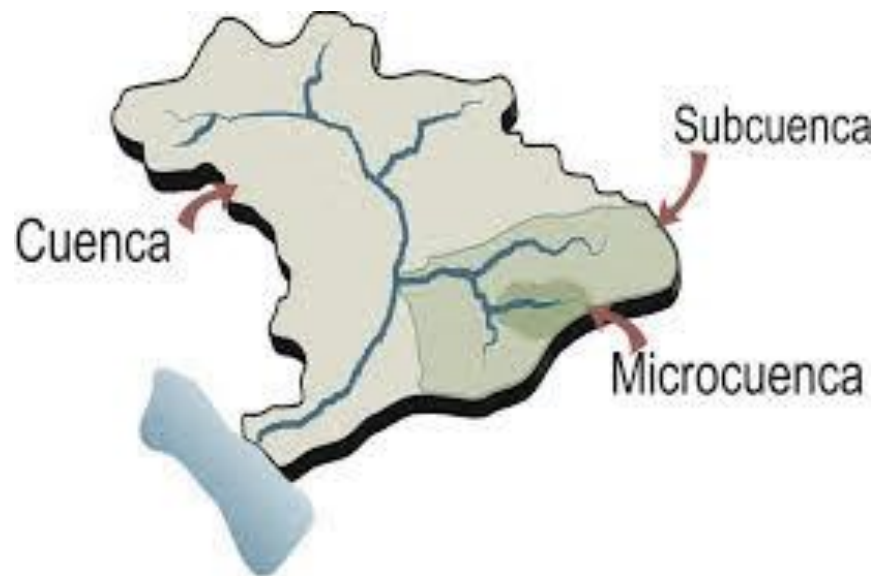
Por otro lado, a esta línea que delimita la cuenca se le puede considerar como el perímetro de la cuenca (P) el cual se representa en km.

### **2.7.1.2. Área de una cuenca**

El área de la cuenca (Ver **Figura 11**) es la superficie proyectada horizontalmente y delimitada por el parteaguas. Esta área permite clasificar la cuenca según su tamaño, por ejemplo, una cuenca abarca más de 50,000 hectáreas, mientras que una subcuenca abarca entre 5,000 y 50,000 hectáreas y una microcuenca menos de 5,000 hectáreas. (gob.mx, 2019)

**Figura 11**

*Clasificación de Cuenca por Área*



Nota: La figura muestra subdivisiones que se generan en una cuenca según su tamaño. (Lima, 2011)

### **2.7.1.3. Longitud axial de una cuenca**

La longitud axial de la cuenca (Ver **Figura 12**) corresponde a la longitud en línea recta y sin tomar en cuenta el relieve desde el punto de desembocadura del cauce principal hasta el punto más alejado del mismo, para conocer el desplazamiento total desde un extremo de la cuenca al otro. (Mosalve Sáenz, 1999)

## Figura 12

### *Longitud Axial de una Cuenca*



Nota: La línea de color rojo representa la longitud axial. (Lima, 2011)

#### **2.7.1.4. Ancho medio de una cuenca**

Para obtener el ancho medio (B) se divide el área por la longitud de la cuenca. (Mosalve Sáenz, 1999)

$$B = \frac{A}{L}$$

Ecuación (2. 4)

Donde:

L = Longitud axial de la cuenca (km)

B = Ancho medio (km)

A = Área de drenaje (km<sup>2</sup>)

### **2.7.1.5. Pendiente media de una cuenca**

La pendiente de una cuenca (Ver **Figura 13**) influye de manera significativa en la infiltración, el escurrimiento superficial, la humedad del suelo y la aportación de agua subterránea a los cauces. A medida que la pendiente aumenta, también lo hace la velocidad del escurrimiento, lo que genera un incremento en la magnitud de las crecidas, la erosión y la cantidad de sedimentos transportados, aunque hay otros factores como la forma de la cuenca, cobertura vegetal y capacidad de infiltración de los suelos, que están relacionados a las crecidas.

Según Alvord (USON, 2000), la pendiente media se calcula como:

$$S_c = \frac{D * L}{A} \qquad \text{Ecuación (2. 5)}$$

Donde:

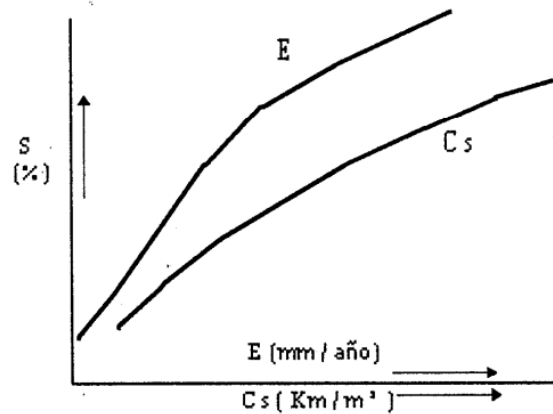
D = La equidistancia entre las curvas consideradas de nivel en km

L = Longitud total de las curvas de nivel en km

A = Área de la cuenca en km<sup>2</sup>

**Figura 13**

*Grafica de Variación de Pendiente (S)*



*Nota: "S" pendiente media de la cuenca, "E" erosión media anual y "Cs" concentración de sedimentos. (USON, 2000).*

Según la **Figura 13**, se observa que, a mayor pendiente, el flujo de agua gana velocidad, aumentando la erosión del suelo y el arrastre de sedimentos. Esto reduce la infiltración y eleva la escorrentía superficial, incrementando la carga sedimentaria en los cuerpos de agua. En contraste, en pendientes bajas, la erosión y el transporte de sedimentos disminuyen debido a una menor velocidad del flujo y una mayor retención del suelo. Esta relación es clave en la gestión de cuencas, ya que las pendientes pronunciadas requieren medidas de conservación para reducir la degradación del suelo y la contaminación del agua.

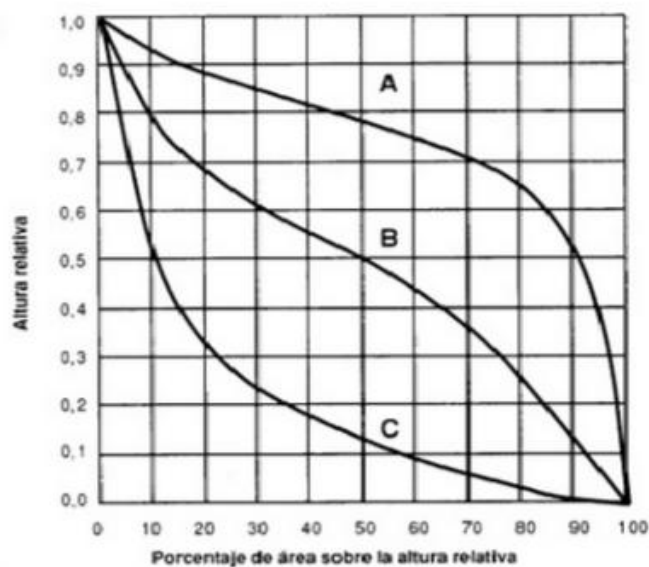
Además, la pendiente media se puede esta se puede expresar en porcentaje para clasificar la cuenca según la siguiente tabla:

**Tabla 2***Clasificación de Cuenca Según su Porcentaje de Pendiente*

Símbolo	Gradiente (%)	Descripción
a	0 – 3	Plano
b	3 – 7	Ligeramente inclinado
c	7 – 12	Moderadamente inclinado
d	12 – 25	Fuertemente inclinado
e	25 – 50	Ligeramente escarpado
f	50 – 75	Moderadamente escarpado
g	>75	Fuertemente escarpado

*Nota: Tomada de (IGAC, 2013).***Curva Hipsométrica**

La curva hipsométrica (ver **Figura 14**) representa qué proporción del área total de una cuenca se encuentra arriba de una determinada elevación.

**Figura 14***Curva Hipsométrica**Nota: Tomada de (Ingeciv, 2015)*

En donde:

**Curva A:** refleja una cuenca con gran potencial erosivo (fase de juventud).

**Curva B:** es una cuenca en equilibrio (fase de madurez).

**Curva C:** es una cuenca sedimentaria (fase de vejez).

De la **Figura 14**, se puede decir que, por ejemplo, en la curva A se observa que aproximadamente al 90% de la altura máxima, solo el 20% del área de la cuenca está por encima de esa cota. En cambio, al nivel más bajo (0.0 de altura), se encuentra el 100% del área. Este tipo de representación permite interpretar el comportamiento morfológico de la cuenca; así, la cuenca A, que tiene mayor superficie en zonas elevadas, presenta un mayor potencial de erosión. En contraste, la cuenca C, con la mayoría de su área en cotas bajas, muestra un menor riesgo erosivo. (Ingeciv, 2015)

### ***Método de Taylor y Schwarz***

El método de Taylor y Schwarz, propuesto en 1952, es una técnica ampliamente utilizada para calcular la pendiente media de una cuenca hidrográfica. Este método, también conocido como el método de la pendiente media o Average Slope Method, permite analizar la inclinación general del terreno de una cuenca.

El cálculo de la pendiente media mediante este método se basa en la relación existente entre la altitud y la superficie de la cuenca, tomando en cuenta la equidistancia entre las curvas de nivel, su longitud total dentro de la cuenca y el área que esta abarca. La ecuación a utilizar es la siguiente:

$$S_c = \frac{D.L}{A}$$

Donde:

$S_c$  = Representa la pendiente media de la cuenca

$D$  = Equidistancia entre curvas de nivel (m)

$L$  = Longitud total de las curvas de nivel contenidas en la cuenca (m)

$A$  = Área total de la cuenca hidrográfica (m<sup>2</sup>)

La aplicación del método requiere la elaboración o uso de mapas topográficos a escala adecuada, en los cuales se identifiquen y midan todas las curvas de nivel presentes en el área de estudio. Se calcula la longitud total de dichas curvas, se multiplica por la equidistancia entre ellas, y finalmente se divide por el área de la cuenca. El resultado permite obtener una estimación de la pendiente media, que puede expresarse como valor adimensional o como porcentaje. (Taylor, 1952)

#### **2.7.1.6. Elevación Media de la Cuenca**

Se puede obtener a partir de la siguiente ecuación:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n (\text{Cota Media Intervalo}_i * \text{Área}_i)}{\sum_{i=1}^n \text{Área}_i} \quad \text{Ecuación (2. 6)}$$

El valor "n" representa el número de intervalos de clase. También se puede obtener utilizando un rectángulo de área equivalente al área delimitada por la curva hipsométrica y los ejes de coordenadas. La altura de este rectángulo corresponde a la elevación media.

Es importante considerar que tanto la altitud como la elevación media de una cuenca influyen en la precipitación, así como en las pérdidas de agua por evaporación y transpiración, lo que afecta directamente al caudal medio de esta. (Mosalve Sáenz, 1999)

### **2.7.1.7. Rectángulo Equivalente**

Este parámetro de relieve se basa en una transformación geométrica que establece la longitud máxima y mínima de los lados de un rectángulo cuya área y perímetro son equivalentes al área y perímetro de la cuenca. (ana.gob.pe, 2019)

$$L * l = A \quad \text{Ecuación (2. 7)}$$

$$2(L + l) = P \quad \text{Ecuación (2. 8)}$$

Donde:

L = Longitud del lado mayor del rectángulo equivalente (km)

l = Longitud del lado menor del rectángulo equivalente (km)

### **2.7.1.8. Factor de Forma**

Esta característica es la relación que existe entre la longitud axial de la cuenca (L) y el ancho medio (B). (Mosalve Sáenz, 1999)

Por lo que:

$$K_f = \frac{B}{L} \quad \text{Ecuación (2. 9)}$$

$$K_f = \frac{A}{L^2} \quad \text{Ecuación (2. 10)}$$

En donde:

L = Longitud axial de la cuenca (km)

B = Ancho medio (km)

$A = \text{Área de drenaje (km}^2\text{)}$

Una cuenca con factor de forma bajo es menos propensa a sufrir crecientes en sus cauces comparada con otra del mismo tamaño, pero con un factor de forma mayor.

**Tabla 3**

*Clases de Valores de Factor Forma para una Cuenca*

<b>Rangos de Kf</b>	<b>Clases de Forma</b>
0.01-0.18	Muy poco achatada
0.18-0.36	Ligeramente achatada
0.36-0.54	Moderadamente achatada

*Nota: Tomada de (Aparicio Mijares, 1992)*

Los valores de la tabla anterior nos permiten clasificar la cuenca según su factor de forma, este determina que mientras la cuenca sea muy poco achatada mayor será su longitud en relación a su ancho lo que hará que tenga una forma más alargada.

### **2.7.1.9. Coeficiente de compacidad**

El índice de Gravelius o también llamado coeficiente de compacidad ( $K_c$ ), se define como la relación entre el perímetro de una cuenca y la longitud de la circunferencia de un círculo de área igual al de la cuenca. Para el cálculo del coeficiente de compacidad se puede utilizar la siguiente fórmula:

$$K_c = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad \text{Ecuación (2. 11)}$$

Donde:

$k_c$  = Coeficiente de compacidad

P = Perímetro de la cuenca (km)

A = Área de la cuenca (km<sup>2</sup>)

Este coeficiente es útil para entender la concentración de agua en función de la forma de la cuenca además de ayudar a dar una clasificación en función de un número, además, el factor de compacidad permite clasificar a la cuenca según su forma asociando un valor concreto (Ver **Tabla 4**), esto permite un mejor análisis de la forma de la cuenca.

**Tabla 4**

*Factor de Compacidad*

<b>Rango de Kc</b>	<b>Clase de compacidad</b>
1.00 – 1.25	Redonda a oval redonda
1.25 – 1.50	De oval redonda a oval oblonga
1.50 – 1.75	De oval oblonga a rectangular oblonga
>1.75	Rectangular

*Nota: Tomada de (UFPS, 2022)*

Por lo anterior, el coeficiente de compacidad (Kc) mide la forma de una cuenca, siendo mayor cuanto más irregular es su topografía. Por ejemplo, una cuenca circular tendrá un Kc mínimo igual a uno, lo que indica una menor tendencia a crecidas y a concentrar más agua, sin embargo, si la cuenca es más alargada o cuadrada, el valor aumenta.

## **2.7.2. Descripción de las características relacionadas con el drenaje de una cuenca**

### **2.7.2.1. Patrón de drenaje**

Los torrentes fluviales se clasifican principalmente en función de los patrones de drenaje, que no es más que el patrón de ramificaciones que presentan los afluentes en una cuenca, por el resultado de los materiales y las estructuras geológicas subyacentes.

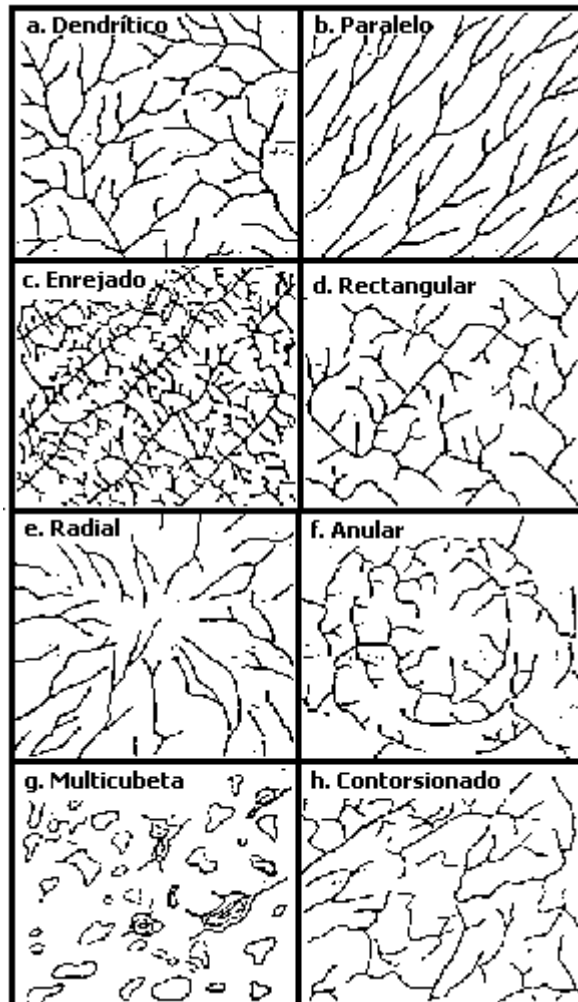
Estos patrones (ver **Figura 15**) ofrecen indicios sobre la evolución reciente de las cuencas y los factores que han influido en su desarrollo. Además también dependen de tipos de suelo y pendientes de terreno, los cuales se describen de acuerdo a Howard:

- Dendrítico: Se presenta en materiales homogéneos, sin control estructural, y es uno de los patrones más comunes en diversos entornos.
- Paralelo: Ocurre en terrenos con pendiente regional, donde los cauces siguen una dirección predominante paralela, común en piedemontes y laderas plegadas.
- Enrejado: Está relacionado con rocas sedimentarias plegadas, donde las diferencias litológicas entre rocas blandas (arcillas) y rocas duras (areniscas) influyen en la formación del patrón.
- Rectangular: Presenta un drenaje anguloso debido a la influencia de fracturas o fallas geológicas en materiales duros.

- Radial: Asociado a domos o conos volcánicos erosionados, un patrón claramente definido puede indicar actividad volcánica reciente.
- Anular: Similar al radial, pero se encuentra en etapas avanzadas de erosión de domos o calderas volcánicas.
- Multicubeta: Un patrón de drenaje irregular, característico de depósitos superficiales ondulados, con posible influencia de calizas, común en llanuras de desborde.
- Contorsionado: De apariencia irregular, este patrón está vinculado a rocas metamórficas y a veces muestra influencia de captura de cuencas, donde una cuenca pierde parte de su drenaje a favor de otra.

**Figura 15**

*Patrones de Drenaje más Comunes*



*Nota: Tomado de (Howard, 1967)*

### **2.7.2.2. Orden de las Corrientes**

El orden de corrientes clasifica los ríos y sus tributarios de acuerdo con su jerarquía dentro de una cuenca hidrográfica. Este sistema organiza las corrientes de agua para medir su tamaño y complejidad:

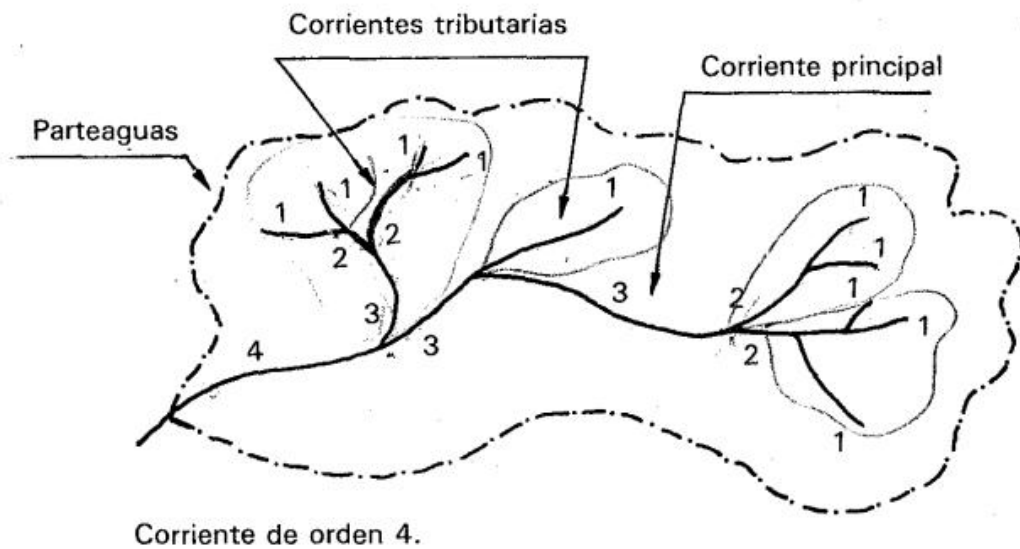
- Corriente de orden 1: Es el tributario más pequeño, sin ramificaciones.
- Corriente de orden 2: Se forma cuando se unen dos corrientes de orden 1.
- Corriente de orden 3: Se forma cuando se unen dos corrientes de orden 2, y así sucesivamente.

Este sistema ayuda a entender el flujo de agua y la estructura de la cuenca, ya que un mayor orden indica una cuenca más extensa y ramificada.

Además, dentro de una cuenca, las corrientes se organizan en áreas de drenaje que definen la superficie de la cuenca y su capacidad para transportar agua, dependiendo del volumen de escorrentía y la velocidad de flujo, lo que está influenciado por las características del suelo y el terreno.

Una cuenca altamente disectada, que responde rápidamente a una tormenta, se refleja en un orden de corrientes alto o una densidad elevada. Se pueden observar densidades u ordenes de corrientes pequeñas en lugares donde los suelos son altamente resistentes a la erosión o son relativamente permeables. En lugares donde el orden de corrientes presenta un número elevado, los suelos se erosionan fácilmente o son relativamente impermeables, las pendientes son altas y hay poca cobertura vegetal. (Aparicio Mijares, 1992)

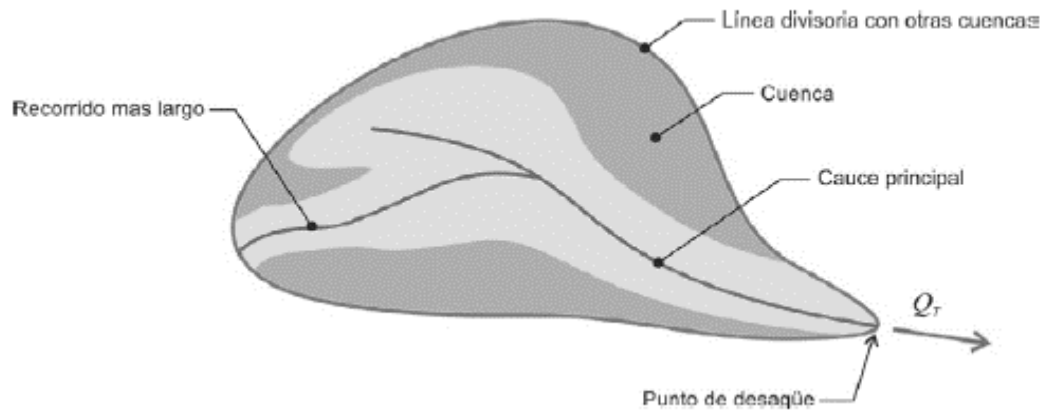
En la **Figura 16** se observar como en la ilustración los cauces más cercanos al parteaguas de la cuenca son de orden 1 posteriormente estos se unen hasta llegar a orden 4 en el punto de descarga de la cuenca.

**Figura 16***Ejemplo de Orden de Corrientes*

Nota: Tomado de (Aparicio Mijares, 1992)

### **2.7.2.3. Longitud del cauce principal**

La longitud del cauce principal es la distancia medida en planta entre el punto de descarga de una cuenca o punto más bajo y el punto de inicio del cauce que suele ser el punto más alto en la cuenca, este normalmente expresado en km.

**Figura 17***Cause más Largo*

*Nota: Tomado de (carreteros.orghtm , 2018)*

En la figura anterior se observa como a pesar de que el cauce presenta dos ramificaciones se toma como cauce principal la ramificación más extensa.

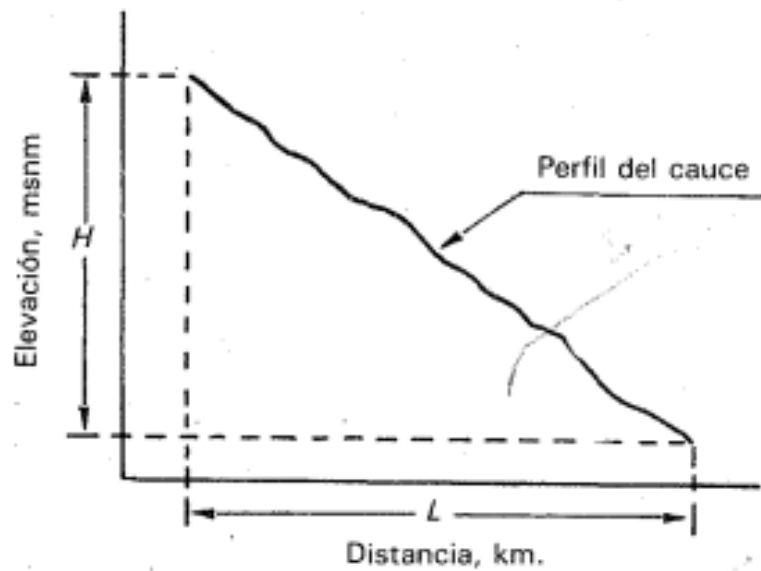
#### **2.7.2.4. Pendiente media del cauce principal**

Uno de los indicadores más significativos del grado de respuesta de una cuenca a una tormenta es la pendiente del cauce principal. Es necesario establecer una pendiente media ya que esta cambia a lo largo del curso de agua. Hay muchas maneras, pero las dos más populares son las siguientes:

El desnivel entre los extremos de la corriente, dividido entre su longitud en planta es la pendiente media. La representación del cauce principal se puede realizar como una gráfica en la cual se coloca en el eje X la distancia en km y en el eje Y la elevación medida a partir del nivel medio del mar (Ver **Figura 18**).

**Figura 18**

*Pendiente del Cauce Principal*

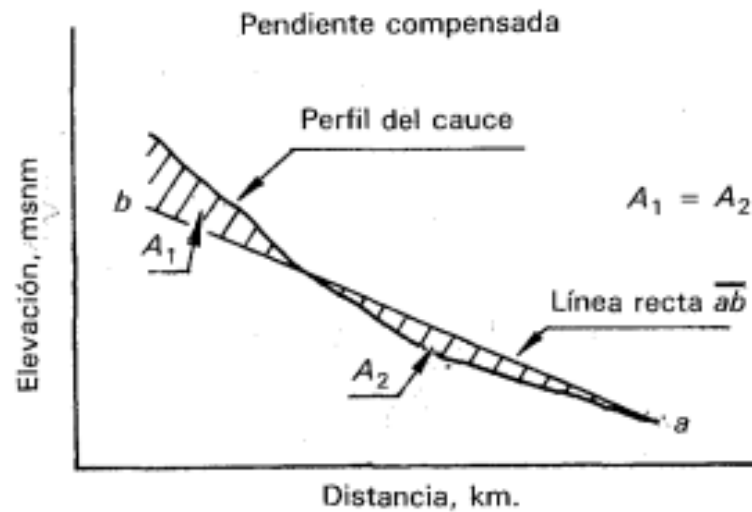


*Nota: "H" diferencia de elevación entre el inicio del cauce y el punto de salida, "L" longitud del cauce (Aparicio Mijares, 1992)*

1. La pendiente media es la de una línea recta que se apoya en el extremo inferior de la corriente y crea áreas iguales entre el perfil del cauce arriba y abajo de dicha línea.

**Figura 19**

*Pendiente Compensada por Método de Áreas*



*Nota: En el perfil del cauce principal se traza una línea recta y se puede observar como medida desde el cauce se forman dos áreas iguales. (Aparicio Mijares, 1992)*

#### **2.7.2.5. Tiempo de concentración**

El tiempo de concentración es el tiempo que tarda el agua en pasar del punto más alejado hasta la salida de la cuenca. Se define como el tiempo que transcurre entre el inicio de la lluvia y el establecimiento del gasto de equilibrio.

El tiempo de concentración, naturalmente, depende de la velocidad promedio del agua dentro de la cuenca y de la longitud máxima que debe recorrer hasta su salida. Esta velocidad depende de las pendientes y los cauces del terreno, así como de la rugosidad de la superficie.

Para calcular el tiempo de concentración se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$t_c = \frac{L}{3600 v} \quad \text{Ecuación (2. 12)}$$

Donde:

$t_c$  = Tiempo de concentración en horas

L = Longitud del cauce principal en km

v = Velocidad media del cauce en m/s

Para el cálculo de la velocidad se utilizarán los valores mostrados en la **Tabla 5** y la **Tabla 6** (Aparicio Mijares, 1992), para la primera tabla se puede determinar la velocidad media del cauce principal a partir de conocer la pendiente media del mismo, para la segunda tabla se puede determinar la velocidad media del cauce principal a partir de conocer la pendiente media del mismo y el tipo de terreno por el cual se abre paso el cauce principal:

**Tabla 5**

*Velocidad según Pendiente Media del Cauce Principal*

<i>Pendiente del cauce principal</i>	<i>Velocidad media</i>
<i>%</i>	<i>m/s</i>
1 – 2	0.6
2 – 4	0.9
4 – 6	1.2
6 – 8	1.5

*Nota: Tomado de (Aparicio Mijares, 1992)*

**Tabla 6**

*Velocidad según Pendiente Media del Cauce Principal y Tipo de Terreno*

<i>Velocidad media, m/s</i>			
<i>Pendiente, %</i>	<i>Bosque</i>	<i>Pastizales</i>	<i>Canal natural no bien definido</i>
<i>0 – 3</i>	<i>0.3</i>	<i>0.5</i>	<i>0.3</i>
<i>4 – 7</i>	<i>0.6</i>	<i>0.9</i>	<i>0.9</i>
<i>8 – 11</i>	<i>0.9</i>	<i>1.2</i>	<i>1.5</i>
<i>12 – 15</i>	<i>1.1</i>	<i>1.4</i>	<i>2.4</i>

*Nota: Tomado de (Aparicio Mijares, 1992)*

Otra forma de realizar el cálculo de tiempo de concentración es mediante la fórmula de Kirpich (Aparicio Mijares, 1992):

$$t_c = 0.06628 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \quad \text{Ecuación (2. 13)}$$

Donde:

$t_c$  = Tiempo de concentración en horas

L = Longitud del cauce principal en km

S = Pendiente media del cauce principal

Algunas otras ecuaciones para el tiempo de concentración son:

Formula de Témez (Aparicio Mijares, 1992):

$$t_c = 0.1251 \left( \frac{L}{S^{0.25}} \right)^{0.76}$$

Ecuación (2. 14)

Donde:

$t_c$  = Tiempo de concentración en horas

L = Longitud del cauce principal en km

S = Pendiente media del cauce principal

Formula de Ven Te Chow (Aparicio Mijares, 1992):

$$t_c = 0.273 \left( \frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.64}$$

Donde:

Ecuación (2. 15)

$t_c$  = Tiempo de concentración en horas

L = Longitud del cauce principal en km

S = Pendiente media del cauce principal

Formula de Johnstone Cross (Hidrogeotecnicas, 2024):

$$t_c = 0.04624 \left( \frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.5}$$

Ecuación (2. 16)

Donde:

$t_c$  = Tiempo de concentración en horas

L = Longitud del cauce principal en km

S = Pendiente media del cauce principal

Formula de Cuerpo de Ingenieros USA (Scribd, 2022):

$$t_c = 0.28 \left( \frac{L}{S^{0.25}} \right)^{0.76} \quad \text{Ecuación (2. 17)}$$

Donde:

$t_c$  = Tiempo de concentración en horas

L = Longitud del cauce principal en km

S = Pendiente media del cauce principal

Formula de Giandotti (Hidrogeotecnicas, 2024):

$$t_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{\Delta H}} \quad \text{Ecuación (2. 18)}$$

Donde:

$t_c$  = Tiempo de concentración en horas

L = Longitud del cauce principal en km

$\Delta H$  = Diferencia de elevación en km

A = Área de cuenca en km<sup>2</sup>

Formula de Williams (Hidrogeotecnicas, 2024):

$$t_c = 0.1914 \left( \frac{L}{A^{0.25} S^{0.25}} \right) \quad \text{Ecuación (2. 19)}$$

Donde:

$t_c$  = Tiempo de concentración en h

L = Longitud del cauce principal en km

S = Pendiente media del cauce principal

A = Área de cuenca en km<sup>2</sup>

## 2.8. Métodos de Transformación de Escorrentía a Caudal

### 2.8.1. Caudal máximo mediante método racional

El método de la fórmula racional para la estimación de caudales máximos se atribuye comúnmente a Lloyd-George (1906), aunque sus fundamentos teóricos fueron inicialmente establecidos por Mulvaney (1850). Dicho método permite calcular el caudal máximo que se espera que escurra por una sección determinada de la cuenca, bajo la hipótesis de que se presenta una lluvia de intensidad máxima constante y uniforme durante un periodo D, el cual equivale al tiempo de concentración de la sección.

$$Q_{\max} = CiA \qquad \text{Ecuación (2. 20)}$$

Donde:

$Q_{\max}$  = Caudal máximo

C= Coeficiente de escorrentía medio ponderado de la cuenca

A = área total de la cuenca vertiente

i = intensidad media máxima de la precipitación medida durante el tiempo de concentración

Una forma de obtener esta ecuación es mediante la relación que describe el coeficiente de escorrentía, que se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$C = \frac{V_{\text{escorrentia superficial total}}}{V_{\text{precipitado total}}} = \frac{\frac{V_E}{t}}{\frac{V_P}{t}} \quad \text{Ecuación (2. 21)}$$

También:

$$\frac{V_E}{t} = Q_E \quad \text{Ecuación (2. 22)}$$

Y:

$$\frac{V_P}{t} = iA \quad \text{Ecuación (2. 23)}$$

Donde:

$Q_E$  =Caudal de escorrentía directa

$i$  = Intensidad de lluvia,

$t$  = tiempo de duración de la lluvia

$A$  = área de drenaje.

Al hacer las sustituciones respectivas se obtiene que:

$$C = \frac{Q_E}{iA} \quad \text{Ecuación (2. 24)}$$

Al utilizar la formula racional se supone que el caudal de escorrentía toma un valor de caudal máximo o caudal pico  $Q_P$ , que se produce debido a una intensidad de lluvia en el área de drenaje y se mantiene por un tiempo

que es igual al periodo de concentración del caudal en el punto de consideración. Teóricamente este es el tiempo de concentración, que es el tiempo requerido para que la escorrentía superficial recorra desde la parte más remota de la cuenca hasta el punto de análisis, obteniendo de esta forma la ecuación de Caudal Máximo. (Monsalve Saenz, 1999)

### **2.8.2. Método Curva Numero (CN)**

El método de la curva número es una técnica empírica que permite estimar la escorrentía directa en una cuenca a partir de características del uso del suelo, el tipo de suelo y las prácticas de manejo y conservación implementadas en la zona. Este método utiliza un parámetro denominado "número de curva" (CN), que varía entre 30 y 100, y refleja la capacidad del terreno para infiltrar agua; valores más bajos indican una alta infiltración y, por ende, menor escorrentía, mientras que valores más altos indican lo contrario.

La metodología se fundamenta en la ecuación de escorrentía del Soil Conservation Service (SCS), que se expresa generalmente como:

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad \text{Para } P > 0.2S \quad \text{Ecuación (2. 21)}$$

Donde:

Q = Escorrentía directa (milímetros)

P = precipitación total (milímetros)

S: Almacenamiento potencial máximo

El valor de S es calculado mediante la siguiente ecuación:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad \text{Ecuación (2. 22)}$$

El método asume que una parte inicial de la precipitación, denominada abstracción inicial, se pierde por infiltración, evaporación y retención en la vegetación, y que el exceso de lluvia, al superar este umbral, se convierte en escorrentía directa. Este enfoque se utiliza ampliamente en el diseño de sistemas de drenaje y en estudios de gestión de recursos hídricos, al integrar de forma sencilla variables ambientales y de manejo del terreno (US Natural Resources Conservation Service, 1996).

De acuerdo a un análisis hecho por Hydrologic Engineering Center (HEC) que se encargó de reproducir el informe del SCS titulado *Urban Hydrology for Small Watersheds*, conocido comúnmente como TR-55, concluyó que dichas tablas ofrecen estimaciones del Número de Curva (CN) en función del Grupo Hidrológico del Suelo (HSG), el tipo de cobertura, el tratamiento aplicado, la condición hidrológica, la condición antecedente de escorrentía (ARC) y el porcentaje de área impermeable en la cuenca. El TR-55 proporciona directrices específicas para el uso de estas tablas.

Los suelos se clasifican en cuatro grupos hidrológicos (A, B, C y D) según su tasa mínima de infiltración, determinada en suelo desnudo tras un periodo prolongado de humectación. Existen diversas metodologías para determinar el tipo de cobertura, siendo las más comunes la inspección de campo, el análisis de fotografías aéreas y la consulta de mapas de uso del suelo.

La condición hidrológica se define como la influencia de la cobertura y el tratamiento sobre la infiltración y la escorrentía, y generalmente se estima a partir de la densidad de la vegetación y del residuo en áreas de muestreo. Una condición hidrológica favorable indica que, para un grupo hidrológico, tipo de cobertura y tratamiento específicos, el suelo presenta un bajo potencial de escorrentía. Entre los factores a considerar para estimar el efecto de la cobertura sobre la infiltración y la escorrentía se incluyen: (a) la densidad de la cobertura arbórea o la vegetación en céspedes, cultivos u otras áreas; (b)

la cantidad de cobertura durante todo el año; (c) la proporción de pasto o leguminosas de siembra cerrada en las rotaciones; (d) el porcentaje de cobertura de residuos; y (e) el grado de rugosidad superficial. Asimismo, al calcular el CN en áreas urbanas se debe considerar el porcentaje de área impermeable y los mecanismos mediante los cuales se conduce la escorrentía desde estas áreas hacia los sistemas de drenaje. Se considera que un área impermeable está conectada si la escorrentía generada fluye directamente hacia el sistema de drenaje, o si se presenta como un flujo superficial concentrado y poco profundo que transita sobre una zona permeable antes de ingresar al sistema. Por otro lado, la escorrentía proveniente de áreas impermeables no conectadas se dispersa en forma de flujo en lámina sobre una zona permeable (U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, s.f.)

Para el caso de esta investigación se presentan las tablas de CN proporcionadas por el RLDOTAMSS:

**Figura 20**

*Usos de Suelo*

Uso de la tierra	Prácticas de cultivo	Condiciones hidrológicas	Características hidrológicas del suelo			
			A	B	C	D
Barbecho	Surco recto	Pobre	77	86	91	94
Cultivos en hilera	Surco recto		72	81	88	91
	Surco recto	Pobre	67	78	85	89
	Curvas a nivel	Bueno	70	79	81	88
	Curvas a nivel	Pobre	65	75	82	86
	Curvas a nivel/terrazas	Bueno	66	74	80	82
	Curvas a nivel/terrazas	Pobre	62	71	78	81
Grano pequeño	Surco recto		65	76	84	88
	Surco recto	Pobre	63	75	83	87
	Curvas a nivel	Bueno	63	74	82	85
	Curvas a nivel	Pobre	61	73	81	84
	Curvas a nivel/terrazas	Bueno	61	72	79	82
	Curvas a nivel/terrazas	Pobre	59	70	78	81
Legumbres o praderas rotativas	Surco recto	Pobre	66	77	85	89
	Surco recto	Bueno	58	72	81	85
	Curvas a nivel	Pobre	64	75	83	85

	Curvas a nivel	Bueno	55	69	78	83
	Curvas a nivel/terrazas	Pobre	63	73	80	83
	Curvas a nivel/terrazas	Bueno	51	67	76	80
Pastizales		Pobre	68	79	86	89
	Curvas a nivel	Regular	49	69	79	84
	Curvas a nivel	Bueno	39	61	74	80
	Curvas a nivel	Pobre	47	67	81	88
	Curvas a nivel	Regular	25	59	75	83
		Bueno	6	35	70	79
Praderas(per m)		Bueno	30	58	71	78
Bosques	Con cobertura pobre	Pobre	45	66	77	83
		Regular	36	60	73	79
	Con buena cobertura	Bueno	25	55	70	77
Granjas			59	74	82	86
Caminos terracería			72	82	87	89
Caminos pavimentados sin cunetas			74	84	90	92
Caminos pavimentados con cunetas			98	98	98	98
Áreas comerciales (80% impermeable)			89	92	94	95
Áreas industriales (72% impermeable)			81	88	91	93
Áreas residenciales (65% impermeable)			77	85	90	92
Áreas residenciales (25% impermeables)			54	70	80	85
Pavimento y tejados (superficies impermeables)			100	100	100	100

### Donde:

GRUPO A:	Suelos con alta capacidad de infiltración. Suelos profundos, arenas y gravas bien o excesivamente drenadas.
GRUPO B	Suelos con moderada capacidad de infiltración. Suelos de moderadamente profundos a profundos, con texturas moderadamente gruesas
GRUPO C	Suelos con baja capacidad de infiltración. Suelos con estratos que impiden el movimiento hacia abajo del agua o suelos con textura de moderadamente fina a fina.
GRUPO D	Suelos con muy baja capacidad de infiltración. Suelos arcillosos, suelos con altas napas freáticas permanentes o con materiales impermeables cerca de la superficie.

*Nota: Tomado de (OPAMSS, 2024)*

## 2.9. Análisis de inundaciones

El Salvador se encuentra ubicado en una zona de alta pluviosidad con incidencia de eventos de origen meteorológico incluyendo huracanes en todas sus categorías. La base de datos histórica indica que en el país se han registrado más de 2,100 eventos de inundación a lo largo de un siglo. De los eventos de inundación registrados entre 1900 y 2012 se encuentra que las causas más comunes son las lluvias (61% de los eventos históricos), las depresiones tropicales (19%), los huracanes (10%) y tormentas tropicales (6%) (DesInventar, 2013).

Para estudiar las inundaciones en El Salvador, los especialistas combinan dos tipos de análisis: hidrológico e hidráulico. En la parte hidrológica, se recopilan datos sobre el clima, el terreno y el uso del suelo para entender cómo la lluvia se convierte en escorrentía. Se utilizan diferentes métodos de cálculo, como el método racional o el método SCS-CN, y se elaboran gráficos llamados hidrogramas, que muestran cómo varía el flujo de agua en diferentes periodos de retorno, por ejemplo, cada 10, 25, 50 o 100 años.

Luego, en la fase hidráulica, se ingresan estos datos en programas de computadora especializados, como HEC-RAS, HEC-HMS, MIKE 11 o SWMM, para simular cómo se mueve el agua en ríos, quebradas y zonas urbanas.

En este caso particular, el programa HEC-HMS se utilizará para analizar cómo se comporta el agua de lluvia en diferentes partes de una cuenca. Para hacerlo, divide el área en varias subcuencas, es decir, secciones más pequeñas que se estudian por separado. El programa realiza una serie de cálculos en cuatro fases (A, B, C y D). Las tres primeras fases (A, B y C) se aplican dentro de cada subcuenca, mientras que la última (fase D) se usa para calcular cómo se mueve el agua cuando sale de una subcuenca y fluye

por los ríos o canales hacia otras zonas. En los lugares donde se juntan varios flujos de agua, el programa suma los caudales de cada uno y finalmente entrega los resultados en forma de tablas y gráficos, mostrando cómo varía el flujo de agua a lo largo del tiempo (lo que se llama un hidrograma), tanto para cada subcuenca como para toda la cuenca en general.

La fase A del modelo se enfoca en las “pérdidas”, es decir, en la parte de la lluvia que no se convierte en escorrentía directa porque no llega a correr por la superficie. Estas pérdidas se dividen en tres tipos principales:

**A1. Interceptación por la vegetación (Canopy):** Cuando hay árboles, arbustos u otro tipo de vegetación, una parte del agua de lluvia no llega al suelo porque queda atrapada en las hojas. Esa agua se evapora más tarde y, por lo tanto, no participa en el escurrimiento. Este fenómeno se llama interceptación.

**A2. Almacenamiento superficial (Surface Storage):** Otra parte de la lluvia se acumula en pequeñas depresiones del terreno, como charcos o huecos en el suelo. Esa agua puede evaporarse o filtrarse con el tiempo. Este tipo de almacenamiento es más común en modelos que simulan lo que ocurre de manera continua, a lo largo de muchos días o incluso meses.

**A3. Infiltración (Loss):** Es el proceso por el cual el agua de lluvia se introduce en el suelo. Esta es la parte más importante de las pérdidas. En la mayoría de los casos, los otros dos tipos de pérdida (interceptación y almacenamiento superficial) no se consideran en los cálculos por defecto, y el programa solo toma en cuenta cuánto de la lluvia logra filtrarse en la tierra. La cantidad de lluvia que no se infiltra se conoce como lluvia neta, y esa es la que se usará en la siguiente fase (fase B) para calcular cuánta escorrentía se genera.

La fase B se encarga de convertir el exceso de lluvia en escorrentía que fluye hacia un punto específico. El programa ofrece dos formas principales para hacer esta transformación:

**1. Modelos empíricos (también llamados modelos teóricos del sistema):** Estos modelos son los más tradicionales y se usan desde hace mucho tiempo. No intentan explicar detalladamente cómo se mueve el agua dentro del terreno, sino que buscan una relación directa entre la cantidad de lluvia que no se infiltra y el flujo de agua que llega a un punto. Para hacerlo, se utilizan fórmulas simples y valores que se eligen según qué tan bien se ajustan a los datos reales. Estos valores no representan características físicas reales del suelo o del agua, sino que se ajustan hasta que el modelo da resultados parecidos a lo que se ha observado. Es decir, no se analiza lo que pasa exactamente dentro del suelo o en las pequeñas corrientes, sino que se busca que el resultado final tenga sentido y se parezca a la realidad.

**2. Modelo conceptual:** Este tipo de modelo intenta representar, de forma más detallada, cómo se mueve el exceso de agua sobre el terreno. Incluye aspectos físicos como la velocidad, la pendiente y la forma del terreno. Dos ejemplos de este tipo que ofrece el programa son el modelo de onda cinemática y el modelo bidimensional de onda difusiva. Aunque estos modelos ofrecen una visión más completa, también resultan más complejos y requieren más datos para funcionar bien.

La fase C considera la existencia de un flujo base sobre la superficie ya que, cuando el agua de lluvia se filtra hacia el subsuelo, una parte puede perderse en capas profundas del terreno, donde queda almacenada en acuíferos. Sin embargo, otra parte solo se queda ahí por un tiempo corto y luego vuelve a salir a la superficie. Esta porción de agua que regresa se conoce como escorrentía base o flujo base. Cuando se suma este flujo base con la escorrentía directa (es decir, el agua que corre por la superficie sin

filtrarse), se obtiene el hidrograma total, que muestra cómo varía el caudal con el tiempo durante y después de una lluvia.

Por último, la fase D consiste en la ejecución del proyecto en HMS, o el comando “RUN”, el cual genera los cálculos necesarios que se verán reflejados en esquemas o tablas con los datos que se deseen obtener. ((Hydrologic Engineering Center's, 2013)

Para el caso de la presente investigación el programa QGIS será utilizado para la preparación, análisis y visualización de la información geoespacial necesaria. QGIS permite incorporar datos como Modelos Digitales de Elevación (DEM), mapas de uso del suelo, redes de drenaje y datos topográficos de alta resolución. Con estas capas, los ingenieros realizan análisis de acumulación de agua, delineación de cuencas y determinación de la dirección del flujo, lo que resulta en mapas de áreas potencialmente inundables y en estimaciones de la profundidad y extensión de la inundación. Estos resultados son esenciales para identificar zonas de alto riesgo, planificar medidas de mitigación y apoyar la toma de decisiones en el diseño de infraestructuras de protección y drenaje. (QGIS Development Team, 2022)

Se requiere que se sigan las prácticas estándar de ingeniería, considerando que los elementos técnicos a evaluar incluyen:

1. La disponibilidad y resolución de datos topográficos.
2. El tamaño de celda y el tiempo de cómputo requerido.
3. La presencia de inundaciones originadas por fuentes múltiples.
4. La prevalencia de condiciones de flujo bifurcado o dividido, así como áreas donde el flujo resulta ineficaz.
5. La existencia de diques—incluyendo desbordamientos y rupturas—u otras estructuras hidráulicas laterales.
6. La presencia de represas o embalses.
7. La incidencia de inundaciones superficiales.

8. Las condiciones hidráulicas, distinguiendo entre regímenes supercríticos y críticos.
9. Las condiciones hidrológicas y del suelo, como tasas elevadas de infiltración y el uso del suelo.
10. La presencia de infraestructuras como puentes, canales y alcantarillas.
11. Las condiciones de contorno.
12. La estabilidad del modelo.
13. La calibración del mismo.
14. La gestión, transferencia y almacenamiento de datos.
15. La consideración de condiciones estacionarias frente a inestacionarias.
16. La incertidumbre inherente a los datos.

Para asegurar que el modelo refleje correctamente la realidad, se comparan los resultados con datos históricos y mediciones en el campo. Este proceso permite identificar las zonas con mayor riesgo de inundación y ayuda a diseñar soluciones efectivas para reducir los daños, como mejoras en el drenaje o la construcción de infraestructuras adaptadas a las condiciones del entorno (U.S. Environmental Protection Agency, 2016).

En cuanto a la decisión de aplicar Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), los especialistas analizan detalladamente el área y las condiciones hidrológicas. Se evalúa la cantidad y frecuencia de las precipitaciones, la densidad del área urbana, la disponibilidad de espacios verdes y el costo-beneficio de implementar estas soluciones. Se seleccionan los SUDS cuando se busca no solo controlar las inundaciones, sino también mejorar la calidad ambiental y fomentar la gestión integral del agua de lluvia. Los organismos del Estado, a través de entidades como OPAMSS y MINED, emiten normativas y lineamientos técnicos, supervisan estudios y coordinan proyectos para asegurar que los SUDS se integren correctamente en la planificación urbana. (Gobierno de El Salvador, 2018)

## **2.10. Descripción de Softwares Aplicables al Análisis Hidrológico y de inundaciones**

### **2.10.1. HEC-RAS**

Según el sitio Hydrologic Engineering Center's encargado de distribuir el software HEC-RAS define a este como:

HEC-RAS es un programa que puede modelar la hidráulica de flujo de aguas de ríos naturales y de otros canales. Este software permite al usuario realizar cálculos de flujo constante unidimensional y bidimensional de flujo inestable, cálculos de sedimentos/lechos trasportables y modelado de temperatura del agua/calidad del agua. (Hydrologic Engineering Center's, 2013)

### **2.10.2. HEC-HMS**

El Sistema de Modelado Hidrológico (HMS) se crea para simular cómo el agua de lluvia se convierte en escorrentía dentro de cuencas hidrográficas, especialmente aquellas con forma ramificada, como un árbol. Este programa se adapta a distintos lugares geográficos y permite analizar muchos tipos de situaciones relacionadas con el agua.

Los especialistas lo usan tanto en grandes cuencas fluviales como en zonas pequeñas, ya sean urbanas o naturales. Con este sistema se generan hidrogramas, que muestran cómo fluye el agua a lo largo del tiempo. (Hydrologic Engineering Center's, 2013)

### **2.10.3. QGIS**

El software qgis tiene diversos usos gracias a su habilidad de procesar mapas, definiéndose de la siguiente forma:

QGIS es un Sistema de Información Geográfica (SIG) de Código Abierto licenciado bajo GNU - General Public License. Además, QGIS es un proyecto oficial de Open Source Geospatial Foundation (OSGeo) y puede usarse en los sistemas operativos de Linux, Unix, Mac OSX, Windows y Android además de soportar numerosos formatos y funcionalidades de datos vector, datos ráster y bases de datos. (QGIS, 2002)

### **2.10.4. GOOGLE EARTH**

La herramienta Earth que ofrece Google es una de las bases de datos cartográficas más extensas que existen, ya que aparte de proporcionar datos de elevación nos permite ver imágenes de 360° de la zona de estudio. Es además una herramienta para crear mapas y funciones de colaboración que contempla imágenes por satélite de alta resolución, explora relieves y edificios 3D de cientos de ciudades, y permite dar acercamiento en calles y barrios con las perspectivas de 360° de Street View. (Google Earth, 2005)

## **2.11. Marco legal en El Salvador relacionado con la regulación del impacto hidrológico de las construcciones**

El Salvador, al igual que otros países, se encuentra vinculado a diversos tratados y convenios internacionales en materia ambiental. Estos instrumentos internacionales sirven como referentes y guían la elaboración y actualización de la legislación nacional. Entre los convenios más relevantes destacan:

- **Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC):** Establece un marco general para la lucha contra el cambio climático, incluyendo medidas para la adaptación y mitigación de sus efectos.
- **Convenio sobre la Diversidad Biológica (CDB):** Promueve la conservación de la diversidad biológica, el uso sostenible de sus componentes y la participación justa y equitativa en los beneficios que se deriven de la utilización de los recursos genéticos.
- **Comité de Gestión de Cursos de Agua Internacional:** La Ley General de Recursos Hídricos, aprobada en diciembre de 2021, establece el Comité de Gestión de Cursos de Agua Internacional, encargado de supervisar las cuencas hidrográficas compartidas con otros países. Este organismo lo integran representantes de la Autoridad Salvadoreña del Agua (ASA) y de varios ministerios, con Relaciones Exteriores como entidad coordinadora. El Comité se reúne periódicamente para intercambiar información y fortalecer la gobernanza y cooperación regional en la protección de los recursos hídricos. Además, analiza y promueve tratados sobre cuencas transfronterizas, ya sean bilaterales o multilaterales. Hasta la fecha, ha suscrito un convenio con Plan Trifinio, una entidad del SICA que trabaja en el desarrollo ambiental y territorial en la frontera entre El Salvador, Guatemala y Honduras. También avanza en el proceso de adhesión a la Convención del Agua, con el objetivo de mejorar la gestión y cooperación en materia hídrica. El país cuenta con varias cuencas transfronterizas, entre ellas las de los ríos Lempa, Paz y Goascorán, cuya gestión busca garantizar un uso equitativo y sostenible del agua. (ASA, 2021)

- En octubre de 2021, El Salvador se incorporó como el 74º socio gubernamental de la alianza Saneamiento y Agua para Todos (SWA). A través de la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA), el país se comprometió a mejorar el acceso al agua potable y al saneamiento, reconociendo la brecha existente entre las zonas urbanas y rurales. El Salvador busca fortalecer el sector hídrico nacional y fomentar el intercambio de experiencias con otros miembros de la alianza. Además, está interesado en aprender de otros países sobre estrategias de financiación para mejorar el acceso a estos servicios esenciales. (SWA, 2021)

### **2.11.1. Ley de Medio Ambiente**

La Ley de Medio Ambiente de El Salvador publicada en marzo de 1998, junto con otras leyes complementarias, establece un conjunto de principios, normas y procedimientos para la gestión ambiental del país. Lo que se busca con esta ley es prevenir o minimizar los daños ambientales antes de que ocurran.

#### **2.11.1.1. Protección del Recurso Hídrico**

La Ley de Medio Ambiente de El Salvador reconoce la importancia del agua como un recurso natural estratégico y establece diversas disposiciones para su protección y gestión sostenible, por ejemplo el capítulo II “Establecimiento de las normas técnicas de calidad ambiental” en el artículo 48 explica como el Ministerio ayudará a mejorar el manejo de cuencas hidrográficas con una ley especial, además de crear un comité que ayude a integrar a las autoridades locales para asegurar el cuidado de las cuencas hidrográficas. Seguido de esto se mencionan también criterios de supervisión en los que se deja claro que el Ministerio es el ente responsable de asegurar

la disponibilidad y calidad del agua en la república de El Salvador, por ende, se encarga de crear un reglamento especial que protege al recurso hídrico (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2022).

En cuanto al recurso del agua, lo que la Ley de medio ambiente busca es:

- **Gestión completa de los recursos hídricos:** Se promueve una gestión integral que considere los aspectos cuantitativos y cualitativos del agua, así como la forma de relacionarse con otros componentes del medio ambiente.
- **Prevención y control de la contaminación del agua:** Se establecen normas para prevenir y controlar la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas.
- **Protección de los ecosistemas acuáticos:** Se establecen medidas para proteger los ecosistemas acuáticos, como ríos, lagos, humedales y zonas costeras.
- **Uso eficiente del agua:** Se promueve el uso correcto por parte de la población, para evitar desperdicios y usos excesivos.

### ***2.11.2. Reglamento General de la Ley de Medio Ambiente***

El Reglamento General de la Ley de Medio Ambiente de El Salvador es un instrumento legal complementario que detalla y desarrolla las disposiciones contenidas en la Ley de Medio Ambiente. En otras palabras, si la Ley establece los principios generales, el Reglamento se encarga de definir los procedimientos, requisitos y mecanismos específicos para su aplicación.

El Reglamento proporciona una interpretación detallada de la Ley, evitando ambigüedades y facilitando su aplicación por parte de las autoridades y los ciudadanos. Además, define los procedimientos administrativos, los requisitos técnicos y los plazos para la realización de trámites ambientales, lo que garantiza una mayor eficiencia en la gestión

ambiental. Además, este aborda temas específicos como la evaluación de impacto ambiental, la gestión de residuos, la calidad del aire y del agua, entre otros, proporcionando normas técnicas y criterios específicos para cada caso.

Para este estudio el interés principal es en el manejo de recursos hídricos en una cuenca o microcuenca, información que esta detallada en el Art 69 ( Criterios de uso para la protección del recurso hídrico) en el cual deja claro que para la protección del agua en cuencas hidrográficas y mantos acuíferos es importante que la gestión tenga un enfoque que asegure la calidad y disponibilidad del vital recurso, además de asegurar la sostenibilidad de este (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2009). Para garantizar que esto se cumpla se toman los siguientes criterios:

- Todo uso del agua ya sea para consumo humano, actividades industriales, agrícolas o para mantener ecosistemas, debe estar respaldado por estudios que evalúen la cantidad y calidad del agua disponible en la cuenca.
- Se establecen límites máximos para el uso del agua, asegurando que se mantenga la cantidad necesaria para el funcionamiento de los ecosistemas acuáticos y terrestres.
- Se promueven prácticas que minimicen la contaminación y el desperdicio del agua, garantizando así su calidad y disponibilidad para usos futuros.
- Se establece que la extracción de agua subterránea debe estar limitada por la tasa de recarga natural del acuífero, evitando su agotamiento.
- Se fomenta la creación de políticas e incentivos que promuevan el uso eficiente del agua y la conservación del suelo.

Seguido de esto se encuentra el artículo 70 (Participación de usuarios del recurso hídrico) en el que se incentiva la participación de la persona o

entidad que hace uso del agua, buscando que las comunidades hagan el uso correcto y necesario sin incurrir en gastos excesivos e irresponsables de este. Además, promueve el uso de tecnologías que se adapten a las normativas actuales de uso del agua, el cual puede aplicarse a empresas productoras. (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2009).

En el capítulo 2 “De las aguas y los ecosistemas acuáticos” se encuentran los artículos del 96 al 101 que hablan sobre permisos y gestión del agua:

El artículo 96 que habla del derecho de aprovechamiento afirma que el derecho al agua puede ser otorgado a personas o entidades, pero y cuando este uso no afecte negativamente al medio ambiente, la sociedad o el desarrollo del país. De esta forma se asegura que el uso del agua sea responsable y sostenible.

El artículo 97 explica que, para poder utilizar cualquier fuente de agua, ya sea superficial o subterránea, es obligatorio obtener un permiso ambiental. Esto garantiza que el uso de agua se realice de manera compatible con la protección del medio ambiente y cumple con los estándares establecidos.

El artículo 98 hace saber que la autoridad encargada del recurso hídrico tiene la facultad de supervisar y regular el uso del agua, esto con el objetivo de tomar medidas para prevenir la sobreexplotación, contaminación, o uso incorrecto del agua.

El artículo 99 que habla de la prioridad de derechos de aprovechamiento deja claro que, al momento de otorgar permisos para el uso del agua, el uso para consumo humano debe tener prioridad. Eso es importante ya que el acceso al agua se considera un derecho fundamental, y no se puede poner por debajo de otros, como uso para industrias.

El artículo 100 ayuda a que los sistemas acuáticos sean conservados adecuadamente, esto incluye también a la fauna dentro de este. Para gestionar adecuadamente los ecosistemas acuáticos se requiere información detallada sobre la calidad y cantidad de agua, los contaminantes presentes, entre otros.

El artículo 101 da lineamientos en los que debe basarse la gestión del agua, como lo es el cambio de sistemas y procesos, tanto en administración del uso de aguas municipales, como en las grandes industrias productoras. Se hace mención sobre hacer un correcto diseño, construcción y operación de sistemas colectores de aguas negras y desperdicios, además promueve la protección y buen aprovechamiento del agua superficial y subterránea. (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2009).

### **2.11.3. Ley de Urbanismo y Construcción**

Esta ley fue publicada en el diario oficial el 11 de junio de 1951 y fue creada para asegurar que las construcciones de urbanización no solo beneficien a los urbanizadores, sino que se cumplan todas las necesidades de quien residirá en ellas.

El artículo 1 establece al VMVDU (Viceministerio de Vivienda y Desarrollo Urbano) como el encargado de crear políticas y normas generales para cualquier tipo de urbanización y construcción a nivel de país. Pero para tener una planificación más diversificada se establece que los municipios serán responsables de crear sus propios planes de desarrollo urbano, cumpliendo siempre con los planes nacionales. En caso de que haya ausencia de planes locales estos serán aprobados por el viceministerio.

El artículo 2 presenta un listado de requisitos para obtener la aprobación de cualquier plan de desarrollo. Este listado cuenta con requisitos

técnicos y documentales donde se encuentran levantamientos topográficos, clase de urbanización, estudios de impacto ambiental, entre otros. De igual forma se establece un requisito mínimo en la dotación de servicios públicos como el agua y un mínimo en los espacios verdes en las urbanizaciones.

El artículo 3 indica que los materiales deben ser aprobados por un laboratorio especializado para asegurar su calidad y el efecto que estos pueden generar al medio.

El artículo 4 indica que para obtener aprobación del VMVDU se debe considerar el área de la urbanización en su totalidad y los efectos a terceros que estos generaran, ya que el hacer un estudio local no calificará para ser aprobado. De igual forma todo proyecto debe ser ejecutado por profesionales autorizados por la ley.

En los artículos 5 al 12 de esta ley se dan indicaciones sobre el inicio de obras y periódicas supervisiones que estas tendrán, se explican sobre las sanciones en caso de incumplimientos, vigencia de aprobaciones, entre otros aspectos. (Viceministerio de Vivienda y Desarrollo Urbano, 1991)

#### ***2.11.4. Reglamento a La Ley de Urbanismo y Construcción***

De acuerdo a las consideraciones que se presentan esta ley, una de las principales razones para su creación es:

Que la urbanización está creciendo desordenadamente y a un ritmo acelerado en el país, constituyendo un atentado para los recursos agrícolas, hidráulicos y de toda índole; lo que en gran parte es debido a la falta de una regulación que controle adecuadamente tales desarrollos. (Viceministerio de Vivienda y Desarrollo Urbano, 1991)

Los artículos 1 al 10 de esta ley fueron derogados, por lo que sus disposiciones dan inicio el artículo 11.

El artículo 11 presenta los requisitos necesarios para clasificar una urbanización industrial. Este tipo de urbanizaciones debe estar dentro de una zona industrial previamente designada en el plan de zonificación o por lo determinado por el Ministerio de Obras Públicas, también se deben contar con los servicios necesarios para operación industrial, ya que sus consumos de agua son mayores y el sistema de drenaje de sus residuos es especial para sus desechos. Debe ser de fácil acceso para un mejor transporte de mercancía y personal. Debido a la contaminación e incomodidad que estas pueden generar en la comunidad debe existir una separación física entre la zona industrial y las áreas residenciales aledañas, dicha separación debe ser una franja de terreno verde de al menos 20 metros, esta área verde está incluida dentro del mínimo de área verde requerido el cual será determinado por la DUA (Dirección de urbanismo y Arquitectura) pero no será nunca menor al 10% del área total a urbanizar.

El artículo 12 presenta los requisitos necesarios para clasificar una urbanización comercial. Al igual que el caso anterior debe estar ubicada en una zona designada como comercial de acuerdo al plan de zonificación o determinada por el MOP a través de la DUA. El tamaño mínimo de los lotes es de 300 metros cuadrados, aunque en ciertos casos justificados pueden hacerse excepciones. Se requiere un mínimo del 10% del área total a urbanizar destinado a áreas verdes.

El artículo 14 establece los requisitos para la aprobación de proyectos de urbanización de desarrollo compleja. Este tipo de urbanización se refiere a las que involucran múltiples usos de suelo, como residencial, comercial, industrial, entre otros. Los requisitos incluyen un mínimo del 10% del área total del proyecto destinada a espacios verdes, pero no se limita a esto, ya que se solicita el plano de ubicación, plano de zonificación del terreno según usos,

planos de agua potable, lluvia y drenaje de aguas residuales, plano de calles, aceras y niveles del terreno, descripción del proyecto y sus etapas de desarrollo. Los requisitos establecidos garantizan que estos proyectos sean planificados de manera integral, considerando aspectos como la infraestructura, los servicios públicos y los espacios verdes, con el fin de promover un desarrollo urbano sostenible y ordenado. (Viceministerio de Vivienda y Desarrollo Urbano, 1991)

#### **2.11.5. Código de Salud**

Este código fue publicado en el Diario Oficial el 28 de abril de 1988 y tiene como objetivo garantizar el cumplimiento de los derechos constitucionales relacionados con la salud. Es importante mencionar que todos los organismos del estado, entidades autónomas y particulares deben colaborar con las autoridades de salud para cumplir con los objetivos que busca este código.

En este documento se abarcan diversas áreas de interés para la comunidad, sin embargo, para este estudio es de mayor importancia lo relacionado con el medio ambiente.

La sección siete de este código titulado “Saneamiento del ambiente Urbano y Rural” explica que el Ministerio se encargara de desarrollar programas de saneamiento ambiental cuyo objetivo es mejorar el abastecimiento de agua potable, el correcto manejo de aguas residuales, la eliminación de basuras, el control y eliminación de animales dañinos para la comunidad, entre otros. De igual forma en sus artículo 57 al 60 se hace saber que el Ministerio de Salud puede intervenir y supervisar todas las actividades relacionadas con el saneamiento básico y la ingeniería sanitaria, incluyendo construcción, mantenimiento y operación de sistemas de agua potable, aguas residuales y manejo de residuos. En situaciones de riesgo para la salud, el ministerio puede realizar inspecciones en cualquier propiedad pública o

privada. Si en alguna inspección se detectan condiciones insalubres o deficiencias en el saneamiento, el Ministerio puede ordenar que tomen medidas para corregir la situación.

La sección ocho, titulada “Agua potable” presenta 5 artículos con respecto al manejo de agua potable en las comunidades.

El artículo 61 menciona que las comunidades rurales y urbanas deben tener acceso al servicio de agua potable, y en caso de no tenerlo, el Estado deberá proponer planes y usar sus recursos para dar el servicio a través de organismos especializados.

El artículo 62 se centra en las zonas rurales ya que el nivel de desarrollo en estas áreas suele ser menor que la urbana, es por eso que el Estado apoyará en la construcción y mantenimiento de sus propios sistemas de abastecimiento de agua, el apoyo será de tipo económico y técnico.

El artículo 63 ayuda a asegurar que el agua destinada a consumo humano cumpla con una calidad sanitaria, calidad que será evaluada según el criterio del Ministerio.

El artículo 64 explica que cualquier construcción, reparación o modificación de una obra pública o privada que tenga como objetivo el uso de agua para consumo humano deberá ser aprobada por el Ministerio. Esto se hará a través de una solicitud escrita con las especificaciones y planos de las obras proyectadas. (Ministerio de Salud, 2019)

### **2.11.6. Ley de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Área Metropolitana de San Salvador y los Municipios Aledaños**

Como lo indica el primer artículo de esta ley, su principal finalidad es proveer un marco legal para ordenar y desarrollar de forma adecuada el territorio del área metropolitana de San Salvador y los municipios que lo rodean. Lo que se busca es asegurar un correcto uso de los recursos y tener una planificación urbana eficiente.

El título uno define cuales son los municipios que conforman el AMSS y debido a su desarrollo urbano se establece que forman una sola unidad urbana. También se establece el procedimiento para incorporar nuevos municipios al AMSS, el cual requiere de una solicitud que debe enviar el municipio interesado y la aprobación del Órgano Legislativo. Uno de los objetivos es una planificación continua y completa, la cual será responsabilidad de las municipalidades, organismos especializados y entidades gubernamentales relacionadas con proveer servicios públicos. (OPAMSS, 2020)

El título dos presenta el marco institucional para la gestión del AMSS, y el artículo 7 los define de la siguiente forma:

Art. 7.- El Marco Institucional del AMSS estará constituido por cuatro organismos que se identifican y diferencian por sus siglas, nombres y funciones de la siguiente manera: COAMSS: Consejo de Alcaldes del Área Metropolitana de San Salvador, creado por los Concejos Municipales del AMSS y de los municipios aledaños. Organismo administrador que ejercerá las funciones en materia urbanística, que los Concejos Municipales que lo conforman le encomienden de conformidad al Código Municipal. CODEMET: Consejo de Desarrollo Metropolitano. Organismo eminentemente político. OPAMSS: Oficina de Planificación del AMSS organismo técnico, que actuará como Secretaría Ejecutiva del Consejo de Alcaldes. COPLAMSS: Comité de

Planeación del AMSS, organismo técnico consultivo, asesor del Consejo de Desarrollo Metropolitano. (OPAMSS, 2020)

El capítulo dos presenta el marco técnico de esta ley. Inicia describiendo el Plan Metropolitano de Desarrollo y Ordenamiento Territorial como un plan general que define la estructura urbana y los usos de suelo a gran escala, propone planes sectoriales para áreas sociales como vivienda, educación, salud, transporte, y también planes especiales que son más detallados para áreas específicas o para la protección de recursos naturales y patrimonio cultural.

El artículo 14 define al Esquema Director del AMS como la base del PMDOT y estipula que este debe incluir una evaluación del estado actual del uso de suelo y red vial, definir las zonas urbanas, urbanizables, no urbanizables y rurales, y las normas de uso para cada zona. También debe incluir lineamientos para la protección del medio ambiente y el uso sostenible de recursos naturales.

Los artículos 15 y 16 explican quiénes eran los encargados de la formulación de planes sectoriales y que estos deben incluir una evaluación de las condiciones actuales de cada sector, objetivos y estrategias para desarrollar cada sector, descripción de las obras de infraestructuras y equipamiento necesarias, reglas que deberán cumplir los proyectos particulares y establecimiento de metas y plazos para la ejecución de los proyectos.

Seguido de esto se encuentra el título tercero titulado “DEL REGIMEN DEL MEDIO AMBIENTE”, en su capítulo uno muestra un conjunto de artículos enfocados en la protección de áreas específicas del AMSS con el objetivo de preservar recursos naturales, permitiendo siempre un desarrollo urbano sostenible.

El artículo 34 establece áreas de desarrollo restringido en zonas donde la urbanización podría afectar negativamente la recarga del agua subterránea o generar contaminación en ellas. Las normas del Esquema Director establecerán medidas como límites en el tamaño de los lotes, áreas mínimas no construidas y obligatoriedad de pozos de absorción para mínima e impacto hidrológico.

El artículo 35 delimitará áreas para proteger los bosques y con esto mejorar la estabilidad del suelo y la calidad del aire. Las normas establecerán restricciones en el uso del suelo, como límites en el tamaño de lotes y porcentajes mínimos de reforestación. Y este se complementa con el artículo 36 que busca proteger las áreas de alta biodiversidad para preservar flora y fauna. Para esto se prohibirá cualquier desarrollo que afecte el hábitat de las especies en cuestión.

El artículo 38 hace un aporte para la protección del recurso hídrico para evitar su contaminación, y lo hace restringiendo las actividades que se pueden llevar a cabo en estas áreas. El artículo las llama área de desarrollo restringido y se determinarán como tal en base a un diagnóstico que dirá cuál es el uso actual dichas aguas, que especies depende del nivel actual de contaminación y los riesgos que traería si se incrementara.

El artículo 39 habla sobre la conservación de áreas no urbanizables debido a su importancia y contribución a la conservación de bosques, recursos hídricos y biodiversidad.

Seguido de esto se encuentra el capítulo tercero que se centra en la evaluación de los impactos ambientales y como estos se aplican a los diferentes proyectos dentro del AMSS.

El artículo 40 habla sobre los casos en los que los proyectos están ubicados en un área de desarrollo restringido y se considera que las normas

del Esquema Director son demasiado restrictivas, se tiene la opción de solicitar un Estudio de Impacto Ambiental para dar opciones alternas que minimicen el impacto ambiental generado por dicho proyecto. Este estudio deberá ser en base a los requisitos de ley.

El artículo 41 existe para los casos en los que no se tenga un Plan Metropolitano o algún caso fue de los límites, para los cuales se requerirá un EIA que indique las consecuencias del desarrollo de dicho proyecto.

El artículo 43 enlista los proyectos que requerirán un EIA en ausencia del Plan Metropolitano:

- a) La formulación de Planes de Desarrollo Territorial;
- b) La formulación de proyectos que alteren significativamente el área rural o los recursos naturales;
- c) La elaboración de proyectos urbanísticos y rurales, ubicados en áreas de desarrollo restringido;
- d) Líneas de transmisión eléctrica y subestaciones;
- e) Centrales hidroeléctricas, termoeléctricas y geotérmicas;
- f) Aeropuertos, terminales de buses y ferrocarriles, construcción de carreteras y caminos, en especial los que puedan afectar áreas protegidas;
- g) Desarrollo urbanos y turísticos de envergadura;
- h) Proyectos inmobiliarios;
- i) Plantas industriales, químicas, metalúrgicas y textiles, productoras de materiales de construcción, de equipo y productos metálicos, curtiembres, agroindustriales, mataderos, planteles y establos de crianza, lecherías y engorde de animales;
- j) Plantas elaboradoras de productos de madera, astilladoras, industrias de celulosa, pasta de papel;
- k) Acuicultura, la explotación intensiva y cultivos o criaderos de recursos acuáticos y plantas procesadoras de los mismos;

- l) Fabricación, transporte, trasiego, almacenamiento, disposición final y reutilización de sustancias tóxicas, inflamables o peligrosas;
- m) Actividades o proyectos de saneamiento ambiental, tales como los sistemas de alcantarillado y agua potable, plantas de tratamiento de aguas y residuos sólidos, rellenos sanitarios y drenajes de aguas lluvias;
- n) Actividades que impliquen un cambio en el uso del suelo en zonas identificadas por el Sistema de Ordenamiento Ecológico-Económicos con potencial de riego, agrícola o de reserva de recursos. (OPAMSS, 2020)

El artículo 44 explica que el contenido del EIA está contemplado en esta ley y el reglamento que la complementa. Y la evaluación de dichos estudios será realizada por OPAMSS.

#### ***2.11.7. Reglamento a la Ley de Desarrollo y Ordenamiento territorial del Área Metropolitana de San Salvador y de los Municipios Aledaños con sus Anexos***

Este extenso reglamento fue publicado en el Diario Oficial No. 76, Tomo No. 327, del 26 de abril de 1995 y consta de 9 partes, cada una subdividida en títulos y capítulos.

El primer título presenta los objetivos, alcances y atribuciones. Define cómo operarán los organismos creados por la ley, como el COAMSS y la OPAMSS. Determina los pasos a seguir para elaborar los instrumentos de planificación urbana, como el Plan Metropolitano. Establece las normas para el uso del suelo, la parcelación y la construcción. Asegura que todas las actividades de desarrollo urbano cumplan con lo establecido en el plan. Establece los procedimientos para obtener permisos de construcción y parcelación. Define las sanciones por no cumplir con las normas establecidas. En cuanto a los alcances del reglamento, se aplica a todas las actividades

relacionadas con la planificación, construcción y desarrollo urbano dentro del AMSS donde se incluye parcelación, reparcelación y actividades en el suelo urbano y rural, Desde la planificación hasta la recepción final de las obras, obras de urbanización como Infraestructura, servicios y equipamiento urbano.

El segundo título muestra las definiciones que se estarán manejando en el reglamento y la parte segunda presenta el marco teórico del reglamento el cual cuenta con dos títulos.

El título segundo detalla las responsabilidades de cada institución involucrada en la formulación de las políticas de desarrollo metropolitano y define el alcance de estas políticas. Se requiere una estrecha colaboración entre diferentes instituciones para la formulación e implementación de las políticas.

#### **Responsabilidades:**

- **OPAMSS:** Coordinación general y formulación de políticas de ordenamiento territorial.
- **MOP:** Políticas de vivienda y diseño vial.
- **Ministerio de Educación:** Políticas para instalaciones educativas.
- **Ministerio de Salud:** Políticas para instalaciones de salud.
- **ANDA:** Políticas de agua potable y alcantarillado.
- **CEL y CAESS:** Políticas de energía eléctrica.
- **ANTEL:** Políticas de telecomunicaciones.
- **Alcaldías:** Políticas de gestión de residuos sólidos y mercados municipales.

A continuación, se presentan los artículos que son de interés para este estudio técnico:

El artículo 12 titulado “De los Suelos Urbanos” establece los requisitos que debe cumplir un terreno para ser clasificado como “urbano” dentro del Esquema Director del AMMS. Primero debe tener acceso a servicios esenciales como carreteras, agua potable, drenaje y electricidad, con una capacidad adecuada para servir a las construcciones existentes o futuras. Y aunque carezca de algunos de los servicios mencionados anteriormente, el terreno debe tener una urbanización ya establecida, es decir, al menos dos terceras partes del terreno disponible para construcción deben estar ocupadas.

Para esto el Esquema Director puede tomar acciones para mejorar la urbanización de un terreno, como proveer servicios básicos o la reordenación del uso del suelo. Además, puede establecer los estándares mínimos requeridos para los servicios básicos en un área urbana determinada.

Los artículos III.31 y III.32 hablan sobre áreas de desarrollo restringido y áreas no urbanizables, su objetivo es proteger los cuerpos de agua, los ecosistemas acuáticos de la contaminación, áreas boscosas, recursos hídricos, biodiversidad y prevenir la erosión del suelo. Para establecer estas áreas, se realizarán estudios que evalúen el uso actual del agua, las especies que dependen de ella y los riesgos de aumentar la contaminación, además las normas del Esquema Director establecerán qué actividades están prohibidas y qué restricciones aplicarán a las actividades permitidas. En conjunto, ambos artículos demuestran un compromiso con la protección del medio ambiente y la sostenibilidad en el desarrollo del Área Metropolitana de San Salvador. Al establecer áreas de desarrollo restringido y no urbanizables, se busca garantizar la preservación de los recursos naturales y la calidad de vida de la población.

El artículo V.11 especifica que el nivel de cada lotificación deberá ser mayor al nivel de los cordones para poder asegurar que el agua lluvia se dirija hacia la calle y luego a los colectores de agua lluvia. En caso que el lote este en un nivel inferior al cordón deberán hacerse las obras necesarias para asegurar un correcto drenaje del agua lluvia.

El artículo V.13 ayuda a establecer zonas de protección en ríos laderas o quebradas. Esta medida es necesaria para evitar desastres naturales como inundaciones y deslizamientos de tierra causados por la erosión del suelo. El tamaño de estas zonas se determinará mediante estudios técnicos que consideren factores como el tipo de suelo, la pendiente del terreno, el historial de inundaciones y la actividad humana en la zona. Estas zonas actuarán como corredores ecológicos dentro de las ciudades, preservando la biodiversidad y facilitando el drenaje natural del agua. Antes de definir la zona de protección, se realizarán estudios hidrológicos y geotécnicos para evaluar el riesgo de inundaciones y deslizamientos. Los estudios tomarán en cuenta factores como el tipo de suelo, la pendiente del terreno, el historial de inundaciones, el uso del suelo y la presencia de agua subterránea.

El artículo V.14 “Obras para el Control del Escurrimiento Pluvial” establece que todo proyecto que construya nuevas superficies impermeables (como techos, estacionamientos, etc.) en áreas con problemas de drenaje debe instalar sistemas para controlar el flujo de agua de lluvia. Estos sistemas, como las cisternas o los jardines de lluvia, deben garantizar que la cantidad de agua que llega a las alcantarillas o ríos sea la misma que antes de la construcción, en otras palabras, garantizar un impacto hidrológico cero. La forma en que se garantizan estas condiciones es incluyendo sistemas para almacenar temporalmente el agua de lluvia y permitir su infiltración en el suelo o su reutilización. Estos sistemas deben estar diseñados para manejar fuertes lluvias (periodo de retorno de 10 años mínimo). Se requieren estudios técnicos para determinar el caudal máximo de agua que se debe manejar y seleccionar

el método de cálculo adecuado, además de que cada propietario será responsable del mantenimiento de los sistemas. (OPAMSS, 2023).

Los estudios hidrológicos deben ser preparados y firmados por profesionales en ingeniería civil, y el contenido básico que exige el reglamento es el siguiente:

- a) Descripción de las características arquitectónicas, infraestructurales y urbanas del proyecto y de su terreno y entorno de inserción.
- b) Objetivos principales del estudio.
- c) Delimitación gráfica del área de estudio en una hoja altimétrica catastral en una escala adecuada, dependiendo del tipo de proyecto, pero que permita visualizar claramente dicho proyecto.
- d) Determinación de los parámetros físicos de la cuenca o área de estudio.
- e) Descripción y aplicación del modelo de escurrimiento utilizado, cuando se utilicen programas de computación se deberá presentar el esquema del modelo matemático completo y toda la información necesaria que permita determinar la efectividad y fidelidad de los resultados derivados de la aplicación del modelo, evaluando la naturaleza y extensión del análisis.
- f) El ancho de la zona de protección, las obras de protección necesarias con sus detalles y características correspondientes: inclinación de taludes, tipos y secciones de muros y otros similares.
- g) Conclusiones y recomendaciones. (OPAMSS, 2024)

Además, este artículo proporciona datos de coeficientes de escorrentía de acuerdo al uso del suelo tal como se presenta en la siguiente figura:

**Figura 21***Coefficientes de Escorrentía de acuerdo al Uso de Suelo***ÁREAS URBANAS:**

<b>Uso de suelo</b>	<b>Coefficientes de escorrentía</b>
Comercio	0.70-0.95
Residencial alta densidad	0.65-0.80
Residencial media densidad	0.40-0.60
Residencial baja densidad	0.30-0.50
Industrial más del 70% impermeable	0.60-0.90
Industrial hasta el 70% impermeable	0.50-0.80
Parques y Cementerios	0.10-0.25
Parqueos Concreto	0.70-0.95
Parqueos Asfalto	0.80-0.95
Áreas Peatonales	0.75-0.85
Techos	0.75-0.95

**OTRAS ÁREAS:**

<b>Uso del suelo</b>	<b>Coefficientes de escorrentía</b>
Cultivos pendiente hasta el 1%	0.40
Cultivos pendiente entre 1-5%	0.45
Cultivos pendiente entre 5 -20%	0.50
Cultivos pendiente entre 20 -50%	0.55
Cultivos pendiente más del 50%	0.60
Vegetación Ligeramente pendiente hasta el 1%	0.35
Vegetación Ligeramente pendiente entre 1-5%	0.40
Vegetación Ligeramente pendiente entre 5-20%	0.45
Vegetación Ligeramente pendiente entre 20-50%	0.50
Vegetación Ligeramente pendiente mas de 50%	0.55
Bosque de Sombra pendiente hasta 1%	0.05
Bosque de Sombra pendiente entre 1-5%	0.10
Bosque de Sombra pendiente entre 5-20%	0.15
Bosque de Sombra pendiente entre 20-50%	0.20
Bosque de Sombra pendiente entre 1-5%	0.25

*Nota: Tomado de (OPAMSS, 2023).*

Por último, este artículo hace mención del anexo 38, que proporciona una guía técnica de drenajes. El Anexo 38 desarrolla de manera detallada los lineamientos técnicos ampliados establecidos en el Art. V.14 A del

Reglamento a la Ley de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Área Metropolitana de San Salvador (RLDOTAMSS). El documento se somete a revisiones, modificaciones y actualizaciones periódicas, conforme a los avances en investigaciones, normativas y acontecimientos territoriales, bajo la autorización del Consejo de Alcaldes del Área Metropolitana de San Salvador (COAMSS).

El Capítulo 4, que se centra en el Estudio Hidrológico, establece los requerimientos técnicos en relación con la oferta de agua de lluvia. Se determina que la ubicación del proyecto debe presentarse de forma gráfica mediante un mapa georreferenciado, obtenido de un mapa cartográfico oficial del CNR o de una imagen satelital reciente (posiblemente complementada con análisis temporal), con el fin de evidenciar el entorno hidrológico; para ello, se sugiere utilizar el Geoportal de OPAMSS.

Se exige la elaboración de una descripción detallada del proyecto, en la que se incluyan las características arquitectónicas e infraestructurales en el caso de edificaciones, o bien las particularidades del desarrollo urbano en urbanizaciones. Dicho documento debe incorporar un cuadro comparativo de áreas permeables e impermeables, y describir el manejo actual de la escorrentía del sitio, identificando riesgos o vulnerabilidades existentes (por ejemplo, antecedentes de inundaciones), con el respaldo de registros fotográficos elaborados por el responsable del estudio, considerando también las posibles afectaciones tanto en el sitio como aguas abajo.

Asimismo, se establece la necesidad de delimitar el área de influencia mediante la presentación de un mapa georreferenciado a escala adecuada, que muestre la altimetría del sector a través de curvas de nivel y el sistema hidrográfico que dirige el flujo hacia el punto de interés. En el contexto de una cuenca urbana, se requiere definir el área de aporte de la red de colectores de aguas lluvias, utilizando la proyección cónica Lambert, el Datum

norteamericano de 1927 y el esferoide de Clarke 1866, presentando esta información en formatos editables para su verificación.

El estudio de contener la justificación de los datos de lluvia de diseño, fundamentada en la ubicación del proyecto y del área de influencia, y basarse en los datos oficiales de la DGOA MARN, los cuales consisten en la Intensidad de Precipitación Máxima Anual convertida a curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia para las estaciones del AMSS: Aeropuerto Ilopango (S-10), ITIC (S-04), Santa Tecla (L-08) y Boquerón (L-18). Se recomienda, además, utilizar el método de Thiessen para establecer la intensidad media de diseño en cuencas en las que interactúen más de tres estaciones; y, en la medida de lo posible, emplear datos de una única estación cuando el proyecto se encuentre dentro de un radio de influencia de 5 km.

Cuando las estaciones se ubiquen entre 5 y 10 km, se sugiere ponderar los datos en función del inverso de la distancia al proyecto, garantizando que los valores ponderados no sean inferiores al 85 % del mayor valor registrado.

En situaciones en las que la estación más cercana se encuentre a más de 10 km, se autoriza el uso de datos específicos: se utilizarán la estación S-04 para Tonacatepeque, Delgado y Cuscatancingo (sector sur); la estación L-18 para Apopa, Nejapa, Cuscatancingo (sector norte), Ayutuxtepeque y Mejicanos; la estación L-08 para San Salvador, Antigua Cuscatlán, San Marcos y Santa Tecla; y la estación S-10 para Soyapango, Ilopango y San Martín.

En cualquier caso, las estaciones que no presenten una serie completa de datos requeridos para el correcto establecimiento de los tiempos de retorno deberán complementarse mediante la extrapolación de la estación del Aeropuerto de Ilopango, ajustándose oportunamente los valores en función de la relación entre estaciones. Además, se insta al responsable del estudio a

analizar y corregir, cuando corresponda, las eventuales inversiones en la tendencia de las láminas de agua derivadas de las intensidades de lluvia publicadas.

El objetivo principal de la guía consiste en describir la metodología para la presentación de estudios hidrológicos, el análisis hidráulico y las consideraciones pertinentes para el diseño de sistemas que mitiguen el impacto hidrológico.

Seguido de esto se presentan métodos para estimar el volumen de escorrentía, estableciendo dos enfoques metodológicos: el método basado en el coeficiente de escorrentía y el método fundamentado en la curva número (CN) del Servicio de Conservación de Suelos (SCS). El método de la curva número se define como un parámetro empírico que permite predecir de forma directa el escurrimiento o la infiltración del exceso de lluvia; para los estudios presentados a la OPAMSS, se adoptan valores específicos bajo la condición de Humedad Antecedente II. El responsable del diseño deberá incluir en la memoria de cálculo un análisis que abarque tanto las condiciones de Humedad Antecedente II como las de Humedad Antecedente III, efectuando las conversiones pertinentes de los valores de CN indicados en la tabla previa a los nuevos valores requeridos para el cálculo.

El cálculo del volumen de escorrentía y de los caudales de diseño se basan en la utilización de un periodo de retorno mínimo de 50 años, tomando en cuenta que la OPAMSS disponga de modificar dicho parámetro hasta alcanzar un periodo de 100 años, en función de los antecedentes de escorrentía del sitio y de la magnitud del proyecto a implementar. La metodología para determinar el caudal hidrológico se estructura a partir del área de influencia, aplicándose el método racional para áreas con extensión igual o inferior a 2.5 km<sup>2</sup> y empleándose métodos de modelación hidrológica en las demás condiciones, especialmente en evaluaciones que involucran el sistema de drenaje primario.

En el caso del método racional, se exige que el profesional respalde los valores asignados a cada parámetro de la ecuación, siendo imprescindible que la determinación de la intensidad ( $I$ ) se fundamente en la aplicación de, al menos, tres fórmulas reconocidas, con el propósito de establecer el tiempo de concentración de manera adecuada y ajustada a las condiciones del estudio. Por otro lado, para la modelación hidrológica se autoriza el uso del software HEC-HMS—disponible de forma gratuita por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos—o de cualquier otro software que el profesional considere técnicamente viable. Se estipula, además, que los resultados obtenidos del modelo hidrológico, junto con todos los valores empleados en el proceso de cálculo del caudal, se presenten en formato editable para facilitar su verificación.

Finalmente, se requiere que el estudio incluya conclusiones y recomendaciones que detallen los impactos del proyecto sobre el entorno y aguas abajo, propongan obras de mitigación, y ofrezcan sugerencias para el análisis hidráulico, tales como la ampliación del estudio para incorporar la susceptibilidad a flujos de escombros y la realización de análisis de transporte de sedimentos según las características particulares de la cuenca, así como la incorporación de una propuesta para el manejo de la escorrentía superficial del proyecto.

El Análisis Hidráulico se organiza en tres secciones que exigen rigurosos procedimientos metodológicos para evaluar tanto el comportamiento del cuerpo de agua como el de los colectores de aguas lluvias, así como para abordar situaciones especiales. En la sección 5.1, se determina que, cuando exista un cuerpo de agua dentro del límite del proyecto o en sus inmediaciones, el responsable del estudio deberá realizar un análisis hidráulico exhaustivo del mismo. Dicho análisis debe evaluar las posibles descargas de aguas lluvias provenientes del proyecto y aportar insumos para la delimitación de la zona de protección. Se exige que el análisis se extienda aguas arriba y aguas abajo del tramo de influencia, con el propósito de

examinar el comportamiento hidráulico del cauce bajo condiciones particulares. Para ello, se requiere presentar un levantamiento topográfico del cuerpo de agua que incluya secciones transversales: al menos cada 50 metros en tramos rectos y cada 20 metros en tramos con cambios significativos de dirección, además de secciones adicionales en puntos de variación de la sección (en estrechamiento o ampliación) y cuatro secciones en cada obra de paso, considerando un análisis mínimo de tres secciones en los puntos más desfavorables cuando el terreno colindante presente una extensión limitada (hasta tres veces el ancho del cauce).

Asimismo, se estipula que, si existen infraestructuras hidráulicas en el cauce, estas deberán ser levantadas topográficamente y evaluadas hidráulicamente. Se establece, además, una longitud mínima de análisis de 200 metros aguas arriba y 300 metros aguas abajo, medidos a partir del inicio y final de la zona de influencia directa; y, en caso de traslape con la zona de posible remanso de una obra de paso, se ampliará el área de estudio hasta 300 metros aguas abajo de la obra. Se define la zona de posible remanso mediante el cálculo que considera el tirante mínimo entre dos veces la altura libre para el paso del agua y la altura del cauce dividida por la pendiente promedio, con un máximo de 300 metros.

En la sección 5.2, se dispone que, si en la parcela del proyecto o en sus alrededores existen colectores de aguas lluvias cuya capacidad hidráulica resulte desconocida, el responsable deberá presentar, como mínimo, un análisis hidráulico de dichos colectores.

La OPAMSS podrá solicitar la ampliación de dicho análisis, basándose en los antecedentes de escorrentía del sitio y la envergadura del proyecto. Se exige que se incluya una descripción detallada del sistema de aguas lluvias hasta el punto de descarga al cuerpo de agua, junto con el análisis hidráulico correspondiente tanto con o sin la aportación del proyecto, y se realice un levantamiento topográfico de la red existente. Para la evaluación del colector,

se autoriza la aplicación de ecuaciones hidráulicas, como la ecuación de Manning, o el uso de software especializado, determinándose el caudal a partir del área de influencia del colector, los patrones de lluvia del análisis hidrológico, un periodo de retorno mínimo de 25 años, las condiciones de uso de suelo y la aplicación del método racional, considerando un tiempo de concentración de cinco minutos para la determinación de la intensidad de lluvia. Alternativamente, se podrá utilizar un sistema de cálculo que integre la variable “tiempo”, empleando un hidrograma de lluvia tipo “Chicago” o un método de bloques alternativos de cinco minutos, utilizando la misma unidad de tiempo en todo el análisis.

En la sección 5.3, se establece que, en casos especiales donde el proyecto incida directamente en el cuerpo de agua, no exista un punto de descarga cercano o se presenten condiciones que no se contemplen en los análisis anteriores, la OPAMSS podrá requerir la ampliación o modificación de los requerimientos del análisis hidrológico e hidráulico. Dichas modificaciones deberán considerar los potenciales efectos que el proyecto genere en el cuerpo de agua y sus áreas colindantes aguas abajo, evaluando las condiciones particulares del sector. Se menciona que se podrán incluir análisis de transporte de sedimentos para determinar la capacidad hidráulica del cauce o de las estructuras bajo condiciones de agua y mezcla de agua con sedimentos. En situaciones en que se requiera, se podrá solicitar la intervención de un tercer profesional, seleccionado a partir de una terna propuesta por la OPAMSS, siendo sus costos y honorarios responsabilidad del propietario del proyecto. Además, se definirá el contenido mínimo que deberá presentar un análisis especial.

A continuación, se presenta el apartado 6 destinado a los sistemas de mitigación del impacto hidrológico, y según el anexo 38 estos se definen como aquellas obras que captan, infiltran, retienen para reúso o detienen el agua de escorrentía superficial, modificando el caudal que alcanza el punto de descarga. Se fomenta la formulación de propuestas que integren Sistemas

Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), utilizando como base la Guía Técnica de Diseño de SUDS, siempre que se garantice la viabilidad de su implementación y mantenimiento durante la vida útil del proyecto.

Se consideran factibles los sistemas que incluyan procesos de infiltración, siempre y cuando las condiciones de los materiales existentes en el inmueble y en las áreas colindantes (actuales o previsibles) lo permitan. Para ello, el profesional investiga las condiciones hidrogeológicas del sitio y realiza ensayos de infiltración, evaluando la calidad del agua a infiltrar y su posible impacto en las zonas aledañas.

Las condiciones de diseño, es decir, el caudal y el punto de descarga, se determinan mediante directrices establecidas por la OPAMSS, y deben integrarse en el estudio hidrológico y el análisis hidráulico del proyecto, considerando el manejo actual de la escorrentía en el entorno. Se establece que el sistema deberá lograr una reducción del caudal en comparación con las condiciones previas a la intervención, oscilando entre un mínimo del 50 % y un máximo del 90 %, en función de las características del sistema de drenaje primario o secundario del área aledaña. El diseño de verificación se efectúa mediante métodos basados en modelaciones hidrológicas e hidráulicas que contemplen tanto la capacidad de infiltración del suelo como la relación entre el hidrograma de entrada y el volumen de detención/laminación, junto con el orificio de control.

Para cualquier sistema de retención o laminación, se exige la incorporación de un orificio de control que descargue a una cámara adicional inspeccionable, seguido de la generación de la tubería de conducción que dirija el flujo hacia el punto de descarga. Se estipula asimismo la construcción de un vertedero de excedencia, ubicado al menos cinco centímetros por debajo del nivel más bajo de la tubería de llegada, y se verifica que dicho vertedero disponga de la capacidad necesaria para descargar el caudal de entrada, descontando el caudal máximo que el orificio de control podría

evacuar. Este vertedero debe conectarse a la misma cámara adicional, y el caudal resultante se incorpora en la verificación hidráulica de la tubería de descarga.

La tubería que conduce hacia la descarga se diseña para transportar el caudal de pico que ingresa al sistema de retención o laminación sin considerar el efecto de la función de laminación, dado que un evento de lluvia puede superar los patrones de diseño y activar el vertedero de excedencia. Se exige que el sistema de excedencia y su conexión a la cámara de descarga sean contruidos de manera que permitan la inspección.

Asimismo, se permite que los sistemas de retención o laminación incorporen cámaras con función de filtro para retener sólidos gruesos antes del ingreso del agua al sistema, estableciéndose que la dimensión máxima de sólidos que sobrepase estos filtros no deberá exceder un tercio de la dimensión transversal mínima del orificio o del vertedero de excedencia.

En el caso de que la salida del sistema de retención o laminación se ubique por debajo del punto de descarga, se requiere la implementación de un sistema de bombeo para aguas lluvias. La capacidad de la bomba se determina en función del caudal máximo de descarga y de la carga dinámica total a superar sin pérdidas. Se estipula la instalación de dos equipos idénticos, de modo que, en caso de falla de uno, el otro asegure la continuidad operativa, además de un sistema de respaldo eléctrico de emergencia con activación automática. La tubería de impelencia se diseña para soportar el caudal máximo de descarga y desembocar en una caja de registro que garantice un desfogue adecuado para su incorporación, por gravedad, al punto de descarga. (OPAMSS, 2023).

El artículo 62 "Obras de urbanización para aguas Lluvias establece requisitos técnicos para la construcción de sistemas de drenaje de aguas lluvias en urbanizaciones. Se indica que Antes de iniciar cualquier

construcción, se debe realizar un estudio para evaluar la cantidad de agua de lluvia que se espera recibir y diseñar el sistema de drenaje en consecuencia.

En zonas con pendientes pronunciadas, se deben tomar medidas para prevenir la erosión del suelo causada por el agua de lluvia. Las tuberías de drenaje deben tener el diámetro adecuado y estar conectadas correctamente a los pozos de visita.

El sistema de drenaje debe ser diseñado para soportar lluvias intensas, con un periodo de retorno de 25 años para los colectores principales o para cualquier obra de drenaje que exceda de sesenta y dos pulgadas. Además, se restringe a 100 metros el escurrimiento superficial en cordones y cunetas, en casos especiales se deberá realizar un análisis por OPAMSS. Se establecen diámetros mínimos para las tuberías que conectan los tragantes a las cajas de registro o pozos de visita, así como para las tuberías principales. Se define una profundidad mínima para las tuberías con el fin de evitar interferencias con otros servicios subterráneos. Se indica la obligatoriedad de construir pozos de visita o cajas de registro en los cambios de dirección o pendiente de las tuberías. Se establecen las dimensiones y características de estos elementos. Las tuberías deben tener una pendiente mínima para garantizar un buen flujo del agua. Las aguas pluviales deben ser descargadas en ríos o quebradas de manera segura, evitando obstrucciones.

#### **2.11.8. Ley General de Recursos Hídricos**

Esta ley fue publicada en el Diario Oficial el 12 de enero de 2022, el objetivo principal de esta ley es establecer un marco legal sólido para la gestión integral de los recursos hídricos de El Salvador. Esto implica garantizar el acceso al agua potable para todos, proteger los ecosistemas acuáticos, promover el uso sostenible del agua y adaptarse a los desafíos del cambio climático. Se busca cumplir uno de los derechos humanos básicos,

fortalecer la institucionalidad para la gestión del agua, promover la participación del ciudadano en el cuidado y toma de decisiones sobre el agua.

La ley aplica a todas las aguas, sin importar dónde se encuentren o en qué estado estén, dentro del territorio salvadoreño. Esta amplia cobertura asegura que todos los recursos hídricos del país estén sujetos a una gestión integral y sostenible, tal como lo establece la Constitución en su artículo 84.

El artículo 8 de esta ley es de suma importancia ya que establece principios fundamentales para guiar la gestión, uso, protección y conservación del agua en El Salvador. Los principios son los siguientes:

- a) **Bien común, vital, finito y vulnerable:** El agua es un bien común, finito, vulnerable y esencial para la vida humana y de los ecosistemas, que, por su interrelación con las actividades humanas y aspectos políticos, económicos, sociales, culturales y ambientales, se convierte en un recurso estratégico.
- b) **Corresponsabilidad:** Responsabilidad y trabajo compartido entre órganos de Estado, gobiernos municipales, organizaciones comunitarias: campesinas, ambientalistas, de consumidores, académicas, de mujeres, de usuarias y usuarios a nivel local, regional y nacional en la gestión integral de los recursos hídricos.
- c) **Eficiencia:** Optimizar el aprovechamiento en los diferentes usos del agua considerando su gestión, protección y conservación.
- d) **El que contamina - paga:** Es responsabilidad de toda persona natural o jurídica, pública, municipal o privada asumir los costos económicos de reparar, mitigar, compensar y restaurar cualquier

deterioro o menoscabo que ocasione en la gestión del recurso hídrico; independientemente de su valor.

- e) **Enfoque de cuenca:** Se reconoce la cuenca hidrográfica como la unidad primaria en la gestión del recurso hídrico.
- f) **Enfoque de derechos:** El diseño y ejecución de las políticas y acciones del Estado en materia de agua se realizarán en función de los elementos constitutivos del derecho humano al agua y las correspondientes obligaciones del Estado tal como se reconoce en la Constitución, Los Tratados Internacionales de Derechos Humanos y las leyes secundarias pertinentes.
- g) **Equidad:** Disposición adecuada de los recursos hídricos entre los integrantes de la sociedad, de acuerdo a las distintas condiciones y necesidades de las personas y grupos sociales y la disponibilidad del recurso; en consecuencia, debe tomar las medidas adecuadas a fin de equiparar las oportunidades y permitir el goce del derecho a todas las personas.
- h) **Gestión de riesgos:** La gestión del agua debe incluir la prevención de los riesgos hidrometeorológicos que amenacen a la población, sus bienes y a los ecosistemas y la mitigación de los efectos perjudiciales que pueden provocar.
- i) **Igualdad y no discriminación:** El goce de los derechos establecidos en la presente Ley, no podrá restringirse con base en diferencias de nacionalidad, raza, género o religión.
- j) **In Dubio Pro Aqua:** El cual establece que, en caso de duda sobre el alcance de las disposiciones legales, se aplicará la norma que más favorezca a la preservación del recurso hídrico,

que garantice la vida digna, la salud, la cultura, la protección y conservación de los ecosistemas.

- k) Integralidad:** La gestión del recurso hídrico conlleva un enfoque integral de cuencas que vincule el mejoramiento de la calidad de vida de la población con la protección de los ecosistemas naturales, con inclusión de sus vínculos con el territorio y la diversidad biológica, ya sea de las cuencas o los acuíferos.
- l) Interés Público:** Es la prevalencia del interés colectivo sobre el interés particular.
- m) Participación ciudadana:** La gestión sustentable e integral de las aguas requiere la participación equitativa y el compromiso responsable de toda la población y en particular, el reconocimiento y la participación de las mujeres a todos los niveles como actoras claves del proceso de uso, manejo y conservación del agua.
- n) Prioridad del uso del agua para consumo humano:** Asignar los usos del agua prioritariamente a necesidades humanas fundamentales.
- o) Protección del recurso hídrico:** El Estado y las entidades públicas, municipales o privadas y los particulares en general tiene la obligación de cuidar y promover el bienestar del recurso hídrico independientemente de su valor para los seres humanos, al igual que de imponer limitaciones a su uso y aprovechamiento.
- p) Seguridad hídrica:** Se define como la capacidad de una sociedad, para disponer de agua en cantidad y calidad aceptable

para su supervivencia y la realización de diferentes actividades recreativas. Asegura la estabilidad económica de una sociedad tomando en cuenta los cambios climáticos y la contaminación ambiental producida por los seres humanos que afectan directamente al agua.

- q) **Sostenibilidad hídrica:** Satisfacer las necesidades actuales de la población, conservando los recursos hídricos en calidad y cantidad para beneficio de las presentes y futuras generaciones, manteniendo la estabilidad de los ecosistemas.
  
- r) **Valoración del agua:** El agua es un recurso cuya valoración debe supeditarse a los beneficios sociales, culturales, económicos y ambientales que de su uso y aprovechamiento se deriven. (ASA, 2022)

El título segundo “Marco Institucional y Zonificación hídrica” presenta información importante sobre la institución responsable de esta gestión. El capítulo I se centra en la creación y funciones de la Autoridad Salvadoreña del Agua (ASA), la institución encargada de gestionar los recursos hídricos del país. Se establece la ASA como una entidad autónoma de derecho público, adscrita al Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, además esta posee autonomía técnica, administrativa, financiera y presupuestaria. Su función es ser la máxima autoridad en materia de gestión integral de los recursos hídricos, elaborar y ejecutar políticas relacionadas con recursos hídricos, otorgar permisos para el uso y aprovechamiento del agua, promueve el desarrollo tecnológico en el sector hídrico, entre otras cosas.

Además, en los artículos 28, 29 y 30 de la ley se establece la creación de los Organismos Zonales de Cuenca (OZC) que son entidades descentralizadas de la ASA, estos tienen como objetivo principal gestionar de

forma integral los recursos hídricos a un nivel local, en otras palabras, delimitando cada hidrográfica del país.

Los OZC desempeñan un papel fundamental en la implementación de la política hídrica a nivel local. Sus principales funciones consisten en elaboración de planes hídricos zonales y coordinan acciones con otros actores locales, vigilar el cumplimiento de la ley y ejercen actos de autoridad en materia de recursos hídricos dentro de su zona, implementar proyectos de protección, conservación y recuperación de los recursos hídricos y responder a situaciones de emergencia relacionadas con el agua, como sequías o inundaciones. Las OZC dependerán administrativamente de la ASA, y estas deberán tener un gerente y equipo técnico operativo, además que la ASA definirá la estructura interna y funcionamiento de cada OZC.

El capítulo II titulado “Zonas hidrográficas y cuencas transfronterizas” presenta una zonificación hidrográfica que permite una gestión organizada por parte de la Política Nacional de Recursos Hídricos y del Plan Nacional de Gestión Integrada de Recursos Hídricos.

El artículo 32 enlista de manera detallada las zonas hidrográficas mencionadas:

Art. 32.- Para fines administrativos de la gestión integral de los recursos hídricos, las tres zonas hidrográficas son las siguientes:

- a) Lempa, constituida por la cuenca del río Lempa dentro del territorio nacional.
- b) Paz - Jaltepeque, que comprende las cuencas hidrográficas que existen en el espacio determinado desde los límites fronterizos de Occidente del país hasta la zona hidrográfica del estero de Jaltepeque; correspondiéndole las regiones hidrográficas siguientes: Paz, Cara Sucia – San Pedro, Grande de Sonsonate –

Banderas, Mandinga – Comalapa y Jiboa – Estero de Jaltepeque.

- c) Jiquilisco - Goascorán, que existe en el espacio geográfico determinado desde los límites de la Zona Hidrográfica Lempa, hasta los límites fronterizos del Oriente del país; correspondiéndole las regiones hidrográficas siguientes: Bahía de Jiquilisco, Grande de San Miguel, Sirama y Goascorán. (ASA, 2022)

Otro punto de interés para el presente estudio se encuentra en el capítulo III titulado “Subsectores Hídricos” ya que dependiendo del uso del agua y del nivel de gestión del sector hídrico esta ley identifica diferentes entidades públicas que se encargarán de administrar las aguas nacionales. Para los temas relacionados a Agua potable será el Ministerio de salud el responsable y para lo relacionado con el subsector saneamiento será el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Para aguas con fines agropecuarios, agrícolas y pesqueros será el Ministerio de Agricultura y Ganadería el responsable. Para aguas con fines hidroeléctricos ubicados en los embalses Cerrón Grande, 5 de noviembre y 15 de septiembre, Guajoyo, (lago Güija), y la Central 3 de febrero y geotérmicos la autoridad competente es la Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa (CEL); y para los casos particulares de otros aprovechamientos hidroeléctricos, agua con fines industriales, agroindustriales, recreativos y otros será la ASA. (ASA,2022)

También es importante que se tenga un proceso continuo y sostenible de gestionar el recurso hídrico, como se define en el artículo 45 sobre la Planificación Hídrica el cual busca definir cómo se utiliza el agua en diferentes sectores, se asegura de tomar en cuenta los efectos del cambio climático, promueve medidas para preservar la calidad y cantidad del agua. El objetivo principal de la planificación hídrica es garantizar un equilibrio entre la satisfacción de las demandas de agua y la protección de los ecosistemas acuático, en otras palabras, busca asegurar que haya suficiente agua para

todos los usos, mantener la calidad para los diferentes usos y que el agua se utilice de manera eficiente y racional.

Además, en el artículo 48 se describe el Plan Nacional de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos el cual debe considerar todos los aspectos de la gestión del agua, desde la protección de los ecosistemas hasta el uso industrial. También se revisará cada cinco años o cuando sea necesario según cambien las condiciones, y la toma de decisiones deberá ser basada en información científica. Su objetivo principal será evaluar aspectos como el cumplimiento de permisos, la calidad del agua y la disponibilidad de agua. (ASA, 2022)

Una herramienta que propone esta ley es el Sistema de Información Hídrica (SIHI), inicialmente en el artículo 49 “Creación y propósito del SIHI” se establece la fundación del mismo, siendo este una base de datos integral que recopila, organiza y almacena toda la información relacionada con las aguas superficiales y subterráneas del país. La Autoridad Salvadoreña del Agua (ASA) es la entidad responsable de administrar y coordinar este sistema. El SIHI se crea con el objetivo de centralizar y facilitar el acceso a datos cruciales para la gestión y planificación de los recursos hídricos. De acuerdo al artículo 50 el SIHI debe contener mapas detallados que muestran usos del suelo, áreas protegidas, redes hidrográficas, información sobre precipitación, temperatura, niveles de agua, caudales, datos sobre la calidad de las aguas superficiales y subterráneas, incluyendo la presencia de contaminantes, así como la cantidad de agua disponible y los diferentes usos que se le están dando al agua en diferentes sectores. La ASA posee la autoridad para solicitar información sobre la gestión del agua a cualquier individuo o entidad, esto permite ampliar y actualizar la información del SIHI. Además, conforme al artículo 52 establece que es obligación de la ASA elaborar un informe anual sobre el estado de los recursos hídricos del país, este informe debe ser presentado al poder legislativo y difundido al público en general. Su objetivo es transparentar la situación del agua en el país y promover una gestión más

sostenible, además que ayuda a ver qué áreas o zonas requieren intervención o mejoras en el ámbito hídrico. (ASA,2022)

#### **2.11.9. Ley de Protección Civil, Prevención y Mitigación de Desastres**

Este documento es de mucha relevancia para este estudio ya que algunas de las problemáticas abordadas son los desastres naturales como inundaciones o desbordamientos de ríos, y este dará los lineamientos sobre cómo actuar frente a estos.

En el artículo 6 se presentan los objetivos del Sistema Nacional de Protección Civil, Prevención y Mitigación de Desastres, los cuales están listados de la siguiente manera:

##### ***a) Incorporación de la gestión prospectiva de riesgos en los planes de desarrollo.***

Este objetivo indica que el sistema debe integrar la evaluación y gestión de riesgos futuros en todos los planes de desarrollo. Esto implica identificar potenciales amenazas, evaluar su probabilidad de ocurrencia y sus posibles impactos, y tomar medidas preventivas para reducir la vulnerabilidad ante desastres.

##### ***b) Educación e información a la población***

El sistema tiene la responsabilidad de educar y concientizar a la población sobre los riesgos de desastres y la importancia de la prevención. Esto incluye la difusión de información clara y accesible sobre cómo prepararse ante diferentes tipos de emergencias.

***c) Elaboración y actualización de mapas de riesgos y planes operacionales***

Este literal enfatiza la necesidad de contar con herramientas de planificación y respuesta efectivas. Los mapas de riesgos permiten identificar las zonas más vulnerables y los planes operacionales detallan las acciones a seguir en caso de desastre.

***d) Diseño y ejecución de planes de protección civil***

Este objetivo se centra en la preparación para responder de manera efectiva ante un desastre. Los planes de protección civil deben incluir acciones para mitigar los daños y reducir los impactos negativos.

***e) Intercambio de información y conocimiento***

El sistema debe fomentar la colaboración y el intercambio de información entre sus miembros y con otras instituciones. Esto permite compartir conocimientos, experiencias y recursos para mejorar la gestión de riesgos.

***f) Cooperación internacional***

Este último objetivo destaca la importancia de establecer relaciones con organizaciones internacionales para acceder a información, recursos y buenas prácticas en materia de gestión de riesgos y desastres (Sistema Nacional de Protección Civil, Prevención y Mitigación de Desastres, 2005).

## **2.12. Estructuras Hidráulicas con Aplicación a la Mitigación Del Impacto Hidrológico.**

### **2.12.1. Diseño de Estructuras Hidráulicas**

#### **2.12.1.1. Canalización de Aguas Pluviales**

A lo largo de la historia, las sociedades han utilizado principalmente estructuras construidas con materiales duraderos, como el concreto, para protegerse de desastres naturales. Estas infraestructuras, conocidas como infraestructuras grises, sirven para manejar el agua de lluvia y reducir el impacto de fenómenos climáticos extremos. Ejemplos de estas construcciones incluyen diques, compuertas y rompeolas para evitar inundaciones, así como sistemas de drenaje como alcantarillas, tuberías y reservorios que almacenan el agua. También se consideran parte de este tipo de infraestructura las instalaciones de climatización, que ayudan a regular la temperatura en condiciones extremas (Mitchell, 2003).

Sin embargo, este enfoque ha dejado de lado la función natural de los ecosistemas en la regulación del agua. Al centrarse únicamente en soluciones tecnológicas, muchas veces se ignora la relación entre la infraestructura y el medio ambiente. Aunque estas construcciones ofrecen beneficios importantes, también presentan desafíos. Su costo es alto, requieren mantenimiento constante y pueden causar problemas ambientales a largo plazo. Además, suelen ser estructuras rígidas, lo que significa que no siempre pueden adaptarse a cambios en el clima o en el entorno. Si llegan a fallar, los efectos pueden ser devastadores para las comunidades y los ecosistemas cercanos.

A pesar de estas limitaciones, en algunas situaciones estas infraestructuras resultan indispensables. Por ejemplo, en zonas costeras, los rompeolas y muros de contención de concreto han demostrado ser efectivos

para reducir el impacto de tormentas fuertes, huracanes y tsunamis. Sin embargo, su construcción altera los ecosistemas naturales y puede afectar la vida de las especies que habitan en estos lugares. También pueden generar conflictos con las comunidades locales, que muchas veces se preocupan por los efectos negativos en el medio ambiente y en su calidad de vida.

Con el crecimiento de las ciudades, la dependencia de estas infraestructuras ha aumentado. En especial, en asentamientos ubicados en zonas de alto riesgo, donde se han construido diques y sistemas de drenaje para reducir inundaciones. Sin embargo, esto puede dar una falsa sensación de seguridad, promoviendo la ocupación de áreas peligrosas y aumentando el riesgo de desastres en el futuro (Hallegatte, 2009).

El impacto del cambio climático ha demostrado que estas infraestructuras pueden ser vulnerables cuando se enfrentan a eventos extremos. Por ejemplo, durante los huracanes Katrina en 2005 y Sandy en 2012, las barreras y diques construidos para proteger las ciudades fueron sobrepasados, lo que causó inundaciones catastróficas. Debido a que el clima está cambiando de manera impredecible, resulta difícil diseñar estructuras que se adapten a eventos futuros. Un dique construido para resistir ciertas condiciones puede volverse insuficiente si los fenómenos climáticos se vuelven más intensos.

Otro reto importante es el tiempo y el costo de construcción de estas infraestructuras. Grandes proyectos, como las defensas contra inundaciones en el Reino Unido y Venecia, pueden tardar décadas en completarse. Además, algunas soluciones, como las estaciones de bombeo y las plantas de desalinización, requieren un alto consumo de energía, lo que puede generar problemas ambientales. En algunos casos, el uso excesivo de energía ha causado apagones, como el ocurrido en Estados Unidos en 2003.

Los costos asociados con estas infraestructuras también son significativos. Construir las es caro y su mantenimiento requiere inversiones constantes. Sin embargo, su efectividad depende del tipo de problema que buscan resolver. Para algunos desastres naturales, como los tsunamis, los diques han demostrado ser una solución útil, aunque costosa. En otros casos, las infraestructuras deben combinarse con sistemas de alerta temprana y planes de evacuación para ser más efectivas.

En las ciudades, estas infraestructuras siguen siendo necesarias porque ocupan poco espacio, pueden ser monitoreadas constantemente y permiten un mayor control sobre el manejo del agua de lluvia. Por estas razones, continúan siendo una parte importante de la planificación urbana en un contexto donde el clima cambia rápidamente (The Nature Conservancy, 2013).

#### **2.12.1.2. Construcción de Bóvedas**

La construcción de bóvedas ya es una práctica en El Salvador utilizada en el control de aguas lluvias, considera factores técnicos, ambientales, legales, climáticos y sociales para garantizar su efectividad y sostenibilidad. Se dimensionan adecuadamente con base en las precipitaciones promedio y eventos extremos, y se diseñan con materiales resistentes a la humedad, sismos y cargas estructurales. Se integran sistemas de drenaje con filtros y rejillas para evitar obstrucciones y se facilitan accesos para el mantenimiento. Se evalúan los impactos ambientales para prevenir afectaciones en ecosistemas, garantizar la recarga hídrica y minimizar la entrada de contaminantes.

Este tipo de obras tienen un costo elevado, además que deben ser diseñadas con información hidrológica precisa ya que el no hacerlo se traduce en una obra que requerirá intervenciones a futuro. Un ejemplo reciente de esto es la reconstrucción de 70 metros de la cama de agua dañada en la bóveda

de la Calle Principal de la Residencial Brisas de San Francisco, en San Salvador, la cual fue intervenida con el propósito de garantizar la seguridad habitacional y de las infraestructuras públicas y privadas en el área de influencia de la obra.

Se colocó un total de 2,670 metros cúbicos de suelo-cemento ciclópeo, compuesto por piedra, cemento y arena, para formar la base de la cama de agua. La intervención, que abarca 70 metros lineales con un ancho de 8 metros, incluye la capacitación previa de los 30 trabajadores responsables sobre el manejo y aplicación del material. El proceso, con una duración estimada de 37 días, comprende la colocación alternada de capas de suelo-cemento y piedra hasta alcanzar una altura máxima de 4 metros en ciertos tramos, finalizando con la instalación de losas de concreto hidráulico, en un volumen total de 332.50 metros cúbicos.

Este proyecto, denominado "Reconstrucción de cama hidráulica en Bóveda de Calle Principal de Residencial Brisas de San Francisco", se ejecuta con una inversión de \$498,508.87, financiada por una contribución de una institución financiera privada al Fondo de Protección Civil, Prevención y Mitigación de Desastres (FOPROMID). La iniciativa busca prevenir fallas estructurales en la bóveda, evitar la formación de cárcavas y la erosión de suelos que representan un riesgo para las vidas y bienes de la población circundante. Beneficia directamente a 5,000 habitantes de la Residencial Brisas de San Francisco y la Colonia La Floresta, además de proporcionar beneficios indirectos a 140,998 residentes de zonas aledañas. Esta obra responde a las demandas de la población por una solución a los problemas derivados del deterioro de la bóveda (MOPT, 2019)

**Figura 22**

*Bóveda Ubicada en Residencial Brisas de San Francisco*



*Nota: Tomado de (MOP,2019)*

### **2.12.2. Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible (SUDS)**

#### **Introducción a los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS)**

Durante décadas, el enfoque tradicional del drenaje urbano se ha centrado en evacuar rápidamente el agua de las ciudades. Este modelo implicó la canalización de cauces urbanos y el diseño de alcantarillas para captar toda la escorrentía superficial. Estas prácticas han reducido significativamente la biodiversidad de los ríos y su capacidad para manejar inundaciones, mientras que los sistemas de alcantarillado han demostrado ser insuficientes para gestionar el incremento de aguas provenientes de áreas urbanas en expansión (Gómez et al., 2004).

En cuanto a la calidad del agua, se han implementado plantas de tratamiento para evitar el consumo de aguas contaminadas, sin embargo, la

escorrentía pluvial que recoge residuos urbanos representa una fuente importante de contaminación difusa (Butler y Davies, 2000). Ante este panorama, el drenaje urbano sostenible surge como una solución que busca proteger y mejorar la calidad del agua, prevenir inundaciones y fomentar la recarga de acuíferos, promoviendo un desarrollo urbano de calidad, especialmente en zonas donde los sistemas convencionales de alcantarillado están al borde de la saturación (EPA, 1999). Este enfoque inicia desde el momento en que el agua de lluvia toca el suelo, estructurándose en tres pilares: la regulación de la cantidad de agua, la mejora de su calidad mediante procesos naturales, y la integración de espacios urbanos más habitables que incorporen hábitats naturales en las ciudades (Fernández et al., 2003).

El desarrollo urbano sostenible, también denominado desarrollo de bajo impacto (Low Impact Development), incluye técnicas específicas que se conocen como SUDS en el Reino Unido, BMPs (Best Management Practices) en Estados Unidos, o Mejores Prácticas de Control (MPC) en países hispanohablantes (Jiménez, 1999). Este texto revisa las medidas preventivas, los principales sistemas estructurales y un método de planificación que permita elegir las combinaciones más adecuadas de estos sistemas. Además, el desarrollo de bajo impacto incluye estrategias urbanísticas más amplias que abordan el drenaje desde las etapas iniciales de planificación (EPA, 1999).

#### **2.12.2.1. Techos Verdes**

Los techos verdes son sistemas instalados en las cubiertas de edificaciones que permiten el crecimiento de vegetación, conformados por varias capas diseñadas para proteger la estructura del edificio. Pueden implementarse tanto en construcciones nuevas como en inmuebles existentes y se clasifican en tres tipos principales: extensivos, intensivos y mixtos.

Entre los principales beneficios de los techos verdes se destacan:

- Incremento del área verde, que puede incluir espacios para el esparcimiento.
- Mejora del aislamiento térmico, lo que contribuye a la reducción del consumo de energía.
- Provisión de aislamiento acústico.
- Incorporación de vegetación en superficies subutilizadas, especialmente útiles en zonas urbanas con altos niveles de impermeabilidad del suelo.

#### **2.12.2.2. Superficies permeables**

Una superficie permeable es un tipo de pavimento artificial diseñado para permitir el paso del agua a través de su estructura. Estos sistemas están compuestos por un material permeable ubicado bajo una capa superior que facilita la infiltración del agua, pudiendo estar formados por césped, césped reforzado, grava, bloques impermeables con huecos rellenos de césped o grava, bloques impermeables con ranuras sin relleno, bloques porosos o pavimentos continuos con mezclas porosas (CIRIA C523, 2001).

El agua atraviesa estas superficies permeables, que funcionan como un filtro, y llega a una capa inferior que actúa como depósito temporal, ayudando a reducir los picos de flujo. Este depósito puede drenar el agua hacia otro lugar o facilitar su infiltración si las condiciones del terreno son adecuadas. El excedente se maneja mediante desagües superiores o drenajes superficiales especialmente diseñados (Pratt et al., 2002).

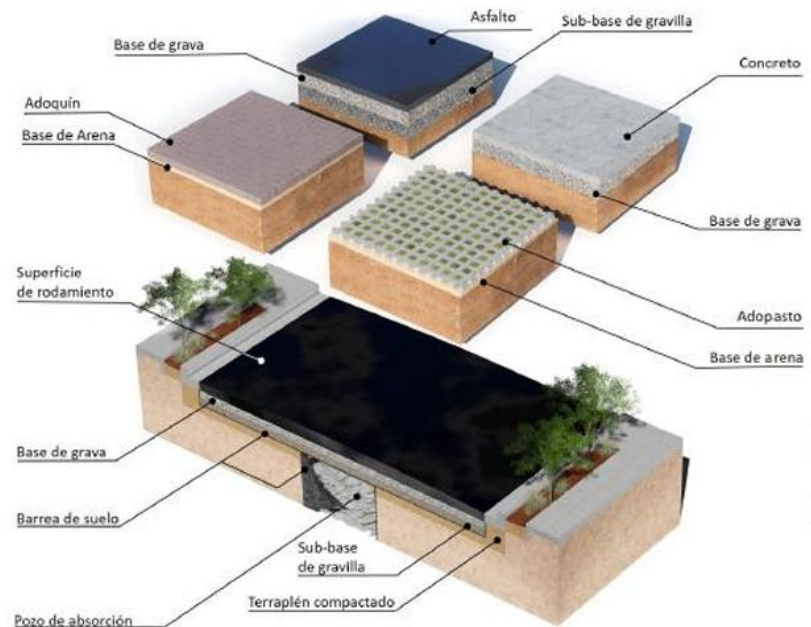
Todas las capas del pavimento deben poseer permeabilidades crecientes desde la superficie hasta la sub-base, incluyendo los geotextiles. Estos materiales son esenciales, ya que permiten el flujo del agua sin retenciones, y funcionan como filtro, elemento separador o refuerzo estructural (Pratt, 2003). Las capas permeables también capturan partículas

de distintos tamaños, aceites y grasas, mientras que los hidrocarburos retenidos pueden ser biodegradados con el tiempo. Investigaciones recientes en las Universidades de Coventry (Coupe et al., 2003) y Cantabria (Proyecto FIDICA) buscan mejorar la eficiencia en la biodegradación de hidrocarburos en este tipo de pavimentos.

Actualmente, estas técnicas son utilizadas en estacionamientos para vehículos ligeros, accesos a áreas residenciales, caminos y patios en América Latina, Europa y Estados Unidos, con ejemplos piloto destacados en Chile (Fernández et al., 2003) y Brasil (Acioli et al., 2004).

En España, la falta de normas o manuales específicos sobre la aplicación de estas superficies ha llevado a que las empresas proveedoras, como la australiana Atlantis, asuman la responsabilidad de orientar sobre su diseño y ejecución. Sin embargo, la Universidad de Cantabria está desarrollando un manual en español para la construcción de superficies permeables, siguiendo ejemplos internacionales como los de Chile (MINVU-DICTUC, 1996) y el Reino Unido (Pratt et al., 2002), lo que contribuye al avance en el conocimiento sobre estas estructuras y sus posibles usos.

Entre los beneficios de estos pavimentos destaca su facilidad de instalación, ya que no requieren nivelación de la superficie ni la incorporación de sumideros o alcantarillas para el drenaje (National SUDS Working Group, 2003). Sin embargo, su mantenimiento es esencial para garantizar su funcionalidad. Esto implica mantener la superficie limpia y libre de sedimentos mediante barridos con aspiración, cuya frecuencia dependerá de los residuos presentes. Además, es importante evitar el uso de sal o gravilla para combatir el hielo, ya que estas sustancias pueden generar colmatación, un problema que se está investigando para optimizar el rendimiento de estos pavimentos (Davies et al., 2002).

**Figura 23***Superficies Permeables*

*Nota: Tomado de (Hermosillo, 2017)*

**2.12.2.3 Pozos y Zanjas de Infiltración**

Los pozos y zanjas de infiltración son sistemas diseñados como perforaciones o trincheras rellenas con material granular que tienen la función de captar y almacenar el agua de escorrentía, facilitando su infiltración hacia el terreno natural. Las zanjas, al ser más estrechas y menos profundas que los pozos, ofrecen ventajas en términos de eficiencia constructiva (National SUDS Working Group, 2003).

En el proceso de diseño, es fundamental considerar las características del terreno, asegurándose de que la capacidad de infiltración sea adecuada y de que la excavación no afecte al nivel freático. Asimismo, estos sistemas deben situarse a una distancia prudente de edificaciones o carreteras para evitar posibles impactos sobre las cimentaciones (CIRIA C523, 2001).

Para optimizar su funcionamiento, suele emplearse geotextiles que actúan como filtro y separador del material granular. También se incluyen desagües de emergencia que permiten desviar el exceso de agua hacia la red de alcantarillado en caso de superar la capacidad de almacenamiento prevista. Además, en la base se instala una tubería permeable para recoger el agua, lo que requiere la construcción de pozos de registro que faciliten la limpieza y los cambios de dirección en las zanjas (MINVU-DICTUC, 1996).

La durabilidad y la eficacia en la depuración de estos sistemas dependen directamente de un diseño adecuado, el cual puede incorporar un sistema de pretratamiento en la entrada del flujo para mejorar su rendimiento (EPA, 1999).

**Figura 24***Pozo y Zanja de Infiltración*

*Nota: Tomado de (Hermosillo 2017)*

**2.12.2.4. Depósitos de Infiltración**

Los depósitos de infiltración son embalses superficiales poco profundos diseñados para almacenar agua temporalmente hasta que esta se infiltra en el suelo. Al igual que las zanjas de infiltración, suelen incorporar un desagüe de emergencia que permite desviar el exceso de agua al siguiente componente en la cadena de tratamiento si se supera su capacidad de almacenamiento (Jiménez, 1999).

Estas estructuras presentan formas irregulares, bases amplias y taludes laterales suaves que generalmente están recubiertos de vegetación

Es esencial que los desagües inferiores garanticen la evacuación continua del agua almacenada. A diferencia de los pozos y zanjas de infiltración, los depósitos tienen la capacidad de recibir agua de cuencas más extensas, permitiendo, además, cuando sea necesario, el almacenamiento temporal de agua sobre la superficie del terreno, formando una lámina de agua (CIRIA C523, 2001).

La eficacia de estos sistemas puede incrementarse mediante la instalación de un sistema de pretratamiento, similar al de las zanjas de infiltración, que reduzca la cantidad de sólidos en suspensión que ingresan al sistema. Esto contribuye a minimizar el riesgo de colmatación en las áreas de infiltración y a garantizar un funcionamiento óptimo del depósito (EPA, 1999).

#### **2.12.2.5. Drenes Filtrantes o Franceses**

Los drenes filtrantes, también conocidos como drenes franceses, consisten en zanjas revestidas con geotextiles y rellenas con grava. Su función principal es permitir el flujo de agua proveniente directamente de superficies de drenaje o de tuberías de aporte (National SUDS Working Group, 2003).

El diseño de estos drenes asegura que el tiempo de permanencia del agua sea lo suficientemente prolongado y la velocidad de su flujo lo suficientemente baja para facilitar la infiltración a través del geotextil. En algunos casos, esto elimina la necesidad de conducir el agua hacia un punto de vertido, ya que la infiltración se completa a lo largo de su recorrido.

La superficie de los drenes puede ser cubierta con vegetación o, en áreas de carreteras, revestida con mezclas drenantes que permitan soportar el tránsito vehicular (MINVU-DICTUC, 1996).

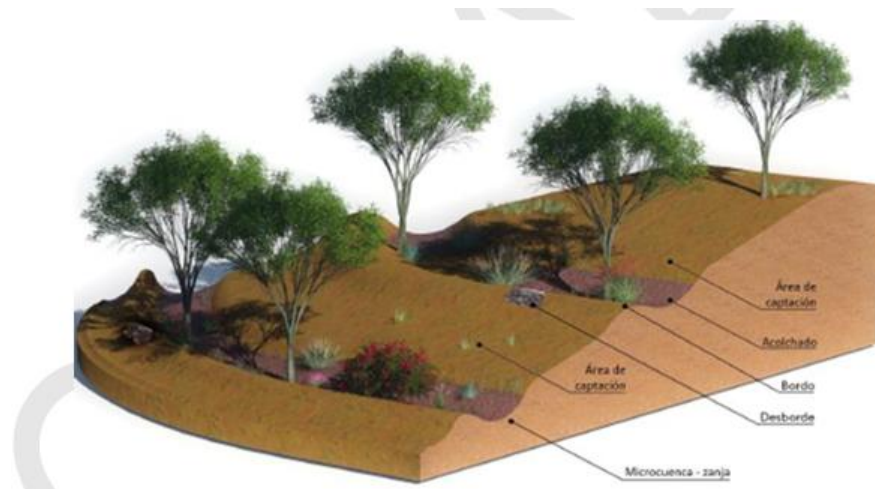
Al igual que otros sistemas de drenaje sostenible (SUDS), los drenes filtrantes pueden combinarse con soluciones complementarias. Por ejemplo, en el diseño de carreteras, es posible instalar franjas filtrantes adyacentes a la calzada con drenes filtrantes para recolectar agua o incluir cunetas verdes con drenes en su base. Estas combinaciones incrementan la capacidad del sistema y mejoran la atenuación del caudal de escorrentía (EPA, 1999).

#### **2.12.2.6. Franjas Filtrantes**

Una franja filtrante se define como una sección de terreno con vegetación y una ligera inclinación, diseñada para captar la escorrentía superficial y facilitar su filtración. Su función principal es actuar como un filtro, atrapando sólidos suspendidos y aceites presentes en la escorrentía (MINVU-DICTUC, 1996).

Para maximizar su eficiencia, las pendientes deben ser suaves y las áreas de paso del agua lo más amplias posible. Estas franjas pueden estar compuestas por diversos tipos de vegetación, que van desde prados hasta pequeños bosques. Mientras que el césped proporciona una superficie más densa, la presencia de arbustos y árboles incrementa la evapotranspiración y aporta beneficios medioambientales adicionales. En general, una mayor anchura de la franja y una vegetación más densa contribuyen a una capacidad filtrante superior y a un mejor grado de depuración (CIRIA C523, 2001).

Estas franjas suelen emplearse en etapas iniciales del sistema de drenaje, recogiendo escorrentía de cuencas de pequeño tamaño. Asimismo, son útiles para tratar la escorrentía de carreteras, siempre que se garantice un diseño que no obstruya el paso del agua hacia la franja filtrante. Además, estas franjas pueden funcionar como un sistema de pretratamiento, reduciendo sólidos y contaminantes antes de que el agua fluya hacia sistemas complementarios, como cunetas verdes (National SUDS Working Group, 2003).

**Figura 25***Franja Filtrante**Nota: Tomado de (Hermosillo 2017)***2.12.2.7 Depósitos de Detención**

Los depósitos de detención son depresiones diseñadas específicamente para ralentizar la escorrentía generada durante tormentas, reteniéndola por varias horas para facilitar la sedimentación de sólidos en suspensión. Su propósito principal es mitigar grandes caudales, disminuyendo los picos de flujo y reduciendo así los riesgos de inundaciones (EPA, 1999).

En el diseño de estos depósitos se puede integrar un sistema de desvío o *bypass*, permitiendo que, luego de recibir la escorrentía inicial (considerada la más contaminada), el resto del agua se dirija hacia el siguiente componente del sistema de drenaje. Los depósitos suelen incluir un desagüe en su base, pero si la entrada y salida no están adecuadamente diseñadas, existe el riesgo de obstrucción debido a la acumulación de sedimentos. Para optimizar su funcionamiento y evitar problemas como la erosión o tiempos de retención insuficientes, el diseño puede incorporar compartimentos, recorridos serpenteantes o disipadores de energía. Además, es recomendable incluir un

sistema de pretratamiento que reduzca los sólidos en suspensión, como una franja filtrante o un mecanismo de decantación compuesto por un pozo con material granular (National SUDS Working Group, 2003).

Desde el punto de vista de la seguridad, las pendientes laterales deben ser suaves, permitiendo un fácil acceso y salida en caso de accidentes, así como un mantenimiento adecuado cuando el depósito esté vacío. En función de la ubicación y la profundidad del depósito, también puede ser necesario instalar cercas de seguridad (MINVU-DICTUC, 1996).

## **2.13. Estrategias de Implementación**

### **2.13.1. Casos de Éxito Internacionales**

A continuación, se presentan casos de países o ciudades densamente poblados que son líderes en el manejo del agua pluvial:

#### **2.13.1.1. Singapur**

De acuerdo a la página del MSE la PUB, como junta estatutaria dependiente del Ministerio de Sostenibilidad y Medio Ambiente (MSE) de Singapur, se encarga de gestionar de forma integrada el suministro de agua, las áreas de captación y las aguas residuales del país. A partir de abril de 2020, también asumió la responsabilidad de proteger la costa de Singapur frente al aumento del nivel del mar, actuando como la agencia nacional de protección costera.

La institución asegura un abastecimiento de agua diversificado y sostenible para Singapur mediante los Cuatro Grifos Nacionales, que incluyen agua de captación local, agua importada, NEWater y agua desalinizada. Además, lidera y coordina los esfuerzos gubernamentales para proteger al país de los efectos del aumento del nivel del mar y para gestionar de manera

integral los riesgos de inundaciones tanto en zonas interiores como costeras. (PUB Home | PUB, Singapore's National Water Agency, s. f.)

Singapur enfrenta riesgos significativos de inundaciones como consecuencia de su topografía y el acelerado proceso de urbanización que ha experimentado. Las lluvias intensas y repentinas, incluso en épocas no asociadas a los monzones, sobrecargan de forma temporal los canales y sistemas de drenaje, ocasionando inundaciones en áreas específicas. Adicionalmente, el cambio climático contribuye al incremento en la frecuencia e intensidad de las precipitaciones, así como al aumento del nivel del mar, lo que representa una amenaza para las regiones de baja altitud en el país. Dado que Singapur es una ciudad costera caracterizada por su alta urbanización, densidad poblacional y abundantes precipitaciones, se prioriza el fortalecimiento de su capacidad de resiliencia ante inundaciones interiores, provocadas por lluvias, y costeras, generadas por el aumento del nivel del mar. Para ello, las autoridades realizan una planificación a largo plazo dirigida a implementar medidas de protección costera y actualizan constantemente las infraestructuras de drenaje para reducir los impactos de las inundaciones repentinas.

En los últimos diez años, se han destinado casi \$2 mil millones a obras de mejora en el sistema de drenaje, y se anticipa que estas inversiones continúen como parte de las estrategias de adaptación futura. No obstante, debido a que el cambio climático incrementa la intensidad de los eventos meteorológicos extremos, no resulta viable ampliar los sistemas de drenaje para abordar cada episodio de lluvias torrenciales, ya que ello implicaría altos costos y un uso significativo del suelo. Por ende, se considera fundamental prepararse para casos ocasionales de inundaciones súbitas. (PUB Home | PUB, Singapore's National Water Agency, s. f.)

La agencia nacional de agua de Singapur basa su metodología en 4 pilares que le han permitido generar grandes avances con relación al recurso hídrico. Estos 4 pilares se muestran en la siguiente figura:

**Figura 26**

*Metodología de los Cuatro Pilares*



*Nota: Tomado de (PUB Home | PUB, Singapore's National Water Agency, s. f.)*

El pilar 1 designado **Gestión del Agua y Sostenibilidad** se basa en el hecho que Singapur, al no contar con fuentes naturales de agua, expande progresivamente sus embalses, pasando de los tres iniciales en MacRitchie, Seletar y Peirce a un total de 17. Actualmente, dos tercios de la isla funcionan como áreas de captación de agua. Para lograrlo, coordina esfuerzos con diversos actores y planifica cuidadosamente la ciudad, asegurando que la

escorrentía superficial en zonas urbanizadas se mantenga apta para su tratamiento y posterior consumo.

Además, el país depende de otras tres fuentes hídricas: agua importada, NEWater (agua reciclada) y agua desalinizada, con el fin de cubrir sus necesidades diarias. A pesar de haber diversificado con éxito su suministro, sigue investigando nuevas estrategias para gestionar y aumentar sus reservas, priorizando fuentes resistentes al cambio climático.

Con la previsión de que la demanda de agua se duplique para 2065, Singapur estima que la energía necesaria para su tratamiento y distribución se triplicará. Por ello, la agencia de gestión del agua (PUB) desarrolla soluciones para disminuir su dependencia de combustibles fósiles y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, minimizando su impacto ambiental.

Desde abril de 2020, tras su designación como Agencia de Protección Costera, PUB emprende proyectos para mitigar el aumento del nivel del mar debido al cambio climático. También invierte en tecnologías innovadoras para mejorar la respuesta ante inundaciones y optimiza su sistema de drenaje, reduciendo el riesgo de anegamientos causados por tormentas cada vez más intensas y frecuentes.

El pilar 2 **Personal Capacitado y Comprometido** busca ampliar la diversificación de los recursos hídricos en Singapur, confía en una fuerza laboral especializada, procesos eficientes y tecnologías avanzadas para garantizar el mantenimiento y funcionamiento adecuado de todo el sistema de agua. Gestiona sus operaciones de manera responsable y optimiza el uso de los recursos disponibles. Además, supervisa que los procesos de tratamiento se mantengan confiables y resilientes, minimiza la pérdida de agua a lo largo de la red de distribución y maximiza la eficiencia en cada etapa de su operación.

El pilar 3 y 4 busca unificar al sector privado y público en el manejo responsable del recurso hídrico de manera segura y eficiente. Esta entidad enfatiza que, así como el agua representa un recurso valioso para todos, su sostenibilidad requiere un esfuerzo compartido. Cada sector de la sociedad contribuye a su conservación y protección.

PUB fomenta la participación de la comunidad y el sector privado, sensibiliza a la población y busca oportunidades para optimizar el uso y reutilización del agua. Cada gota que no se consume es una gota que no necesita ser producida. (*Sustainability And Environment*, s. f.)

#### **2.13.1.2. Colombia**

En Bogotá, Colombia Se encontraron 74 documentos relacionados con SUDS en América Latina, de los cuales se seleccionaron 50 estudios que cumplían con los criterios de inclusión establecidos. De esta selección, 23 correspondieron a artículos obtenidos de bases de datos especializadas (Scopus y Web of Science), mientras que 27 se recuperaron mediante Google Scholar. Se constató que, de los 24 países que integran Latinoamérica y el Caribe, se reportaron estudios en siete países y en 28 ciudades. Además, se evidenció que Colombia representó el 44 % de los casos, Brasil el 36 %, México el 8 %, Argentina y Costa Rica el 4 % cada uno, y Chile y Paraguay el 2 % respectivamente. Asimismo, la frecuencia de publicaciones sobre SUDS en la región mostró un crecimiento sostenido: se publicó solo un artículo en el periodo 2013–2015, mientras que entre 2017 y 2020 se incrementó a 11. En cuanto a las revistas indexadas, Brasil destacó con 18 artículos (75 % de la muestra), seguido de Colombia con tres publicaciones (13 %), México con dos (8 %) y Costa Rica con una, mientras que los demás países no reportaron publicaciones en este formato. (Gómez, J., Pérez, M., & Rodríguez, L, 2021).

Debido a esto se prestó especial atención a las medidas tomadas por Colombia en cuanto al manejo y desarrollo de medidas para mitigar los impactos hidrológicos.

El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible publicó en 2022 un documento técnico con lineamientos para potencializar el uso de agua lluvia el cual surge como respuesta a las acciones establecidas en el Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022 (Congreso de la República de Colombia, 2019), que dispone que el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible elabore un instrumento técnico para potenciar el uso del agua de lluvia, con especial énfasis en zonas sometidas a estrés hídrico. El documento técnico contiene directrices de orientación destinadas a las autoridades ambientales para administrar el recurso hídrico y a los usuarios, con el objetivo de informarles sobre las posibilidades de uso y gestión de las aguas lluvias.

La creación de un lineamiento técnico para el uso de agua lluvia responde a la necesidad de clarificar y regular el manejo de este recurso, el cual es considerado bien de uso público. Según los artículos 2.2.3.2.2.2, 2.2.3.2.2.4 y el Decreto 1076 de 2015, el Estado tiene el control sobre las aguas lluvias y la responsabilidad de vigilar su uso. De esta forma, se establece que el propietario de un predio puede hacer uso sin concesión de las aguas que caigan o se recojan en su propiedad, bajo ciertas condiciones de no causar perjuicios a terceros. Sin embargo, si las aguas lluvias atraviesan varios predios o forman un cauce natural, se requerirá una concesión para su uso. Por lo tanto, esta normativa busca clarificar los procedimientos adecuados para el uso o concesión de aguas lluvias, teniendo como objetivo principal el beneficio del control eficiente e idóneo del manejo de este recurso, respetando tanto los derechos de los propietarios como el impacto ambiental a nivel local. Además, el lineamiento también se justifica en garantizar que el uso de las aguas no cause daños colaterales a terceros, estableciendo de esta manera la necesidad de una autorización ambiental adecuada en ciertos contextos.

El Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022 determina que las medidas para potenciar el uso del agua de lluvia deben aplicarse en todo el territorio nacional, pero se enfatizan especialmente aquellas zonas donde la demanda supera significativamente la oferta superficial disponible. El documento técnico de uso de agua de lluvia se crea para orientar la identificación de las áreas con estrés hídrico y los principales usuarios de agua en dichos territorios, con el fin de focalizar la aplicación de estos lineamientos. Para ello, se utiliza como unidad de análisis la información consolidada en el Estudio Nacional del Agua (ENA) del Ideam, que organiza el país en cinco grandes áreas hidrográficas, subdivididas en 41 zonas y 316 subzonas hidrográficas, sirviendo estas divisiones como referencia para la planificación y ordenación del territorio.

En este análisis, se emplea el indicador de vulnerabilidad por desabastecimiento (IVH) para condiciones de año seco, el cual relaciona el estado del sistema hídrico a través del índice de retención y regulación (IRH) con el índice de uso de agua (IUA), determinando así cuáles subzonas presentan mayor estrés hídrico. Asimismo, se analiza la demanda de agua en diferentes sectores (pecuaria, agrícola, consumo humano, generación de energía, hidrocarburos, industria, minería, piscicultura y servicios) para identificar a los principales usuarios en estas áreas críticas. (Congreso de la República de Colombia. 2019)

En la sección 3 de este lineamiento se presentan tres indicadores que son utilizados para evaluar la intervención antrópica de diferentes cuencas del país, el primer indicador es el IRH (índice de retención y regulación hídrica), el segundo indicador es el IUA (índice de uso de agua superficial) y el tercer y último indicador es el IVH (índice de vulnerabilidad por desabastecimiento). A cada uno de estos índices se le ha asignado un rango para poder categorizarlos desde un índice bajo hasta uno crítico según sea el caso del área geográfica que se está describiendo:

**Tabla 7***Categorías del Índice de Retención y Regulación Hídrica (IRH)*

<b>Rango IRH</b>	<b>Categoría IRH</b>	<b>Descripción</b>
> 0.85	Muy alta	Muy alta retención y regulación de humedad
0.75 – 0.85	Alta	Alta retención y regulación de humedad
0.65 – 0.75	Moderada	Media retención y regulación de humedad media
0.50 – 0.65	Baja	Baja retención y regulación de humedad
< 0.50	Muy baja	Muy baja retención y regulación de humedad

*Nota: Tomado de (Ideam, 2019)***Tabla 8***Índice de Uso de Agua Superficial (IUA)*

<b>Rango Índice de Uso del Agua</b>	<b>Categoría</b>	<b>Interpretación Índice de Uso del Agua</b>
> 100	Crítico	La presión supera las condiciones de la oferta superficial disponible
50,01 – 100	Muy alto	La presión de la demanda es muy alta respecto a la oferta superficial disponible
20,01 – 50	Alto	La presión de la demanda es alta respecto a la oferta superficial disponible
10,01 – 20	Moderado	La presión de la demanda es moderada respecto a la oferta superficial disponible
1,01 – 10	Bajo	La presión de la demanda es baja respecto a la oferta superficial disponible
≤ 1	Muy bajo	La presión de la demanda no es significativa respecto a la oferta superficial disponible

*Nota: Tomado de (Ideam, 2015)*

**Tabla 9***Índice de Vulnerabilidad por Desabastecimiento (IVH)*

Categoría IUA	Rango IUA	Categorías IRH			
		Alta	Moderada	Baja	Muy baja
		Rango IRH			
		0.75 – 0.85	0.65 – 0.75	0.50 – 0.65	<0.50
Muy bajo	< 1	Muy baja	Baja	Media	Media
Baja	1 – 10	Baja	Baja	Media	Media
Moderado	>10 – 20	Media	Media	Alta	Alta
Alto	>20 – 50	Media	Alta	Alta	Muy alta
Muy alto	>50 – 100	Media	Alta	Alta	Muy alta
Crítico	>100	Muy alta	Muy alta	Muy alta	Muy alta

*Nota: Tomado de (Ideam, 2015)*

La identificación de zonas con estrés hídrico se realizó mediante el análisis del índice de vulnerabilidad por desabastecimiento (IVH), en las categorías de alto y muy alto, para condiciones de año seco, tal como se presenta en el Estudio Nacional del Agua (Ideam, 2019). Con esta información, se establecieron las subzonas hidrográficas que experimentan un claro estrés hídrico. Por lo que da un total de 84 subzonas hidrográficas con categoría de IVH alta o muy alta fueron identificadas a nivel de áreas y zonas hidrográficas. Se observa que 58 subzonas hidrográficas (69%) y 16 áreas hidrográficas (19%) están localizadas en las áreas hidrográficas Magdalena Cauca y Caribe, respectivamente. Además, en la **Tabla 10** se presenta la distribución espacial de las zonas identificadas con estrés hídrico. (Ministerio Nacional de Medioambiente, 2022)

**Tabla 10**

*Distribución de Subzonas Hidrográficas con Estrés Hídrico a Nivel de Área Hidrográfica*

Nombre área hidrográfica	Nombre zona hidrográfica	Subzonas hidrográficas	
		(#)	%
Amazonas	-	0	0.00%
Caribe	Caribe - Guajira	7	8.30%
	Caribe - Litoral	5	6.00%
	Catatumbo	3	3.60%
	Sinú	1	1.20%
	Total Caribe	16	19.00%
Magdalena Cauca	Alto Magdalena	16	19.00%
	Bajo Magdalena	6	7.10%
	Cauca	22	26.20%
	Cesar	4	4.80%
	Medio Magdalena	5	6.00%
	Saldaña	2	2.40%
	Sogamoso	3	3.60%
TOTAL Magdalena Cauca	58	69.00%	
Orinoco	Arauca	1	1.20%
	Meta	7	8.30%
	Total Orinoco	8	9.50%
Pacífico	Patía	2	2.40%
	Total Pacífico	2	2.40%
Total GENERAL		84	100.00%

*Nota: Tomado de (Ideam, 2019)*

El Estudio Nacional del Agua 2018 (Ideam, 2019) prioriza las cabeceras municipales en riesgo de desabastecimiento hídrico, identificando un total de 391 municipios en dicha condición. Con el fin de evaluar el posible impacto de la implementación de medidas para potenciar el uso del agua de lluvia en las 84 subzonas hidrográficas, se analizó la localización de estos municipios en relación con dichas subzonas. Se reconoce que, debido a la divergencia entre los límites de la división político-administrativa y las fronteras de las subzonas hidrográficas, un municipio puede abarcar parcial o totalmente una o varias de ellas. Se establece que un municipio posee potencial para beneficiarse de la

priorización de acciones cuando al menos el 50 % de su extensión se sitúa dentro de estas áreas; y, a mayor porcentaje, mayor es el beneficio potencial derivado de la implementación de dichas medidas. Del análisis se concluye que 268 municipios vulnerables al desabastecimiento hídrico podrían verse favorecidos por la aplicación de acciones en las subzonas con estrés hídrico.

Además en la figura anterior detalla la distribución porcentual de la extensión municipal comprendida en las subzonas con estrés, distribuyéndose departamentalmente de la siguiente manera: Atlántico (3 %), Bolívar (18 %), Boyacá (35 %), Caldas (5 %), Cauca (7 %), Cesar (22 %), Córdoba (3 %), Cundinamarca (41 %), Huila (4 %), La Guajira (15 %), Magdalena (12 %), Nariño (3 %), Norte de Santander (6 %), Quindío (7 %), Risaralda (1 %), Santander (39 %), Sucre (5 %), Tolima (24 %) y Valle del Cauca (18 %). (Ministerio Nacional de Medioambiente, 2022)

Seguido de esto se presenta el capítulo 4 denominado “Elementos técnicos en relación con la oferta de agua lluvia”, el capítulo examina los elementos técnicos asociados a la disponibilidad de agua de lluvia, la cual se define por el volumen que puede ser captado en una superficie destinada a la captación. Se enfatiza que dicha oferta varía en el espacio y en el tiempo, lo que requiere una comprensión que abarque desde el orden nacional hasta el local. En el numeral 4.1 se utiliza la oferta hídrica total superficial como una herramienta analítica que ilustra la variación de la disponibilidad de agua a nivel nacional, diferenciando su comportamiento según las subzonas hidrográficas y las condiciones climáticas (años secos, medios y húmedos); este análisis se fundamenta en la información consolidada en el Estudio Nacional del Agua 2018 (Ideam, 2019) y en la zonificación hidrográfica del país, conforme se expuso en secciones anteriores.

El numeral 4.2 detalla el proceso de monitoreo de la precipitación, mientras que el numeral 4.3 describe quiénes y cómo se efectúa dicho monitoreo a niveles nacional y regional, así como los mecanismos mediante

los cuales los usuarios acceden a esta información. Posteriormente, el numeral 4.4 establece las directrices que permiten a un usuario realizar el monitoreo de la precipitación de manera autónoma.

En lo que respecta a la variación de la oferta a nivel nacional, el Estudio Nacional del Agua 2018 presenta datos actuales sobre el estado del recurso hídrico mediante el análisis de series históricas de variables hidrológicas y meteorológicas del periodo 1981–2016. Además, la oferta hídrica total se define como el volumen de agua que escurre por la superficie e integra los sistemas de drenaje superficial, es decir, el agua que fluye por el suelo sin infiltrarse o evaporarse y que se concentra en los cauces de ríos o en cuerpos de agua lentos. Dichos datos se generan a nivel de subzona hidrográfica y se clasifican según condiciones de año seco, medio y húmedo. (Ideam, 2013)

Para facilitar la interpretación de esta oferta, se elaboran tablas y figuras que expresan el rendimiento en litros por día por metro cuadrado (l/día/m<sup>2</sup>) de agua evacuada por cada subzona. Por ejemplo, se establece que, bajo condiciones de año medio, el rendimiento varía desde un mínimo de 0.07 l/día/m<sup>2</sup> en la subzona "Directos Caribe - Arroyo. Sharimahana Alta Guajira" hasta un máximo de 23.9 l/día/m<sup>2</sup> en la subzona "río San Juan Medio"; además, dicha subzona muestra rendimientos de 13.5, 23.9 y 34.5 l/día/m<sup>2</sup> en condiciones de años seco, medio y húmedo, respectivamente.

Se destaca que, dado que la unidad de análisis es la subzona hidrográfica, esta información posee un carácter regional y no resulta suficiente para determinar la oferta de agua de lluvia en un sitio específico sin un monitoreo puntual de la precipitación, en virtud de la variabilidad temporal y espacial inherente. Además, se enfatiza que la definición de oferta hídrica total se obtiene al descontar procesos como la infiltración y la evaporación de la precipitación total. (Ministerio Nacional de Medioambiente, 2022)

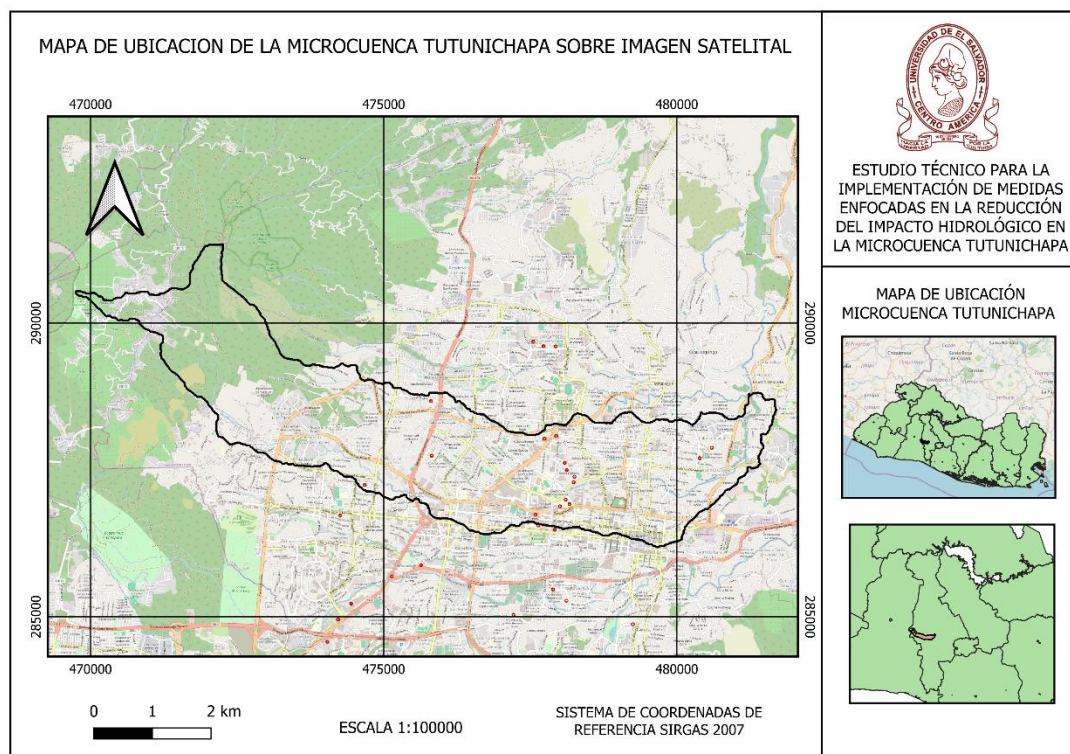
En conclusión, la información presentada en este capítulo constituye una base teórica fundamental para el desarrollo de las características presentes en la cuenca de estudio y para posteriormente examinar la manera de implementar medidas que reduzcan el impacto hidrológico en la cuenca de estudio, ya que, las características a obtener, los reglamentos y métodos a utilizar, y los conceptos desarrollados ayudaran a comprender de mejor manera los capítulos posteriores.

**CAPÍTULO III: ESTUDIO HIDROLOGICO DE LA  
MICROCUENCA TUTUNICHAPA EN EL AÑO 2024**

### **3.1. Descripción de las Características Morfométricas de la Microcuenca Tutunichapa**

#### ***3.1.1. Delimitación de la microcuenca***

Para la delimitación del área de estudio (Ver **Figura 27**) es necesaria partir de un modelo de elevación digital, el cual nos permite obtener el parteaguas de la microcuenca de estudio mediante la obtención de la red de drenaje del área, teniendo en cuenta que se debe de configurar un sistema de coordenadas de referencias, este sistema de referencia moderno es Sirgas 2007 y es el utilizado en El Salvador. La microcuenca se encuentra ubicada en San Salvador centro, distrito de san salvador, San Salvador este distrito de ciudad delgado y la libertad sur distrito de santa tecla, nace en la parte alta de volcán de san salvador en la finca gloria en las coordenadas 469746 E, 290538 N y su punto de drenaje está en el río Urbina en la comunidad San Joaquín, en las coordenadas 481224.3 E, 288793.3 N. La microcuenca Tutunichapa pertenece la subcuenca del río Acelhuate que a su vez pertenece a la cuenca del río lempa y que a su vez pertenece a la región hidrográfica A.

**Figura 27***Mapa de Ubicación de la Microcuenca*

*Nota: Se puede observar que el parteaguas que delimita la microcuenca esta resaltado en una línea de color negro. Elaboración propia con QGIS y montado sobre mapa Google Earth.*

### **3.1.2. Características geométricas de la microcuenca.**

Como antes se mencionó en el capítulo 2, las características geométricas de una cuenca (Ver **Tabla 11**) son las que ayudan a dimensionar su tamaño, así como también a darles una clasificación según dichas características, las cuales se obtuvieron mediante el programa Qgis utilizando las herramientas de forma, dichas características se presentan a continuación:

**Tabla 11***Características Geométricas*

<b>Característica</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
<b>Área</b>	1997.82	Ha
<b>Perímetro</b>	40.08	Km

*Nota: Elaboración propia*

La cuenca al presentar un área de 1997.82, se puede clasificar como una microcuenca al tener menos de 5,000 hectáreas.

**3.1.4. Longitud axial**

La longitud axial (Ver **Figura 28**) tal como se describió previamente se toma como la longitud que existe entre la desembocadura del cauce más largo y el punto más alto y distante.

**Figura 28***Longitud Axial de la Microcuenca*

*Nota: Elaborado mediante software Qgis.*

Por lo tanto, medida desde el punto de salida hasta el punto más alejado de la microcuenca se obtiene una longitud axial de 11.61 km. La longitud axial está estrechamente relacionada con la morfología de la microcuenca. Una microcuenca alargada tendrá una mayor longitud axial, lo que puede afectar tanto su comportamiento hidráulico como su uso del suelo. La longitud axial tiene un impacto directo sobre la dinámica hidrológica de la cuenca, la velocidad de escurrimiento, la erosión del suelo y la planificación del uso del agua

### **3.1.5. Ancho medio de la microcuenca**

El ancho medio de una cuenca ayuda a conocer la dimensión que esta tiene en relación con su longitud axial, por lo que se puede decir que es una idealización si se imaginara la microcuenca como un rectángulo. (Mosalve Sáenz, 1999). Un ancho medio más estrecho generalmente indica una microcuenca más alargada y lineal, donde el flujo de agua puede concentrarse más rápidamente hacia el punto de salida, lo que podría hacerla más susceptible a la erosión en áreas específicas.

$$B = \frac{A}{L} \quad \text{Ecuación (2. 20)}$$

$$B = \frac{19.98 \text{ km}^2}{11.61 \text{ km}} = 1.72 \text{ km}$$

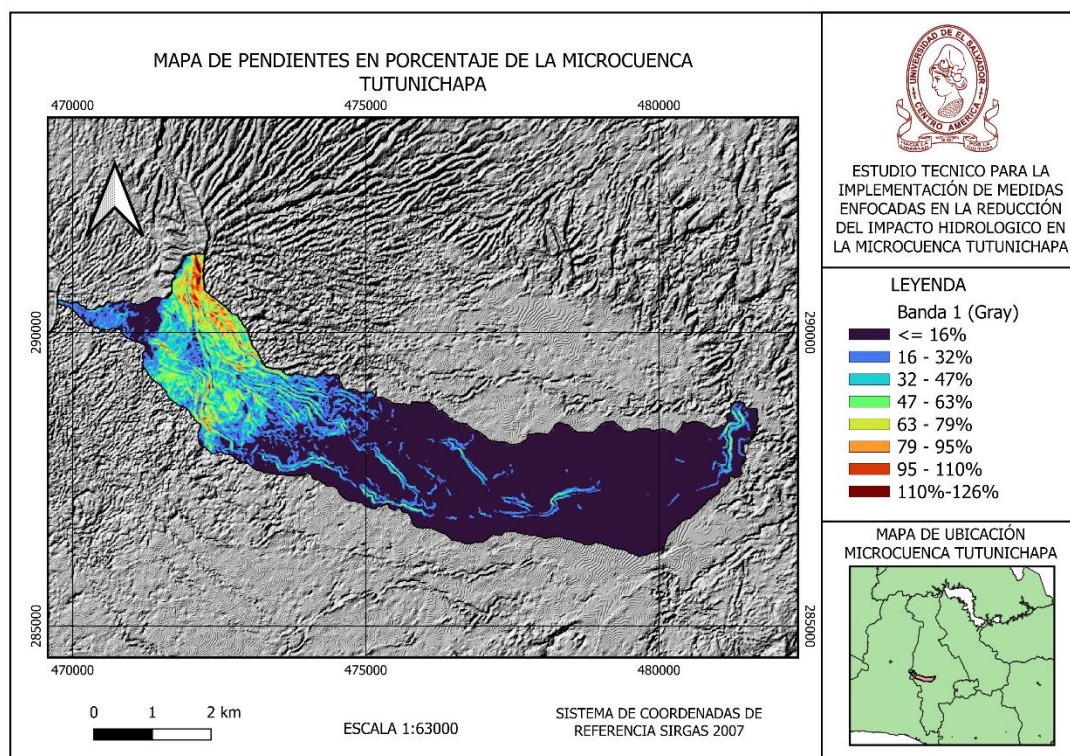
Un ancho medio más estrecho como es el caso de la microcuenca Tutunichapa donde es casi 7 veces menor en comparación con la longitud axial indica una microcuenca más alargada y lineal, donde el flujo de agua puede concentrarse más rápidamente hacia el punto de salida, lo que podría hacerla más susceptible a la erosión en áreas específicas,

### 3.1.6. Pendiente media de la microcuenca

La pendiente de una cuenca afecta directamente la velocidad de escurrimiento influyendo también en su infiltración, su escurrimiento y la humedad del suelo (USON, 2000). Se puede observar en la **Figura 29** y la **Figura 30** en la que la cuenca al tener una forma alargada y pendientes pronunciadas de entre  $22^\circ$  y  $30^\circ$  en su parte alta, se puede decir que tiende a tener drenajes rápidos que disminuyen de velocidad a la altura media de la microcuenca, la cual es de 17.52%. En la **Figura 29** se pueden observar mediante una escala de colores las pendientes que tiene el relieve dentro de la microcuenca de estudio.

**Figura 29**

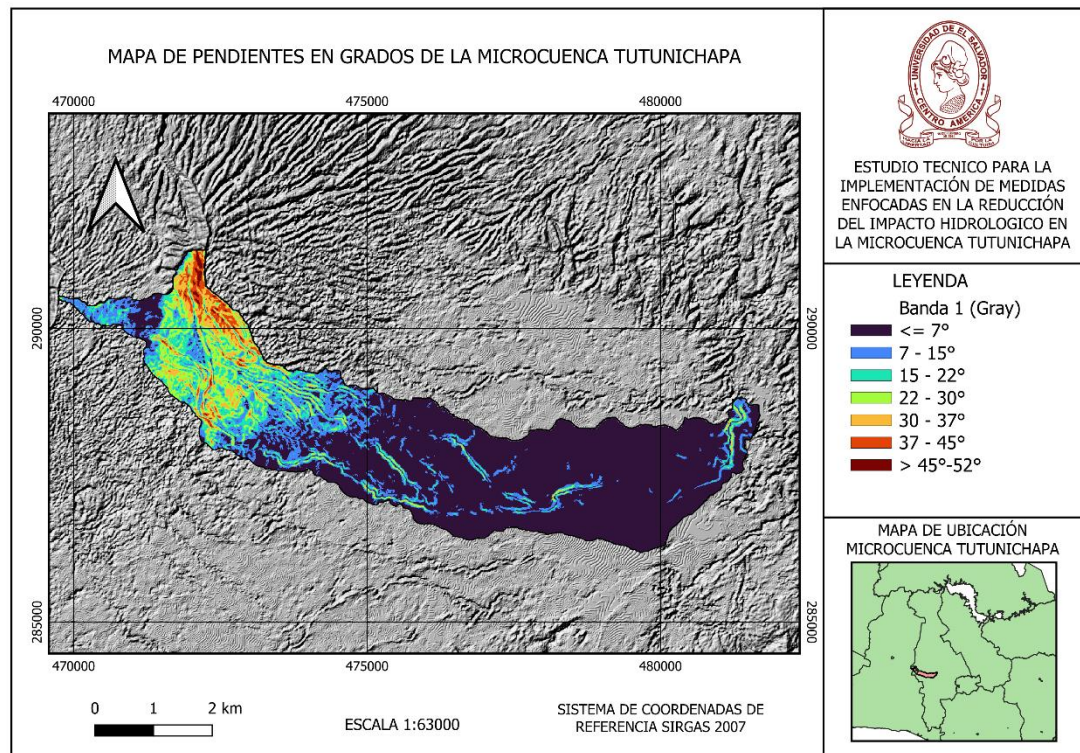
*Pendiente Media de la Microcuenca en Porcentaje (%)*



*Nota: Elaborado mediante software Qgis, con base de mapa topográfico mundial.*

**Figura 30**

*Pendiente Media de la Microcuenca en Grados Sexagesimales (°)*



*Nota: Elaborado mediante software Qgis, con base de mapa topográfico mundial.*

### 3.1.7. Factor de forma

Al ser la relación que existe entre la longitud axial de la cuenca (L) y el ancho medio (B) se pueden obtener valores que sean menores, iguales o mayores a 1. (Mosalve Sáenz, 1999)

Una cuenca con factor de forma bajo es menos propensa a sufrir crecientes en sus cauces comparada con otra del mismo tamaño, pero con un factor de forma mayor.

$$K_f = \frac{19.98}{11.61^2} = 0.15$$

De acuerdo al valor de factor de forma obtenido que se encuentra entre 0.01 y 0.18 la microcuenca se puede describir según la **Tabla 3**, como muy poco achatada y presenta una forma alargada ya que, para un factor de forma menor a 1.0 como es el caso, se dice que una cuenca tiende a ser alargada y con baja susceptibilidad a avenidas. Esto quiere decir que las cuencas con un factor de forma bajo tienen una extensión más pronunciada en una sola dirección, lo que hace que la escorrentía se distribuya a lo largo del cauce de manera gradual, en consecuencia, este tipo de cuencas suele tener una baja susceptibilidad a inundaciones repentinas.

**Tabla 3**

*Clases de Valores de Factor Forma para una Cuenca*

Rangos de Kf	Clases de Forma
0.01-0.18	Muy poco achatada
0.18-0.36	Ligeramente achatada
0.36-0.54	Moderadamente achatada

### **3.1.8. Coeficiente de compacidad**

Este coeficiente permite entender la concentración de agua en función de la forma de la cuenca asociado a un número, para la microcuenca en estudio se tiene:

$$K_c = 0.28 \frac{40.08}{\sqrt{19.98}} = 2.51$$

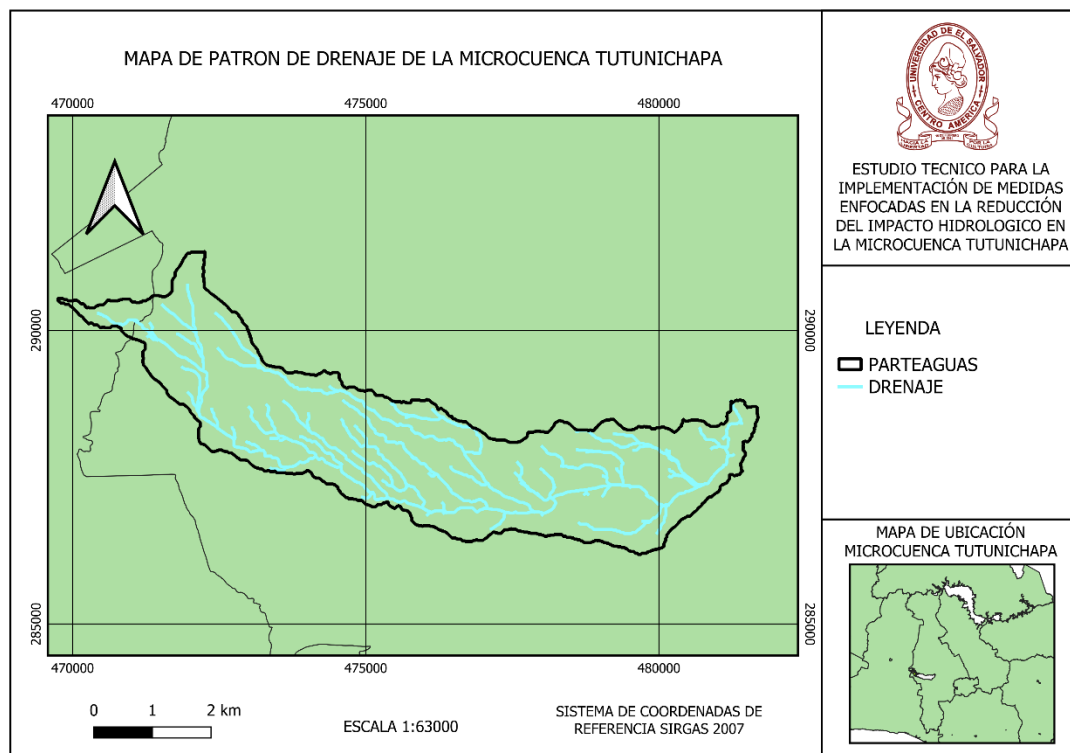
De acuerdo al valor de coeficiente de compacidad obtenido, el cual es superior a 1.75, se puede decir que la microcuenca se clasifica como rectangular, con un valor de coeficiente de 2.51, el cual evidencia una forma

rectangular, por lo que, se puede inferir que presenta un drenaje más disperso y prolongado en el tiempo, lo que reduce la posibilidad de crecidas súbitas. Su geometría alargada implica que el agua de lluvia debe recorrer distancias mayores antes de alcanzar el punto de salida, resultando en un mayor tiempo de concentración y una respuesta hidrológica más lenta ante eventos de precipitación intensa. Esto indica que la cuenca tiene una menor susceptibilidad a avenidas rápidas, ya que el escurrimiento no se concentra de inmediato en el cauce principal, lo que puede ser beneficioso para la gestión del riesgo de inundaciones.

## **3.2. Descripción de las características relacionadas con el drenaje de la microcuenca Tutunichapa**

### ***3.2.1. Patrón de drenaje***

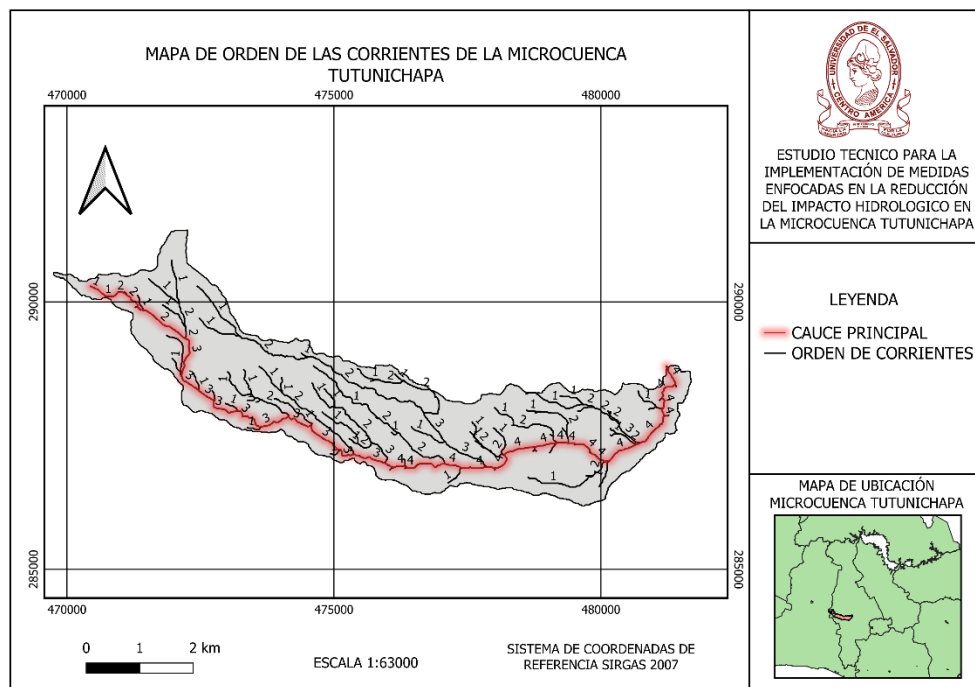
El patrón de drenaje presente en la microcuenca de estudio (Ver **Figura 31**) es un patrón dendrítico, el cual indica que el relieve es relativamente uniforme, con pendientes suaves o moderadas y unidireccionales, y que la geología del terreno es homogénea y erosionable, esto permitiendo que los ríos y afluentes se dispongan de manera natural y ramificada. El patrón de drenaje identificado para la microcuenca Tutunichapa, sugiere que esta se desarrolla en condiciones geológicas y topográficas que favorecen la formación de un sistema de drenaje más eficiente, donde la escorrentía sigue los cauces más accesibles sin influencias estructurales que alteren su dirección.

**Figura 31***Mapa de Patrón de Drenaje Microcuenca Tutunichapa*

*Nota: Elaborado mediante software Qgis.*

### 3.2.2. Orden de las corrientes

La microcuenca Tutunichapa, de acuerdo a su red de drenaje presenta corrientes de orden 4, lo que indica que su sistema de drenaje esta medianamente desarrollado, donde los afluentes han alcanzado una ramificación significativa, pero sin llegar a la complejidad de órdenes superiores como lo son cuencas con áreas superiores a los 5000 Ha.

**Figura 32***Orden de Corrientes Microcuenca Tutunichapa*

*Nota: Elaborado mediante software Qgis.*

**Tabla 12***Longitud de Cada Orden de Corriente*

ORDEN	LONGITUD (KM)
1	27.137
2	20.109
3	8.783
4	7.646
<b>Total</b>	<b>63.675</b>

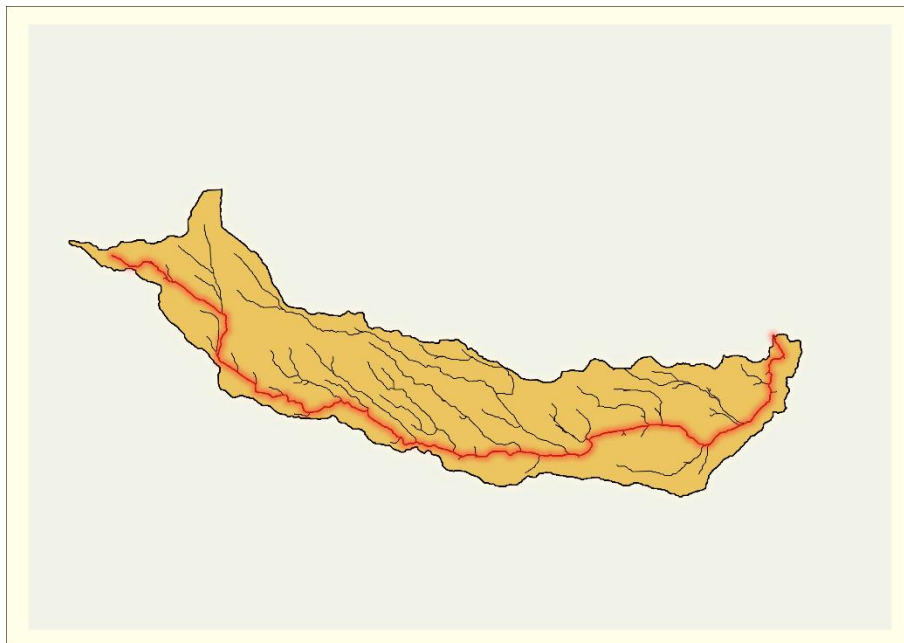
En la tabla anterior se puede observar las distancias en kilómetros de los diferentes ordenes de corrientes, la mayor longitud está en el orden de corriente y la menor de las corrientes de orden

### 3.2.3. Longitud del cauce principal

La longitud del cauce principal de la microcuenca (Ver **Figura 33**) es de 15.86 km, medida desde el punto de descarga ubicado en la parte baja del río Urbina hasta la cabecera del río en el punto más alto ubicado en la cima del volcán de San Salvador, este valor interviene directamente en el tiempo de concentración de las precipitaciones, una longitud de cauce mayor puede dar como resultado un flujo más prolongado, lo que puede reducir el riesgo de inundaciones repentinas, dependiendo de otros factores como la pendiente y la permeabilidad del suelo.

**Figura 33**

*Cauce Principal Microcuenca Tutunichapa*



*Nota: Línea de color rojo intenso, cauce principal de la microcuenca; Línea de color rojo atenuado, límite de la microcuenca; Líneas de color verde, afluentes del cauce principal. Elaborado mediante software Qgis.*

### 3.2.4. Pendiente media del cauce principal

De acuerdo a lo presentado en la **Figura 34**, con una cota máxima de 1798.29 msnm y una mínima de 480.72 msnm del cauce principal, se observa una diferencia considerable de elevación, esto debido a que la microcuenca se origina a lo largo de un volcán y su valle. Partiendo de los datos ya mencionados utilizando el software Qgis y el método de Taylor & Schwarz se obtiene como resultado una pendiente media de 11.57%, o expresado en grados 6.60°.

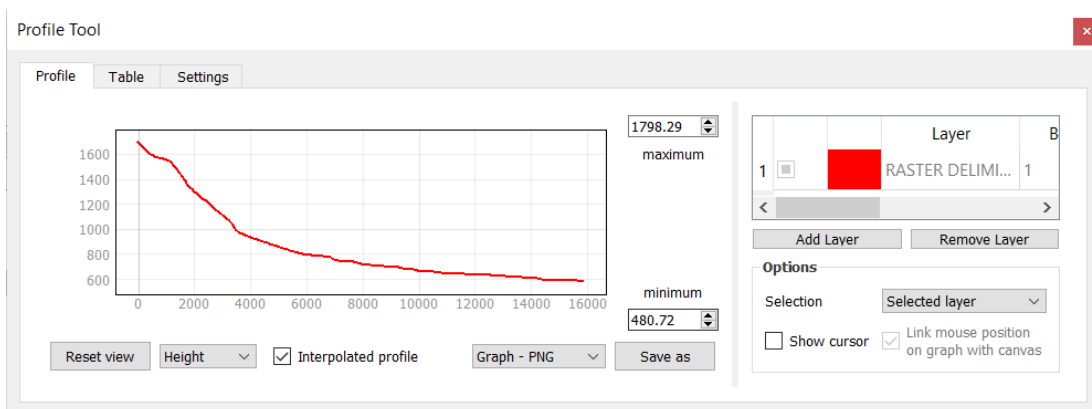
#### Método Taylor & Schwarz

SUMATORIA DE LONGITUD REAL	7580.84
SUMATORIA DE $L/S^{1/2}$	22285.87
PENDIENTE %	11.57

Pendiente es de 11.57%, 6.60 grados.

### Figura 34

#### Perfil del Cauce Principal a través de Software Qgis



*Nota: Captura tomada desde el software Qgis.*

En la **Figura 34**, se puede observar el perfil del cauce principal representada en una gráfica y resaltada en una línea color rojo, además, de su cota máxima y mínima.

### 3.2.5. Tiempo de concentración

Como se mencionó en el capítulo anterior, el tiempo de concentración es el periodo de tiempo que tarda el agua en recorrer la cuenca hasta su salida, influenciado por la longitud del cauce, la pendiente y la rugosidad del terreno. Un tiempo mayor indica una respuesta hidrológica más lenta, mientras que uno menor puede favorecer escurrimientos rápidos y un mayor riesgo de inundaciones. (Aparicio Mijares, 1992)

A continuación, se presenta el cálculo del Tc de la microcuenca Tutunichapa, aplicando diferentes ecuaciones.

Formula de Servicio de Conservación de Suelos (SCS):

$$t_c = 0.06628 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \quad \text{Ecuación (2. 5)}$$

$$t_c = 0.06628 \frac{15.86^{0.77}}{11.57^{0.385}} = 0.22 \text{ h}$$

Formula de Témez:

$$t_c = 0.1251 \left( \frac{L}{S^{0.25}} \right)^{0.76} = 0.64 \text{ h} \quad \text{Ecuación (2. 6)}$$

Formula de Ven Te Chow:

$$t_c = 0.273 \left( \frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.64} = 0.73 h \quad \text{Ecuación (2. 7)}$$

Formula de Johnstone Cross:

$$t_c = 0.04624 \left( \frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.5} = 0.10 h \quad \text{Ecuación (2. 21)}$$

Formula de Cuerpo de Ingenieros USA:

$$t_c = 0.28 \left( \frac{L}{S^{0.25}} \right)^{0.76} = 1.44 h \quad \text{Ecuación (2. 9)}$$

Formula de Giandotti

$$t_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{\Delta H}} = 1.43 h \quad \text{Ecuación (2. 22)}$$

Formula de Williams

$$t_c = 0.1914 \left( \frac{L}{A^{0.25} S^{0.25}} \right) = 0.78 h \quad \text{Ecuación (2. 11)}$$

**Tabla 13***Cuadro Resumen de Tiempos de Concentración*

<b>Método usado</b>	<b>Tiempo de concentración (h)</b>
Kirpich	0.22
Témez	0.64
Ven Te Chow	0.73
Johnstone Cross	0.10
Cuerpo de Ingenieros USA	1.44
Giandotti	1.43
Williams	0.78

*Nota: Elaboración propia.*

En base al anexo 38 de la guía técnica de los drenajes de aguas lluvias de la OPAMSS se tomaron tres fórmulas para cálculo de tiempo de concentración: Kirpich, Ven Te Chow y Giandotti. Al ser el promedio más el 50% de la diferencia del tiempo de concentración máximo (Giandotti) menos el tiempo de concentración mínimo (Kirpich) menor que el tiempo de concentración máximo (Giandotti) se escogió el promedio de los tres tiempos de concentración.

$$t_{c_{prom}} = \frac{0.22 + 0.73 + 1.43}{3} = 0.79 \text{ h}$$

$$t_{c_{prom+(tc_{max}-tc_{min})}} = 0.79 + 0.5(1.43 - 0.22) = 1.40 \text{ h}$$

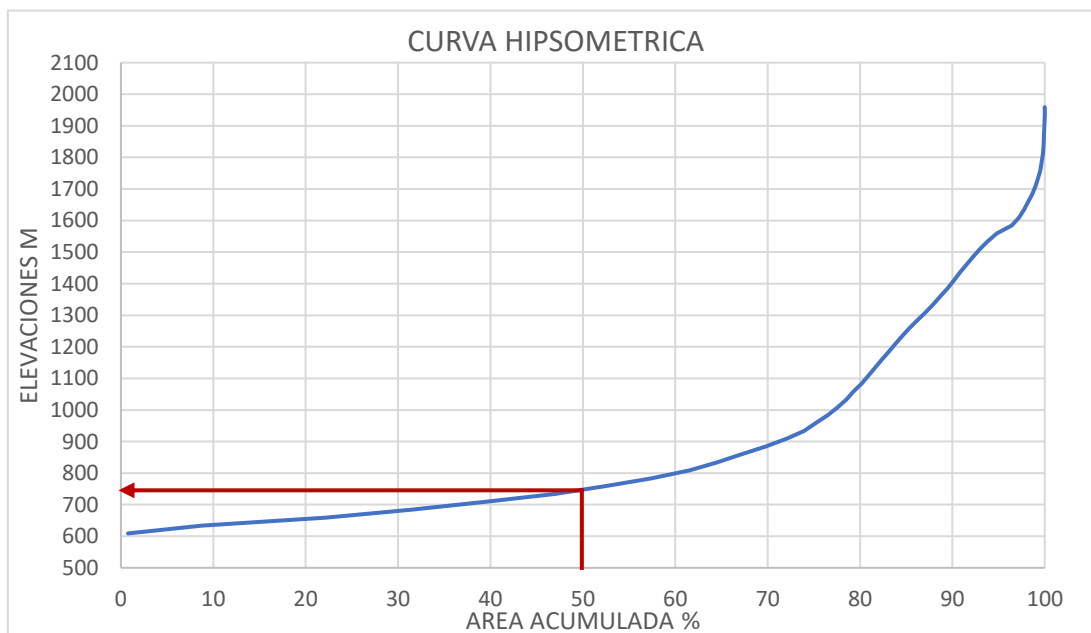
$$t_{c_{microcuencia}} = 0.79 \text{ h} = 47.4 \text{ min}$$

### 3.2.6. Curva hipsométrica

En la **Figura 35** el área acumulada en porcentaje (%) representa cuánto del total del área de la cuenca está contenida hasta cierta elevación, en el eje Y esta la elevación en metros (m). La curva tiene una pendiente suave en la parte baja, del 0 al 70% del área acumulado se encuentra bajo la cota 1000, lo que indica que la mayor parte de la microcuenca se encuentra en una topografía plana. A partir del 80% del área acumulada, la pendiente aumenta de forma abrupta indicando un área escarpada, se conoce de antemano que es debido al área de la microcuenca que se encuentra en el volcán de San Salvador. La curva es un punto medio entre una convexa y una cóncava, lo que indica un equilibrio entre erosión y acumulación de sedimentos.

**Figura 35**

*Perfil del Cauce Principal a través de Software Qgis*



*Nota: Elaboración Propia.*

La elevación media hipsométrica es de 750 m, ya que dicha elevación se encuentra en un punto medio. Este es otro elemento importante para considerar que la microcuenca está en una fase de equilibrio, con una distribución homogénea del relieve.

### **3.3. Identificación de las estaciones con influencia en la microcuenca Tutunichapa a través del método de los polígonos de Thiessen**

El primer paso para aplicar el método de los polígonos de Thiessen es conocer las coordenadas de las estaciones meteorológicas más cercanas a la microcuenca, de las cuales se tiene su información de lluvia, para este caso serán las estaciones meteorológicas: Boquerón, Santa Elena, San Salvador, ITIC, Ilopango.

Cabe aclarar que de las estaciones se utilizaron los datos históricos, los cuales condicionaron la lluvia de diseño a años anteriores, por lo que no permitirá que los datos obtenidos sean los más apegados a las condiciones actuales de precipitación.

**Tabla 14**

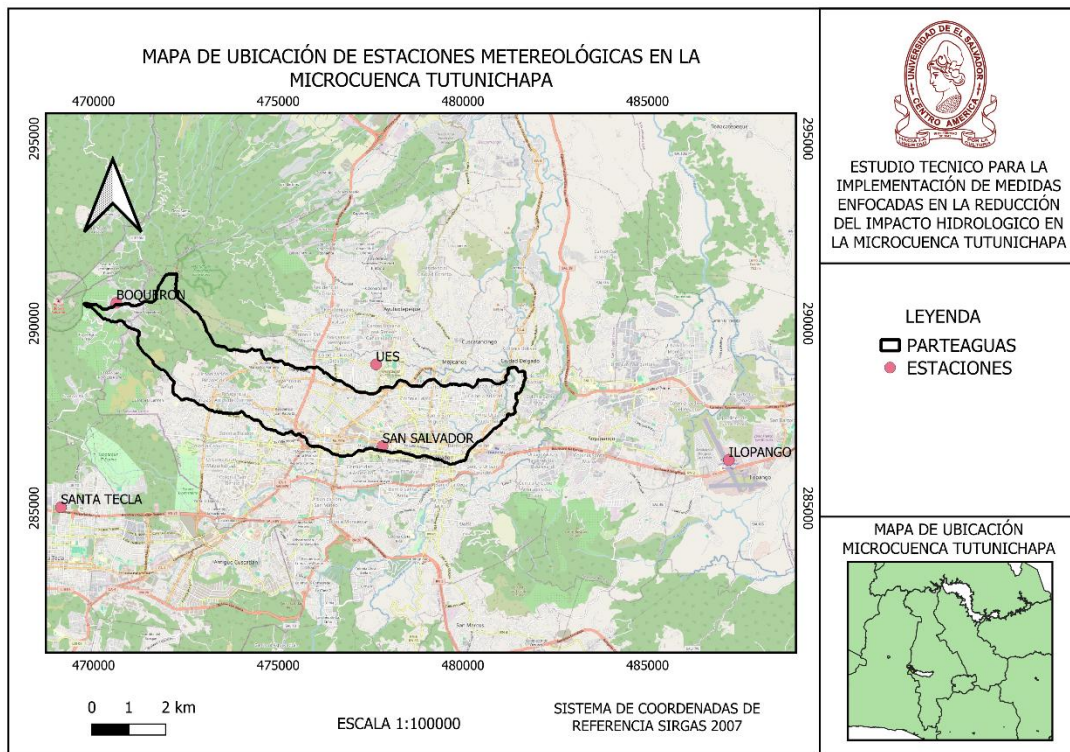
*Estaciones Meteorológicas Cercana a la Microcuenca Tutunichapa*

<b>Estación</b>	<b>Coordenada X</b>	<b>Coordenada Y</b>
<b>Ilopango</b>	487198.0437	286301.6270
<b>Boquerón</b>	470616.7769	290556.0138
<b>San Salvador</b>	477823.6284	286676.7071
<b>ITIC</b>	477645.2890	288889.4500
<b>Santa Tecla</b>	469114.1023	285026.0942

*Nota: Datos tomados del MARN.*

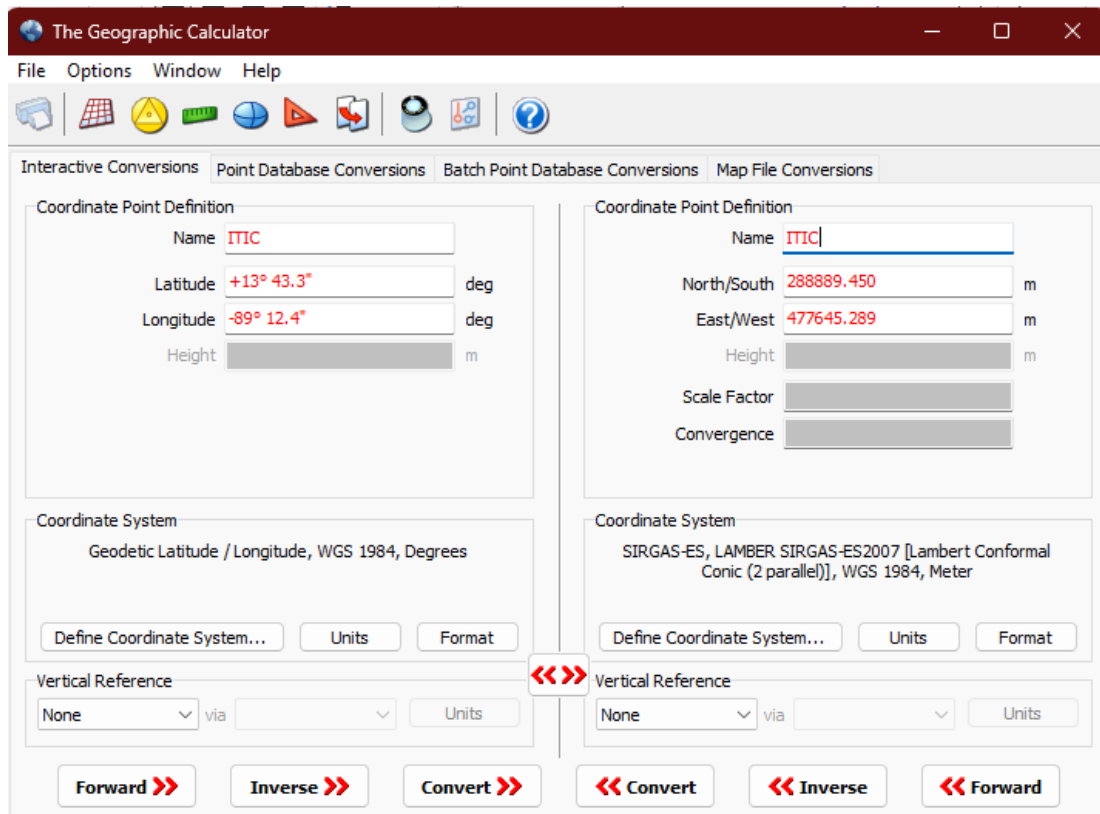
**Figura 36**

*Mapa de Ubicación de Estaciones Meteorológicas.*



*Nota: Elaborado mediante el software Qgis, con base de mapa de Google earth.*

Las coordenadas de las estaciones meteorológicas proporcionadas por el MARN, por defecto vienen en coordenadas geográficas, por lo que para trabajarlas en el QGIS y no tener discrepancias con el sistema de referencia será necesario transformarlas a Lambert Conformal Conic SIRGAS. Las coordenadas se transformarán con el programa “The Geographic Calculator”

**Figura 37***Calculadora de Coordenadas*

*Nota: Conversión de unidades mediante programa The Geographic Calculator.*

El sistema de coordenadas de entrada es el de coordenadas geográficas y la salida es el sistema de coordenadas SIRGAS, los parámetros del sistema de coordenadas SIRGAS fueron previamente definidos.

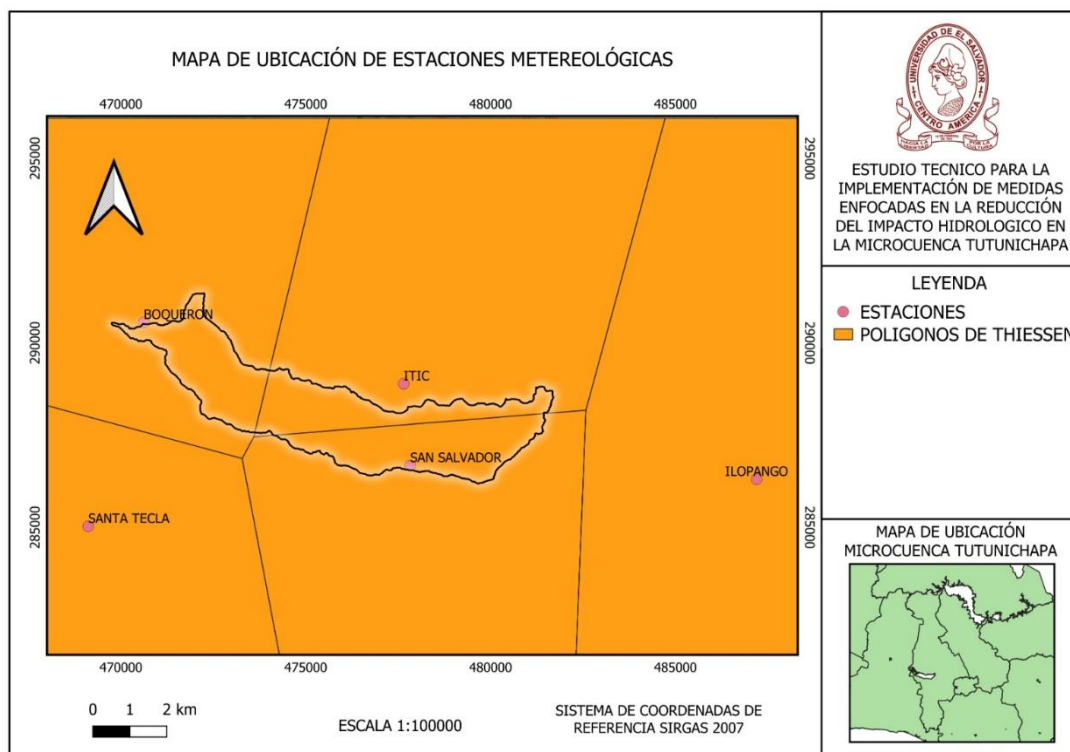
Luego, para realizar el análisis hidrológico con base en datos de precipitación representativos, se identificaron las estaciones meteorológicas más cercanas a la microcuenca Tutunichapa. Estas estaciones son: Boquerón, ITIC y San Salvador. A partir de su ubicación geográfica, se construyeron los polígonos de Thiessen, que permiten definir el área de influencia de cada estación dentro del territorio. Este procedimiento se fundamenta en la distribución espacial de las estaciones, sin considerar

topografía ni gradientes altitudinales, por lo que es útil para estimar la precipitación media en zonas urbanas compactas como esta microcuenca.

Una vez definidos los polígonos, se recortaron utilizando la capa límite de la microcuenca para determinar qué proporción del área está influenciada por cada estación meteorológica. Este recorte permite realizar una estimación más precisa de la lluvia ponderada en la microcuenca, utilizando métodos establecidos como el de Thiessen.

### Figura 38

*Polígonos de Thiessen, con estaciones cercanas a la microcuenca Tutunichapa*

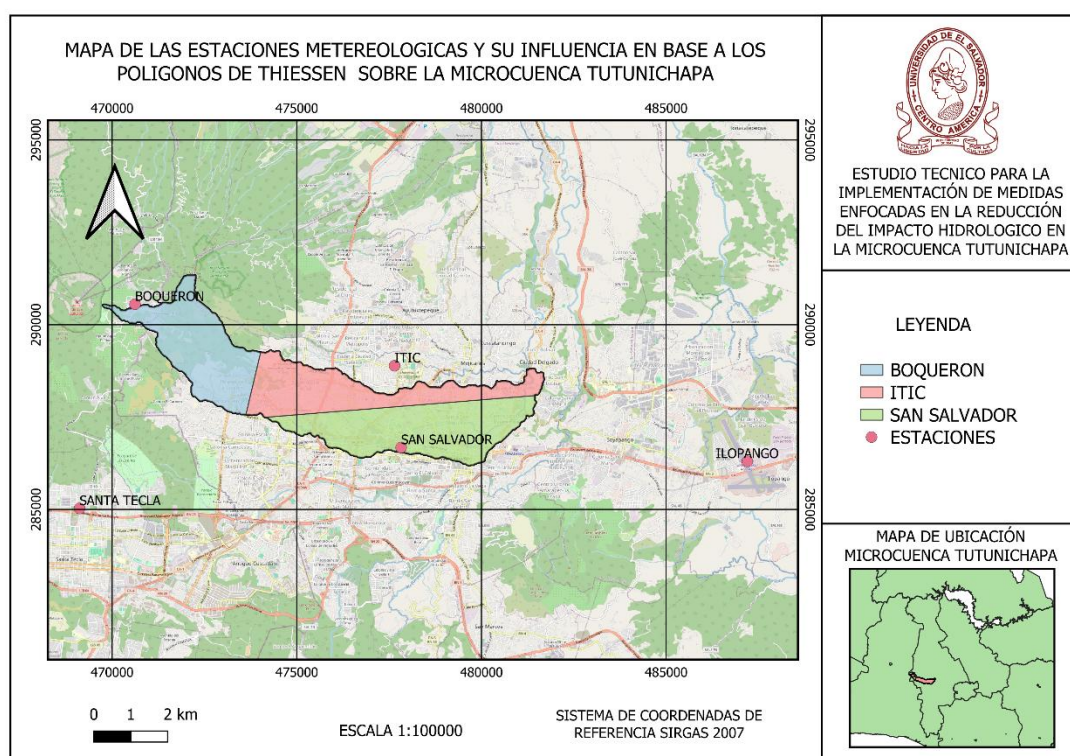


*Nota: Elaborado mediante el software Qgis, adaptado del mapa de texturas de la OPAMSS.*

Las estaciones meteorológicas que tienen influencia en la microcuenca son: Estación meteorológica de Boquerón, estación ITIC, estación San Salvador. Por lo cual es necesario recortar estos polígonos con la capa que delimita la microcuenca Tutunichapa.

**Figura 39**

*Salida de los Polígonos de Thiessen Delimitados por la Microcuenca*



*Nota: Se muestra con colores las áreas de influencia que tiene cada estación en la microcuenca. Elaborado mediante el software Qgis.*

### 3.4. Cálculo de Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF)

Las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) se calculan como una ejemplificación del proceso mediante el cual, a través de regresión lineal múltiple, es posible obtener la relación entre la intensidad de la precipitación, su duración y el periodo de retorno. Este procedimiento permite modelar el

comportamiento de la lluvia en función de datos históricos y ajustar ecuaciones que describen como varia la precipitación con respecto al tiempo.

De las estaciones meteorológicas se obtienen las intensidades máximas anuales para diferentes duraciones de lluvia de 5, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 150, 180, 240 y 360 minutos, que han sido proporcionados por la Dirección General del Observatorio Ambiental del Ministerio de Medio Ambiente Recursos Naturales (MARN). Esta información ha sido analizada por medio del Método probabilístico de Gumbel, obteniéndose de éste, las curvas Intensidad-Duración y Frecuencia para periodos de retorno de 2, 3, 5, 10, 25 y 50 años. A excepción de la estación meteorológica de San Salvador, de las cuales solo se tienen periodos de retorno de 2, 3, 5, 10 y 25 años.

Como ejemplo de aplicación del método Gumbel se analizó la estación meteorológica de Santa Elena, debido a que para las estaciones que se encuentran dentro de la microcuenca no se cuenta con datos históricos por año.

**Tabla 15**

*Estación Meteorológica Santa Tecla, Datos Históricos*

ESTACION METEREOLÓGICA SANTA TECLA, DATOS HISTÓRICOS 1954-1984													
AÑO	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	0.32	0.28	0.09	0.07
1955	1.86	1.73	1.46	1.28	1.05	0.71	0.54	0.40	0.32	0.27	0.22	0.15	0.12
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	0.12
1957	2.20	1.89	1.53	1.56	1.26	0.88	0.67	0.45	0.36	0.30	0.25	0.18	0.10
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	0.08
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	0.27	0.27	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	0.15
1964	2.40	2.27	2.27	1.78	1.36	0.94	0.78	0.56	0.44	0.36	0.21	0.16	0.12
1965	2.48	2.28	2.01	1.71	1.33	0.93	0.68	0.47	0.41	0.30	0.32	0.27	0.06

<b>1966</b>	2.28	1.92	1.89	1.87	1.58	1.26	1.02	0.78	0.65	0.53	0.45	0.35	0.07
<b>1967</b>	2.56	2.36	2.00	1.77	1.26	1.25	1.17	0.94	0.36	0.23	0.20	0.10	0.10
<b>1968</b>	2.14	1.89	1.50	1.42	1.25	1.15	1.07	0.83	0.74	0.60	0.32	0.26	0.18
<b>1969</b>	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
<b>1970</b>	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
<b>1971</b>	3.36	2.66	2.32	2.10	1.56	1.20	0.75	0.53	0.41	0.33	0.28	0.14	0.12
<b>1972</b>	2.56	1.78	1.45	1.20	0.91	0.74	0.60	0.53	0.44	0.27	0.24	0.10	0.03
<b>1973</b>	3.18	2.29	1.93	1.76	1.41	1.05	0.90	0.64	0.50	0.42	0.36	0.24	0.10
<b>1974</b>	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
<b>1975</b>	2.38	2.17	1.88	1.79	1.73	1.27	0.97	0.67	0.52	0.42	0.35	0.26	0.26
<b>1976</b>	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
<b>1977</b>	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
<b>1978</b>	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
<b>1979</b>	2.72	1.95	1.90	1.68	1.45	1.02	0.80	0.59	0.47	0.39	0.33	0.22	0.19
<b>1980</b>	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
<b>1981</b>	2.84	2.24	1.84	1.58	1.35	1.09	0.89	0.70	0.45	0.36	0.32	0.24	0.20
<b>1982</b>	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
<b>1983</b>	2.76	1.80	1.66	1.50	1.46	1.24	0.96	0.61	0.49	0.38	0.31	0.18	0.12
<b>1984</b>	3.60	2.80	2.46	2.24	1.58	1.14	0.91	0.70	0.54	0.46	0.27	0.22	0.16

*Nota: Elaboración propia tomando datos proporcionados por el MARN.*

En base a los datos históricos se procede a calcular las variables probabilísticas respectivas al método de Gumbel: Promedio, desviación estándar, parámetro de escala y parámetro de posición.

$$\text{Promedio} = \bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} \quad \text{Ecuación (2. 23)}$$

$$\text{Desviación estandar} = s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad \text{Ecuación (2. 24)}$$

$$\text{Parametro de escala} = \alpha = \frac{\pi}{\sqrt{6} * s} \quad \text{Ecuación (2. 25)}$$

$$\text{Parametro de posición} = X_0 - \frac{0.5772}{\alpha} \quad \text{Ecuación (2. 26)}$$

**Tabla 16**

*Cuadro Resumen de la Suma de las Variables Probabilísticas de Gumbel*

<b>AÑO</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>45</b>	<b>60</b>	<b>90</b>	<b>120</b>	<b>150</b>	<b>180</b>	<b>240</b>	<b>360</b>
<b><math>\bar{x}</math></b>	2.609	2.131	1.852	1.645	1.354	1.053	0.846	0.621	0.483	0.390	0.330	0.250	0.167
<b>Sx</b>	0.505	0.382	0.369	0.358	0.326	0.275	0.244	0.182	0.133	0.114	0.091	0.093	0.080
<b><math>\alpha</math></b>	2.5403	3.3541	3.4780	3.5795	3.9359	4.6657	5.2483	7.0337	9.6544	11.2777	14.1376	13.8462	16.1229
<b>Xo</b>	2.3818	1.9592	1.6857	1.4842	1.2069	0.9295	0.7362	0.5389	0.4231	0.3388	0.2889	0.2083	0.1313

*Nota: Se calculan las variables probabilísticas para cada duración de lluvia. Elaboración propia en Excel tomando datos proporcionados por el MARN.*

Una vez calculado las variables probabilísticas se le aplica logaritmo a la función de densidad de Gumbel, la cual es la que se utiliza para obtener las intensidades de lluvias para cada periodo de retorno y duración respectivamente.

$$\text{Densidad de gumbel} = F_{(x)} = e^{-e^{-\left(\frac{x-u}{\alpha}\right)}} \quad \text{Ecuación (2. 27)}$$

$$\text{Densidad Gumbel} = X_0 + \frac{(-\ln(-\ln(F(x))))}{\alpha} \quad \text{Ecuación (2. 28)}$$

$$\text{Periodo} = F(x) = 1 - \frac{1}{T} \quad \text{Ecuación (2. 29)}$$

**Tabla 17**

*Cuadro de Intensidades de Lluvia en Función a la Duración y el Periodo de Retorno*

Periodo de retorno	Duración (minutos) / Intensidad(mm/min)														
	5	10	15	20	30	45	60	90	120	150	180	240	360	T	F(x)
<b>2</b>	2.53	2.07	1.79	1.59	1.30	1.01	0.81	0.59	0.46	0.37	0.31	0.23	0.15	2.00	0.50
<b>3</b>	2.74	2.23	1.95	1.74	1.44	1.12	0.91	0.67	0.52	0.42	0.35	0.27	0.19	3.00	0.67
<b>5</b>	2.97	2.41	2.12	1.90	1.59	1.25	1.02	0.75	0.58	0.47	0.39	0.32	0.22	5.00	0.80
<b>10</b>	3.27	2.63	2.33	2.11	1.78	1.41	1.16	0.86	0.66	0.54	0.45	0.37	0.27	10.00	0.90
<b>25</b>	3.64	2.91	2.61	2.38	2.02	1.62	1.35	0.99	0.75	0.62	0.52	0.44	0.33	25.00	0.96
<b>50</b>	3.92	3.12	2.81	2.57	2.20	1.77	1.48	1.09	0.83	0.68	0.56	0.49	0.37	50.00	0.98

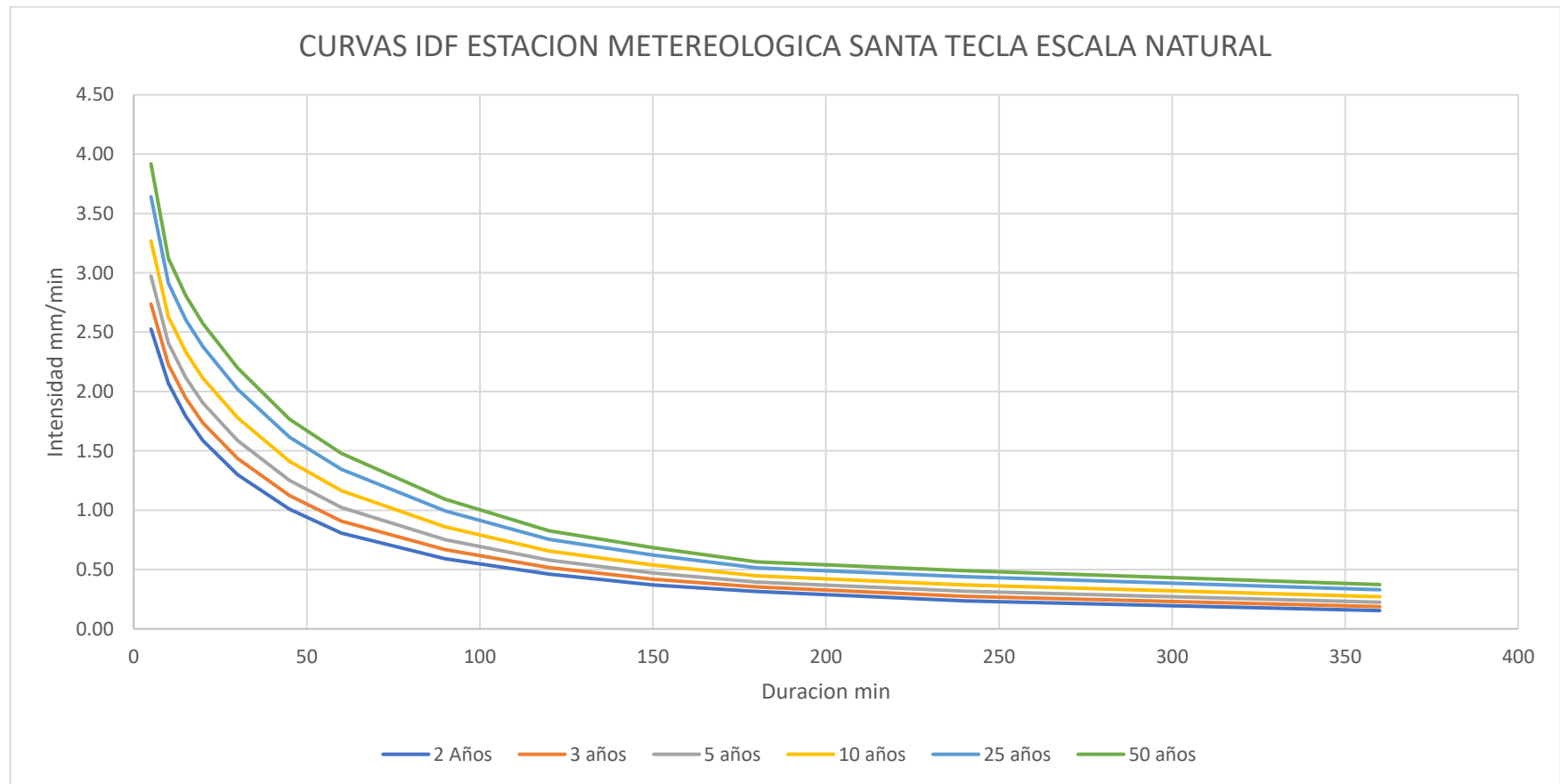
*Nota: Se calcula la función de densidad de Gumbel para cada duración de lluvia. Elaboración propia en Excel.*

Con los resultados obtenidos para cada estación se elaboran las curvas intensidad, duración-frecuencia (IDF), tanto en escala natural como logarítmica.

Se puede observar que en la **Figura 40** y la **Figura 41** se presentan las curvas IDF correspondientes a la estación meteorológica Santa Tecla

**Figura 40**

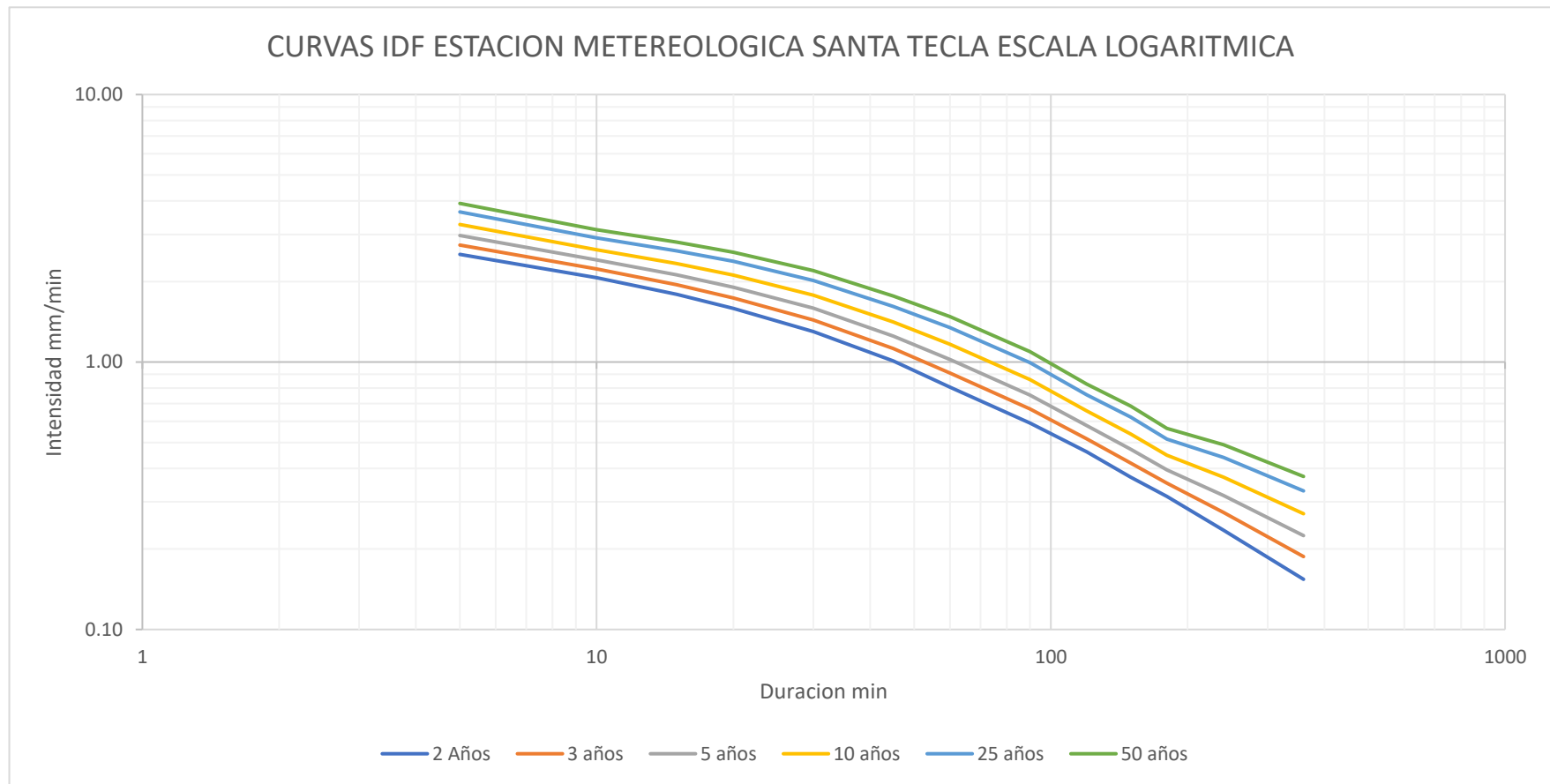
*Curvas IDF Escala Natural Estación Meteorológica Santa Tecla*



Nota: Elaboración propia en Excel tomando datos proporcionados por el *MARN*.

**Figura 41**

*Curvas IDF Escala Logarítmica Estación Meteorológica Santa Tecla*



Nota: Elaboración propia en Excel tomando datos proporcionados por el MARN.

Para la determinación del caudal máximo Instantáneo, generado por la microcuenca como respuesta a un evento de lluvia de diseño se utilizará un periodo de retorno de 50 años como se indica en el Reglamento a la Ley de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Área Metropolitana de San Salvador y de los Municipios Aledaños.

Esta disposición busca garantizar que las infraestructuras hidráulicas en el Área Metropolitana de San Salvador estén preparadas para manejar eventos de precipitación significativos, equilibrando la seguridad y la viabilidad económica.

### **3.5. Caudal máximo instantáneo**

Debido a que la microcuenca Tutunichapa se encuentra ubicada dentro del Área Metropolitana de San Salvador, el cálculo del caudal máximo instantáneo se realiza en base al anexo 38 de la guía técnica de drenajes de aguas lluvias elaborada por la OPAMSS, esta guía presenta dos posibles métodos a utilizar, de los cuales se descartó el método racional, ya que la microcuenca posee un área mayor de 2.5 km, por lo que se escogió el método de modelación hidrológica utilizando el software HEC-HMS. Para el volumen de esorrentía se utilizó la metodología de curva número de SCS.

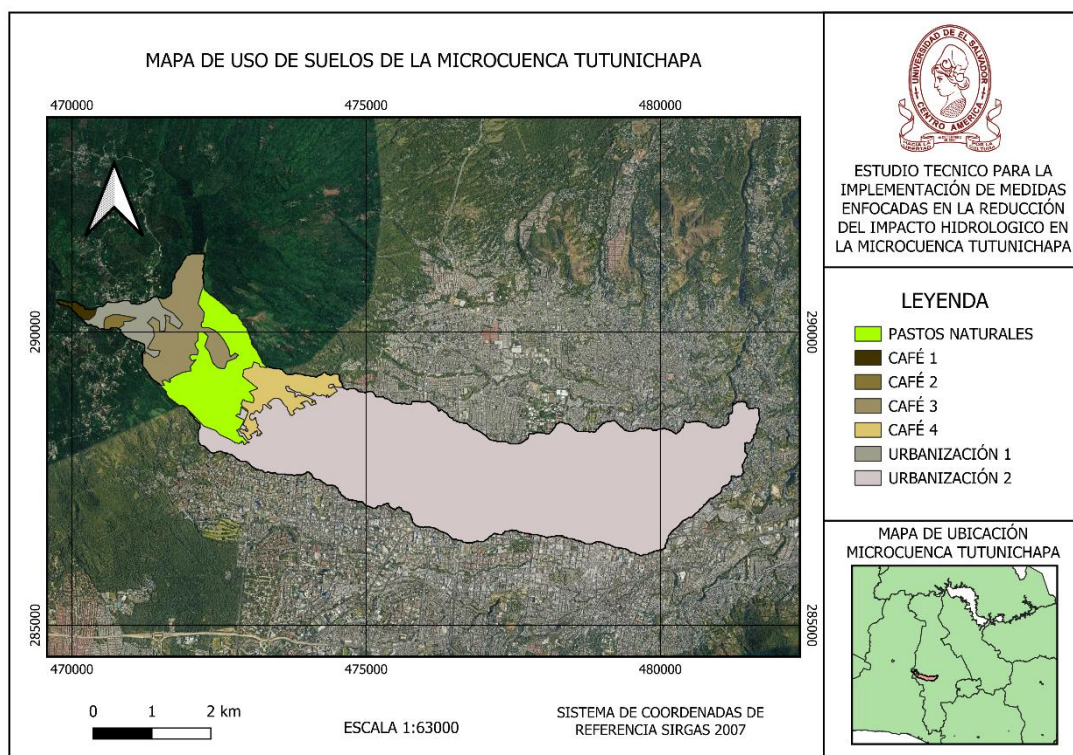
#### **3.5.1. Método de curva número SCS**

Para el cálculo de numero de curva se usó la tabla propuesta en el anexo 38 de la guía técnica de drenajes de aguas lluvias de la OPAMSS. Para el cálculo de numero de curva es necesario conocer el uso de suelos, prácticas de cultivo, las condiciones hidrológicas que se encuentran en dicho sitio y las características hidrológicas del suelo. Para obtener estos parámetros se utilizaron los mapas de uso de suelos y texturas de suelos del mapeo digital que se encuentra en la página oficial del CENTA del año 2024.

El primer paso es conocer el uso de suelos de la microcuenca el cual se presenta en la **Figura 42**, tomado de la página oficial del CENTA del año 2024 y adaptado en el programa QGIS.

**Figura 42**

*Tipos de Uso de Suelo de la Microcuenca Tutunichapa*



*Nota: Adaptado de mapa de uso de suelos del CENTA del año 2024 y elaborado mediante software Qgis.*

En la microcuenca se encuentran tres tipos de usos de suelos: Cultivos de café, pastos naturales y urbanización, la división del uso de suelo del cultivo de café y urbanización se hizo para poder calcular el número de curva ponderado. Como se muestra en la **Tabla 18**, el porcentaje de pastos naturales es del 9.94%, el porcentaje total de cultivo de café es de 12.84% y el área urbanizada del 74.07%

**Tabla 18***Porcentaje de Área de los Usos de Suelo de la Microcuenca*

ZONA	VEGETACION	AREA HA	% AREA
1	PASTOS NATURALES	198.6	9.94%
1	CULTIVO DE CAFÉ	9.14	0.46%
2	CULTIVO DE CAFÉ	8.31	0.42%
3	CULTIVO DE CAFÉ	150.73	7.54%
4	CULTIVO DE CAFÉ	88.26	4.42%
1	URBANIZACION	63.04	3.16%
2	URBANIZACION	1479.82	74.07%
		1997.9	100.00%

*Nota: Elaborado mediante el software Excel.*

El segundo paso es identificar el tipo de práctica agrícola en la microcuenca, para este caso el cultivo de café en esta zona se practica en hilera siguiendo las curvas de nivel del terreno, los pastos naturales se consideraron como pastizales que crecen siguiendo las curvas de nivel de la topografía y la urbanización 1 se consideró como residencial con zonas de impermeabilización del 25% y la urbanización 2 como residencial con zonas de impermeabilización del 65% en base al mapa de impermeabilización del área metropolitana que se encuentra en el sitio web de la OPAMSS.

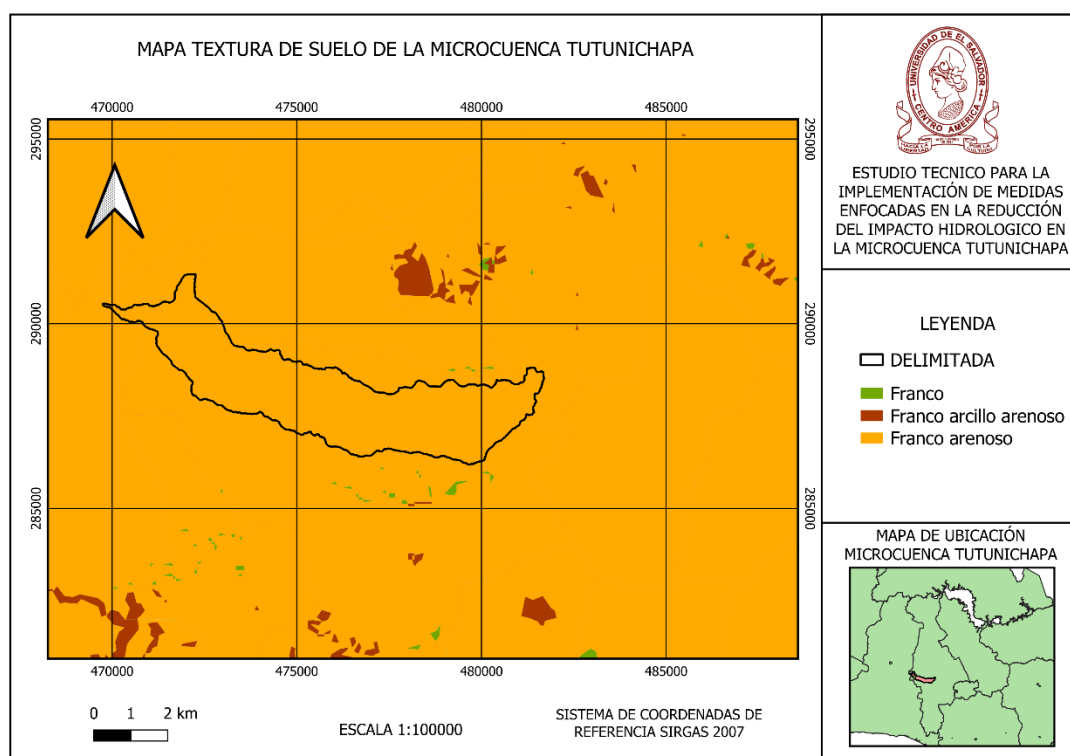
El tercer paso es conocer las condiciones hidrológicas, este parámetro indica los efectos del tipo de cubierta y de su tratamiento sobre la infiltración y la escorrentía. Generalmente es estimada a través de la densidad de la planta que cubre el suelo o de los residuos acumulados sobre él, y se clasifica en buena, regular y malas siendo una condición hidrológica pobre o mala, cuando existan sobre el suelo factores que reducen las tasas de infiltración y aumenten la escorrentía, y por el contrario una condición hidrológica buena

se observa cuando sobre el suelo existen factores que tienden a mejorar la infiltración del agua y disminuir la escorrentía. Al tener una alta densidad en los pastos naturales y el cultivo de café se clasificó como una condición hidrológica buena.

El cuarto paso es conocer las características hidrológicas del suelo, para este caso se puede observar que la textura en el 100% de la microcuenca corresponde a franco arenosa. Al tener este tipo de textura en toda la microcuenca y tomando de base el manual de referencia técnica del HEC-HMS, se determinó que la microcuenca cae en el grupo B, suelos con moderada capacidad de infiltración cuando están saturados.

**Figura 43**

*Mapa de Texturas de Suelo de la Microcuenca Tutunichapa*



*Nota: Adaptado de mapa de texturas de suelos de la OPAMSS y elaborado mediante software Qgis.*

Como quinto paso es calcular un numero de curva ponderado, ya que hay distinto tipo de vegetación en la microcuenca. En la **Tabla 19**, se presentan los resultados obtenidos.

**Tabla 19**

*Cálculo de Curva Número Promedio*

ZONA	VEGETACION	AREA HA	NC HUMEDAD ANTECEDENTE II	NC HUMEDAD ANTECEDENTE III	NC III x AREA	NC PROM
1	PASTOS NATURALES	198.6	61	78	15540.20	90.44
1	CULTIVO DE CAFÉ	9.14	75	87	798.30	
2	CULTIVO DE CAFÉ	8.31	75	87	725.81	
3	CULTIVO DE CAFÉ	150.73	75	87	13165.03	
4	CULTIVO DE CAFÉ	88.26	75	87	7708.78	
1	URBANIZACION	63.04	70	84	5313.84	
2	URBANIZACION	1479.82	85	93	137436.96	
		1997.9			180688.93	

*Nota: Elaboración propia.*

En la **Tabla 19**, la columna 1 contiene el número de identificación por zona, la columna 2 es el tipo de vegetación por zona de la microcuenca, en la columna 3 es el área respectiva por cada zona, en la cuarta columna se obtiene un numero de curva por defecto con humedad antecedente II, pero ya que se trata de un estudio hidrológico de la microcuenca es necesario convertirlo a humedad antecedente III con la fórmula propuesta por la OPAMSS en el anexo 38, en la sexta columna se multiplica el área del número de curva con humedad antecedente III y finalmente se divide la sumatoria de la columna 6 entre el área total para obtener un numero de curva ponderado para toda la microcuenca (ubicado en la columna 7)

### 3.5.2. Cálculo de hietograma para cada estación meteorológica con el método de bloques alternos.

Para poder aplicar el método de bloques alternos se necesita procesar los datos históricos de lluvia a través de una regresión lineal múltiple y de esta forma obtener la ecuación propuesta por Aparicio Mijares, y calcular cualquier intensidad en función de una duración. En base al anexo 38 de la guía técnica de drenajes de aguas lluvias de la OPAMSS, el periodo de retorno se tomó de 50 años, al tener un tiempo de concentración de 47 minutos se consideró un hietograma para una hora, con intervalos de 5 minutos.

**Tabla 20**

*Distribución Temporal de Precipitación para una Tormenta de Diseño*

DURACION (MIN)	INTENSIDAD (MM/HORA)	PROFUNDIDAD ACUMULADA MM	PROFUNDIDAD INCREMENTAL MM	TIEMPO MIN	PRECITIPITACION MM
5	313.3	26.1	26.1	0-5	2.09
10	201.0	33.5	7.4	5-10	2.39
15	155.1	38.8	5.3	10-15	2.84
20	129.0	43.0	4.2	15-20	3.60
25	111.8	46.6	3.6	20-25	5.27
30	99.5	49.8	3.2	25-30	26.10
35	90.2	52.6	2.8	30-35	7.40
40	82.8	55.2	2.6	35-40	4.23
45	76.8	57.6	2.4	40-45	3.16
50	71.8	59.8	2.2	45-50	2.59
55	67.5	61.9	2.1	50-55	2.23
60	63.9	63.9	2.0	55-60	1.97

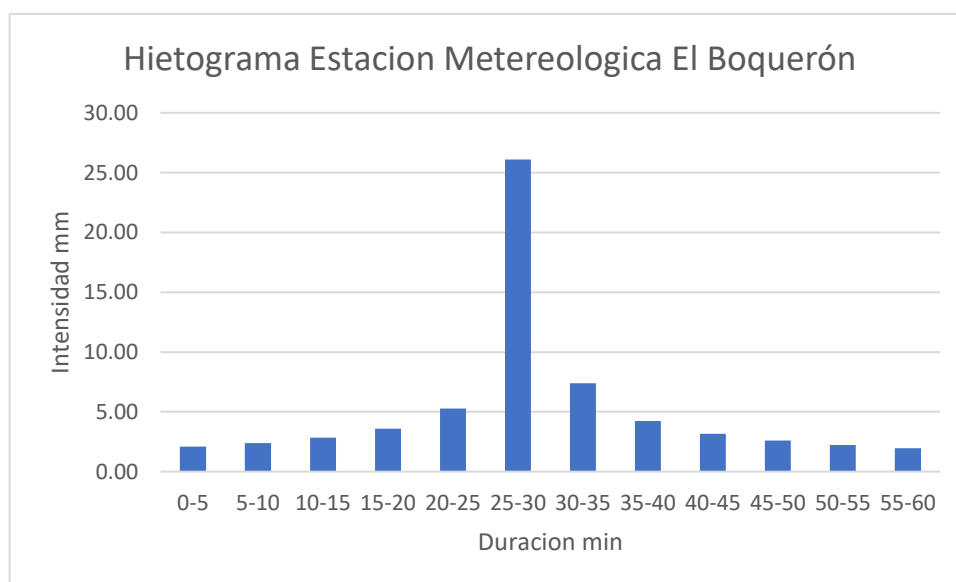
*Nota: Elaboración propia.*

En la **Tabla 20**, en la primera columna se observa las duraciones de la precipitación, en la segunda columna la intensidad calculada con la ecuación de Aparicio Mijares en función de cada duración y el periodo de retorno escogido. En la tercera columna se obtiene la profundidad acumulada en mm, en la cuarta columna se determina la precipitación incremental restando el

valor acumulado actual con el anterior. Finalmente se coloca el mayor valor en el centro del hietograma, luego se coloca el segundo mayor valor al bloque anterior, el tercero mayor al bloque posterior, y así sucesivamente alternando después y antes del centro.

#### Figura 44

##### *Hietograma Estación Meteorológica El Boquerón*



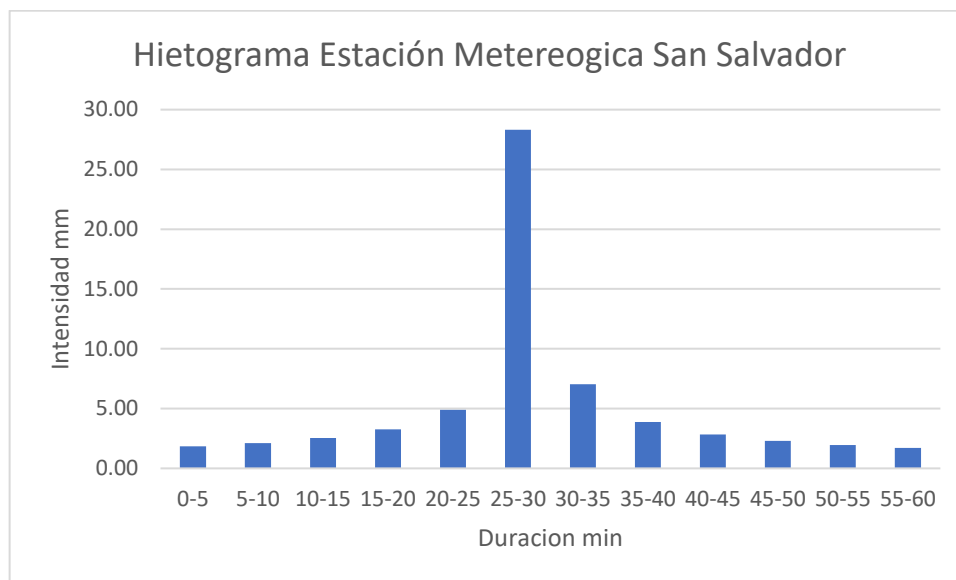
*Nota: Se muestra una representación gráfica de la duración en minutos versus la intensidad en mm. Elaboración propia.*

**Tabla 21***Estación Meteorológica San Salvador*

DURACION (MIN)	INTENSIDAD (MM/HORA)	PROFUNDIDAD ACUMULADA MM	PROFUNDIDAD INCREMENTAL MM	TIEMPO MIN	PRECIPITACION MM
5	339.7	28.3	28.3	0-5	1.83
10	212.0	35.3	7.0	5-10	2.12
15	160.9	40.2	4.9	10-15	2.54
20	132.3	44.1	3.9	15-20	3.27
25	113.7	47.4	3.3	20-25	4.90
30	100.5	50.2	2.8	25-30	28.31
35	90.5	52.8	2.5	30-35	7.03
40	82.6	55.1	2.3	35-40	3.88
45	76.2	57.2	2.1	40-45	2.85
50	71.0	59.1	2.0	45-50	2.30
55	66.5	61.0	1.8	50-55	1.96
60	62.7	62.7	1.7	55-60	1.72

*Nota: Elaboración propia.*

En la **Tabla 21**, se observan las distintas intensidades de lluvia obtenidas mediante cálculos desde datos de lluvia proporcionados por MARN, para los cuales la duración está expresada en minutos.

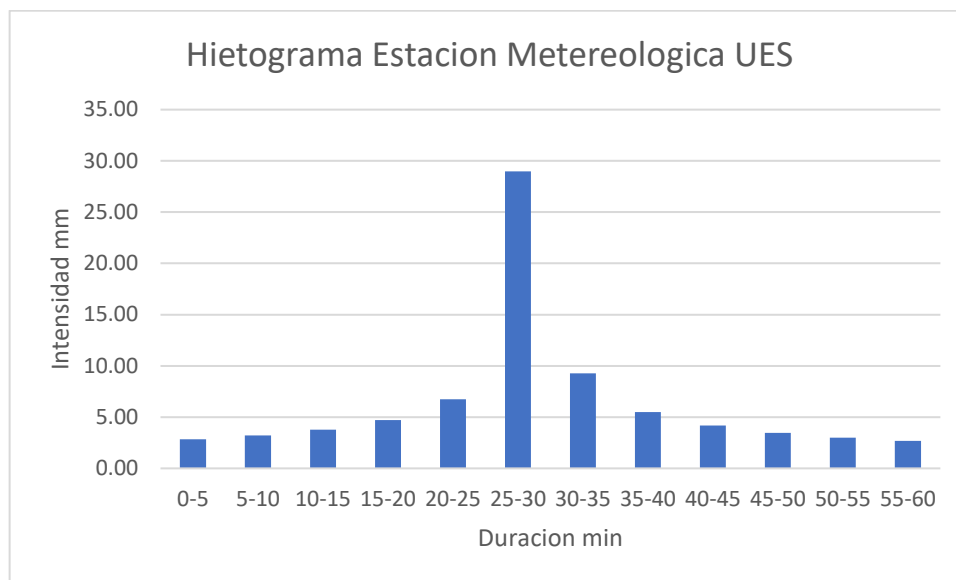
**Figura 45***Estación Meteorológica San Salvador*

*Nota: Se muestra una representación gráfica de la duración en minutos versus la intensidad en mm. Elaboración propia.*

**Tabla 22***Estación Meteorológica UES*

DURACION (MIN)	INTENSIDAD (MM/HORA)	PROFUNDIDAD ACUMULADA MM	PROFUNDIDAD INCREMENTAL MM	TIEMPO MIN	PRECITIPITACION MM
5	347.9	29.0	29.0	0-5	2.83
10	229.5	38.3	9.3	5-10	3.21
15	179.9	45.0	6.7	10-15	3.78
20	151.4	50.5	5.5	15-20	4.71
25	132.4	55.2	4.7	20-25	6.74
30	118.7	59.4	4.2	25-30	28.99
35	108.2	63.1	3.8	30-35	9.26
40	99.9	66.6	3.5	35-40	5.49
45	93.1	69.8	3.2	40-45	4.17
50	87.4	72.8	3.0	45-50	3.46
55	82.5	75.6	2.8	50-55	3.01
60	78.3	78.3	2.7	55-60	2.68

*Nota: Elaboración propia.*

**Figura 46***Hietograma Estación Meteorológica UES*

*Nota: Se muestra una representación gráfica de la duración en minutos versus la intensidad en mm. Elaboración propia.*

**3.5.3. Hietograma de la microcuencia**

Para el cálculo del hietograma de la microcuencia se debe aplicar el método de Thiessen con el objetivo de obtener una intensidad ponderada para cada duración de las estaciones meteorológicas en función del área de influencia que tienen en la microcuencia.

**Tabla 23***Cálculo de Intensidad Ponderada para Estaciones Meteorológicas*

Duración 5 min	Área (HA)	Intensidad (mm/min)	Áreas*Intensidad	Intensidad ponderada mm/min	Intensidad ponderada mm/h
BOQUERON	609.48	2.09	1272.32		
SAN SALVADOR	775.13	1.83	1419.82		
UES	613.21	2.83	1735.18		
Total	1997.82		4427.32	2.22	132.96

Duración 10 min	Área (HA)	Intensidad (mm/min)	Áreas*Intensidad	Intensidad ponderada mm/min	Intensidad ponderada mm/h
BOQUERON	609.48	2.39	1456.87		
SAN SALVADOR	775.13	2.12	1639.59		
UES	613.21	3.21	1970.11		
Total	1997.82		5066.56	2.54	152.16
Duración 15 min	Área (HA)	Intensidad (mm/min)	Áreas*Intensidad	Intensidad ponderada mm/min	Intensidad ponderada mm/h
BOQUERON	609.48	2.84	1730.50		
SAN SALVADOR	775.13	2.54	1968.63		
UES	613.21	3.78	2315.07		
Total	1997.82		6014.19	3.01	180.62
Duración 20 min	Área (HA)	Intensidad (mm/min)	Áreas*Intensidad	Intensidad ponderada mm/min	Intensidad ponderada mm/h
BOQUERON	609.48	3.60	2192.15		
SAN SALVADOR	775.13	3.27	2531.02		
UES	613.21	4.71	2889.58		
Total	1997.82		7612.75	3.81	228.63
Duración 25 min	Área (HA)	Intensidad (mm/min)	Áreas*Intensidad	Intensidad ponderada mm/min	Intensidad ponderada mm/h
BOQUERON	609.48	5.27	3209.15		
SAN SALVADOR	775.13	4.90	3795.04		
UES	613.21	6.74	4130.09		
Total	1997.82		11134.29	5.57	334.39
Duración 30 min	Área (HA)	Intensidad (mm/min)	Áreas*Intensidad	Intensidad ponderada mm/min	Intensidad ponderada mm/h
BOQUERON	609.48	26.10	15910.43		
SAN SALVADOR	775.13	28.31	21943.42		
UES	613.21	28.99	17776.25		
Total	1997.82		55630.10	27.85	1670.72

Duración 35 min	Área (HA)	Intensidad (mm/min)	Áreas*Intensidad	Intensidad ponderada mm/min	Intensidad ponderada mm/h
BOQUERON	609.48	7.40	4509.43		
SAN SALVADOR	775.13	7.03	5449.22		
UES	613.21	9.26	5679.65		
Total	1997.82		15638.30	7.83	469.66
Duración 40 min	Área (HA)	Intensidad (mm/min)	Áreas*Intensidad	Intensidad ponderada mm/min	Intensidad ponderada mm/h
BOQUERON	609.48	4.23	2578.36		
SAN SALVADOR	775.13	3.88	3007.39		
UES	613.21	5.49	3364.25		
Total	1997.82		8950.00	4.48	268.79
Duración 45 min	Área (HA)	Intensidad (mm/min)	Áreas*Intensidad	Intensidad ponderada mm/min	Intensidad ponderada mm/h
BOQUERON	609.48	3.16	1926.56		
SAN SALVADOR	775.13	2.85	2206.45		
UES	613.21	4.17	2560.11		
Total	1997.82		6693.11	3.35	201.01
Duración 50 min	Área (HA)	Intensidad (mm/min)	Áreas*Intensidad	Intensidad ponderada mm/min	Intensidad ponderada mm/h
BOQUERON	609.48	2.59	1578.64		
SAN SALVADOR	775.13	2.30	1785.59		
UES	613.21	3.46	2124.09		
Total	1997.82		5488.32	2.75	164.83
Duración 55 min	Área (HA)	Intensidad (mm/min)	Áreas*Intensidad	Intensidad ponderada mm/min	Intensidad ponderada mm/h
BOQUERON	609.48	2.23	1356.60		
SAN SALVADOR	775.13	1.96	1519.96		
UES	613.21	3.01	1842.72		
Total	1997.82		4719.28	2.36	141.73

Duración 60 min	Área (HA)	Intensidad (mm/min)	Áreas*Intensidad	Intensidad ponderada mm/min	Intensidad ponderada mm/h
BOQUERON	609.48	1.97	1200.28		
SAN SALVADOR	775.13	1.72	1334.55		
UES	613.21	2.68	1642.91		
Total	1997.82		4177.74	2.09	125.47

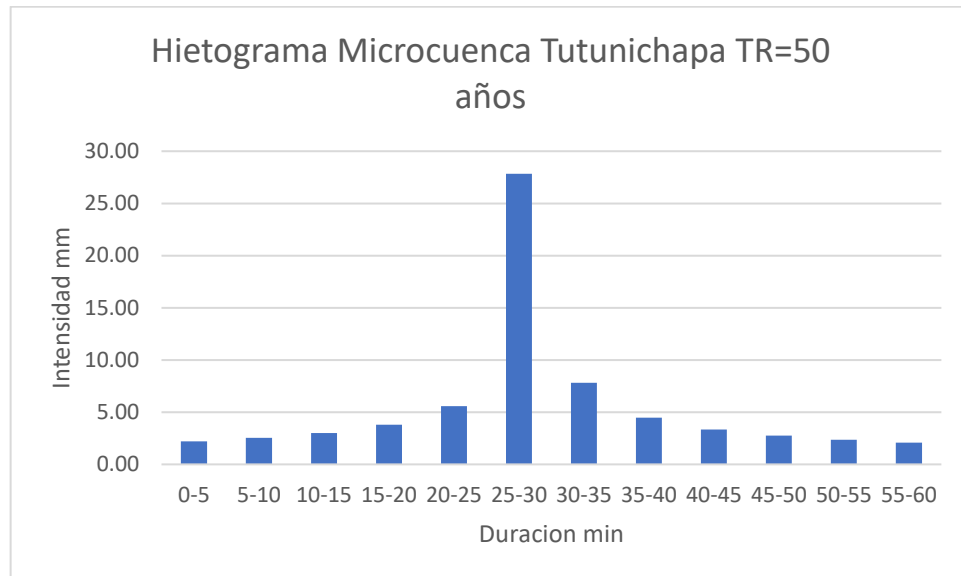
*Nota: Elaboración propia.*

**Tabla 24**

*Tiempo y Precipitación para Hietograma*

TIEMPO MIN	PRECIPITACION mm
0-5	2.22
5-10	2.54
10-15	3.01
15-20	3.81
20-25	5.57
25-30	27.85
30-35	7.83
35-40	4.48
40-45	3.35
45-50	2.75
50-55	2.36
55-60	2.09

*Nota: Elaboración propia.*

**Figura 47***Hietograma Microcuenca Tutunichapa*

*Nota: Se muestra una representación gráfica de la duración en minutos versus la intensidad en mm. Elaboración propia.*

#### **3.5.4. Cálculo de caudal instantáneo máximo a través de modelación hidrológica para el año 2024**

Para calcular el caudal instantáneo máximo se usó el programa HEC-HMS, en el cual es necesario configurar cuatro parámetros: Modelo de la microcuenca, modelos meteorológicos, control de especificaciones y el conjunto de datos de las series de tiempo. En el modelo de la microcuenca se define la geometría, configurando el punto de descarga y el área de la microcuenca, de igual forma el método de pérdidas que para este caso se consideró el método de curva número.

Como método de transformación se seleccionó el hidrograma unitario y no se consideró un flujo base, ya que, en tormentas de corta duración, la respuesta del flujo base no alcanza a notarse durante el evento, en la microcuenca la escorrentía escurre rápidamente y el flujo base no influye en

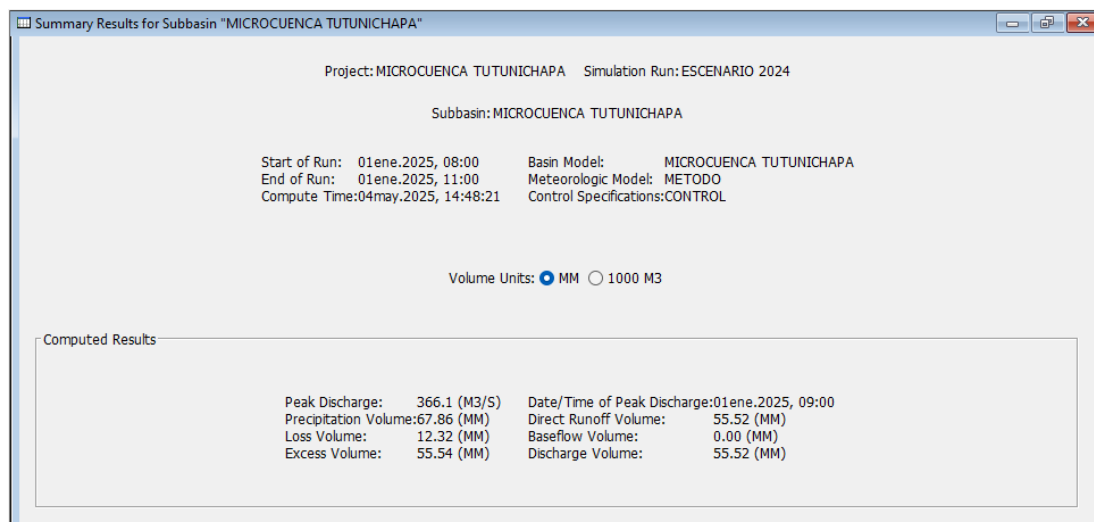
el resultado. De igual forma al no contar con la tasa de evapotranspiración y al tener una simulación con una duración corta no se consideró para este análisis.

En el modelo meteorológico se configuro el hietograma de la lluvia de diseño. En el control de especificaciones se consideró que el evento inicia a las 8:00 am y termina a 11:00 am, con una duración total de 3 horas, superior al tiempo de concentración de la microcuenca 0.79 horas, ya de esta manera se observa cuando el grafico del hidrograma empieza a decrecer.

Finalmente, en el conjunto de datos de las series de tiempo se importa el hietograma y se configura el inicio y fin de la tormenta, que para este caso es de una hora con intervalos de 5 minutos.

### Figura 48

#### *Pantallazo de Salida Programa HEC HMS, Modelación Hidrológica*



*Nota: Elaboración propia mediante modelación en software HEC HMS.*

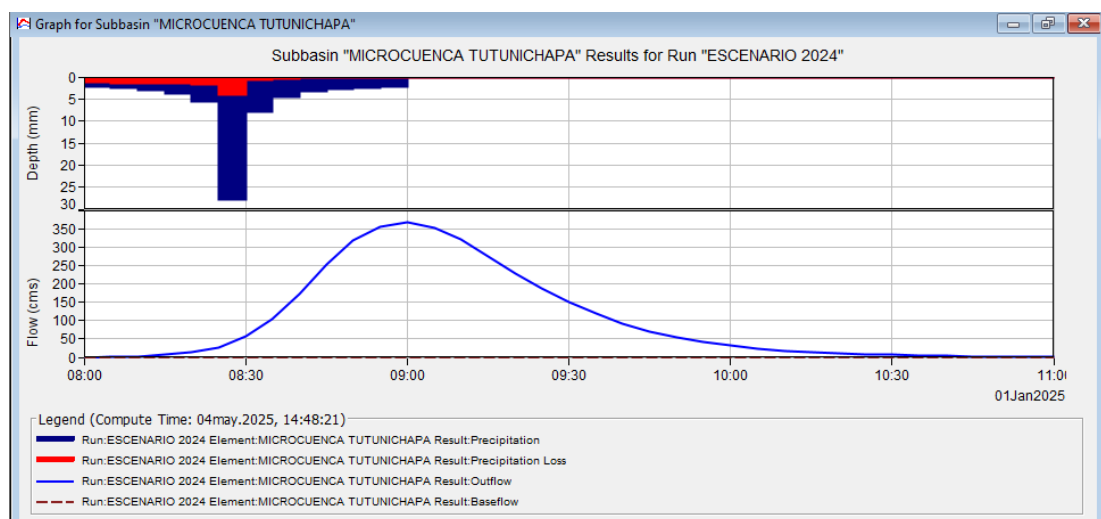
A partir de un evento de lluvia simulado (Ver **Figura 49**) y utilizando el método de transformación de escorrentía del SCS se estimó un caudal máximo de 366.1 m<sup>3</sup>/s que ocurrió a las 09:00 h del 1 de enero de 2025, una

hora después del inicio del evento. La lluvia total registrada sobre la microcuenca fue de 67.86 mm, con un volumen de pérdidas de 12.32 mm, al ser un valor relativamente bajo coincide con el alto porcentaje de urbanización de la microcuenca, por lo que se tiene que el agua que se transforma en escorrentía es de 55.54 mm, que coincide con el volumen de escorrentía directa.

Con más del 81.8% de la lluvia convertida en escorrentía, la cuenca presenta una respuesta muy rápida al escurrimiento debido a su alto grado de impermeabilización de suelos. El 18.2% del agua se pierde por infiltración, lo que indica un terreno con poca capacidad de absorción congruente con el área urbanizada de la microcuenca. El pico ocurre solo una hora después del inicio del evento, lo que evidencia un tiempo de concentración corto, típico de una microcuenca urbana.

**Figura 49**

*Hidrograma De La Microcuenca Tutunichapa*



*Nota: Elaboración propia mediante modelación en software HEC HMS.*

La escorrentía comienza pocos minutos después del inicio del evento, cuando el suelo ya no puede infiltrar más agua, el caudal máximo se alcanza

a las 9:00 am con un valor de 366.1 m<sup>3</sup>/s. El ascenso rápido de la curva indica que la microcuenca cuenta con una respuesta rápida, esto es coherente ya que el 77% de esta se encuentra urbanizada. Cerca de las 10:30 am el caudal se disipa, llegando a valores cercanos a cero, ya que no se ha considerado un caudal base.

### **3.6. Demanda de Agua Potable y Producción de Aguas Residuales, para la Microcuenca Tutunichapa**

#### ***3.6.1. Consumo habitacional de agua potable***

El análisis de la demanda de agua potable y la generación de aguas residuales en la microcuenca Tutunichapa es fundamental para comprender el impacto que ejerce la urbanización sobre los recursos hídricos. Este cálculo permite estimar el volumen de agua que se importa desde los diferentes sistemas de abastecimiento de ANDA para suplir las necesidades de la población residente, así como la cantidad de agua que, tras su uso, se convierte en aguas residuales.

Esta relación es clave dentro del estudio, debido a que estos volúmenes tienen un impacto directo en el ciclo hidrológico, ya que, si existe una alta demanda de recurso hídrico que no puede ser cubierta por fuentes de agua dentro de su territorio, significa que se debe de abastecer de fuentes externas a la microcuenca. Por lo tanto, esto representa una evidencia de la afectación que sufre el ciclo hidrológico debido a la modificación en el uso de suelos, especialmente en la urbanización. Al estimar estos volúmenes, se tiene un insumo para el diseño de estrategias de mitigación más acertadas como también estrategias de sostenibilidad en consumo, para así determinar qué tanto del volumen consumido debería estar aportando en infiltración la cuenca, para no presentar mayores afectaciones al ciclo hidrológico, y por

consiguiente contribuyendo así a reducir el impacto hidrológico en el área de estudio y sus alrededores.

El cálculo del consumo de agua se realizará con base en lo establecido en la norma técnica de ANDA, la cual proporciona instrucciones específicas para determinar la cantidad de agua requerida en diversas situaciones. Este enfoque garantiza que las estimaciones sean lo más cercano a la realidad y cumplan con los estándares establecidos para la gestión y el suministro eficaces de recursos hídricos.

Para ello se tomarán los consumos específicos, se pueden observar los diferentes consumos asociados al tipo de uso del inmueble:

**Figura 50***Consumos Específicos de Agua*

Dotación total urbana $\geq$	220	l/p/d
Locales comerciales	20	l/m <sup>2</sup> /d
Hoteles	500	l/hab/d
Pensiones	350	l/hab/d
Restaurantes	50	l/m <sup>2</sup> /d
Escuelas		
• Externos	40	l/alumno/d
• Internados	200	l/p/d
• Personas no residentes	50	l/p/d
Hospitales	600	l/cama/d
Clínicas		
• Médicas	500	l/consultorio/d
• Dentales	1000	l/consultorio/d
Vivienda		
• Mínima	80 - 125	l/p/d
• Media	125 - 175	l/p/d
• Alta	175 - 350	l/p/d
Otros		
• Mercados, puestos	15	l/m <sup>2</sup> /d
• Cines, teatros	3	l/asiento/d
• Oficinas	6	l/m <sup>2</sup> /d
• Bodegas	20	l/m <sup>2</sup> /d

*Nota: (ANDA, 2014)*

Para el cálculo de la demanda de agua potable en la microcuenca se ha considerado solamente el consumo estimado de la población que habita dentro del área de estudio. Para ello se tomó un consumo de 200 l/p/d considerando un promedio de consumo para cada individuo en la microcuenca.

Para el cálculo de la población se tomó una densidad poblacional de 2,655 hab/km (PMMU, 2021) <sup>2</sup>, considerando solamente el área urbanizada de la microcuenca la cual se ha tomado como un porcentaje del área total, este corresponde a un 77% como se presentó en el capítulo 1, partiendo del

porcentaje urbanizado y el área total de la microcuenca, se tiene un área urbanizada de 15.98 km<sup>2</sup>, por lo que la población es posible estimarla de la siguiente manera:

$$\text{Población de microcuenca} = (\text{Densidad poblacional})(\text{Área urbanizada})$$

$$\text{Población de cuenca} = (2,655 \text{ hab/km}^2)(15.98 \text{ km}^2)$$

$$\text{Población de cuenca} = 42,426.9 \text{ hab}$$

Se aproxima a 42,500 habitantes

Para el cálculo de la demanda media diaria de agua que consume la población se adicionará un 20% por fugas y desperdicios, tal como se explica en la Norma Técnica de ANDA. Por lo tanto:

$$\text{Consumo de agua potable} = \frac{\text{Demanda} * \text{Poblacion} * 1.2}{86400 \text{ s}}$$

$$\text{Consumo de agua potable} = \frac{(200 \text{ l/p/d})(42,500 \text{ p})(1.2)}{86400 \text{ s}}$$

$$\text{Consumo de agua potable} = 118.05 \text{ l/s}$$

$$\text{Consumo de agua potable anual} = 3,722,824.8 \text{ m}^3$$

Este valor de 118.05 litros por segundo representa el caudal medio que debe ser suministrado de forma continua para satisfacer la demanda de agua potable de la población residente en la microcuenca. Al proyectar este caudal

a lo largo de un año, se estima un volumen total de aproximadamente 3,722,824.8 metros cúbicos. Este volumen corresponde solamente al agua extraída fuera de la microcuenca, ya que, es abastecida por los diferentes sistemas de distribución operados por ANDA y no proviene de fuentes internas a la microcuenca.

### **3.6.2. Producción habitacional de aguas residuales**

Para el cálculo del caudal medio de aguas residuales ( $Q_{mr}$ ) el aporte de aguas residuales se calcula como el consumo máximo horario de agua potable para el cual se usó el factor de  $K_2$  de 2.4, afectada por un coeficiente de retorno del 0.8; además, se considera que el sistema en su mayoría está conformado por tuberías de PVC por lo que se tomara una infiltración potencial ( $I_p$ ) de 0.1 l/s/ha y se tomara solamente el área urbanizada de la microcuenca que es 1598 ha.

$$Q_{mr} = Q_{mp} * K_2 * 0.8 + I_p * \text{Área de infiltración}$$

$$Q_{mr} = (118.05 \text{ l/s})(2.4)(0.8) + (0.1 \text{ l/s/ha})(1598 \text{ ha})$$

$$Q_{mr} = 386.46 \text{ l/s}$$

### **3.7. Interpretación del comportamiento hidrológico de la microcuenca Tutunichapa, en conjunto con la demanda de agua potable y la producción de aguas residuales.**

Con los cálculos anteriores se puede decir que la microcuenca, al estar mayormente urbanizada, presenta una limitada capacidad de infiltración, lo que reduce de gran manera que se recarguen los mantos acuíferos esto, por la alta impermeabilización del suelo debido a la expansión urbana que provoca

que la mayor parte del agua pluvial escurra rápidamente por la superficie de la microcuenca en lugar de filtrarse al subsuelo. Como resultado, el suministro de agua en la microcuenca depende de sistemas ubicados a las afueras de esta, como lo son la planta potabilizadora Torogoz de ANDA ubicada al norte del departamento de La Libertad y el sistema Zona Norte de ANDA ubicado en el distrito de Apopa y Nejapa, los cuales suministran el recurso hídrico necesario para la población. (LPD, 2024)

Por otro lado, existen, aunque no en un gran número descargas ilegales de aguas residuales dentro de la microcuenca, afectando la calidad del agua y representando riesgos para la salud pública y el medio ambiente. Según el "Plan Nacional de Recuperación de Ríos Urbanos (Caso Acelhuate)", se han identificado necesidades de infraestructura hidráulica para el tratamiento de aguas residuales en la región, pero hasta la fecha, no se han implementado soluciones efectivas. (DES, 2023)

Además, estudios han señalado que las aguas residuales de la zona metropolitana de San Salvador, que incluye la microcuenca Tutunichapa, son vertidas en los afluentes del área metropolitana, lo que genera un considerable impacto ambiental en dichos afluentes y en la población local que vive a las cercanías del cauce del río. (Fichtner, 2024)

El volumen estimado de 3,722,824.8 m<sup>3</sup> de agua potable consumida anualmente en la microcuenca implica también la generación de un volumen elevado de aguas residuales las cuales se deben transportar a plantas de tratamiento fuera de la microcuenca y en este proceso tienen a infiltrarse en el suelo debido a que las redes son muy antiguas y poseen pequeñas fugas. Este caudal de aguas residuales, sumado a la limitada capacidad de infiltración del suelo debido a la urbanización presente en la mayoría de la superficie de la microcuenca, agrava significativamente el impacto hidrológico en la zona. Por un lado, se pierde el potencial de recarga natural de los acuíferos, lo que afecta directamente el ciclo hidrológico y añade escases del

recurso hídrico a largo plazo y por otro contamina los suelos y eventualmente las aguas subterráneas con las infiltraciones de aguas residuales aun no tratadas. Esta situación evidencia la urgente necesidad de integrar estrategias de gestión hídrica más sostenibles que incluyan la implementación de sistemas de infiltración urbana que permitan la recarga de los mantos acuíferos para así mitigar el impacto generado por la urbanización presente dentro de la microcuenca.

Tomando de base la caracterización morfométrica e hidrológica, los resultados obtenidos mediante la modelación hidrológica en el software HEC-HMS reflejan coherencia con el comportamiento de la microcuenca. A pesar de que su forma alargada y el bajo factor de forma los cuales indican una menor susceptibilidad a inundaciones, el alto grado de urbanización presente en la microcuenca de 77 % y su baja capacidad de infiltración alteran este comportamiento teórico donde no está involucrado la intervención humana.

En los resultados del modelo se observó una cantidad significativa de la precipitación en escorrentía: de los 67.86 mm de lluvia, solo 12.32 mm fueron pérdidas por infiltración o retención, mientras que 55.54 mm o sea el 81.9 % generaron escorrentía directa, esto da como resultado un caudal pico elevado de 366.1 m<sup>3</sup>/s, valor que refuerza la respuesta rápida del sistema. Aunque el tiempo de concentración estimado fue de 0.79 horas, el cual en teoría es relativamente corto y coherente con la pendiente media del cauce 11.57 % y la de la pendiente media de la microcuenca en general 17.52 grados sexagesimales, los resultados indican que factores como el uso de suelos tienen un peso significativo en la cantidad y velocidad del escurrimiento directo y del caudal.

Por lo tanto, aunque las características morfométricas de la microcuenca apuntan a una respuesta más gradual, la urbanización en el 77 % de la microcuenca ha modificado este comportamiento, cambiando la tendencia de la microcuenca de ser menos susceptible a caudales altos y a

inundaciones, la impermeabilización del suelo ha reducido drásticamente la infiltración, alterando el ciclo hidrológico de la microcuenca y la regulación natural de esta, tendiendo a una descarga rápida de la escorrentía de lluvia, lo que incrementa no solo los picos de caudal, sino también el riesgo de inundaciones.

**CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE ESCENARIOS  
HIDROLÓGICOS PARA LA MICROCUENCA  
TUTUNICHAPA**

#### **4.1. Metodología para la elección de medidas de mitigación del impacto hidrológico en la microcuenca Tutunichapa.**

Para poder proponer medidas para la mitigación del impacto hidrológico en la microcuenca Tutunichapa, se ha realizado a partir de una división del área en tres zonas: Zona 1, zona 2 y zona 3, es importante aclarar que para la formulación de la propuesta de medidas de mitigación del impacto hidrológico se ha optado por utilizar únicamente la zonificación de uso de suelo correspondiente al año 2024, ya que las medidas propuestas están diseñadas para responder a la situación del año 2024 de la microcuenca Tutunichapa.

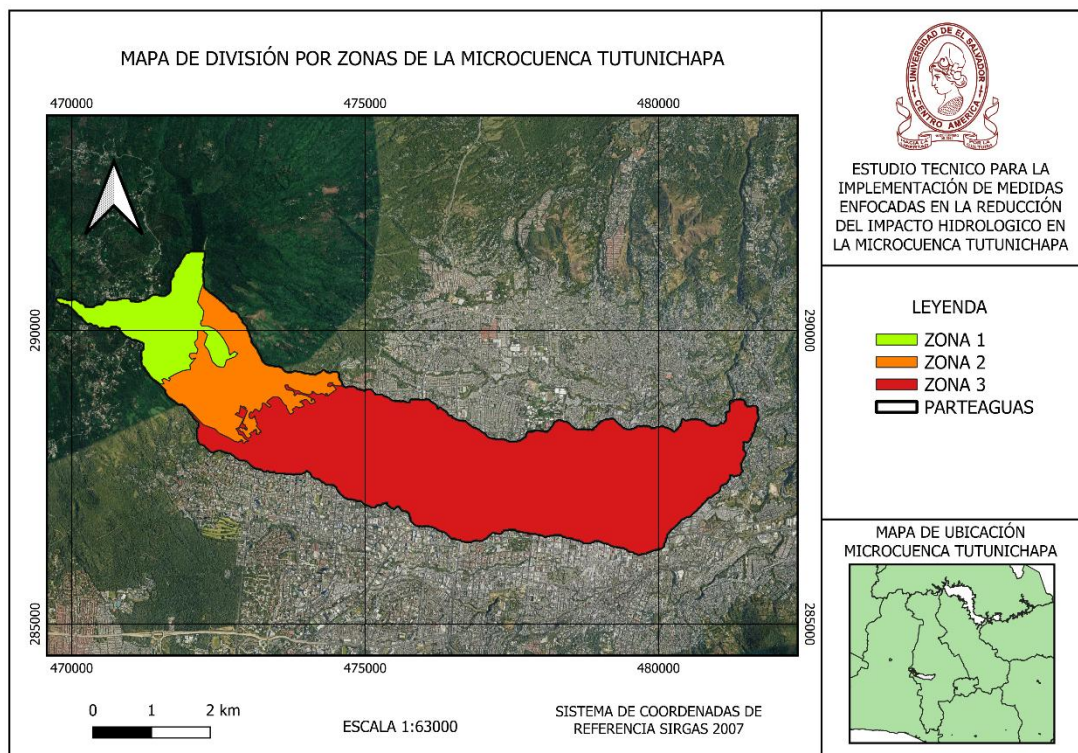
Esta clasificación toma un único criterio de zonificación, el cual es el uso de suelos, esta decisión responde al análisis desarrollado en el capítulo III, donde se comprobó que el uso de suelos es el factor de mayor peso en la generación de escorrentía e infiltración en la microcuenca Tutunichapa. Estructurar la zonificación únicamente en función del uso de suelos no solo simplifica el análisis, sino que permite centrar las medidas de mitigación en función del impacto que cada tipo de uso genera sobre el ciclo hidrológico de la microcuenca.

#### 4.1.1. División de la microcuenca Tutunichapa por zonas de estudio

En la **Figura 51** se presenta la zonificación de la microcuenca Tutunichapa en función de los criterios analizados a detalle en la **Tabla 25**.

**Figura 51**

*Mapa de División por Zonas de la Microcuenca Tutunichapa*



*Nota: Elaboración mediante el software Qgis, con base de mapa satelital de Google earth.*

**Tabla 25***Características por zona de la Microcuenca Tutunichapa*

<b>Criterio</b>	<b>Zona 1</b>	<b>Zona 2</b>	<b>Zona 3</b>
<b>Área (HA)</b>	231.21	286.8	1479.82
<b>% Área</b>	12%	14%	74%
<b>Elevación media (m)</b>	1521.95	1135.52	723.26
<b>Pendiente media (%)</b>	40%	44.48%	8.84%
<b>Uso de suelo</b>	Café Urbanización	Café Pastos naturales	Urbanización
<b>% Café</b>	73%	31%	-
<b>% Pastos naturales</b>	-	69%	-
<b>% Urbanización</b>	17%	-	100%
<b>Importancia hidrológica</b>	Recarga hídrica y origen de microcuenca	Transición del caudal entre zona 1 y zona 2 con la zona 3.	Control de escorrentía urbana

*Nota: Elaboración propia.*

La **Tabla 25** muestra la zonificación de la microcuenca, diferenciando sus características topográficas y de uso del suelo. La zona 1 representa el 11% del área total, con pendientes promedio cercanas al 40% y una elevación medida de 1521.95 msnm, en esta zona predomina el cultivo de café con un 73% de cobertura, mientras que el 17% corresponde a áreas urbanizadas. La zona 2 abarca el 12% del territorio, con una pendiente media del 44.48% y elevación media de 1135.52 msnm, esta zona, de transición hidrológica, presenta un 31% de cobertura de café y un 69% de pastos naturales. Por último, la zona 3 cubre el 74% del área de la microcuenca, se encuentra

totalmente urbanizada y tiene pendientes suaves, con una elevación media de 723.26 msnm. Esta clasificación territorial, basada en el uso de suelo, resalta la importancia de aplicar estrategias diferenciadas de manejo hidrológico, priorizando intervenciones en las zonas con mayor grado de impermeabilización y riesgo de escorrentía superficial.

#### ***4.1.2. Evolución del comportamiento hidrológico de la microcuenca Tutunichapa y proyección futura***

El análisis de la evolución hidrológica que ha tenido la microcuenca Tutunichapa se plantea a través de tres escenarios ubicados en diferentes puntos del tiempo, los cuales evidencian los cambios que ha sufrido la microcuenca hasta la actualidad y los que se pueden generar a futuro si continúa el crecimiento de la huella urbana.

Estos escenarios se analizarán para poder proponer obras hidráulicas que reduzcan el impacto hidrológico en la microcuenca Tutunichapa, para ello en cada escenario se obtendrá el caudal, escorrentía e infiltración. El primer escenario para analizar corresponde al año 1995, ya que un cambio significativo en la mancha urbana del AMSS se da entre los años 1995 y 2002, cuando se experimenta un crecimiento urbano acelerado, alcanzando la totalidad de los municipios del AMSS que existían en el 2002, 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.

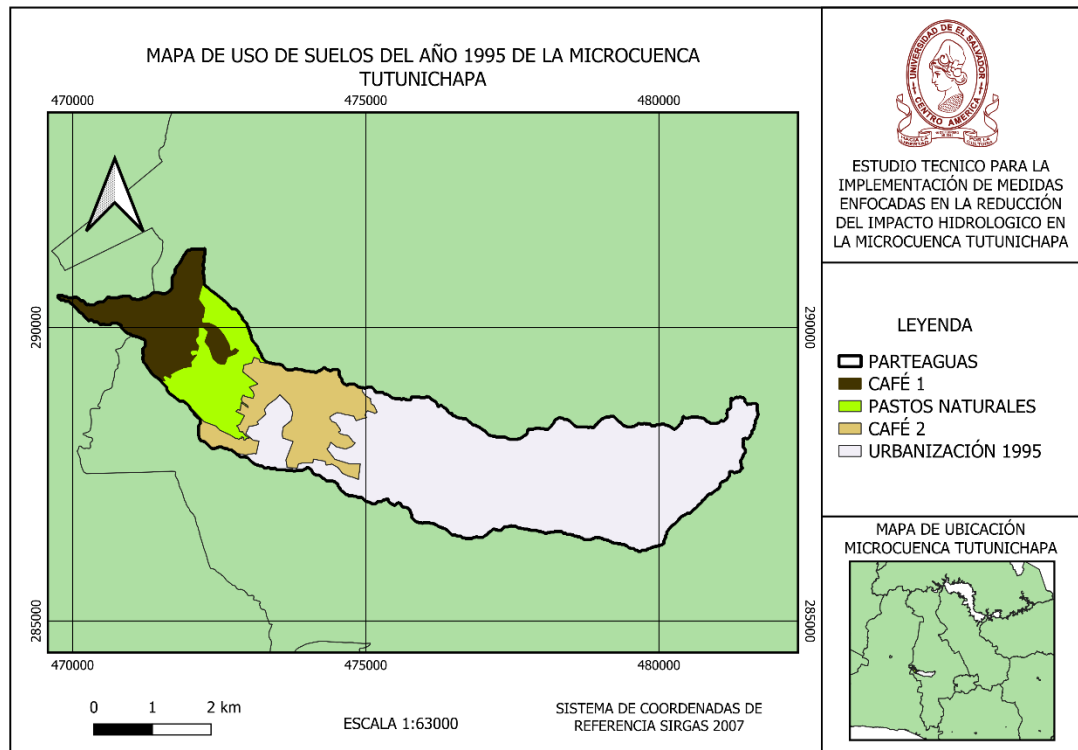
El segundo escenario corresponde al año 2024 presentado en el capítulo anterior y el tercero es una proyección futura considerando el máximo crecimiento horizontal posible dentro de la microcuenca. De estos tres escenarios se analizan los datos de caudal de escorrentía, infiltración, consumo de agua potable y producción de aguas residuales correspondientes

a cada año de estudio, con esto se busca analizar de qué manera el incremento de áreas urbanizadas aumenta el impacto hidrológico, tomando como punto de partida las condiciones correspondientes al año 1995. Este análisis permitirá generar información importante que puede considerarse al momento de realizar diseños de obras hidráulicas que sean más adecuadas y eficiente, considerando el comportamiento hidrológico que ha tenido la microcuenca en el pasado, la situación actual y el que podría tener si se continua con el crecimiento urbano, considerando escenarios más cercanos a la realidad de la microcuenca Tutunichapa.

#### ***4.1.2.1. Escenario hidrológico para el año 1995***

Al igual que en los cálculos para el año 2024 presentado en el capítulo anterior, el análisis se realiza a través del método de modelación hidrológica utilizando el software HEC-HMS y utilizando para el volumen de escorrentía la metodología de curva número de SCS.

El primer paso es conocer el uso de suelos de la microcuenca, por ello el mapa de uso de suelos a utilizar será el proporcionado por el CENTA en la **Figura 52**, ya que históricamente y tomando en cuenta las fotos satelitales de Google Earth el uso de suelos que presenta mayor cambio es la urbanización, es por ello que, para obtener un resultado más preciso el % de área urbanizada para ese año fue proporcionado por la OPAMSS. El siguiente paso es identificar el tipo de práctica agrícola en la microcuenca, para este caso el cultivo de café en la zona 1 se practica en hilera siguiendo las curvas de nivel del terreno, y en la zona 2 debido a su topografía se consideró en hileras siguiendo las curvas de nivel del terreno, formando terrazas. Los pastos naturales se consideraron como pastizales que crecen siguiendo las curvas de nivel de la topografía. La urbanización se consideró como residencial con zonas de impermeabilización del 65% en base al mapa de impermeabilización del área metropolitana que se encuentra en el sitio web de la OPAMSS.

**Figura 52***Mapa de Uso de Suelos Urbanización de 1995.*

*Nota: Adaptado de mapa de uso de suelos del CENTA del año 2024 y urbanización del año 1995 de la OPAMSS, elaborado mediante software Qgis.*

El tercer paso es conocer las condiciones hidrológicas, este parámetro indica los efectos del tipo de cubierta y de su tratamiento sobre la infiltración y la escorrentía. Generalmente es estimada a través de la densidad de la planta que cubre el suelo o de los residuos acumulados sobre él, y se clasifica en buena, regular y malas siendo una condición hidrológica pobre o mala, cuando existan sobre el suelo factores que reducen las tasas de infiltración y aumenten la escorrentía, y por el contrario una condición hidrológica buena se observa cuando sobre el suelo existen factores que tienden a mejorar la infiltración del agua y disminuir la escorrentía. Al tener una cobertura densa y

un bajo potencial de escorrentía los pastos naturales y el cultivo de café se clasificaron con una condición hidrológica buena.

El cuarto paso es conocer las características hidrológicas del suelo, para este caso tal como se presentó en el capítulo 3, la textura presente en el 100% de la microcuenca tiene textura franco arenosa. Al tener este tipo de textura en toda la microcuenca y tomando de base el manual de referencia técnica del HEC-HMS, se determinó que la microcuenca cae en el grupo B, suelos con moderada capacidad de infiltración cuando están saturados.

Como quinto paso es calcular un número de curva ponderado, ya que hay distinto tipo de vegetación en la microcuenca. En la **Tabla 26** se presentan los resultados obtenidos

**Tabla 26**

*Cálculo de Curva Número Promedio para el año 1995*

VEGETACION	AREA HA	NUMERO CURVA HUMEDAD ANTECEDENTE II	NUMERO CURVA HUMEDAD ANTECEDENTE III	NC x AREA	NC PROMEDIO
PASTOS NATURALES	198.6	61	78	15540.20	89.73
CULTIVO DE CAFÉ	231.4	75	87	20210.89	
CULTIVO DE CAFÉ	263.0	71	85	22333.80	
URBANIZACION	1304.9	85	93	121191.43	
	1997.9			179276.31	

*Nota: Creación propia mediante programa Excel*

En la **Tabla 26** se presenta en la columna 1 el número de identificación por zona, en la columna 2 el tipo de vegetación por zona de la microcuenca, en la columna 3 el área respectiva por cada zona, en la cuarta columna se obtiene un número de curva por defecto con humedad antecedente II, pero ya que se trata de un estudio hidrológico de la microcuenca es necesario convertirlo a humedad antecedente III con la fórmula propuesta por la OPAMSS, esto se presenta en la columna 5, en la sexta columna se multiplica el área del número de curva con humedad antecedente III y finalmente se divide la sumatoria de esta columna entre el área total para obtener un número de curva ponderado para toda la microcuenca el cual se presenta en la columna 7.

#### ***Cálculo de caudal instantáneo máximo y volumen en la microcuenca Tutunichapa para el año 1995***

Para calcular el caudal instantáneo máximo se usó el programa HEC-HMS, en el cual es necesario configurar cuatro parámetros: Modelo de la microcuenca, modelos meteorológicos, control de especificaciones y el conjunto de datos de las series de tiempo.

En el modelo de la microcuenca se define la geometría, configurando el punto de descarga y el área de la microcuenca, de igual forma el método de pérdidas que para este caso se consideró el método de curva número.

Como método de transformación se seleccionó el hidrograma unitario y no se consideró un flujo base, ya que, en tormentas de corta duración, la respuesta del flujo base no alcanza a notarse durante el evento, en la microcuenca la escorrentía escurre rápidamente y el flujo base no influye en el resultado.

En el modelo meteorológico se configuro el hietograma de la lluvia de diseño. En el control de especificaciones se consideró que el evento inicia a

las 8:00 am y termina a 11:00 am, con una duración total de 3 horas, superior al tiempo de concentración de la microcuenca 0.79 horas, ya de esta manera se observa cuando el grafico del hidrograma empieza a decrecer.

Finalmente, en el conjunto de datos de las series de tiempo se importa el hietograma y se configura el inicio y fin de la tormenta, que para este caso es de una hora con intervalos de 5 minutos.

### Figura 53

#### *Simulación Hidrológica de la Microcuenca Tutunichapa, año 1995*



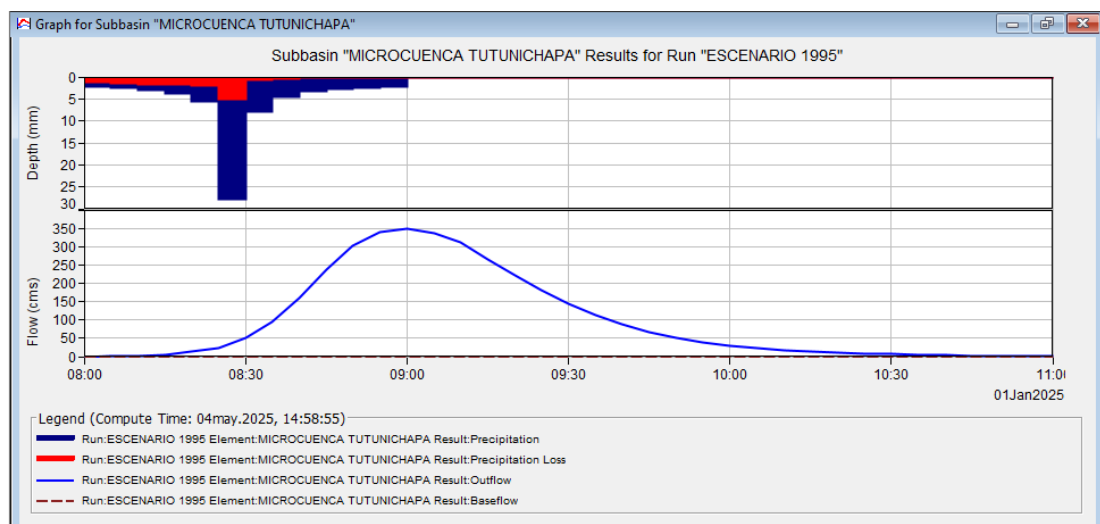
*Nota: Creación propia mediante programa HEC HMS*

En la **Figura 54** a partir de un evento de lluvia simulado, y utilizando el método de transformación de escorrentía del SCS se estimó un caudal máximo de 350.2 m<sup>3</sup>/s que ocurrió a las 09:00 h, una hora después del inicio del evento. La lluvia total registrada sobre la microcuenca fue de 67.86 mm, con un volumen de pérdidas de 14.85 mm, un valor moderado si se compara con el escenario 2024, lo cual se explica por una menor impermeabilización del terreno en ese año. Como resultado, el agua transformada en escorrentía fue de 53.01 mm, y el volumen de escorrentía directa alcanzó los 52.98 mm, equivalente a 1,058,776.62 m<sup>3</sup>.

Con aproximadamente el 78.1% de la lluvia convertida en escorrentía, este escenario presenta un comportamiento menos crítico que el observado en 2024, en el cual se generó mayor escorrentía superficial. Aun así, la cuenca muestra una respuesta rápida al escurrimiento, reflejo de un entorno urbano con significativa ocupación del suelo. El 21.9% del agua se pierde por infiltración, evidenciando una mayor capacidad de absorción en comparación con 2024. El pico ocurre solo una hora después del inicio del evento, lo que confirma un tiempo de concentración corto, característico de una microcuenca urbana.

### Figura 54

*Hidrograma de la Microcuenca Tutunichapa Correspondiente al Año 1995*



*Nota: Creación propia mediante programa HEC HMS*

Como se observa en la **Figura 54** la escorrentía comienza pocos minutos después del inicio del evento, cuando el suelo ya no puede infiltrar más agua, el caudal máximo se alcanza a las 9:00 am con un valor de 350.2 m<sup>3</sup>/s. El ascenso rápido de la curva indica que la microcuenca cuenta con una respuesta rápida, esto es coherente ya que a pesar de estar menos urbanizada que en el 2024, aun el 65% de esta se encuentra urbanizada.

Cerca de las 10:30 am el caudal se disipa, llegando a valores cercanos a cero, ya que no se ha considerado un caudal base. Este hidrograma es el que se busca obtener luego de implementar las medidas en cada zona de la microcuenca.

***Demanda de agua potable y producción de aguas residuales para el año 1995***

Debido a la alta movilidad que se dio en la posguerra la densidad poblacional del año 1995 rondaba los 2,547 hab/km<sup>2</sup> (BID, 1998), además el área urbanizada de la microcuenca era menor a la actual llegando a 13.05 km<sup>2</sup>, por lo que es posible estimar la población de la siguiente manera:

$$\text{Población de microcuenca} = (\text{Densidad poblacional})(\text{Área urbanizada})$$

$$\text{Población de cuenca} = (2,547 \text{ hab/km}^2)(13.05 \text{ km}^2)$$

$$\text{Población de cuenca} = 33,238.35 \text{ hab}$$

Se aproxima a 33,239 habitantes

Para el cálculo de la demanda media diaria de agua que consume la población se adicionará un 20% por fugas y desperdicios, tal como se explica en la Norma Técnica de ANDA. Por lo tanto:

$$\text{Consumo de agua potable} = \frac{\text{Demanda} * \text{Poblacion} * 1.2}{86400 \text{ s}}$$

$$\text{Consumo de agua potable} = \frac{(200 \text{ l/p/d})(33,239 \text{ p})(1.2)}{86400 \text{ s}}$$

Consumo de agua potable = 92.33 l/s

Consumo de agua potable anual = 2,911,736.4 m<sup>3</sup>

Al comparar los datos del año 1995 con los cálculos actuales, se observa un incremento significativo en los últimos 30 años para el consumo anual de agua potable dentro de la microcuenca. En 1995, el volumen estimado fue de 2,911,736.4 m<sup>3</sup>, mientras que en año 2024 este alcanza los 3,722,824.8 m<sup>3</sup>, lo que representa un aumento aproximado del 27.9%. Este crecimiento puede atribuirse a factores como el crecimiento urbano que se dio en las últimas décadas, en especial en el área elevada de la microcuenca, lo que se traduce en la expansión de la mancha urbana y posiblemente un incremento en la cobertura de los servicios básicos.

### ***Producción habitacional de aguas residuales 1995***

Tal como se calculó en el capítulo 3, para conocer el caudal medio de aguas residuales (Q<sub>mr</sub>) el aporte de aguas residuales se calcula como el consumo máximo horario de agua potable para el cual se usó el factor de K<sub>2</sub> de 2.4, afectada por un coeficiente de retorno del 0.8; además, se considera que el sistema en su mayoría está conformado por tuberías de PVC por lo que se toma una infiltración potencial (I<sub>p</sub>) de 0.1 l/s/ha y se tomara como área urbanizada de la microcuenca 1305 ha.

$$Q_{mr} = Q_{mp} * K_2 * 0.8 + I_p * \text{Área de infiltracion}$$

$$Q_{mr} = (92.33 \text{ l/s})(2.4)(0.8) + (0.1 \text{ l/s/ha})(1305 \text{ ha})$$

$$Q_{mr} = 307.77 \text{ l/s}$$

En relación con el aumento del consumo de agua potable en las últimas décadas, también se ha registrado una mayor producción de aguas residuales en la microcuenca. El caudal medio de aguas residuales ( $Q_{mr}$ ) en 1995 se estimaba en 307.77 litros por segundo, mientras que los cálculos actuales indican un caudal de 386.46 litros por segundo, lo cual representa un incremento del 25.6%. Este aumento correspondió tanto al crecimiento de la población conectada a los sistemas de agua y saneamiento como a una mayor disponibilidad de sistemas de alcantarillado sanitario dentro del área urbana de la microcuenca, lo cual llevó a que los sistemas de aguas residuales que fueron bien diseñados en su momento no den abastos a las demandas actuales.

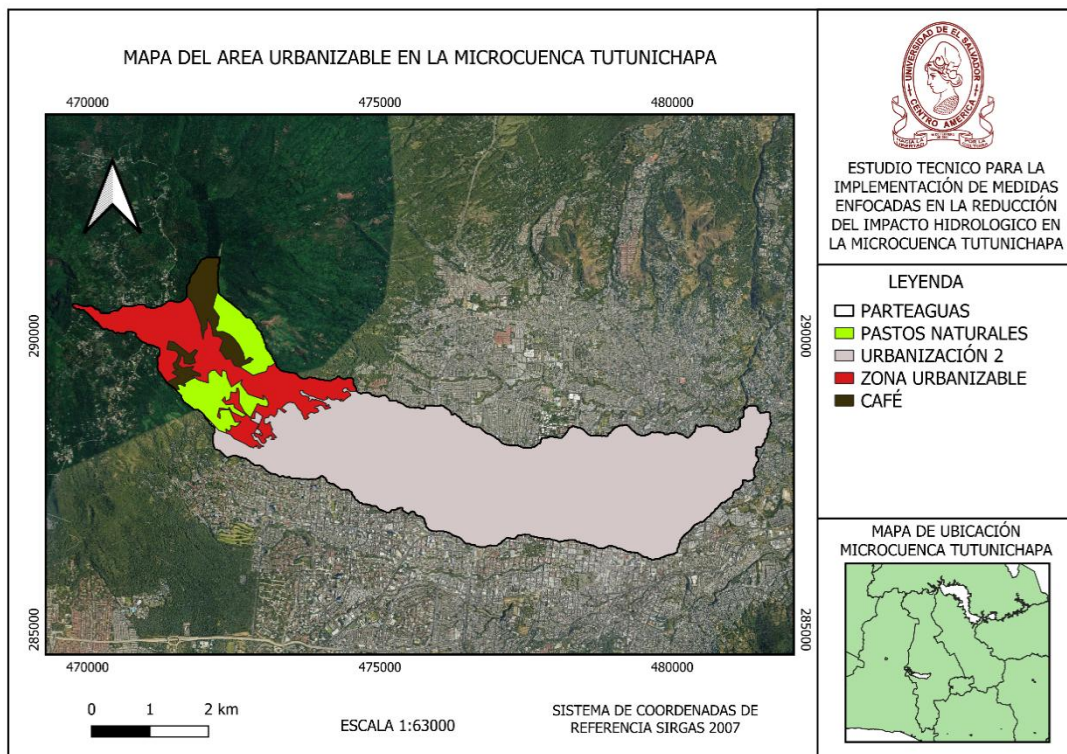
#### ***4.1.2.2. Escenario hidrológico para la condición crecimiento horizontal máximo.***

Para identificar las posibles áreas a ser urbanizadas para continuar con un crecimiento horizontal en la microcuenca Tutunichapa, se consideró el criterio de pendientes entre el 16% y 32%. Este valor se tomó como límite debido a la accesibilidad a la zona y el riesgo que existe en construir en pendientes más elevadas. Luego se analizó el mapa de pendientes sobre el mapa de uso de suelos de 2024, para identificar qué tipo de coberturas se verían afectadas por una posible urbanización. Las áreas para urbanizar poseen pastos naturales y cultivos de café, los cuales juegan un papel clave en la regulación hídrica de la microcuenca y en la recarga de acuíferos. Además, estas zonas reducen la escorrentía intensa y ayudan mitigar inundaciones en las zonas más bajas de la microcuenca.

Finalmente, en **Figura 55** se delimito la zona en color rojo que podrían ser objeto de expansión urbana si se siguiera creciendo horizontalmente.

**Figura 55**

*Mapa de Área Urbanizable de la Microcuenca Tutunichapa*



Nota: Mapa elaborado mediante software Qgis y adaptado de Google Earth del año 2024

**Tabla 27***Cálculo de Curva Número Promedio*

VEGETACION	AREA HA	NUMERO CURVA HUMEDAD ANTECEDENTE II	NUMERO CURVA HUMEDAD ANTECEDENTE III	NC x AREA	NC PROMEDIO
PASTOS NATURALES	135.5	61	78	10602.70	91.64
CULTIVO DE CAFÉ	86	75	87	7511.39	
ZONA URBANIZABLE	296.5	85	93	27537.17	
URBANIZACION	1479.82	85	93	137436.96	
	1997.82			183088.24	

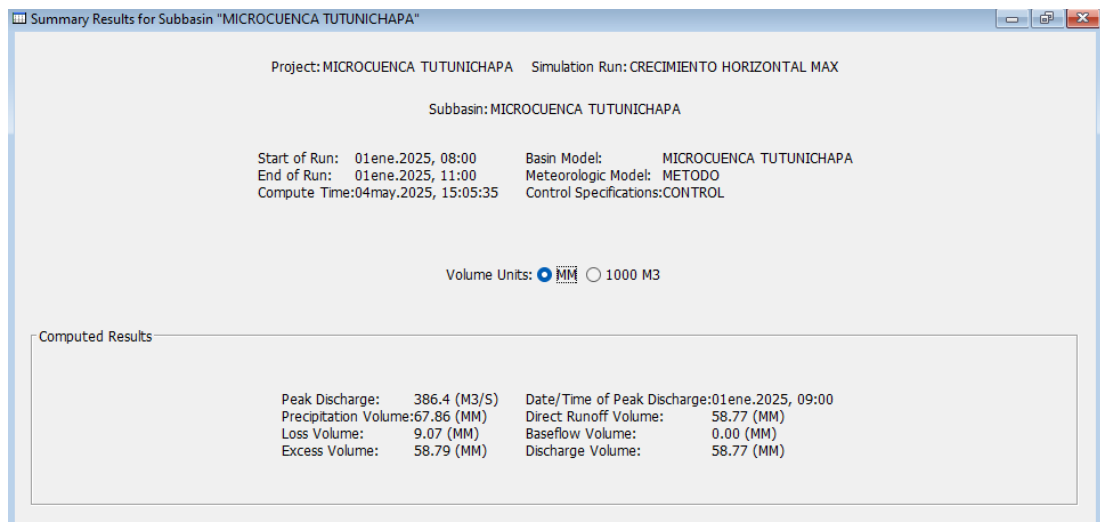
*Nota: Creación propia mediante programa Excel*

En la **Tabla 27** en la columna 1 es el número de identificación por zona, la columna 2 es el tipo de vegetación por zona de la microcuenca, en la columna 3 el área respectiva por cada zona. En la cuarta columna se obtiene un numero de curva por defecto con humedad antecedente II, pero ya que se trata de un estudio hidrológico de la microcuenca es necesario convertirlo a humedad antecedente III con la fórmula propuesta por la OPAMSS en el anexo 38. En la sexta columna se multiplica el área del número de curva con humedad antecedente III y finalmente se divide la sumatoria de la columna sexta entre el área total para obtener un numero de curva ponderado para toda la microcuenca.

***Cálculo de caudal instantáneo máximo y volumen en la microcuenca Tutunichapa para la condición crecimiento urbano horizontal máximo***

**Figura 56**

*Pantallazo de Salida Programa HEC HMS, Modelación Hidrológica*



*Nota: Creación propia mediante programa HEC HMS*

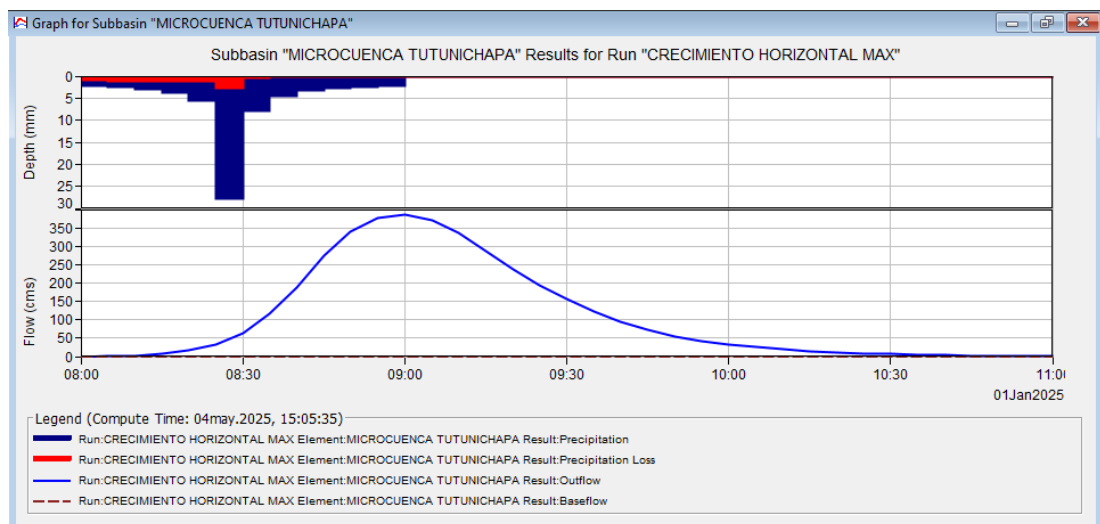
En la **Figura 57** a partir de un evento de lluvia simulado, y utilizando el método de transformación de escorrentía del SCS se estimó un caudal máximo de 366.4 m<sup>3</sup>/s que ocurrió a las 09:00 h, una hora después del inicio del evento. La lluvia total registrada sobre la microcuenca fue de 67.86 mm, con un volumen de pérdidas de 9.07 mm, un valor considerablemente bajo, coherente con el alto porcentaje de urbanización planteado para este escenario. Como resultado, el agua que se transforma en escorrentía asciende a 58.79 mm, coincidiendo con el volumen de escorrentía directa.

Con alrededor del 86.6% de la lluvia convertida en escorrentía, este escenario confirma ser el más desfavorable de los tres, superando al comportamiento observado en 2024. El volumen de pérdidas por infiltración representa apenas el 13.4% de la precipitación total, lo que indica una

capacidad de absorción del terreno muy limitada, debido a una mayor urbanización e impermeabilización de la microcuenca. Este resultado es congruente con el modelo de crecimiento horizontal máximo, que reduce al mínimo las áreas permeables.

### Figura 57

#### *Hidrograma de la Microcuenca Tutunichapa Escenario de Zonas Urbanizables*



*Nota: Creación propia mediante programa HEC HMS*

El caudal pico se da una hora después que ha iniciado el evento, esto indica una lluvia tipo tormenta de corta duración e intensidad elevada, típica de zonas con alto grado de urbanización, al estar el 89% de la microcuenca urbanizada, las pérdidas por infiltración o retención son mínimas, como lo indica la delgada línea roja.

***Demanda de agua potable y producción de aguas residuales para para la condición crecimiento urbano horizontal máximo***

Planteado un escenario en donde la mancha urbana siga creciendo hasta cubrir toda zona que cumpla con las características para ser urbanizada y tomando la densidad poblacional actual de 2,655 hab/km<sup>2</sup> (PMMU, 2021), y un área urbanizada de 17.76 km<sup>2</sup>, se estima la población de la siguiente manera:

$$\text{Población de microcuenca} = (\text{Densidad poblacional})(\text{Área urbanizada})$$

$$\text{Población de cuenca} = (2,655 \text{ hab/km}^2)(17.76 \text{ km}^2)$$

$$\text{Población de cuenca} = 47,152.8 \text{ hab}$$

Se aproxima a 47,153 habitantes

Para el cálculo de la demanda media diaria de agua que consume la población se adicionará un 20% por fugas y desperdicios, tal como se explica en la Norma Técnica de ANDA. Por lo tanto:

$$\text{Consumo de agua potable} = \frac{\text{Demanda} * \text{Poblacion} * 1.2}{86400 \text{ s}}$$

$$\text{Consumo de agua potable} = \frac{(200 \text{ l/p/d})(47,153 \text{ p})(1.2)}{86400 \text{ s}}$$

$$\text{Consumo de agua potable} = 130.98 \text{ l/s}$$

Consumo de agua potable anual =  $4,130,602.8 m^3$

La expansión máxima del área urbanizada dentro de la microcuenca alcanzaría los 17.76 km<sup>2</sup> lo que representa un 89% del área total de la microcuenca y lo que conllevaría a un aumento en la población residente, estimada en más de 47,000 personas. Este crecimiento urbano genera una demanda de agua potable de 130.98 litros por segundo, lo cual se traduce en 4,130,602.8 metros cúbicos anuales, los cuales representa un incremento del 10.9% con respecto al consumo actual, reflejando cómo la expansión del área urbanizada incrementaría también la extracción de agua de la fuente actual que abastece la microcuenca, que, de no llegar a suplir la demanda podría traer consigo la explotación de otras fuentes externa, vaciando los mantos acuíferos y trayendo consigo una modificación del ciclo hidrológico natural en estas áreas. Por lo tanto, los sistemas de abastecimiento actuales, en un escenario de crecimiento urbano máximo deberán adaptarse para cubrir dicha demanda de manera continua y eficiente para evitar que por la falta del recurso hídrico se deba limitar el uso de este a la población.

***Producción habitacional de aguas residuales para la condición crecimiento urbano horizontal máximo***

Tal como se calculó en el capítulo 3, para conocer el caudal medio de aguas residuales ( $Q_{mr}$ ) el aporte de aguas residuales se calcula como el consumo máximo horario de agua potable para el cual se usó el factor de  $K_2$  de 2.4, afectada por un coeficiente de retorno del 0.8; además, se considera que el sistema en su mayoría está conformado por tuberías de PVC por lo que se toma una infiltración potencial ( $I_p$ ) de 0.1 l/s/ha y se tomara como área urbanizada de la microcuenca 1776 ha.

$$Q_{mr} = Q_{mp} * K2 * 0.8 + I_p * \text{Área de infiltracion}$$

$$Q_{mr} = (130.98 \text{ l/s})(2.4)(0.8) + (0.1 \text{ l/s/ha})(1776 \text{ ha})$$

$$Q_{mr} = 429.08 \text{ l/s}$$

Como resultado del aumento en el consumo de agua potable, también se proyecta un incremento en la generación de aguas residuales. El caudal medio estimado de aguas residuales en esta condición asciende a 429.08 litros por segundo, lo cual representa un crecimiento del 11% en comparación con los valores actuales. Además, el aumento del área urbanizada y la instalación de un sistema de alcantarillado sanitario para esta zona, conllevarían a incrementar los caudales de aguas residuales en colectores abajo, lo que podría ocasionar que aquellos que están trabajando cercanos a su máxima capacidad colapsen y sea necesario cambiarlos. Además, se necesitaría que las plantas de tratamiento que existen actualmente estén preparadas para captar y tratar este incremento en el volumen de aguas residuales.

Los aumentos observados en el consumo de agua potable y en la producción de aguas residuales conllevan retos para la gestión del recurso hídrico en la microcuenca, ya que, la totalidad del agua potable proviene de fuentes externas, y cualquier incremento en la demanda disminuye la sostenibilidad los sistemas de abastecimiento de agua potable y los sistemas de disposición de aguas residuales.

#### 4.1.3. Análisis comparativo de escenarios hidrológico para la microcuenca Tutunichapa

El análisis hidrológico de la microcuenca Tutunichapa, a través de los escenarios modelados en HEC-HMS para los años 1995, 2024 y una proyección de crecimiento urbano horizontal máximo, revela una tendencia creciente en el caudal pico y la escorrentía directa, así como una reducción drástica en la infiltración.

**Tabla 28**

*Comparación de escenarios 1995, 2024 y crecimiento urbano máximo*

<b>Escenario</b>	<b>Caudal pico (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Escorrentía directa (mm)</b>	<b>Infiltración (mm)</b>
1995	350.2	52.98	14.85
2024	366.1	55.52	12.32
Crecimiento urbano horizontal máximo	386.4	58.77	9.07

*Nota: Creación propia mediante programa Excel*

#### **Caudal Pico**

**Tabla 29**

*Comparación caudal pico por escenarios*

<b>Comparación</b>	<b>Diferencia (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Variación (%)</b>
1995 vs 2024	15.9	4.54%
2024 vs Crecimiento Máximo	20.3	5.54%
1995 vs Crecimiento Máximo	36.2	10.34%

*Nota: Creación propia mediante programa Excel*

El caudal pico se incrementa de manera progresiva, desde 1995 a 2024, con aumentos de aproximadamente 5% entre escenarios, lo que demuestra cómo el crecimiento urbano aumenta los caudales picos.

### Esorrentía Directa

**Tabla 30**

*Comparación esorrentía directa por escenarios*

<b>Comparación</b>	<b>Diferencia (mm/s)</b>	<b>Variación (%)</b>
1995 vs 2024	2.54	4.79%
2024 vs Crecimiento Máximo	3.25	5.85%
1995 vs Crecimiento Máximo	5.79	10.93%

*Nota: Creación propia mediante programa Excel*

La esorrentía directa también tiene un aumento, a pesar de que parecen aumentos pequeños, en términos hidrológicos son significativos, ya que más agua fluye por la superficie de la microcuenca, sobrecargando sistemas de drenaje y aumentando el riesgo de inundación.

### Infiltración

**Tabla 31**

*Comparación infiltración por escenarios*

<b>Comparación</b>	<b>Diferencia (mm/s)</b>	<b>Variación (%)</b>
1995 vs 2024	-2.53	-17.04%
2024 vs Crecimiento Máximo	-3.25	-26.38%
1995 vs Crecimiento Máximo	-5.78	-38.92%

*Nota: Creación propia mediante programa Excel*

La infiltración disminuye entre 1995 y 2024 se pierde casi el 27%% de capacidad de infiltración, y en el escenario más urbanizado, que sería el más desfavorable, se pierde casi el 40% respecto a 1995. Esta reducción afecta la recarga de acuíferos y genera mayor escurrimiento superficial, alterando el ciclo hidrológico.

#### ***4.1.3.1 Volumen de escorrentía generado por zonas***

Antes de presentar las propuestas de medidas específicas para el escenario del 2024, es necesario establecer una base técnica que respalde los volúmenes de agua lluvia que se pretende infiltrar, para ello, se desarrolló un modelo hidrológico de la microcuenca Tutunichapa utilizando el software HEC-HMS, con el fin de estimar la escorrentía generada por zonas y evaluar la viabilidad técnica de las intervenciones propuestas. La principal finalidad de este modelo no es la predicción de caudales máximos, sino la estimación precisa del volumen de escorrentía superficial generado por cada zona. Este enfoque es esencial para evaluar si las medidas de infiltración propuestas como lagunas de infiltración, zanjas o pavimentos permeable tienen el volumen necesario para infiltrar.

#### ***Configuración del modelo de la microcuenca en HEC-HMS***

En este componente se definió la geometría del sistema, incluyendo el punto de descarga, y la subdivisión de las 3 zonas con su respectiva área. Para la estimación de pérdidas por infiltración, se utilizó el método del número de curva (CN) del SCS, el cual fue ponderado para cada zona en función del tipo de suelo y cobertura presente, esto proporciona una estimación más realista del volumen de escorrentía superficial generado por la lluvia, que es el principal insumo para dimensionar las medidas propuestas. En cuanto al tiempo de concentración, se calculó para la microcuenca un valor de 0.79 horas, este parámetro fue incluido en el modelo como parte de la configuración estándar, sin embargo, es importante aclarar que, aunque el  $T_c$  afecta la forma

del hidrograma y la distribución temporal de los caudales, no tiene incidencia sobre el volumen total de escorrentía generado, por ello, para los fines de este estudio centrado en justificar la capacidad de infiltración de cada zona el  $T_c$  es un dato que no condiciona el análisis. En cuanto a la transformación de escorrentía, se empleó el hidrograma unitario del SCS como método de transformación, apropiado para eventos breves y de alta intensidad como los que se presentan en zonas urbanas. No se consideró flujo base, ya que en tormentas de corta duración la respuesta subterránea es insignificante frente al flujo superficial rápido que caracteriza a esta microcuenca.

### ***Modelo meteorológico***

En el modelo meteorológico se configuró el hidrograma de la lluvia de diseño. En el control de especificaciones se consideró que el evento inicia a las 8:00 am y termina a 11:00 am, con una duración total de 3 horas, superior al tiempo de concentración de la microcuenca 0.79 horas.

### ***Control de simulación***

La simulación fue definida para iniciar a las 8:00 a.m. y finalizar a las 11:00 a.m.

**Tabla 32***Cálculo de Curva Número Promedio*

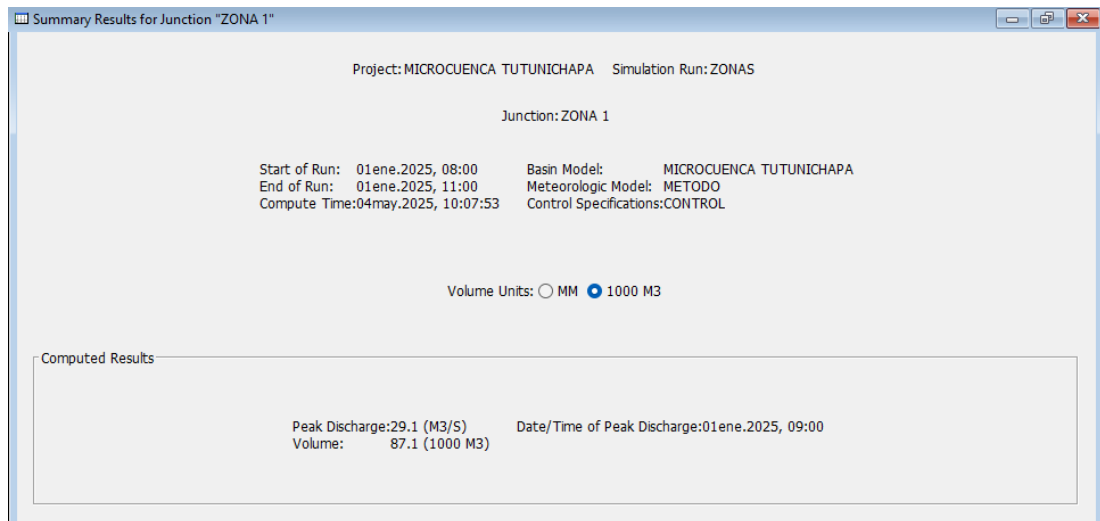
ZONA	VEGETACION	AREA HA	NC HUMEDAD ANTECEDENTE II	NC HUMEDAD ANTECEDENTE III	NC x AREA	NC PROM
1	URBANIZACION	63.04	70	84	5295.36	86.18
	CULTIVO DE CAFÉ	9.14	75	87	795.18	
	CULTIVO DE CAFÉ	8.31	75	87	722.97	
	CULTIVO DE CAFÉ	150.72	75	87	13112.64	
2	PASTOS NATURALES	198.58	61	78	15489.24	80.77
	CULTIVO DE CAFÉ	88.22	75	87	7675.14	
3	URBANIZACION	1479.81	85	93	137622.33	93.00
		1997.9			175417.5	

*Nota: Creación propia mediante programa Excel*

En la **Tabla 32** en la columna 1 es el número de identificación por zona, en este caso las tres zonas antes definidas para el escenario de 2024, la columna 2 es el tipo de vegetación por zona de la microcuenca, en la columna 3 el área respectiva por cada zona. En la cuarta columna se obtiene un número de curva por defecto con humedad antecedente II, pero ya que se trata de un estudio hidrológico de la microcuenca es necesario convertirlo a humedad antecedente III con la fórmula propuesta por la OPAMSS. En la sexta columna se multiplica el área del número de curva con humedad antecedente III y finalmente se divide la sumatoria de la columna sexta entre el área total para obtener un número de curva ponderado para toda la microcuenca.

**Figura 58**

*Pantallazo de salida, zona 1 de la microcuenca Tutunichapa, volumen de escorrentía directa*



*Nota: Creación propia mediante programa HEC HMS*

**Figura 59**

*Pantallazo de salida, zona 2 de la microcuenca Tutunichapa, volumen de escorrentía directa*



*Nota: Creación propia mediante programa HEC HMS*

## Figura 60

*Pantallazo de salida, zona 3 de la microcuenca Tutunichapa, volumen de escorrentía directa*



*Nota: Creación propia mediante programa HEC HMS*

En este análisis, la zona 1 genera un volumen de 87,100 m<sup>3</sup>, la zona 2 alcanza 163,800 m<sup>3</sup>, y la zona 2 presenta el mayor volumen con 1,071,700 m<sup>3</sup>. Estos valores corresponden a escorrentía directa, es decir, el volumen de agua generado por el evento de precipitación que no se infiltra en el suelo, ya que es el método de pérdidas en este modelo, y que fluye directamente sobre la microcuenca. Cabe destacar que estos volúmenes representan valores acumulados, según la configuración hidrológica del modelo: la zona 2 incluye la escorrentía generada en la zona 1, mientras que la zona 3 acumula el escurrimiento producido en las tres zonas. La variación entre zonas también está determinada por el grado de impermeabilización del suelo. La zona 3, altamente urbanizada y con un elevado valor de curva número, genera mayor escorrentía directa debido a su baja capacidad de infiltración y a la confluencia de aportes de las zonas aguas arriba. La zona 2 presenta un volumen mayor que la zona 1.

El análisis hidrológico desarrollado permitió estimar con claridad el volumen de escorrentía superficial que se genera en el año 2024 en cada una de las tres zonas de la microcuenca Tutunichapa, confirmando que el uso del suelo y el grado de impermeabilización son los factores determinantes en la transformación del agua lluvia en escurrimiento superficial. Con esta información, se cuenta ahora con una base que ayudara a la selección y dimensionamiento de medidas de mitigación adaptadas a las condiciones particulares de cada zona, en este contexto, el capítulo siguiente presenta las medidas específicas diseñadas para cada zona, considerando el aporte hídrico y la capacidad de cada área para integrar soluciones sostenibles.

**CAPÍTULO V: PROPUESTA DE MEDIDAS DE  
MITIGACIÓN APLICABLES POR CADA ZONA DE  
ESTUDIO EN LA MICROCUENCA TUTUNICHAPA.**

## **5.1. Medidas de Mitigación Aplicables por Cada Zona de la Microcuenca Tutunichapa para el año 2024.**

La formulación de medidas para reducir el impacto hidrológico en la microcuenca Tutunichapa se ha planteado bajo un enfoque técnico, aplicable por zonas. Es importante tomar en cuenta las diferencias en uso de suelo, pendiente, niveles de urbanización y potencial de intervención de cada sector. Dentro de las medidas propuestas se encuentran la aplicación de SUDS establecidos por la Guía Técnica de Diseño de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible del AMSS, pero no se limita solamente a estas técnicas, también se incluyen estrategias de gestión territorial, prácticas agrícolas sostenibles y control del crecimiento urbano, orientadas a reducir la escorrentía, mejorar la infiltración y conservar el equilibrio hidrológico de la microcuenca.

Dado la morfología y el uso de suelos de la microcuenca, ha sido dividida en zonas en tres zonas, lo que permite proponer medidas específicas para cada contexto, priorizando aquellas que realmente sean aplicables y generen el impacto esperado, más allá de simplemente aplicar soluciones. En el capítulo IV se determinó los volúmenes de escorrentía directa generados en cada zona de estudio, utilizando el modelo hidrológico HEC-HMS, estos volúmenes representan el agua que fluye superficialmente hacia el sistema de drenaje tras restar las pérdidas por infiltración, se debe considerar que no se puede infiltrar toda la escorrentía directa, ya que se pierde la alimentación a las corrientes superficiales.

### **5.1.1. Medidas para zona 3 de la microcuenca Tutunichapa**

#### **1. Aceras permeables**

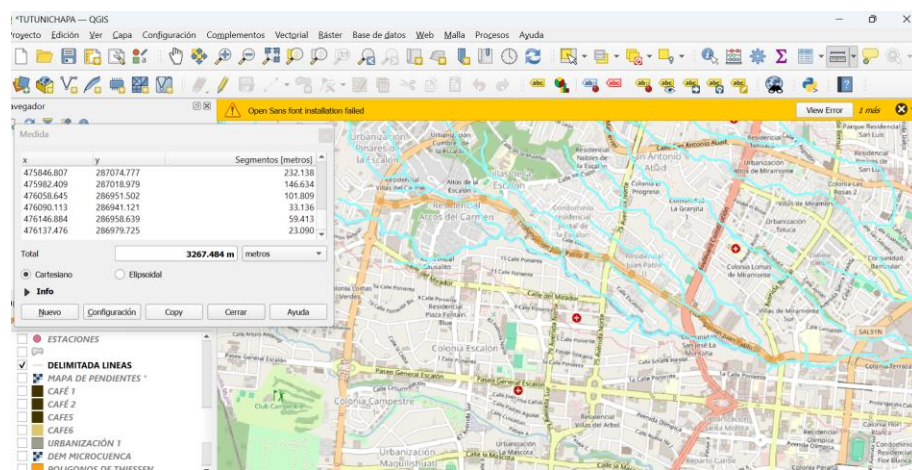
Esta propuesta busca recuperar la infiltración del agua a través de áreas impermeables en las aceras. Esta opción resulta más factible que implementarla en calles y carreteras ya que no la acera no se expone a

grandes cargas de tráfico por lo que no se requiere una resistencia alta, además de ser más económica.

Inicialmente se propone el uso de aceras permeables a lo largo de la prolongación Juan Pablo II teniendo esta una longitud de 3267 metros aproximadamente, se considerará que la acera no es continua debido a su interrupción por calles que la interceptan, por lo que se utilizara el 80% de la longitud medida, y esta propuesta se aplicara en ambas aceras, dando una longitud de aceras permeables de 5227.2 metros lineales. Además, se considerará que el ancho de la acera puede variar a lo largo de la Prolongación Juan Pablo II, por lo que se considerará un valor de 1 metro de ancho para cada acera permeable, en caso que la acera sea más grande solo se intervendrá 1 metro de esta.

### Figura 61

*Captura de Pantalla de la Herramienta “Medir” en Qgis Para Obtención de Longitud de Calle*



*Nota: Creación propia mediante programa QGIS*

Al instalar las aceras permeables descritas, se logra almacenar un volumen de 8,784 m<sup>3</sup> de agua, considerando una profundidad efectiva de 0.50

m. Para garantizar el correcto funcionamiento del sistema, este volumen deberá infiltrarse en un periodo de 24 horas, lo que implica mantener una tasa de infiltración mínima de 20 mm/h. De esta manera, se consigue que cada evento pluviométrico en la microcuenca contribuya a una reducción de la escorrentía equivalente a 0.44 mm.

## **2. Implementación de pavimentos permeables en áreas de renovación urbana y espacios públicos**

Aunque la urbanización ha limitado en gran medida la infiltración natural, es posible recuperar parte de esta función mediante la sustitución progresiva de pavimentos tradicionales por pavimentos permeables en parques, aceras y estacionamientos. Esta medida tiene como objetivo permitir la infiltración de volúmenes moderados de agua de lluvia, reduciendo la carga directa sobre el sistema de drenaje, así como disminuir la formación de escorrentía superficial durante lluvias moderadas. Además, estos contribuirán a la recarga de acuíferos y a la reducción de la temperatura superficial urbana.

Para la zona 3 de la microcuenca donde su superficie está totalmente impermeabilizada y donde la disponibilidad de espacio para soluciones tradicionales como lagunas o zanjas de infiltración es limitada, la implementación de pavimentos permeables en superficies de parqueo se presenta como una alternativa eficiente para gestionar la escorrentía superficial y promover la recarga de acuíferos.

Este tipo de pavimento permite la infiltración directa del agua de lluvia hacia el subsuelo, funcionando de manera similar a las lagunas o zanjas, pero integrándose en espacios ya urbanizados sin requerir un cambio de uso del suelo. Considerando una tasa de infiltración menor que la de una zanja de infiltración, se puede optar por elegir 13 mm/h, además teniendo en cuenta que se tiene entre plazas y parqueos como la plaza Thelma López de Davidson, el parqueo del centro comercial Metrocentro, el parqueo del Centro

de Gobierno y otros (Ver **Tabla 33**), una superficie de aproximadamente 195,000 m<sup>2</sup> revestida con pavimento permeable de la cual se podría optar por utilizar en un enfoque más realista solamente el 50% como área efectiva, sin embargo para el parqueo del C.C. Metrocentro se propone tomar como área efectiva un área menor a 40,000 m<sup>2</sup> esto debido a que el máximo de área a utilizar para infiltrar debe ser de 4 Ha, posteriormente colocando una profundidad que permita retener el agua de alrededor de 40 cm, la cual de espacio para colocar una sub-base de material drenante, tendría la capacidad de infiltrar un volumen de hasta 30,400 m<sup>3</sup> por día, lo que equivale a 1.28 mm por evento, siempre que las condiciones del subsuelo lo permitan y el sistema se mantenga en buenas condiciones. Esta medida, además de reducir el volumen y la velocidad del escurrimiento superficial, contribuye a disminuir el riesgo de inundaciones en zonas bajas y a mitigar el impacto hidrológico asociado al aumento de la impermeabilización en áreas densamente edificadas.

Sin embargo, hay más parqueos o parques donde se puede implementar esta medida, si en los lugares propuestos no es viable debido al tipo de suelo. Es importante que para implementarse se deba realizar estudios de suelo previos para verificar la tasa de infiltración de los estratos de suelo más profundos. A continuación, se presenta una tabla con las áreas de los lugares seleccionados para implementar los pavimentos permeables:

**Tabla 33***Áreas para Posible Aplicación de Pavimentos Permeables*

<b>Lugar</b>	<b>Área en m<sup>2</sup></b>
Plaza Thelma López de Davidson	654.76
Centro judicial Isidro Meléndez	20,161.88
Parqueo Sertrasen	5,040.75
Parqueo Hospital General de Especialidades del Instituto Salvadoreño del Seguro Social	35,046.08
Parqueo Pricesmart	6,879.38
Parqueo Centro de Gobierno	45,734.50
Parqueo de C.C. Metrocentro	81,111.77
<b>Total</b>	<b>194,629.12</b>

*Nota: Áreas medidas a partir del mapa de Google Earth del año 2024.*

Se presenta la tabla tomando en cuenta únicamente el 50% de área total del lugar, ya que el pavimento permeable no puede ser aplicado al 100% del área.

**Tabla 34***Áreas Reducidas para Posible Aplicación de Pavimentos Permeables*

<b>Lugar</b>	<b>Área en m<sup>2</sup></b>
Plaza Thelma López de Davidson	327.38
Centro judicial Isidro Meléndez	10,080.94
Parqueo Sertrasen	2,520.38
Parqueo Hospital General de Especialidades del Instituto Salvadoreño del Seguro Social	17,523.04
Parqueo Pricesmart	3,439.69
Parqueo Centro de Gobierno	20,000.00
Parqueo de C.C. Metrocentro	28,000.00
<b>Total</b>	<b>81,891.43</b>

*Nota: Áreas medidas a partir del mapa de Google Earth del año 2024.*

### **3. Creación de techos verdes y jardines pluviales en edificios públicos y privados**

La implementación de techos verdes en edificaciones y jardines pluviales en espacios abiertos permite reducir la escorrentía superficial, al absorber parte del volumen de agua generado por lluvias. Esta medida no solo disminuye la presión sobre el sistema de drenaje, sino que también contribuye a la mejora del clima urbano, ya que al incrementar la vegetación se reduce la temperatura del entorno. Además, estas soluciones son altamente efectivas en espacios reducidos y de fácil integración a proyectos de construcción o remodelación en la zona urbana ya construida.

#### ***5.1.2. Medidas para zona 2 de la microcuenca Tutunichapa***

##### **1. Frenar el crecimiento urbano horizontal**

. Al igual que en la zona 1, la zona 2, la cual posee en su totalidad cobertura vegetal, un 31 % de cultivos de café y un 69 % de pastos naturales que actualmente cumplen el rol de propiciar la infiltración y la transición entre la zona 1 y baja de la microcuenca, al ser estas urbanizadas aumenta la vulnerabilidad hidrológica en la microcuenca. El procedimiento del cálculo del caudal pico y volumen de escorrentía directa se presentó en las medidas para la zona 1 de la microcuenca.

##### **2. Aplicar SUDS que propicien la infiltración en la zona de pastos naturales y cultivos de café.**

##### **Lagunas de infiltración**

La zona 2 comparte características morfométricas con la zona 1, en primer lugar se propone la implementación de un conjunto de lagunas de

infiltración distribuidas estratégicamente en la zona 2 de la microcuenca Tutunichapa, con el objetivo de incrementar el volumen de infiltración, reducir la escorrentía superficial que llega directamente a la zona 3 y reducir los caudales pico generados por los eventos de precipitación, esta medida está basada bajo los criterios de la Guía Técnica de Diseño de SUDS del Área Metropolitana de San Salvador. Con esta medida se pretende conseguir beneficios como: La disminución del volumen de escorrentía superficial, la recarga de acuíferos mediante infiltración y la reducción del caudal pico en eventos de tormenta, mitigando riesgos de inundaciones en zonas bajas de la microcuenca.

Cada laguna se diseñará con una capacidad individual máxima de 1,080 metros cúbicos, volumen que corresponde al máximo que puede infiltrarse en un periodo de 24 horas bajo una tasa de infiltración de 15 mm/h, al no contar con un estudio de permeabilidad del suelo y una zona en específico donde se construirá, se optó por tomar el valor mínimo aceptado por la Guía Técnica de Diseño de SUDS del AMSS. Estas lagunas se ubicarán en sitios con pendientes inferiores al 15%, preferentemente en zonas con cobertura vegetales como lo pueden ser los cafetales que existen en la parte alta de la microcuenca, donde exista espacio suficiente y acceso a escorrentía superficial concentrada, sin dejar de lado que la distancia mínima al nivel freático es de 3 m. En conjunto, se tendrá que diseñar y construir la cantidad necesaria de lagunas de infiltración que permitirá infiltrar un volumen total de 5,400 metros cúbicos por evento, lo que equivale a un aporte de aproximadamente 0.27 milímetros de infiltración adicional sobre la superficie total de la microcuenca, contribuyendo al objetivo de recuperar la condición hidrológica del año 1995.

## Zanjas de infiltración

A diferencia de las lagunas las zanjas de infiltración pueden adaptarse fácilmente a la forma del terreno, instalándose de forma lineal, por ejemplo, siguiendo las curvas de nivel en la zona de cafetales, sin necesidad de modificar significativamente el uso del suelo existente.

Se propone la implementación de un sistema de zanjas de infiltración en especial en los terrenos cultivados con café y las zonas verdes disponibles en la urbanización 1. Esta solución tiene como objetivo al igual que la laguna de infiltración incrementar la infiltración, controlar la escorrentía superficial desde las pendientes y reducir el aporte de caudales hacia la zona 3 urbanizada. Las zanjas de infiltración se plantean como una medida de bajo impacto, fácil implementación y gran efectividad cuando se ubican en espacios lineales como franjas vegetadas, bordes de caminos y curvas de nivel.

Estas estructuras se construirán en sectores con pendientes iguales o menores al 15%, asegurando la estabilidad de estas, una de las formas de aprovechar las condiciones morfométricas de la zona 2 es la instalación de zanjas a nivel de curvas de nivel o terrazas agrícolas en los cafetales, aprovechando la pendiente natural del terreno. Esta disposición permite reducir la velocidad de escurrimiento superficial, disminuir la erosión hídrica, y aumentar la infiltración localizada, al tiempo que contribuye al mejoramiento de la retención de humedad en el cultivo. Además, el uso de estas zanjas construida en terrenos dedicados a prácticas agrícolas promueve beneficios adicionales como la conservación de suelo fértil, la reducción del transporte de sedimentos y el aumento de la productividad en zonas de ladera.

Para esta propuesta se pretende construir 3,000 metros lineales de zanjas de infiltración con un ancho de 1.5 m, distribuidos a lo largo de terrenos de cultivo, y áreas de transición entre suelo rural y la urbanización 1. Esta

longitud permitiría generar una capacidad total de almacenamiento estimada de 6,000 m<sup>3</sup> por evento, garantizando un vaciado completo en 24 horas bajo una tasa mínima de infiltración de 15 mm/h, tal como lo exige la normativa, esta medida aportaría aproximadamente 0.30 mm de infiltración por evento sobre el área total de la microcuenca.

### **3. Medida integral para cultivos de café y pastos naturales.**

En la zona 2 de la microcuenca Tutunichapa, el uso del suelo está dominado por pastos naturales en un 69%, complementado con un 31% de cafetales. La función de la zona 2 es ser un área de transición hidrológica, que regula el flujo de agua hacia la parte baja de la microcuenca. Aunque el área destinada a cultivos de café representa únicamente el 31% del uso del suelo en la zona 2, es importante considerar que en estas áreas aún persiste el uso ocasional de insecticidas, herbicidas y fertilizantes sintéticos. Si bien su impacto es menor por el área de influencia el uso inadecuado de estos insumos puede contribuir a la contaminación del suelo, la pérdida de materia orgánica, además de generar escorrentía con carga contaminante que, en casos puntuales, podría alcanzar cuerpos de agua, infiltrar hacia el subsuelo o llegar a la parte baja de la microcuenca.

En respuesta a esta problemática, se propone una medida integral orientada a mejorar la infiltración del agua, conservar el suelo, y reducir la carga contaminante. Las acciones clave son:

- Reforestación dirigida mediante la siembra de especies nativas o de raíces profundas, en hileras intermedias dentro de los pastizales, estas especies no solo aportan sombra, sino que rompen capas compactadas, facilitan la infiltración del agua y aumentan la retención de humedad en el suelo.

- Instalación de barreras vivas a lo largo de curvas de nivel, estas estructuras actúan como frenos naturales a la escorrentía, ayudando a reducir la velocidad del agua, evitar la erosión y favorecer la infiltración.
- Transición hacia prácticas agroecológicas, con énfasis en la reducción gradual del uso de insecticidas sintéticos, sustituyéndolos por bioinsumos, insecticidas naturales o controles biológicos. Aunque esta medida no propicia la infiltración, si es una acción complementaria que mejora la calidad del agua infiltrada.

Con las medidas propuestas en la zona 3 y zona 2 de la microcuenca se logra un aumento en la infiltración de 2.29mm, el cual permite disminuir la escorrentía superficial en la microcuenca. Como se puede evidenciar la zona 3 es la que será intervenida en mayor escala al necesitar de pavimentos y aceras permeables de grandes extensiones, esto se planteó de esta manera, ya que, esta zona es la que menos infiltración provee de manera natural, y la que más ha sido urbanizada en el pasado.

Aun se deben infiltrar 0.24mm en la zona 1 de la microcuenca para poder llegar a un valor de 2.53mm, para lo cual se presentan las siguientes medidas.

### ***5.1.3. Medidas para zona 1 de la microcuenca Tutunichapa***

#### **1. Frenar el crecimiento urbano horizontal**

La zona 1 cuenta con en su mayor parte con un uso de suelos del 73 % en cultivos de café y un 17% en urbanización, este 73% sin urbanizar cumple la función de infiltración, evapotranspiración y reducir la escorrentía superficial. De acuerdo con lo mostrado en el escenario tres en el capítulo anterior, urbanizar esta zona implica impermeabilizar el suelo, lo cual continúa

alterando el ciclo hidrológico natural, aumentando el volumen y velocidad de la escorrentía superficial, elevando el riesgo de erosión y deslizamientos. Es por esto que a continuación, se presenta el cálculo para conocer el aumento del caudal y la escorrentía superficial si se continúa urbanizando la zona 1 y media de la microcuenca.

Los resultados de simulación en HEC-HMS confirman que la microcuenca Tutunichapa tiene una respuesta rápida a eventos de lluvia, con un caudal pico de 425.6 m<sup>3</sup>/s alcanzado solo una hora después del inicio de la precipitación, este comportamiento se debe a la alta impermeabilización del suelo, donde más del 96.8% del agua de lluvia se convierte en escorrentía y apenas el 3.2% logra infiltrarse.

Esta situación refleja un entorno urbano con infiltración prácticamente nula, lo cual agrava el riesgo de inundaciones, por ello, se considera fundamental como medida de mitigación no continuar con el crecimiento horizontal urbano, ya que esto implicaría ocupar más superficie permeable, reducir aún más la capacidad de infiltración y aumentar la escorrentía directa.

## **2. Aplicar SUDS que propicien la infiltración**

### **Lagunas de infiltración**

Como segunda medida se propone la implementación de un conjunto de lagunas de infiltración distribuidas estratégicamente en la zona 1 de la microcuenca Tutunichapa, con el objetivo de incrementar el volumen de infiltración, reducir la escorrentía superficial y reducir los caudales pico generados por los eventos de precipitación, esta medida está basada bajo los criterios de la Guía Técnica de Diseño de SUDS del Área Metropolitana de San Salvador. Con esta medida se pretende conseguir beneficios como: La disminución del volumen de escorrentía superficial, la recarga de acuíferos

mediante infiltración y la reducción del caudal pico en eventos de tormenta, mitigando riesgos de inundaciones en zonas bajas de la microcuenca.

Cada laguna se recomienda diseñarla con una capacidad individual máxima de 1,080 metros cúbicos, volumen que corresponde al máximo que puede infiltrarse en un periodo de 24 horas bajo una tasa de infiltración de 15 mm/h. En conjunto, se tendrá que diseñar y construir la cantidad necesaria de lagunas de infiltración que permitirá infiltrar un volumen total de 3240 metros cúbicos por evento, lo que equivale a un aporte de aproximadamente 0.16 milímetros de infiltración adicional sobre la superficie total de la microcuenca

### **Zanjas de infiltración**

A diferencia de las lagunas las zanjas de infiltración pueden adaptarse fácilmente a la forma del terreno, instalándose de forma lineal, por ejemplo, siguiendo las curvas de nivel en la zona de cafetales, sin necesidad de modificar significativamente el uso del suelo existente.

Se propone la implementación de un sistema de zanjas de infiltración en especial en los terrenos cultivados con café y las zonas verdes disponibles en la urbanización 1. Esta solución tiene como objetivo al igual que la laguna de infiltración incrementar la infiltración, controlar la escorrentía superficial desde las pendientes y reducir el aporte de caudales hacia la zona 3 urbanizada. Las zanjas de infiltración se plantean como una medida de bajo impacto, fácil implementación y gran efectividad cuando se ubican en espacios lineales como franjas vegetadas, bordes de caminos y curvas de nivel.

Estas estructuras se pueden construir en sectores con pendientes iguales o menores al 15%, asegurando la estabilidad de estas, una de las formas de aprovechar las condiciones morfométricas de la zona 1 es la instalación de zanjas a nivel de curvas de nivel o terrazas agrícolas en los

cafetales, aprovechando la pendiente natural del terreno. Esta disposición permite reducir la velocidad de escurrimiento superficial, disminuir la erosión hídrica, y aumentar la infiltración localizada, al tiempo que contribuye al mejoramiento de la retención de humedad en el cultivo. Además, el uso de estas zanjas construida en terrenos dedicados a prácticas agrícolas promueve beneficios adicionales como la conservación de suelo fértil, la reducción del transporte de sedimentos y el aumento de la productividad en zonas de ladera.

Para esta propuesta se pretende construir 1500 metros lineales de zanjas de infiltración con un ancho de 1.5 m, distribuidos a lo largo de terrenos de cultivo, y áreas de transición entre suelo rural y la urbanización 1. Esta longitud permitiría generar una capacidad total de almacenamiento estimada de 6,000 m<sup>3</sup> por evento, garantizando un vaciado completo en 24 horas bajo una tasa mínima de infiltración de 15 mm/h, tal como lo exige la normativa, esta medida aportaría aproximadamente 0.11 mm de infiltración por evento sobre el área total de la microcuenca.

### **Techos verdes y depósitos de recolección de aguas lluvias**

La zona 1 de la microcuenca Tutunichapa tiene un área del 18% urbanizada, dentro de las comunidades principales en la urbanización 1 de la zona 1 de la microcuenca Tutunichapa se encuentran: Finca la gloria, Finca Alemania, Finca Santa Claudia, Finca Alejandría, Cantón el Progreso, Caserío Joya grande A pesar de ser solo el 18% total del área alta esto ha incrementado la impermeabilización, generando más escorrentía superficial, erosión de suelos y la disminución de infiltración y evapotranspiración, elementos importantes del ciclo hidrológico, a pesar de que las siguientes medidas no aportan un volumen de infiltración y recolección significativo, toda medida aporta a la propuesta integral.

Techos verdes en viviendas, restaurantes que se encuentran en la zona turística del Boquerón que además de embellecer las fachadas, también

ayudan a regular la temperatura, retienen parte del agua y reducen el volumen de escorrentía hacia las calles.

Depósitos para la recolección de aguas lluvias en viviendas y locales comerciales, pueden ser desde barriles al que cae el agua lluvia de un canal o de un tubo hasta sistemas integrados de abastecimientos de agua no potable para uso en cisternas de baño, limpieza, lo cual reduce los caudales ya que se retiene parte del agua lluvia y además suponen una fuente de agua, en especial en esta zona 1 de la microcuenca donde arriba de la cota 1000 msnm, históricamente el servicio de agua potable por parte de ANDA no es suministrado.

### **3. Medida integral para cultivos de café**

En la zona 1 de la microcuenca Tutunichapa el 82% del uso de suelo está destinado a cultivos de café, una de las practicas comunes es el uso de insecticidas, herbicidas y fertilizantes sintéticos que al no aplicarse con criterios técnicos generan un deterioro del suelo como erosión, reducción de infiltración, incremento de escorrentía contaminada y contaminación del agua que infiltra al subsuelo. Por esto es importante aplicar una medida integral para promover el aumento de infiltración, proteger el suelo, reducir la carga contaminante que puede llegar a zonas más bajas de la microcuenca o al sub suelo, para lograr lo esperado es importar promover:

- Construcción de barreras vivas en curvas de nivel para reducir velocidad del escurrimiento, reducir la erosión del suelo y al mismo tiempo aumentar infiltración.
- Promover una agricultura ecológica reduciendo el uso de insecticidas sintéticos y utilizar insecticidas naturales o bioinsumos.

- Conversión de monocultivos de café a sistemas agroforestales que integren el cultivo de café bajo sombra con árboles frutales o maderables, que sirvan como barreras vivas que a su vez mantengan la humedad del suelo y propicien la infiltración

#### **4. Campañas de concientización ambiental**

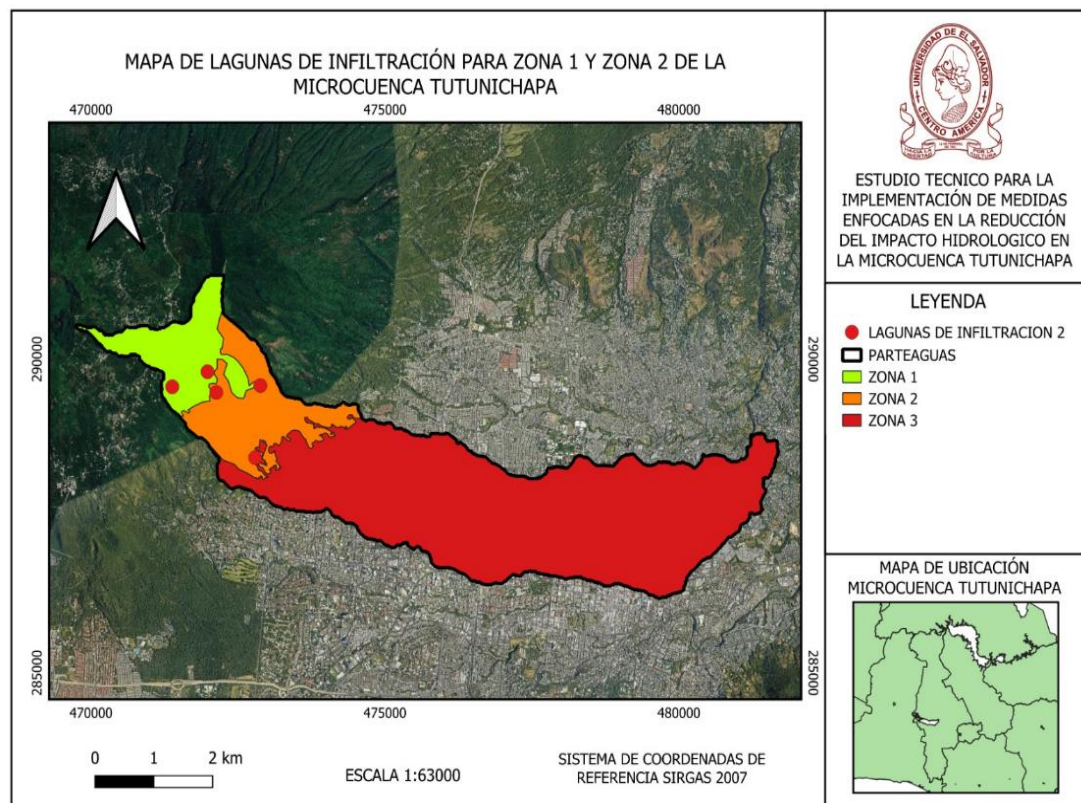
La implementación de campañas de concientización ambiental es una herramienta que también se puede utilizar para fortalecer la gestión comunitaria del recurso hídrico y garantizar la sostenibilidad de la zona 1 de la microcuenca. Las comunidades de Finca La Gloria, Finca Alemania, Finca Santa Claudia, Finca Alejandría, Cantón El Progreso, Los Llanitos y Caserío Joya Grande, ubicadas en una zona clave para la recarga hídrica, deben de participar de forma activa en el proceso de mitigación del impacto hidrológico negativo. Es importante promover y dar a conocer la importancia que tiene esta área para la microcuenca, de igual forma sensibilizar sobre el impacto de prácticas inadecuadas como deforestación, impermeabilización y reforzar el uso de medidas prácticas como las recomendadas anteriormente.

Con la implementación de las medidas propuestas en la zona 1 y media de la microcuenca Tutunichapa, las dos medidas que aportan a la infiltración son las lagunas de infiltración y zanjas de infiltración, con la implementación de estas medidas se lograra alcanzar un incremento acumulado de infiltración de 1.68 milímetros sobre el total de la microcuenca. Este avance representa un paso significativo hacia el cumplimiento del objetivo hidrológico de restaurar los niveles de infiltración del año 1995, cuando se tenían 8.96 mm. Sin embargo, aún falta recuperar 1.72 mm adicionales para alcanzar esa condición. Para lograrlo, se enfocarán medidas en la zona 3, altamente urbanizada, mediante la implementación de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible como, parque y aceras permeables, jardines de lluvia, pozos de infiltración, techos verdes, etc. Estas soluciones, permitirán retener e infiltrar volúmenes en la zona 3, reduciendo la carga sobre la red de drenaje de aguas

lluvias y contribuyendo a regresar la microcuenca a las condiciones objetivos. Tales medidas como las lagunas de infiltración se presentan en la siguiente figura:

**Figura 62**

*Mapa de Ubicaciones Propuestas para Lagunas de Infiltración*



Nota: Mapa elaborado mediante software Qgis y adaptado de Google Earth del año 2024

La ubicación de las lagunas de infiltración en la zona alta de la microcuenca Tutunichapa se fundamenta en criterios técnicos como la baja densidad urbana, la presencia de cobertura vegetal y la existencia de áreas medianamente planas que podrían facilitar su construcción. Sin embargo, es importante destacar que esta propuesta se basa en un análisis preliminar a partir de mapas geológicos, por lo que será necesario realizar estudios de suelo detallados para verificar la viabilidad de implementación en las zonas

seleccionadas. Además, se requiere la validación en campo para confirmar las condiciones topográficas, la capacidad de infiltración del terreno y otros factores que garanticen la efectividad de estas estructuras como medidas sostenibles de mitigación del impacto hidrológico.

Con estas propuestas aplicadas en conjunto a la zona 1, 2 y 3 de la microcuenca se logra un aumento en la infiltración las cuales se resumen en la siguiente tabla:

**Tabla 35**

*Aporte de Infiltración por Cada Zona*

<b>Zona</b>	<b>Medida Implementada</b>	<b>Aporte en mm</b>
1	Lagunas de infiltración	0.11
	Zanjas de Infiltración	0.16
2	Lagunas de infiltración	0.27
	Zanjas de Infiltración	0.30
3	Pavimentos Permeables	1.28
	Aceras Permeables	0.44
Total		2.56

Nota: Elaboración propia.

## 5.2. Identificación de zonas vulnerables a inundación en la microcuenca Tutunichapa

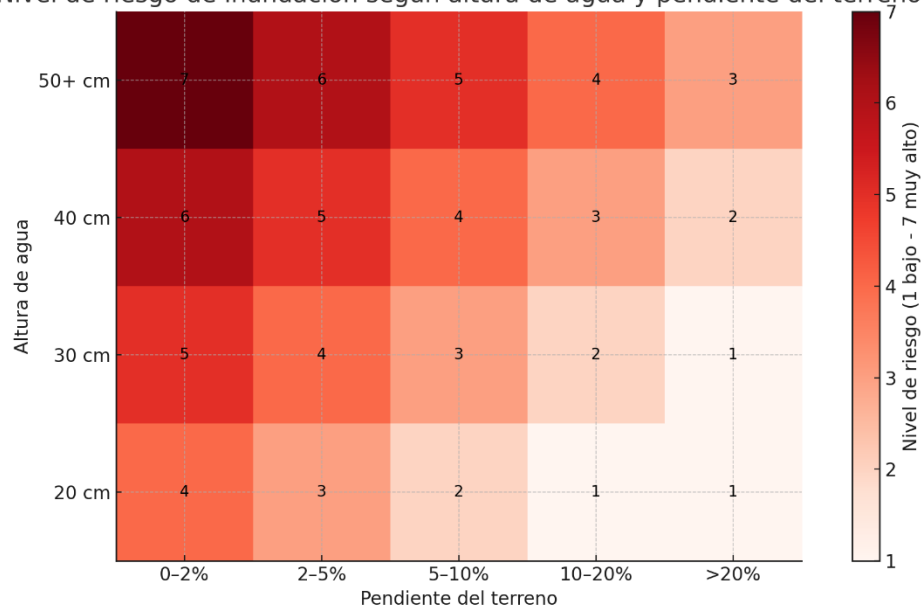
Para la identificación de zonas vulnerables en la microcuenca en el año 2024 se utilizará el mapa obtenido en Qgis, el cual indica las alturas de inundación sobre el terreno y se resaltan usando colores distintivos para cada rango, además se tomará en cuenta el rango de pendientes obtenido en el análisis por zona de la microcuenca.

Al adaptar los rangos proporcionados por Loat, R., & Petrascheck en su Matriz para determinar los niveles de peligro de inundación, se obtiene la siguiente gráfica:

**Figura 63**

*Clasificación de Riesgo por Inundación (Altura de Inundación vs Pendiente)*

Nivel de riesgo de inundación según altura de agua y pendiente del terreno



*Nota: Adaptado de Loat, R., & Petrascheck, A. (1997)*

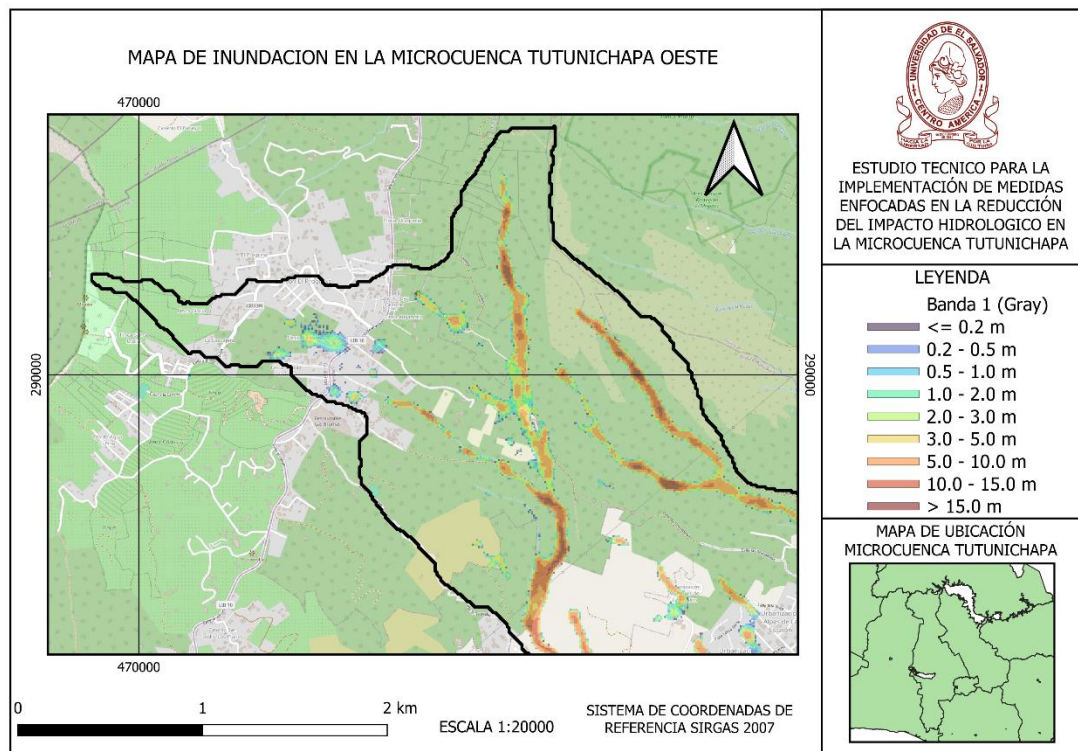
Para la salida de datos de Qgis se definió que se mostraran las zonas con altura de inundación mayor a 20cm, considerando que valores menores no representan un riesgo significativo, además el grafico muestra que valores mayores a los 50cm con bajas pendientes se considera como un nivel muy alto de riesgo ya que a partir de ese punto de inundación es cuando una persona puede tener dificultades para moverse a través del agua y una persona mayor o un niño puede ser arrastrado por la corriente.

Tomando esto en cuenta se analizará cada zona de la cuenca dividiéndola en alta, media y baja.

### Figura 64

*Captura de Pantalla de Qgis Mostrando las Alturas de Inundación*

*(Zona 1 de la Microcuenca)*

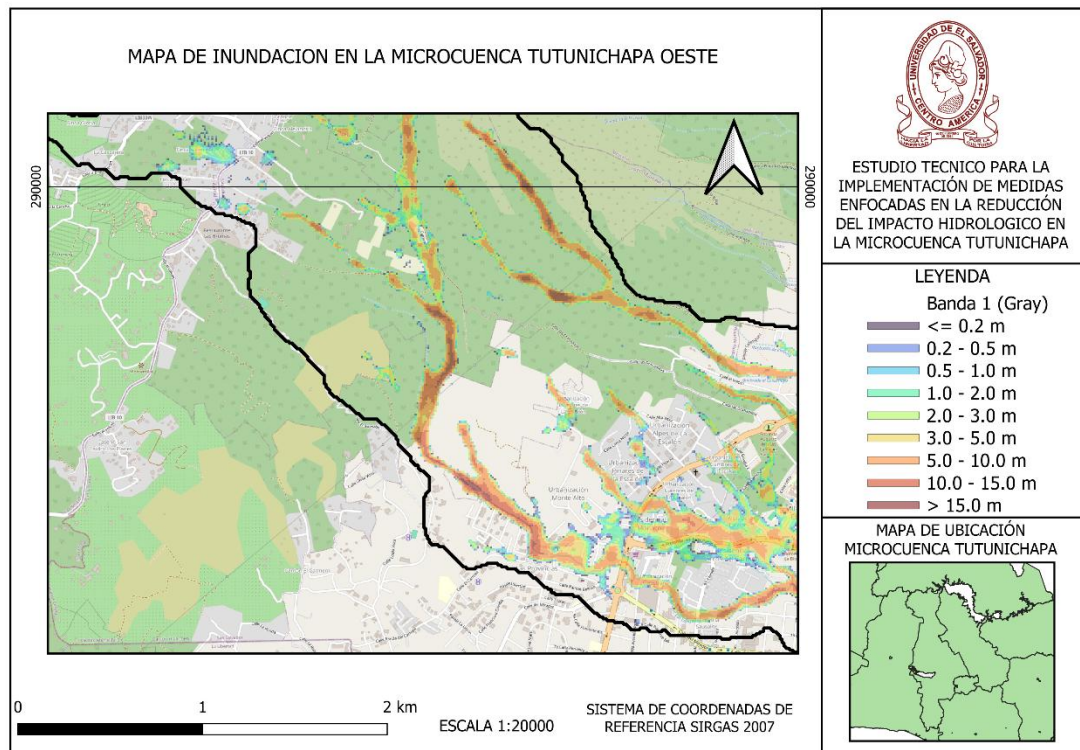


*Nota: Mapa adaptado de Google Earth del año 2024 y elaborado mediante software Qgis.*

La zona 1 de la microcuenca posee una pendiente media de 40% lo que indica que el agua no tiende a empozarse, sin embargo, logra alcanzar altas velocidades debido a la gravedad, se observa un área urbanizada con valores de inundación entre los 20cm y 50cm, en esta zona se encuentra la Finca Santa Claudia y Finca Alemania ubicadas sobre calle al Volcán, lo que pone a estas dos ubicaciones en un nivel 2 y 3, traducido a un nivel moderado de peligrosidad por inundación. En la zona noreste se observa una zona con vegetación con valores de entre 5m a 10m de inundación sobre el terreno. Al ser una zona de cultivos y vegetación donde hay altas pendientes y el tirante tiende a crecer el riesgo por deslizamientos aumenta, por lo que el Cantón San isidro los planes y Cantón los llanitos se encuentran en un peligro de inundación y deslizamientos muy alto.

## Figura 65

*Captura de Pantalla de Qgis Mostrando las Alturas de Inundación  
(Zona 2 de la Microcuenca)*

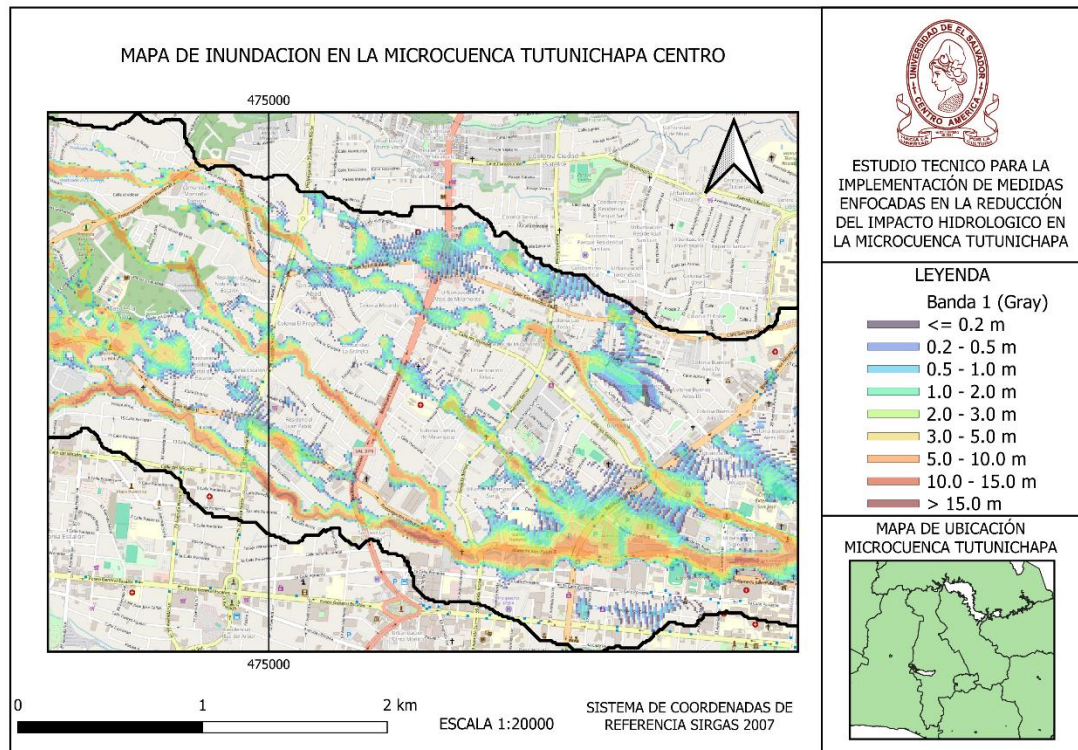


*Nota: Mapa adaptado de Google Earth del año 2024 y elaborado mediante software Qgis.*

La zona 2 de la microcuenca presenta pendientes de entre 16% hasta 47%, teniendo las pendientes más elevadas en la zona de transición con la zona 1 de la microcuenca, y estas van descendiendo conforme se acerca la zona de transición con la zona 3. La zona 2 no presenta un área urbanizada que corra riesgo de inundación, sin embargo, en la zona de cultivos se identifican zonas donde el tirante alcanza valores entre 5 y 15 metros, específicamente en la Quebrada las Lajas.

## Figura 66

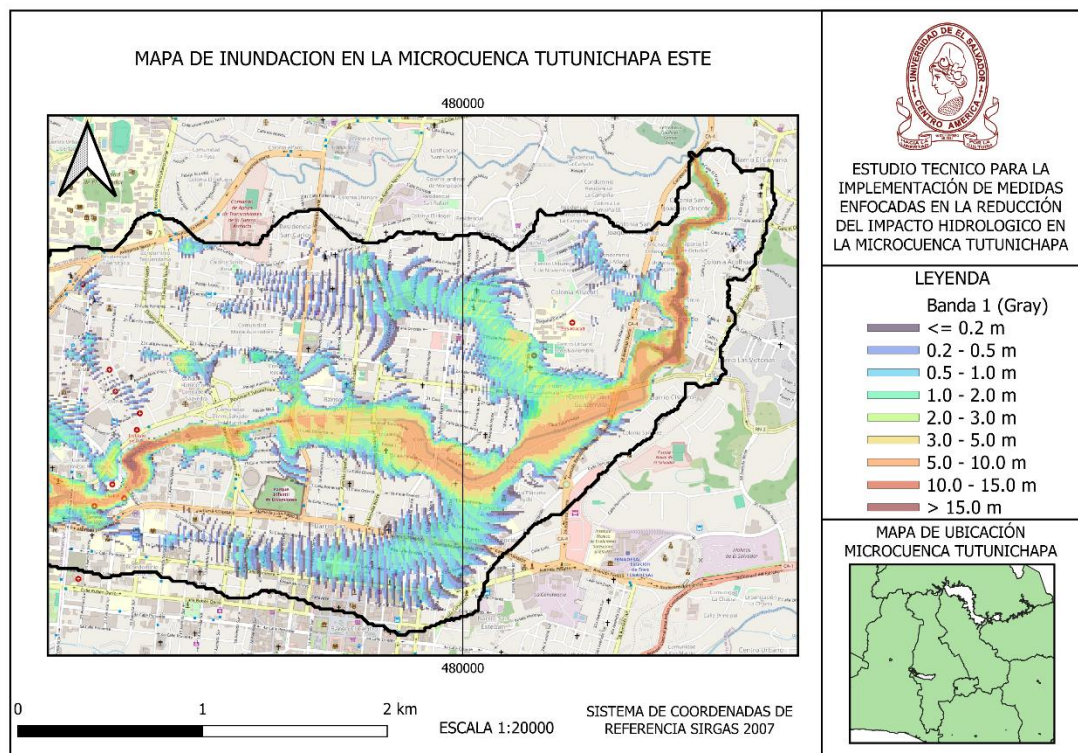
*Captura de Pantalla de Qgis Mostrando las Alturas de Inundación  
(Zona 3 de la Microcuenca)*



*Nota: Mapa adaptado de Google Earth del año 2024 y elaborado mediante software Qgis.*

**Figura 67**

*Captura de Pantalla de Qgis Mostrando las Alturas de Inundación  
(Zona 3 de la Microcuenca)*



*Nota: Mapa adaptado de Google Earth del año 2024 y elaborado mediante software Qgis.*

La zona 3 de la microcuenca presenta pendientes de entre 0% hasta el 16%, por lo que el agua tiende a empozarse, y se presentan velocidades bajas en las corrientes. Además, esta zona está 100% urbanizada por lo que la infiltración es muy reducida, por lo que la mayor parte de la escorrentía escurrirá sobre calles y aceras. En esta zona se pueden identificar tirantes de entre 5 a 15 metros en todo el recorrido de la quebrada las lajas, al encontrarse en una zona urbana su desbordamiento afectaría las siguientes ubicaciones, Urbanización Cumbres de la Escalón, Las Provincias, Urbanización Capistrano, Residencial Arcos del Carmen.

Además, la esorrentía al finalizar su recorrido a través de la Quebrada las Lajas se une al Arenal-Totonicapa, donde se identifican tirantes hidráulicos de entre 10 a 15 metros en la mayor parte de su recorrido, dejando en un riesgo alto a muy alto a todas las colonias situadas a los costados de la Prolongación Juan Pablo II y la Alameda Juan Pablo II, como lo son la Comunidad Tutunichapa, Condominio Clínicas Médicas y Barrio Concepción. Por otro lado, se identifican tirantes hidráulicos que van desde 1 metro hasta los 5 metros en el Río Urbina, y al estar en la parte más baja de la microcuenca Tutunichapa las pendientes son menores al 10% por lo que el riesgo de inundación sería de moderado a alto en las urbanizaciones aledañas, por ejemplo, Barrio San Miguelito, Centro Urbano Guatemala, Colonia San Judas, Urbanización Toscana I y II y Reparto 12 de octubre.

Al comparar esta información con los antecedentes históricos presentados en el capítulo 1 se verifica que la quebrada Las Lajas, la Alameda Juan Pablo II y las comunidades aledañas al Río Urbina son las principales afectadas en la zona 3 de la microcuenca. Esta información es útil para saber que zonas deberían ser intervenidas por las autoridades para prevenir inundaciones y para mejorar la respuesta ante las consecuencias de este fenómeno.

## **CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## 6.1. Conclusiones

1. En el escenario correspondiente al año 2024, se identificó que la microcuenca Tutunichapa enfrenta un alto grado de urbanización, con un 77% de su superficie transformada en áreas impermeabilizadas. Esta condición ha reducido significativamente la capacidad de infiltración del suelo, aumentando la escorrentía superficial y la probabilidad de inundaciones. A pesar de ello, los caudales y volúmenes calculados aún permiten la planificación de medidas correctivas, siempre que se mantenga controlado el crecimiento urbano horizontal y se apliquen estrategias que permitan reducir el impacto hidrológico generado por proyectos ya existentes.
2. Las características morfométricas e hidrológicas indican que la microcuenca Tutunichapa, en condiciones naturales, presentaría una baja susceptibilidad a caudales elevados y una respuesta hidrológica más lenta. No obstante, para el año 2024 el elevado grado de urbanización, que alcanza el 77 % del área, ha alterado significativamente su comportamiento. La escasa infiltración registrada de apenas 12.32 mm frente a los 67.86 mm de lluvia total, junto con un caudal pico de 366.1 m<sup>3</sup>/s, reflejan una respuesta rápida. Aunque el tiempo de concentración estimado de 0.79 horas es coherente con la morfometría de la microcuenca, la alta impermeabilización de suelos ha reducido drásticamente su capacidad de infiltración. por lo tanto, el cambio en el uso del suelo ha superado la influencia de las características morfométricas e hidrológicas, alterando el balance hídrico e incrementando los riesgos de escorrentía e inundaciones en la microcuenca Tutunichapa.

3. La metodología para la evaluación y propuesta de medidas en la microcuenca Tutunichapa demuestra la importancia de analizar la microcuenca desde un enfoque zonificado, lo cual permite adaptar las soluciones en función a la morfometría e hidrología de cada zona. La división de la microcuenca en zonas no solo responde a criterios morfométricos y de uso de suelos, sino también al rol que desempeña cada zona dentro del ciclo hidrológico: recarga, transición y control de escorrentía, respectivamente. Esta estrategia por zonas permite plantear intervenciones más precisas y efectivas, evitando generalizaciones que podrían resultar en medidas ineficaces.
4. La aplicación de SUDS y medidas para mejorar la infiltración de manera regional en la microcuenca Tutunichapa, como el uso de lagunas de infiltración, zanjas de infiltración, pavimentos y aceras permeables permite una reducción en la escorrentía superficial obtenida mediante el almacenamiento temporal y posterior infiltración de 2.56 mm de agua, reduciendo significativamente el impacto hidrológico causado debido al avance en la urbanización, por lo que, este análisis deja abierta la oportunidad de la construcción de obras civiles para contribuir especialmente al aumento de la recarga hídrica y al control de los caudales de escorrentía, reduciendo el riesgo de inundaciones.
5. La implementación de medidas de mitigación hidrológica, como los pavimentos permeables, las zanjas y lagunas de infiltración, han demostrado ser una eficaz solución para reducir los caudales pico e igualar niveles de infiltración presentes en el año de 1995. Estas medidas no solo restauran el equilibrio del ciclo hidrológico, sino que también representan una solución viable

con una relativa facilidad de aplicación en entornos urbanos densamente contruidos.

6. La proyección del escenario de crecimiento urbano horizontal máximo demuestra un incremento considerable en la demanda de agua potable y en la producción de aguas residuales, alcanzando valores insostenibles para los sistemas actuales de distribución y saneamiento. Además, este crecimiento haría que el 89% del área de la microcuenca estuviera urbanizada, cambiando totalmente el uso de suelos de esta área, incrementando el área impermeabilizada de esta. Es por esto que de no establecer un control riguroso del uso del suelo y no detener la expansión indiscriminada de la mancha urbana, se incrementaría las problemáticas hidrológicas de la cuenca, con mayores riesgos de escasez, contaminación y eventos como inundaciones. Por tanto, es urgente implementar políticas que frenen el avance urbano en zonas susceptibles y prioricen el desarrollo vertical y ordenado.
  
7. Las normativas nacionales establecidas en El Salvador desempeñan un papel fundamental en la estandarización de los parámetros utilizados para realizar los estudios hidrológicos, ya que garantizan que los análisis y resultados se desarrollen bajo criterios técnicos uniformes y confiables. Estas normativas no solo facilitan la interpretación de los datos, sino que también permiten que las propuestas de planificación y mitigación de riesgos hidrológicos se adapten adecuadamente a las características geográficas y climáticas del país, fortaleciendo así la toma de decisiones en proyectos de ordenamiento territorial, infraestructura y gestión ambiental.

## 6.2. Recomendaciones

1. Es importante que, cualquier análisis de las condiciones hidrológicas de un área de estudio, se cuente con datos de lluvia actualizados, que permitan obtener lluvias de diseño confiables y representativas de las condiciones climáticas actuales. Estos datos son fundamentales para garantizar la precisión de caudales de escorrentía y la identificación de posibles riesgos hidrológicos, permitiendo que las soluciones de mitigación sean adecuadas a las necesidades reales del entorno.
2. Se recomienda que futuros estudios integren un análisis económico con énfasis en la evaluación beneficio costo de las medidas propuestas, ya que este trabajo de graduación se ha centrado en el análisis hidrológico e hidráulico, por lo que es importante que los futuros estudios consideren no solo el rendimiento de cada solución, sino también su relación entre el beneficio que se obtiene y el costo que requiere. Incorporar esta perspectiva fortalecería la viabilidad real de las propuestas, facilitando su ejecución dentro de planes urbanos de los distritos que están dentro de la microcuenca, San Salvador, Ciudad Delgado y Santa Tecla.
3. Se recomienda que futuras investigaciones o procesos de implementación contemplen una etapa de validación técnica en campo, acompañada de estudios de diseño detallado de las medidas propuestas, así como de un análisis integral de la infraestructura hidráulica existente, con especial énfasis en la zona baja de la microcuenca Tutunichapa, que concentra el mayor grado de urbanización. Esta área cuenta con diversas estructuras hidráulicas como bóvedas, sistemas de detención,

redes de drenaje de aguas lluvias, etc., cuyo estado operativo y nivel de mantenimiento deben ser evaluados antes de implementar las medidas propuestas en este trabajo de graduación. Además, las visitas en campo permitirán verificar elementos claves del diseño, tales como la pendiente del terreno, la textura y compactación del suelo, la profundidad del nivel freático, la cobertura vegetal y la presencia de infraestructura existente que pudiera condicionar la aplicación de estas medidas. Esta validación es importante para ajustar las medidas lo más cercano a la realidad y de esta forma poder garantizar su funcionalidad.

## BIBLIOGRAFÍA

- agrawdata.com*. (2024). Obtenido de <https://agrawdata.com/blog/erosion-hidrica/>
- ana.gob.pe*. (2019). Obtenido de [https://www.ana.gob.pe/2019/consejo-de-cuenca/pampas/F#:~:text=b\)%20Rect%C3%A1ngulo%20Equivalente%3A,y%20per%C3%ADmetro%20de%20la%20cuenca.](https://www.ana.gob.pe/2019/consejo-de-cuenca/pampas/F#:~:text=b)%20Rect%C3%A1ngulo%20Equivalente%3A,y%20per%C3%ADmetro%20de%20la%20cuenca.)
- ANDA. (2014). *NORMAS TECNICAS PARA ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO DE AGUAS NEGRAS*.
- Aparicio Mijares, F. J. (1992). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*.
- Aquaefundacion. (s.f.).
- aquafeelmaryland.com*. (2024). Obtenido de <https://aquafeelmaryland.com/como-afecta-la-perdida-de-agua-a-la-biodiversidad-la-importancia-de-conservar-nuestros-recursos-naturales/?lang=es>
- ASA. (2021). *Autoridad Salvadoreña de Agua*. Obtenido de <https://www.asa.gob.sv>
- ASA. (2022). Obtenido de <https://www.asa.gob.sv/ley-del-agua/>
- ayudaenaccion.org*. (2020). Obtenido de <https://ayudaenaccion.org/blog/sostenibilidad/efectos-cambio-climatico-economia/>
- Banco Interamericano del Desarrollo* . (2016). Obtenido de <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Perfil-de-riesgo-de-desastre-por-inundaciones-para-EI-Salvador-Informacional.pdf>
- BUENDÍA, M. P. (2007). *EL MEDIO AMBIENTE A PRINCIPIOS DEL SIGLO XXI: ¿ CRISIS O ADAPTACIÓN ?*
- Calixto, N. J. (2022). *Fundamentos de Hidrologia*. Bogota, Colombia: Ecoe Ediciones S.A.S.
- carreteros.orghtm* . (2018). Obtenido de [http://www.carreteros.org/normativa/drenaje/5\\_2ic2016/apartados/2.htm](http://www.carreteros.org/normativa/drenaje/5_2ic2016/apartados/2.htm)

- CEPAL. (2012). Obtenido de observatorioplanificacion.cepal.org/sites/default/files/instrument/files/Ley%20del%20Medio%20Ambiente%20actualización%202012.pdf
- Chile, F. (2020). *Fundacion Chile*. Obtenido de [https://fch.cl/noticias/cinco-medidas-para-abordar-la-crisis-del-agua-en-la-reactivacion-sostenible/?utm\\_source=climate.selectra.com](https://fch.cl/noticias/cinco-medidas-para-abordar-la-crisis-del-agua-en-la-reactivacion-sostenible/?utm_source=climate.selectra.com).
- climate.selectra.com*. (2024). Obtenido de <https://climate.selectra.com/es/que-es/deforestacion>
- comunidadplanetaazul.com*. (2023). Obtenido de <https://comunidadplanetaazul.com/la-deforestacion-y-el-ciclo-del-agua/>
- Cuenca Hidrografica*. (2015). Obtenido de <https://cuencahidrograficamila.blogspot.com/2016/04/estudio-morfologico-de-una-cuenca.html>
- DES. (2023). *El Salvador*. Obtenido de <https://www.elsalvador.com/noticias/nacional/contaminacion-de-rios-ancelhuate/1055860/2023/>
- Dirección General de Ordenamiento Forestal*. (2017). Obtenido de <https://www.transparencia.gob.sv/institutions/mag/documents/185734/download>
- ElMundo. (09 de 08 de 2022). Obtenido de <https://diario.elmundo.sv/nacionales/inundaciones-cortes-de-energia-y-arboles-derribados-tras-violenta-tormenta-en-gran-san-salvador>
- elsalvador.com*. (3 de 11 de 2015). Obtenido de [historico.elsalvador.com/historico/169165/basura-y-ripiro-en-la-quebrada-las-lajas-provoco-correntada.html](http://historico.elsalvador.com/historico/169165/basura-y-ripiro-en-la-quebrada-las-lajas-provoco-correntada.html)
- elsalvador.com*. (20 de 10 de 2023). Obtenido de <https://www.elsalvador.com/noticias/nacional/san-salvador-invierno-inundaciones-evacuaciones-emergencias/1091235/2023/>
- EPA. (2024). *Environment Protection Agency*. Obtenido de [https://espanol.epa.gov/espanol/como-puede-ayudar-proteger-las-fuentes-de-agua?utm\\_source=](https://espanol.epa.gov/espanol/como-puede-ayudar-proteger-las-fuentes-de-agua?utm_source=)

- Eregulations*. (1998). Obtenido de [faolex.fao.org/docs/pdf/els77285.pdf](https://faolex.fao.org/docs/pdf/els77285.pdf)
- europarl.europa.eu*. (2022). Obtenido de <https://www.europarl.europa.eu/topics/es/article/20221019STO44561/1-as-causas-de-la-deforestacion-y-la-respuesta-de-la-ue>
- FAO. (2014). Obtenido de [fao.org: https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/6dc91118-81ae-49b8-9b58-839f9486ce52/content](https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/6dc91118-81ae-49b8-9b58-839f9486ce52/content)
- Fichtner. (2024). *Fichtner*. Obtenido de <https://www.americas.fichtner.de/blog-post-san-salvador>
- forbes.com*. (2024). Obtenido de [https://www.forbes.com.mx/estos-son-los-impactos-economicos-que-estamos-sufriendo-por-el-cambio-climatico/#google\\_vignette](https://www.forbes.com.mx/estos-son-los-impactos-economicos-que-estamos-sufriendo-por-el-cambio-climatico/#google_vignette)
- forestal.udec*. (2016). Obtenido de <https://www.forestal.udec.cl/columna-de-opinion-inundaciones-ocurren-por-alteraciones-en-la-capacidad-de-infiltracion-y-retencion-de-agua-en-el-suelo/>
- Fundacion, A. (2024). *Aquae Fundacion*. Obtenido de [https://www.fundacionaquae.org/wiki/reducir-contaminacion-agua/?utm\\_source=](https://www.fundacionaquae.org/wiki/reducir-contaminacion-agua/?utm_source=)
- Global Water Partnership*. (2012). Obtenido de <https://www.gwp.org/globalassets/global/toolbox/references/the-handbook-for-integrated-water-resources-management-in-transboundary-basins-of-rivers-lakes-and-aquifers-inbo-gwp-2012-spanish.pdf>
- gob.mx*. (2019). Obtenido de <https://www.gob.mx/imta/articulos/que-es-una-cuenca-211369#:~:text=Se%20considera%20que%20una%20cuenca,menos%20de%205%20000%20hect%C3%A1reas.>
- Gobierno de San Salvador*. (2015). Obtenido de [sansalvador.gob.sv/download/codigo-municipal/?wpdmdl=7522&refresh=66b97e7fa65541723432575](https://sansalvador.gob.sv/download/codigo-municipal/?wpdmdl=7522&refresh=66b97e7fa65541723432575)

- Hidrogeotecnicas. (2024). *Hidrogeotecnicas*. Obtenido de <https://hidrogeotecnicas.blogspot.com/2024/11/ejercicio-calculo-del-tiempo-de.html>
- Howard, A. D. (1967). *DRAINAGE ANALYSIS IN GEOLOGIC INTERPRETATION A SUMMATION*.
- iadb.org*. (2023). Obtenido de <https://blogs.iadb.org/cultura-arte-creatividad/es/preservar-nuestra-identidad-frente-al-cambio-climatico-el-impacto-en-la-cultura-y-el-desafio-de-proteger-nuestro-patrimonio/iagua.es>
- iagua.es*. (2016). Obtenido de <https://www.iagua.es/blogs/ana-abellan/impactos-urbanizacion-ciclo-agua>
- iagua.es*. (2024). Obtenido de <https://www.iagua.es/respuestas/que-es-sequia>
- IGAC, I. G. (2013). *Gobierno de Colombia*. Obtenido de [https://cortolima.gov.co/sites/default/files/POMCAS/2020/POMCA\\_RIO\\_LUISA/3\\_6\\_PENDIENTES.pdf](https://cortolima.gov.co/sites/default/files/POMCAS/2020/POMCA_RIO_LUISA/3_6_PENDIENTES.pdf)
- IMN. (2022). *Instituto meteorologico Costa Rica*. Obtenido de IMN.
- Ingeciv. (2015). *Ingeciv*. Obtenido de <https://ingeciv.com/que-es-una-curva-hipsometrica/>
- Ley de Protección Civil*. (2005).
- Ley de Urbanismo y Construcción*. (1991). Obtenido de <https://www.transparencia.gob.sv/institutions/tonacatepeque-san-salvador/documents/482070/download>
- Lima, S. G. (2011). *¿Que es una cuenca hidrografica?*
- LPD. (2024). *La Prensa Grafica*. Obtenido de <https://www.laprensagrafica.com/elsalvador/Planta-Torogoz-produjo-menos-agua-en-2023-20240705-0090.html>
- LPG. (10 de 10 de 2022). Obtenido de <https://www.laprensagrafica.com/elsalvador/Comunidades-mas-vulnerables-pasan-zozobra-por-lluvias-20230922-0089.html>
- MARN. (2014). *Gestión integrada del recurso hídrico*. San Salvador: Comunicación Estratégica.

- MARN. (2017). Obtenido de <https://appsdec.marn.gob.sv/docs/2.2b%20MARN%20Guia%20Practica%20de%20Captacion%20de%20Agua%20Lluvia.pdf>
- Mijares, F. J. (1992). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. Mexico: Grupo Noriega Editores.
- MINSAL. (2017). Obtenido de [https://asp.salud.gob.sv/regulacion/pdf/planes/plan\\_gestion\\_de\\_riesgos\\_desastres\\_v1.pdf](https://asp.salud.gob.sv/regulacion/pdf/planes/plan_gestion_de_riesgos_desastres_v1.pdf)
- Mosalve Sáenz, G. (1999). *Hidrología en la Ingeniería*. naturefund.de. (2018). Obtenido de [https://www.naturefund.de/es/informacion/forestacion/bosques\\_importancia\\_y\\_funcion/bosque\\_y\\_ciclo\\_del\\_agua#:~:text=Por%20ejemplo%20C%20la%20deforestaci%C3%B3n%20hace,para%20el%20ciclo%20del%20agua.](https://www.naturefund.de/es/informacion/forestacion/bosques_importancia_y_funcion/bosque_y_ciclo_del_agua#:~:text=Por%20ejemplo%20C%20la%20deforestaci%C3%B3n%20hace,para%20el%20ciclo%20del%20agua.)
- OPAMSS. (2021). Obtenido de [opamss.org.sv/ova\\_doc/guia-habitats-urbanos-sostenibles/](https://opamss.org.sv/ova_doc/guia-habitats-urbanos-sostenibles/)
- OPAMSS. (2021). Obtenido de [https://opamss.org.sv/ova\\_doc/suds/](https://opamss.org.sv/ova_doc/suds/)
- OPAMSS. (07 de 2021). *Resumen Ejecutivo de la Guía Técnica para el diseño de SUDS en el AMSS*. Obtenido de <https://opamss.org.sv>
- OPAMSS. (2023). Obtenido de [https://opamss.org.sv/wp-content/uploads/2024/02/RLDOTAMSS\\_CON\\_ANEXOS\\_AGOSTO\\_2023.pdf](https://opamss.org.sv/wp-content/uploads/2024/02/RLDOTAMSS_CON_ANEXOS_AGOSTO_2023.pdf)
- OPAMSS. (2023). Obtenido de <https://opamss.org.sv/wp-content/uploads/2020/07/REGLAMENTO-ACTUALIZADO-2023.pdf>
- PMMU. (2021). *Política Metropolitana de Movilidad Urbana*. Obtenido de <https://opamss.org.sv/wp-content/uploads/2021/10/PMMU%20AMSS.pdf>
- Reglamento a la Ley de Urbanismo y construcción*. (2012).
- Reglamento General de la ley de Medio Ambiente*. (1998). Obtenido de <https://www.transparencia.gob.sv/institutions/chiltiupan-la-libertad/documents/320909/download>

- Salvador, G. d. (2017). *transparencia.gob.sv*. Obtenido de [https://www.transparencia.gob.sv/institutions/82/documents/140859/download#:~:text=El%20%C3%81rea%20Metropolitana%20de%20San%20Salvador%20\(AMSS\)%2C%20se%20extiende,la%20poblaci%C3%B3n%20total%20del%20pa%C3%ADs.](https://www.transparencia.gob.sv/institutions/82/documents/140859/download#:~:text=El%20%C3%81rea%20Metropolitana%20de%20San%20Salvador%20(AMSS)%2C%20se%20extiende,la%20poblaci%C3%B3n%20total%20del%20pa%C3%ADs.)
- Scribd. (2022). *Scribd*. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/463317726/Tiempo-de-concentracion>
- SNET. (2002). Obtenido de [mapas.snet.gob.sv/hidrologia/view.php?id=151](http://mapas.snet.gob.sv/hidrologia/view.php?id=151)
- SNET. (17 de 09 de 2009). Obtenido de <http://mapas.snet.gob.sv/hidrologia/view.php?id=496>
- SNET. (17 de 10 de 2011). Obtenido de <http://mapas.snet.gob.sv/hidrologia/view.php?id=608>
- SNET. (13 de 07 de 2012). Obtenido de <http://mapas.snet.gob.sv/hidrologia/view.php?id=621>
- SNET. (29 de 08 de 2018). Obtenido de <http://mapas.snet.gob.sv/hidrologia/view.php?id=792>
- SWA. (2021). *Sanitation and Water for All*.
- Taylor, C. J. (1952). *Unit-hydrograph and flood routing*.
- TradeSafe. (2024). *TradeSafe*. Obtenido de [https://trdsf.com/es/blogs/news/gestion-del-agua?srsId=AfmBOoqFPPpJb5aLlrc5vNrqnMrDuc--p2lpeygekX5bX-8nFDuXWpt7&utm\\_source=](https://trdsf.com/es/blogs/news/gestion-del-agua?srsId=AfmBOoqFPPpJb5aLlrc5vNrqnMrDuc--p2lpeygekX5bX-8nFDuXWpt7&utm_source=)
- udep.edu.pe*. (2024). Obtenido de <https://www.udep.edu.pe/hoy/2024/04/necesitamos-drenaje-y-control-de-erosion-para-evitar-deslizamientos/>
- UDLAP. (2024). Obtenido de [blogcatedraunesco.udlap.mx:](https://blogcatedraunesco.udlap.mx/) <https://blogcatedraunesco.udlap.mx/el-ciclo-del-agua-bajo-amenaza/>
- UFPS, U. F. (2022). *Fundamentos de Hidrología*.
- USON, U. d. (2000). *Estudio Topohidráulico e Hidrológico sobre el Río Altar*.
- vermiduero.es*. (2024). Obtenido de <https://vermiduero.es/efectos-de-la-agricultura-convencional-frente-a-agricultura-sostenible/>

- MARN. (1998, abril 5). LEY DE MEDIO AMBIENTE. Eregulations.org.  
<https://elsalvador.eregulations.org/media/Ley%20de%20medio%20ambiente.pdf>
- MARN. (2000, marzo 21). REGLAMENTO GENERAL DE LA LEY DEL MEDIO AMBIENTE. Eregulations.org.  
<https://elsalvador.eregulations.org/media/Reglamento%20General%20de%20La%20Ley%20del%20Medio%20Ambiente.pdf>
- VMVDU. (1991, junio 4). LEY DE URBANISMO Y CONSTRUCCION. Eregulations.org.  
[https://elsalvador.eregulations.org/media/ley\\_urbanismo\\_construccion.pdf](https://elsalvador.eregulations.org/media/ley_urbanismo_construccion.pdf)
- VMVDU. (1991b, junio 5). Eregulations.org.  
<https://elsalvador.eregulations.org/media/reglamento%20a%20la%20ley%20de%20urbanismo%20y%20construccion%20en%20lo%20relativo%20a%20parcelaciones%20y%20urbanizaciones%20habitacionales%20-%20d-70-91.pdf>
- OPAMSS. (2011, abril 4). LEY DE ORDENAMIENTO Y DESARROLLO TERRITORIAL. Gob.sv.  
[https://www.asamblea.gob.sv/sites/default/files/documents/decretos/171117\\_073012466\\_archivo\\_documento\\_legislativo.pdf](https://www.asamblea.gob.sv/sites/default/files/documents/decretos/171117_073012466_archivo_documento_legislativo.pdf)
- PUB home. (s/f). PUB, Singapore's National Water Agency. Recuperado el 20 de mayo de 2025, de <https://www.pub.gov.sg/>
- Congreso de la República de Colombia (2019). USO DEL AGUA LLUVIA. Gov.co. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/07/LINEAMIENTOS-USO-AGUAS-LLUVIAS.pdf>
- Ideam. (2019). NORMATIVIDAD SGI - NORMATIVIDAD SGI - IDEAM. Gov.co. <http://sgi.ideam.gov.co/normatividad-sg>
- Ideam. (2015). NORMATIVIDAD SGI - NORMATIVIDAD SGI - IDEAM. Gov.co. <http://sgi.ideam.gov.co/normatividad-sgi>
- Ideam. (2013). NORMATIVIDAD SGI - NORMATIVIDAD SGI - IDEAM. Gov.co. <http://sgi.ideam.gov.co/normatividad-sgi>

## **ANEXO A**

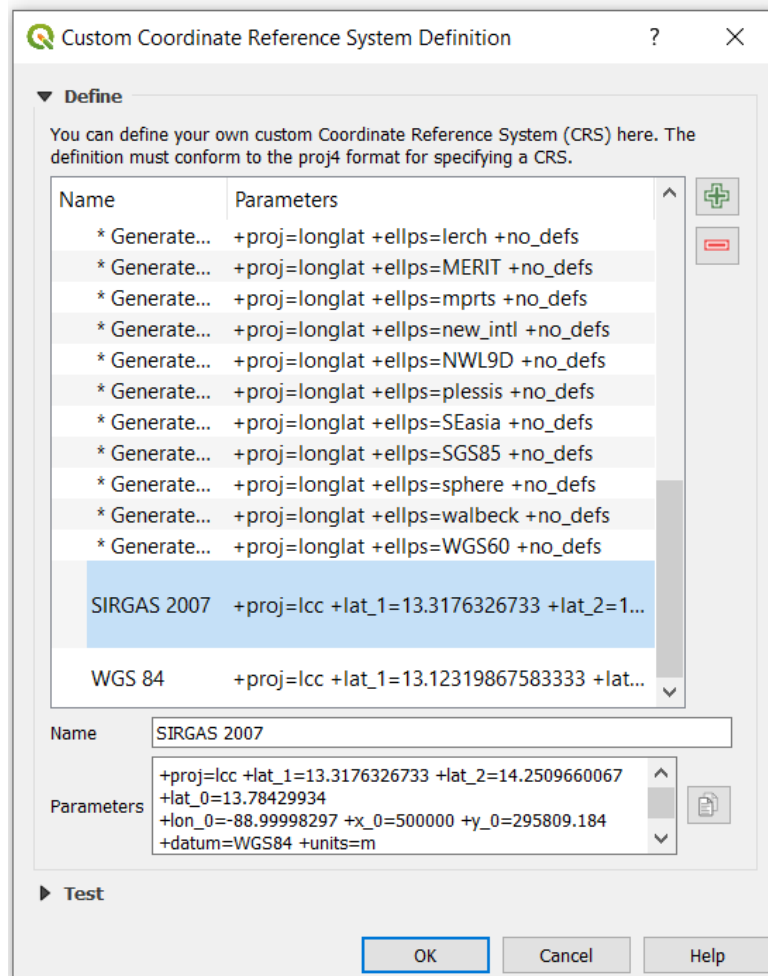
### **Obtención de las características morfométricas de la microcuenca mediante Software Qgis**

#### ***Delimitación de la microcuenca***

Primer paso, antes de trabajar con el modelo de elevación se debe de configurar un sistema de coordenadas de referencias, para El Salvador el sistema de referencia moderno es Sirgas 2007.

## Ilustración 1

### Definición del sistema de coordenadas de referencia personalizado

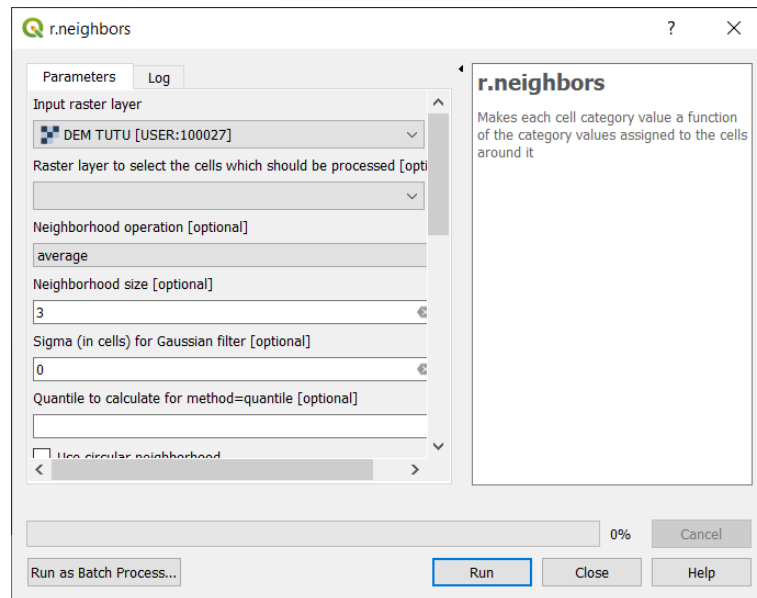


*Nota: Captura tomada de Software QGIS.*

El segundo paso es eliminar las celdas vacías con el comando `r.neighbors` y las depresiones con el comando `Fill sinks` `Xxl`

## Ilustración 2

### Herramienta para eliminar celdas vacías

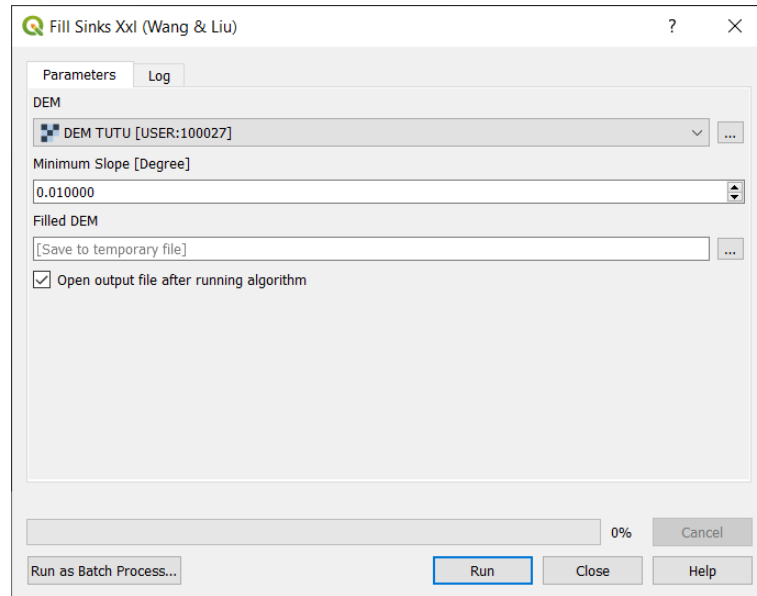


*Nota: Captura tomada de Software QGIS.*

Seleccionar el DEM proporcionado por las asesoras, en operación seleccionar el promedio y en el tamaño de celda vecina seleccionar 3, ya que será una cuadrícula de 3x3 para calcular el promedio de la información del pixel faltante.

### **Ilustración 3**

#### *Herramienta para eliminar depresiones*



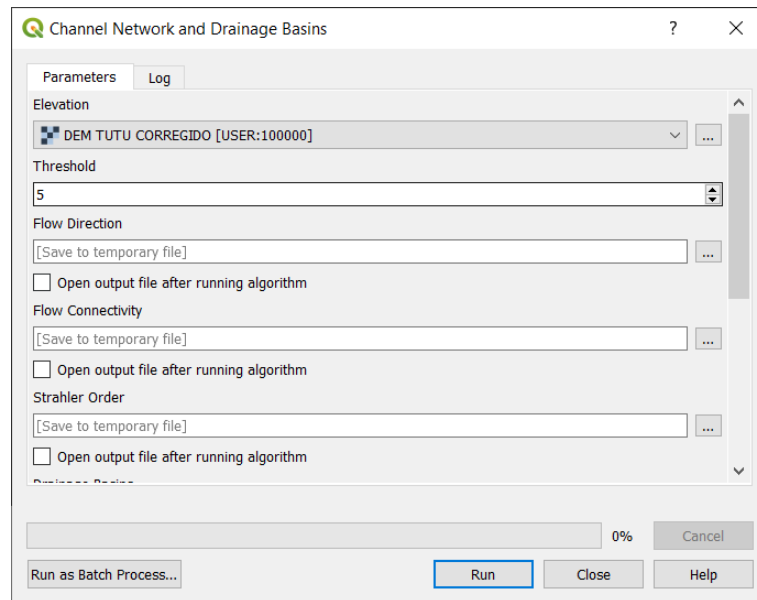
*Nota: Captura tomada de Software QGIS.*

Seleccionar el DEM corregido por r.neighbors y en pendiente mínima trabajar con 0.01 grados.

El tercer paso es determinar la red de drenaje con el comando Channel network and drainage basins

## Ilustración 4

### Red de canales y cuencas de drenaje

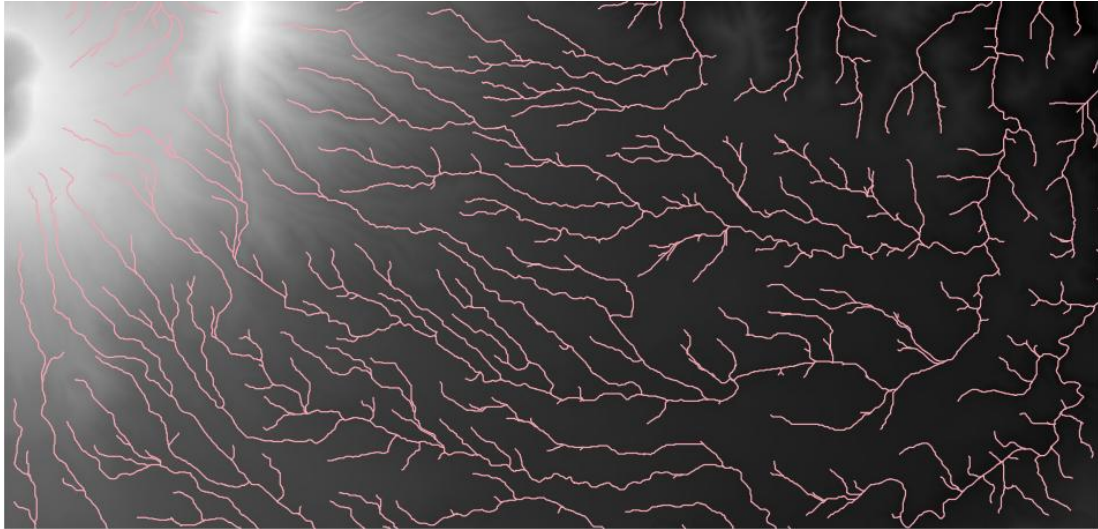


*Nota: Captura tomada de Software QGIS.*

Seleccionar el DEM corregido y elegir red de orden 5 porque la microcuenca es pequeña, dejar solo la casilla de canales activas

### **Ilustración 5**

*Resultado de la red de drenaje del DEM*

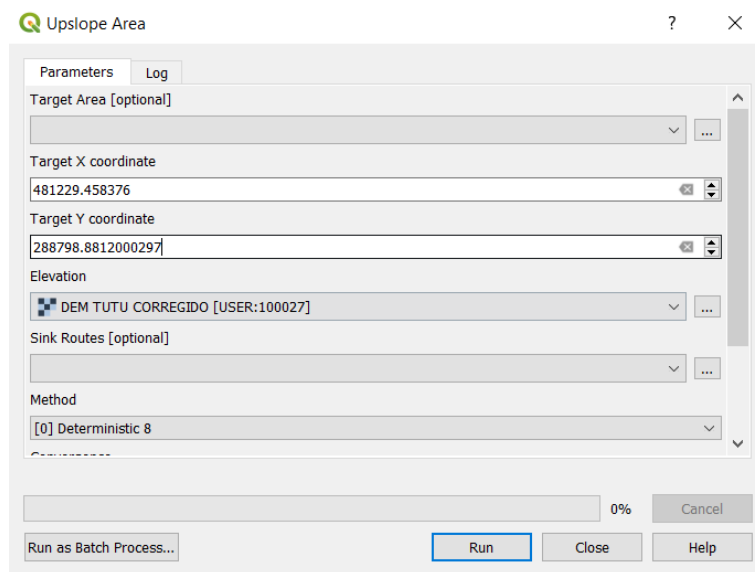


*Nota: Captura tomada de Software QGIS.*

Seleccionar el DEM corregido y elegir red de orden 5 porque la microcuenca es pequeña, dejar solo la casilla de canales activos

### **Ilustración 6**

*Delimitación del área de la microcuenca*

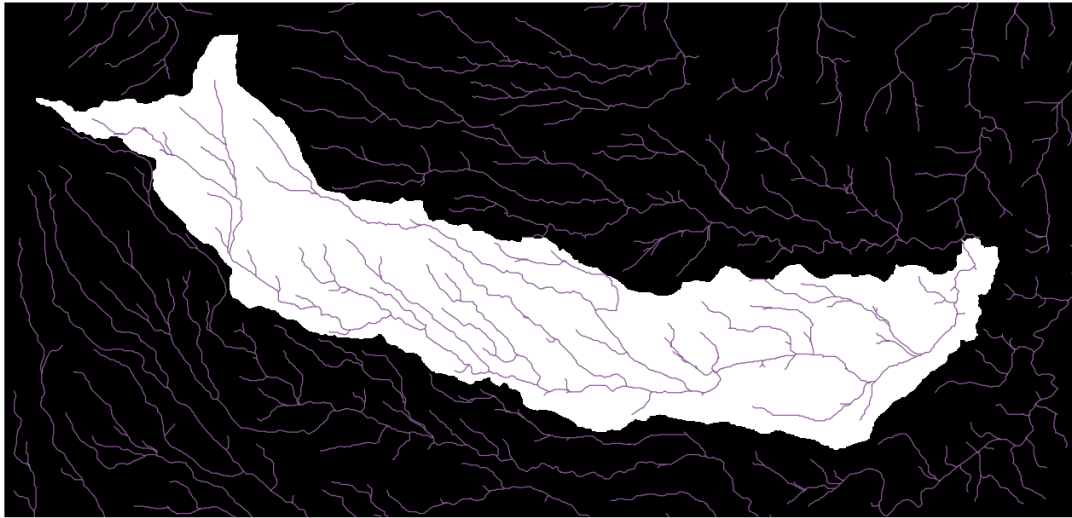


*Nota: Captura tomada de Software QGIS.*

Seleccionar el DEM corregido e ingresar las coordenadas de la salida de la microcuenca, en método dejarlo por defecto.

### ***Ilustración 7***

*Resultado de la microcuenca Tutunichapa delimitada*

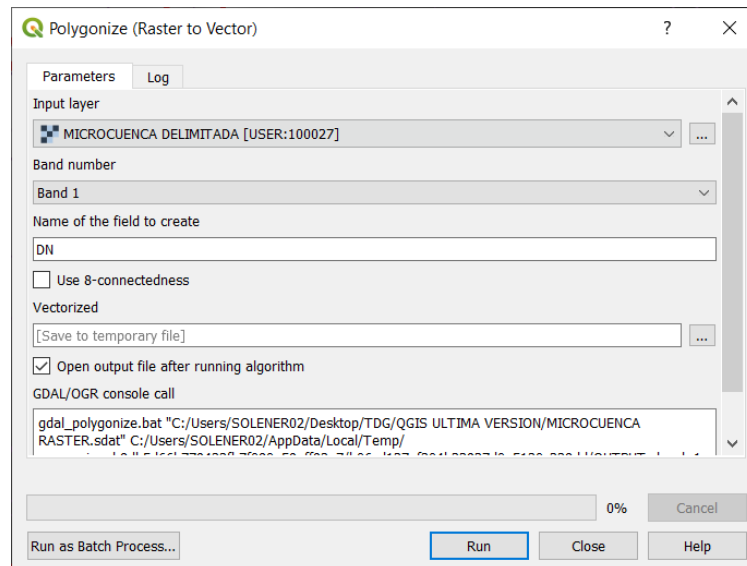


*Nota: Captura tomada de Software QGIS.*

El quinto paso es convertir el raster que se obtuvo como resultado de la delimitación de la microcuenca en un vector, con el fin de poder calcular las propiedades de la microcuenca más adelante, este procedimiento se realiza con el comando Polygonize

## Ilustración 8

### Poligonizar de ráster a vector

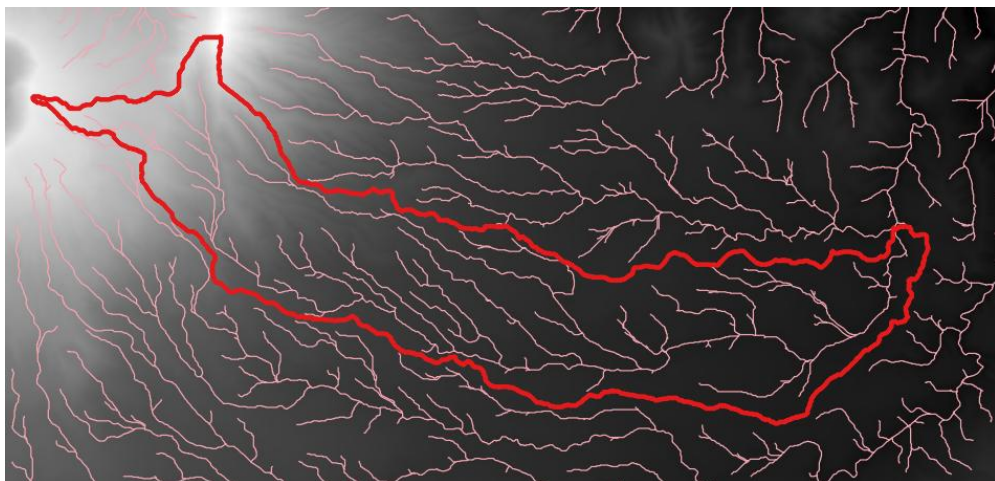


*Nota: Captura tomada de Software QGIS.*

Seleccionar el ráster obtenido de la delimitación de la microcuenca y dejar las demás opciones por defecto.

## Ilustración 9

### Resultado de la vectorización del ráster

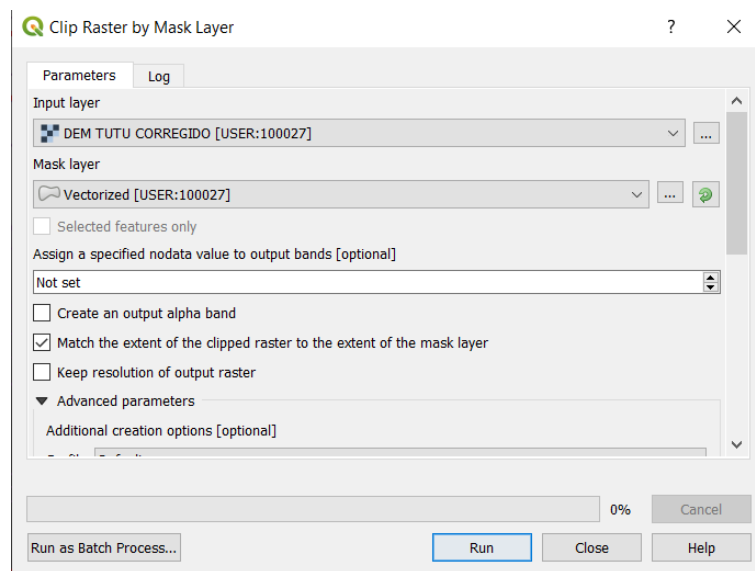


*Nota: Captura tomada de Software QGIS.*

El sexto paso es recortar el DEM con la forma de la microcuenca con el comando Clip raster by mask layer, y la red de drenaje específica de la microcuenca con el comando Clip.

### ***Ilustración 10***

#### ***Recortar DEM de la microcuenca Tutunichapa***

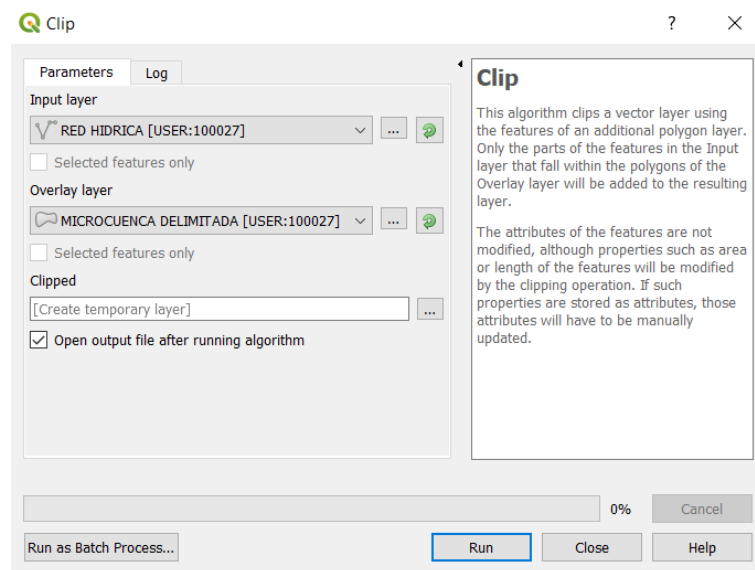


***Nota: Captura tomada de Software QGIS.***

Seleccionar el ráster corregido y como capa de máscara seleccionar el vector de la microcuenca.

### **Ilustración 11**

#### *Recortar red de drenaje de la microcuenca*

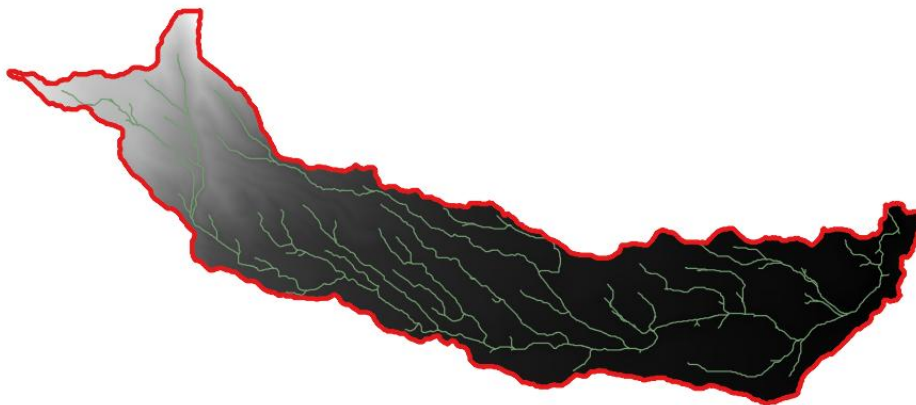


*Nota: Captura tomada de Software QGIS.*

En la capa de entrada seleccionar la red hídrica y en la capa que superpuesta seleccionar el vector de la microcuenca delimitada.

### **Ilustración 12**

#### *Resultado de la microcuenca y su red de drenaje*



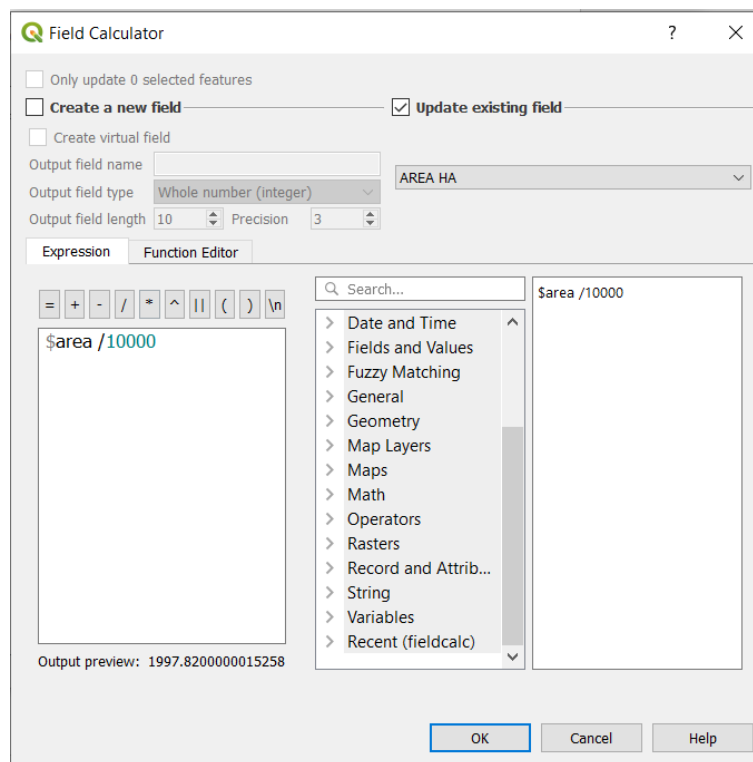
*Nota: Captura tomada de Software QGIS.*

## Área de la microcuencia

En la capa microcuencia delimitada abrir calculadora de atributos, seleccionar la función \$area y dividirla entre 10000 para obtener el área en hectáreas.

### Ilustración 13

Calculadora de campos, campo área.



*Nota: Captura tomada de Software QGIS.*

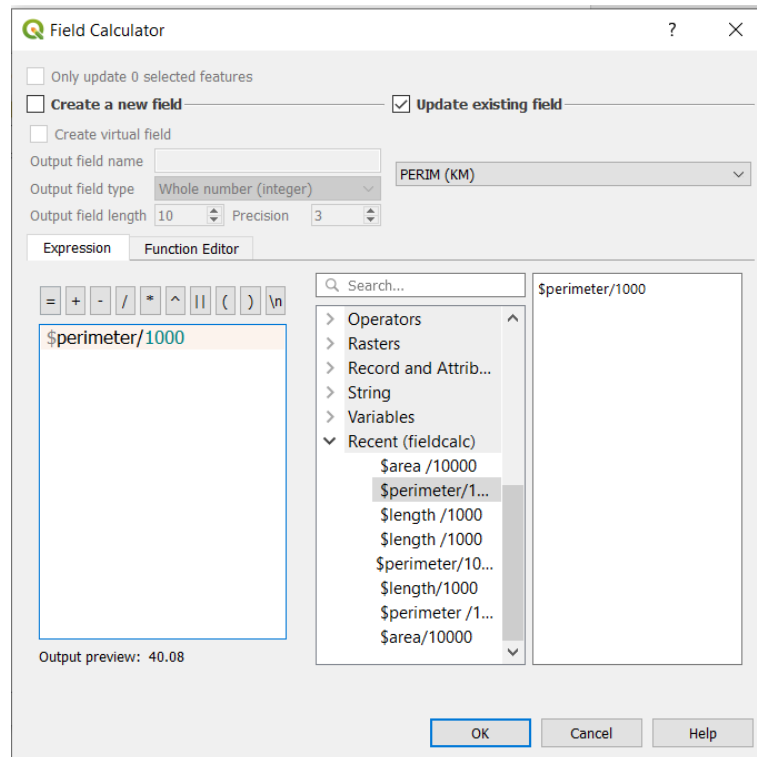
Área: 1997.82 hectáreas, 19.98 Km<sup>2</sup>

## Perímetro de la microcuencia

En la capa microcuencia delimitada, abrir calculadora de atributos, seleccionar la función \$perimeter y dividirla entre 1000 para obtener el perímetro en km.

### Ilustración 14

Calculadora de campos, campo perímetro.



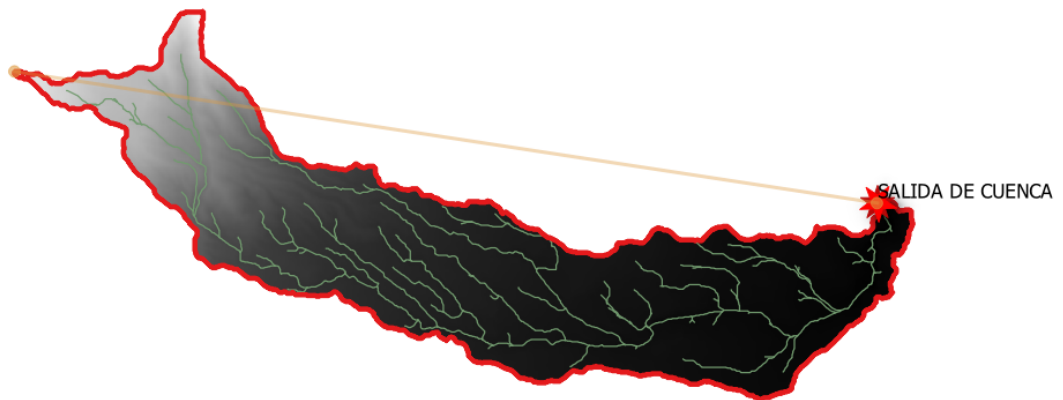
Nota: Captura tomada de Software QGIS.

Perímetro: 40.08 km.

## **Longitud axial**

### **Ilustración 15**

*Longitud axial de la microcuenca*



*Nota: Captura tomada de Software QGIS. Longitud tomada desde la desembocadura hasta el punto más alejado.*

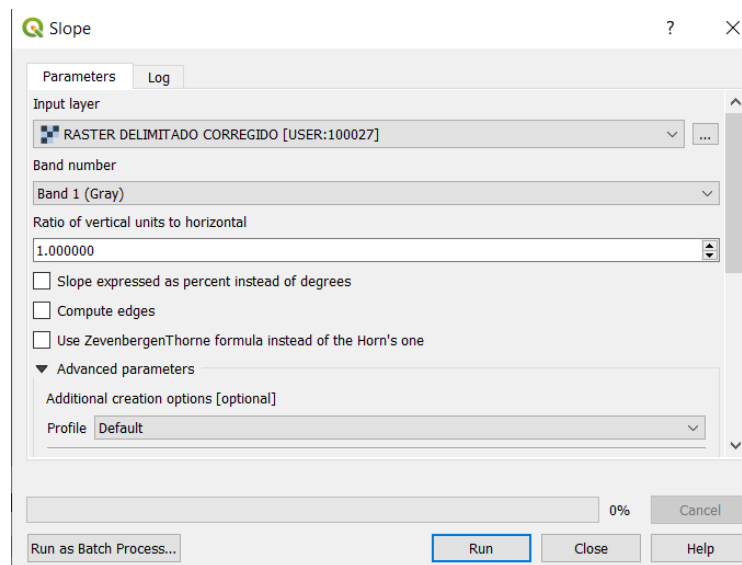
Longitud axial: 11.61 km.

## ***Pendiente media de la microcuenca***

El primer paso es dirigirse a la ficha ráster, análisis y pendiente.

### ***Ilustración 16***

#### ***Pendientes***

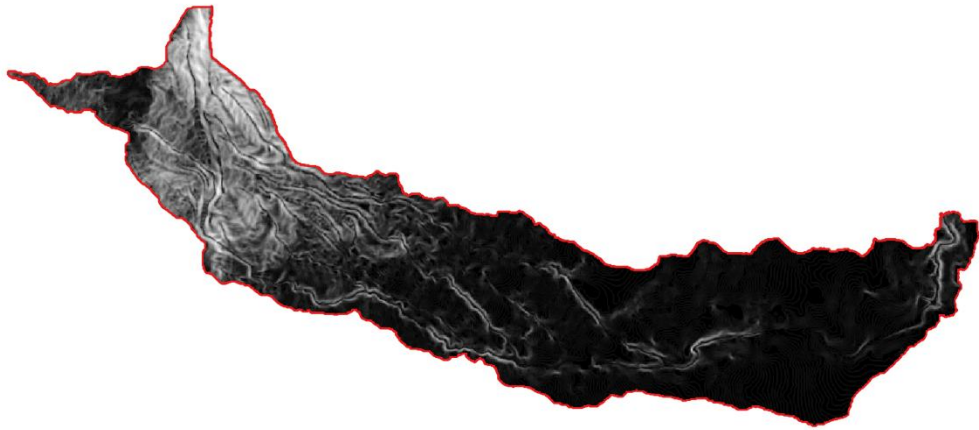


***Nota: Captura tomada de Software QGIS.***

Seleccionar el raster de la microcuenca delimitada, el mapa que se obtiene de pendientes se presenta en grados.

### **Ilustración 17**

*Mapa de pendientes en grados*

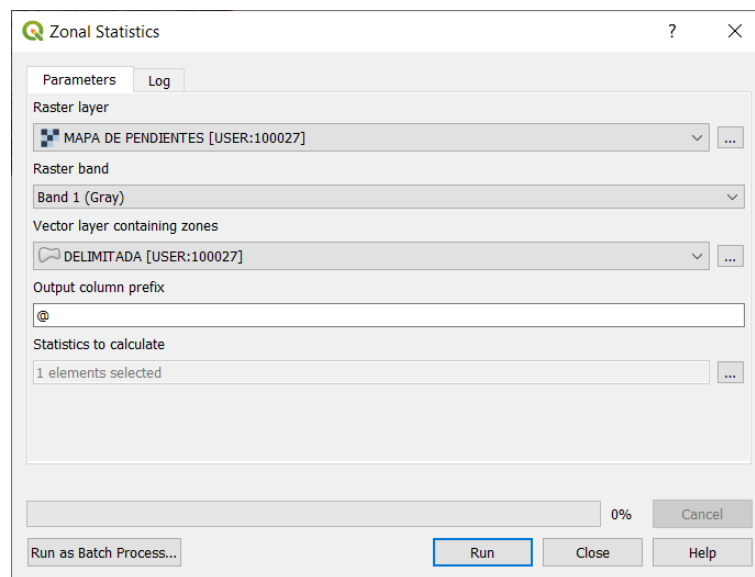


*Nota: Captura tomada de Software QGIS.*

El segundo paso es usar la herramienta estadística de zonas, seleccionar el mapa de pendientes, en la capa vectorial seleccionar la microcuenca delimitada y en estadísticas a calcular seleccionar media.

### **Ilustración 18**

*Estadísticas de zona*

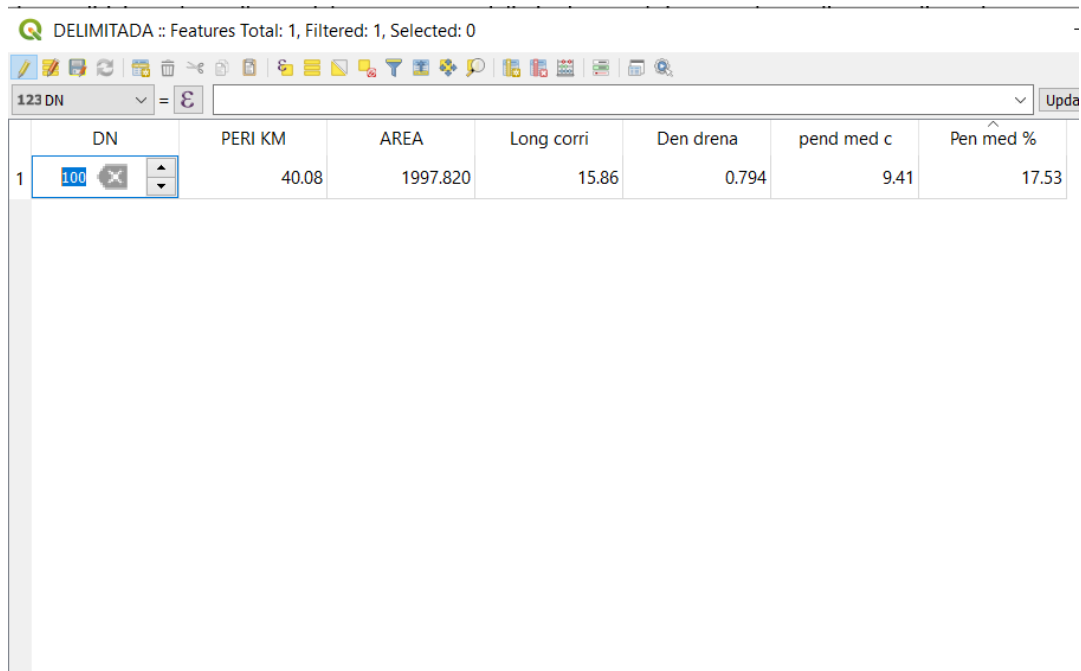


*Nota: Captura tomada de Software QGIS.*

Tercer paso es dirigirse a los atributos del vector microcuenca delimitada y se obtiene que la pendiente media.

### **Ilustración 19**

Atributos del vector microcuenca delimitada



	DN	PERI KM	AREA	Long corri	Den dreña	pend med c	Pen med %
1	100	40.08	1997.820	15.86	0.794	9.41	17.53

*Nota: Captura tomada de Software QGIS.*

La pendiente es de 9.41 grados y en porcentaje es del 17.52%.

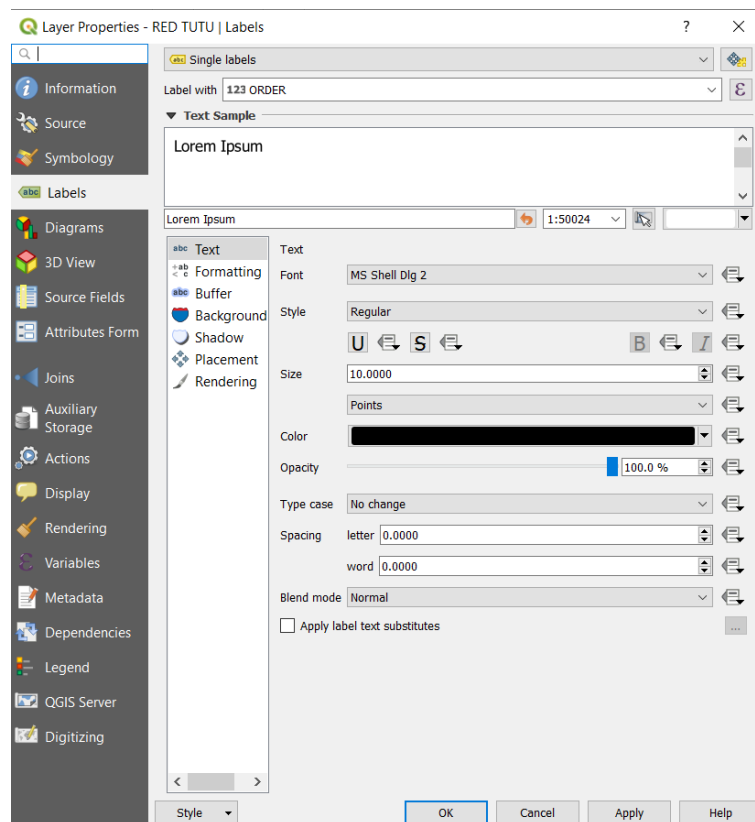
## Obtención de las características hidrológicas de la microcuenca mediante Software Qgis

### *Orden de las corrientes*

Seleccionar el vector red Tutunichapa, que es vector que se creó al ejecutar el comando Channel network and drainage basins , luego seleccionar etiqueta, etiqueta simple, orden.

### **Ilustración 20**

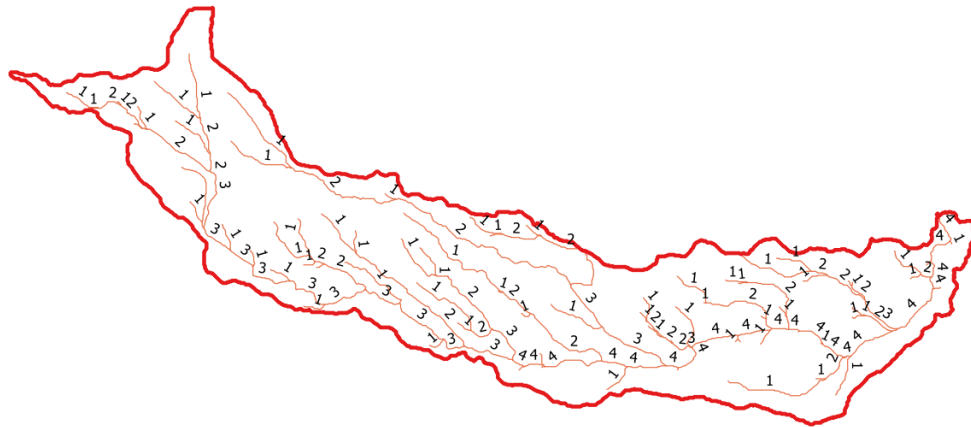
#### *Propiedades de capa red Tutunichapa*



*Nota: Captura tomada de Software QGIS.*

### **Ilustración 21**

*Red de corrientes microcuenca Tutunichapa*



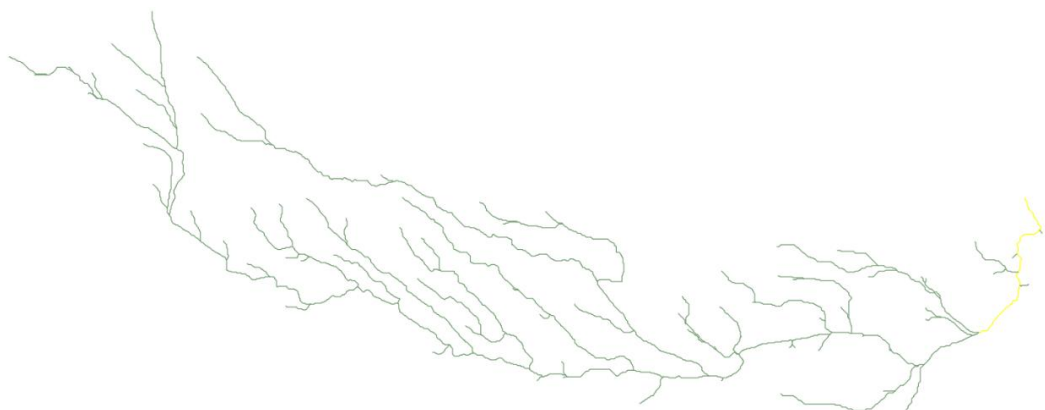
*Nota: Captura tomada de Software QGIS.*

### **Longitud del cauce principal**

El primer paso con la herramienta seleccionar, seleccionar el cauce principal del vector red Tutunichapa.

### **Ilustración 22**

*Selección del cauce principal de la red de drenaje de la microcuenca Tutunichapa.*



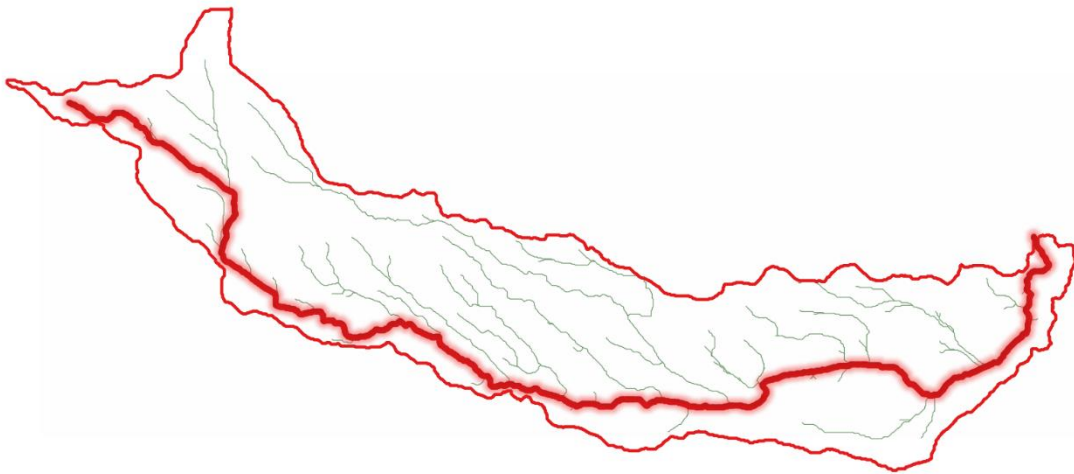
*Nota: Captura tomada de Software QGIS.*

Seleccionar todos los tramos que forman el cauce principal, tal como se muestra en color amarillo.

El segundo paso es exportar los elementos seleccionados como un archivo shape, y unir los tramos con el comando Merge selected features.

### ***Ilustración 23***

*Cauce principal microcuenca Tutunichapa.*



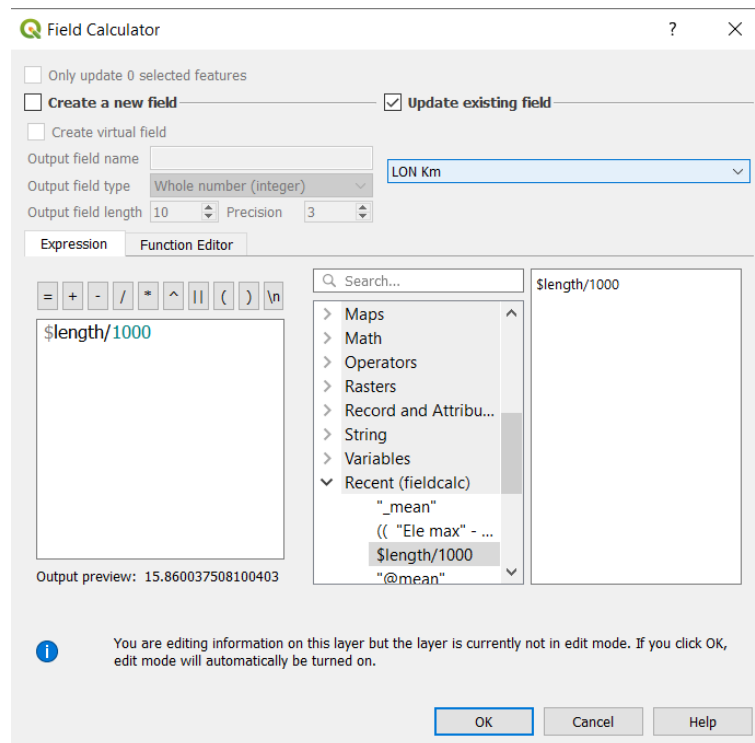
*Nota: Captura tomada de Software QGIS.*

Dar un color diferente al cauce principal para poder diferenciarlo.

El tercer paso es abrir tabla de atributos en el vector cauce principal y calcular la longitud con el comando \$length y dividirlo entre 1000 para obtener km.

### **Ilustración 24**

#### *Calculadora de atributos, atributo longitud.*



*Nota: Captura tomada de Software QGIS.*

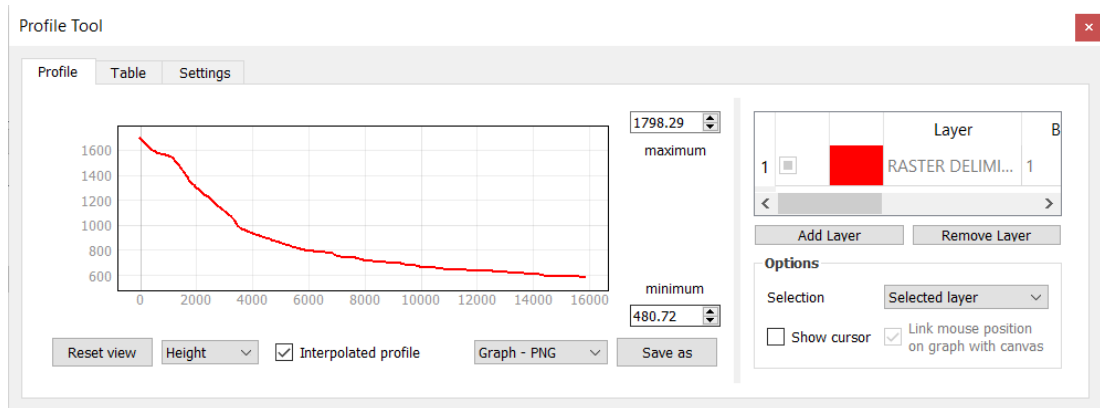
Longitud= 15.86 km.

### **Pendiente media del cauce principal**

Abrir la herramienta perfil y en ráster seleccionar el ráster corregido, y en selección seleccionar el vector cauce principal, la herramienta genera automáticamente el perfil y la tabla con las diferentes elevaciones.

## Ilustración 25

### Herramienta perfil



*Nota: Captura tomada de Software QGIS.*

## Ilustración 26

### Tabla de longitudes y elevaciones del cauce principal

Profile Tool

Profile Table Settings

RASTER\_DELIMITADO\_CORREGIDO\_band\_1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
1 0	10	24.1421	34.1421	48.2843	58.2843	68.2843	82.4264	96.5685	106.569	120.711	130.711	140.711	154.853	164.853	178.995	193.137	207.279	221.421	235.563	249.706	263.848	277.99	287.99	302.132	31
> 1695	1693	1690	1688	1685	1682	1680	1678	1676	1674	1672	1670	1668	1665	1662	1659	1656	1653	1650	1646	1642	1638	1635	1632	1629	16

Copy to clipboard Copy to clipboard (with coordinates) Create Temporary layer

*Nota: Captura tomada de Software QGIS.*

Luego se debe copiar los datos a Excel y tabularlos para poder aplicar el método de Taylor & Schwarz

La consideración que se tomó en cuenta para usar el método de Taylor & Schwarz y obtener una pendiente representativa es considerar pendientes mayores a 0.001.

*Longitud de cada orden de corriente*

Pendiente real (S)	Longitud real (L)	$L/S^{1/2}$
0.200	10.000	22.361
0.212	14.142	30.705
0.200	10.000	22.361
0.212	14.142	30.705
0.300	10.000	18.257
0.200	10.000	22.361
0.141	14.142	37.606
0.141	14.142	37.606
0.200	10.000	22.361
0.141	14.142	37.606
0.200	10.000	22.361
0.200	10.000	22.361
0.212	14.142	30.705
0.300	10.000	18.257
0.212	14.142	30.705
0.212	14.142	30.705
0.212	14.142	30.705
0.212	14.142	30.705
0.283	14.142	26.591
0.283	14.142	26.591
0.283	14.142	26.591
0.212	14.142	30.705
0.300	10.000	18.257
0.212	14.142	30.705
0.300	10.000	18.257
0.283	14.142	26.591
0.212	14.142	30.705
0.212	14.142	30.705
0.300	10.000	18.257
0.300	10.000	18.257
0.100	10.000	31.623
0.200	10.000	22.361
0.100	10.000	31.623
0.200	10.000	22.361
0.100	10.000	31.623
0.200	10.000	22.361
0.100	10.000	31.623
0.100	10.000	31.661
0.071	14.142	53.183

0.100	10.000	31.623
0.100	10.000	31.661
0.141	14.142	37.606
0.141	14.142	37.606
0.200	10.000	22.361
0.141	14.142	37.606
0.141	14.142	37.606
0.141	14.142	37.606
0.212	14.142	30.705
0.100	10.000	31.623
0.071	14.142	53.248
0.100	10.000	31.661
0.100	10.000	31.623
0.100	10.000	31.661
0.100	10.000	31.623
0.100	10.000	31.623
0.100	10.000	31.623
0.071	14.142	53.183
0.071	14.142	53.248
0.100	10.000	31.661
0.071	14.142	53.228
0.071	14.142	53.248
0.071	14.142	53.228
0.071	14.142	53.248
0.071	14.142	53.183
0.071	14.142	53.183
0.100	10.000	31.623
0.100	10.000	31.623
0.100	10.000	31.623
0.099	10.000	31.739
0.071	14.142	53.183
0.212	14.142	30.705
0.300	10.000	18.257
0.300	10.000	18.257
0.099	10.000	31.739
0.071	14.142	53.183
0.071	14.142	53.183
0.071	14.142	53.183
0.100	10.000	31.623
0.141	14.142	37.606
0.100	10.000	31.623
0.200	10.000	22.361
0.300	10.000	18.257
0.212	14.142	30.705

0.283	14.142	26.591
0.354	14.142	23.784
0.283	14.142	26.591
0.566	14.142	18.803
0.200	10.000	22.361
0.300	10.000	18.257
0.300	10.000	18.257
0.212	14.142	30.705
0.300	10.000	18.257
0.200	10.000	22.361
0.300	10.000	18.257
0.200	10.000	22.361
0.200	10.000	22.361
0.200	10.000	22.361
0.141	14.142	37.606
0.212	14.142	30.705
0.300	10.000	18.257
0.283	14.142	26.591
0.495	14.142	20.101
0.500	10.000	14.142
0.354	14.142	23.784
0.300	10.000	18.257
0.283	14.142	26.591
0.283	14.142	26.591
0.212	14.142	30.705
0.300	10.000	18.257
0.212	14.142	30.705
0.212	14.142	30.705
0.212	14.142	30.705
0.283	14.142	26.591
0.283	14.142	26.591
0.495	14.142	20.101
0.424	14.142	21.712
0.424	14.142	21.712
0.283	14.142	26.591
0.200	10.000	22.361
0.212	14.142	30.705
0.283	14.142	26.591
0.354	14.142	23.784
0.354	14.142	23.784
0.566	14.142	18.803
0.424	14.142	21.712
0.566	14.142	18.803
0.495	14.142	20.101

0.212	14.142	30.705
0.141	14.142	37.606
0.200	10.000	22.361
0.100	10.000	31.623
0.141	14.142	37.606
0.212	14.142	30.705
0.200	10.000	22.361
0.200	10.000	22.361
0.283	14.142	26.591
0.100	10.000	31.623
0.200	10.000	22.361
0.200	10.000	22.361
0.200	10.000	22.361
0.100	10.000	31.623
0.212	14.142	30.705
0.354	14.142	23.784
0.400	10.000	15.811
0.354	14.142	23.784
0.424	14.142	21.712
0.141	14.142	37.606
0.100	10.000	31.623
0.141	14.142	37.606
0.100	10.000	31.623
0.071	14.142	53.183
0.141	14.142	37.606
0.141	14.142	37.606
0.100	10.000	31.623
0.141	14.142	37.606
0.141	14.142	37.606
0.200	10.000	22.361
0.141	14.142	37.606
0.354	14.142	23.784
0.283	14.142	26.591
0.212	14.142	30.705
0.283	14.142	26.591
0.212	14.142	30.705
0.354	14.142	23.784
0.283	14.142	26.591
0.283	14.142	26.591
0.212	14.142	30.705
0.200	10.000	22.361
0.212	14.142	30.705
0.100	10.000	31.623
0.100	10.000	31.623

0.071	14.142	53.183
0.071	14.142	53.183
0.100	10.000	31.650
0.071	14.142	53.183
0.141	14.142	37.606
0.071	14.142	53.183
0.100	10.000	31.623
0.100	10.000	31.623
0.100	10.000	31.623
0.100	10.000	31.623
0.200	10.000	22.361
0.300	10.000	18.257
0.200	10.000	22.361
0.141	14.142	37.606
0.200	10.000	22.361
0.200	10.000	22.361
0.300	10.000	18.257
0.071	14.142	53.183
0.300	10.000	18.257
0.200	10.000	22.361
0.300	10.000	18.257
0.300	10.000	18.257
0.200	10.000	22.361
0.200	10.000	22.361
0.200	10.000	22.361
0.300	10.000	18.257
0.212	14.142	30.705
0.200	10.000	22.361
0.200	10.000	22.361
0.212	14.142	30.705
0.141	14.142	37.606
0.300	10.000	18.257
0.212	14.142	30.705
0.283	14.142	26.591
0.212	14.142	30.705
0.212	14.142	30.705
0.212	14.142	30.705
0.200	10.000	22.361
0.212	14.142	30.705
0.200	10.000	22.361
0.212	14.142	30.705
0.100	10.000	31.623
0.141	14.142	37.606
0.200	10.000	22.361

0.212	14.142	30.705
0.200	10.000	22.361
0.200	10.000	22.361
0.100	10.000	31.623
0.200	10.000	22.361
0.141	14.142	37.606
0.100	10.000	31.623
0.200	10.000	22.361
0.100	10.000	31.623
0.200	10.000	22.361
0.141	14.142	37.606
0.300	10.000	18.257
0.212	14.142	30.705
0.200	10.000	22.361
0.283	14.142	26.591
0.200	10.000	22.361
0.200	10.000	22.361
0.141	14.142	37.606
0.200	10.000	22.361
0.200	10.000	22.361
0.300	10.000	18.257
0.141	14.142	37.606
0.200	10.000	22.361
0.200	10.000	22.361
0.200	10.000	22.361
0.212	14.142	30.705
0.200	10.000	22.361
0.100	10.000	31.623
0.141	14.142	37.606
0.141	14.142	37.606
0.100	10.000	31.623
0.200	10.000	22.361
0.200	10.000	22.361
0.141	14.142	37.606
0.200	10.000	22.361
0.212	14.142	30.705
0.212	14.142	30.705
0.300	10.000	18.257
0.283	14.142	26.591
0.200	10.000	22.361
0.200	10.000	22.361
0.212	14.142	30.705
0.212	14.142	30.705
0.200	10.000	22.361

0.283	14.142	26.591
0.212	14.142	30.705
0.424	14.142	21.712
0.500	10.000	14.142
0.566	14.142	18.803
0.600	10.000	12.910
0.354	14.142	23.784
0.300	10.000	18.257
0.283	14.142	26.591
0.283	14.142	26.591
0.212	14.142	30.705
0.283	14.142	26.591
0.300	10.000	18.257
0.200	10.000	22.361
0.141	14.142	37.606
0.212	14.142	30.705
0.283	14.142	26.591
0.100	10.000	31.623
0.141	14.142	37.606
0.071	14.142	53.183
0.212	14.142	30.705
0.141	14.142	37.606
0.071	14.142	53.183
0.100	10.000	31.661
0.071	14.142	53.183
0.071	14.142	53.183
0.100	10.000	31.623
0.071	14.142	53.183
0.141	14.142	37.606
0.100	10.000	31.623
0.071	14.142	53.183
0.141	14.142	37.606
0.071	14.142	53.183
0.100	10.000	31.623
0.071	14.142	53.183
0.141	14.142	37.606
0.100	10.000	31.623
0.141	14.142	37.606
0.100	10.000	31.623
0.071	14.142	53.183
0.100	10.000	31.623
0.071	14.142	53.183
0.141	14.142	37.606
0.100	10.000	31.623

0.141	14.142	37.606
0.100	10.000	31.623
0.071	14.142	53.183
0.100	10.000	31.623
0.071	14.142	53.248
0.100	10.000	31.623
0.100	10.000	31.623
0.100	10.000	31.623
0.100	10.000	31.623
0.200	10.000	22.361
0.200	10.000	22.374
0.100	10.000	31.661
0.100	10.000	31.661
0.071	14.142	53.230
0.100	10.000	31.661
0.100	10.000	31.623
0.100	10.000	31.651
0.100	10.000	31.623
0.100	10.000	31.623
0.071	14.142	53.183
0.100	10.000	31.623
0.100	10.000	31.651
0.100	10.000	31.623
0.071	14.142	53.248
0.100	10.000	31.623
0.100	10.000	31.623
0.100	10.000	31.623
0.071	14.142	53.183
0.141	14.142	37.606
0.100	10.000	31.623
0.100	10.000	31.661
0.071	14.142	53.248
0.071	14.142	53.183
0.100	10.000	31.623
0.100	10.000	31.623
0.100	10.000	31.623
0.100	10.000	31.623
0.141	14.142	37.606
0.100	10.000	31.661
0.100	10.000	31.623
0.071	14.142	53.248
0.100	10.000	31.661
0.100	10.000	31.623
0.071	14.142	53.248

0.100	10.000	31.661
0.100	10.000	31.623
0.100	10.000	31.661
0.100	10.000	31.623
0.100	10.000	31.623
0.100	10.000	31.623
0.141	14.142	37.606
0.100	10.000	31.623
0.141	14.142	37.606
0.141	14.142	37.606
0.200	10.000	22.371
0.100	10.000	31.651
0.100	10.000	31.661
0.071	14.142	53.183
0.071	14.142	53.230
0.100	10.000	31.651
0.100	10.000	31.623
0.100	10.000	31.651
0.100	10.000	31.623
0.200	10.000	22.361
0.100	10.000	31.700
0.071	14.142	53.183
0.100	10.000	31.623
0.100	10.000	31.651
0.100	10.000	31.623
0.100	10.000	31.623
0.100	10.000	31.623
0.141	14.142	37.606
0.100	10.000	31.623
0.071	14.142	53.183
0.071	14.142	53.230
0.100	10.000	31.623
0.071	14.142	53.183
0.100	10.000	31.623
0.100	10.000	31.623
0.100	10.000	31.623
0.141	14.142	37.606
0.100	10.000	31.661
0.071	14.142	53.248
0.071	14.142	53.230
0.100	10.000	31.661
0.100	10.000	31.651
0.100	10.000	31.651
0.100	10.000	31.651

0.100	10.000	31.623
0.100	10.000	31.661
0.071	14.142	53.183
0.100	10.000	31.623
0.100	10.000	31.623
0.100	10.000	31.623
0.100	10.000	31.623
0.200	10.000	22.361
0.100	10.000	31.623
0.212	14.142	30.705
0.100	10.000	31.661
0.071	14.142	53.248
0.071	14.142	53.248
0.100	10.000	31.661
0.071	14.142	53.183
0.071	14.142	53.248
0.100	10.000	31.623
0.100	10.000	31.661
0.100	10.000	31.623
0.100	10.000	31.623
0.100	10.000	31.623
0.100	10.000	31.661
0.100	10.000	31.623
0.071	14.142	53.183
0.071	14.142	53.248
0.100	10.000	31.623
0.071	14.142	53.248
0.100	10.000	31.623
0.071	14.142	53.183
0.100	10.000	31.623
0.071	14.142	53.230
0.100	10.000	31.690
0.100	10.000	31.661
0.071	14.142	53.183
0.071	14.142	53.183
0.100	10.000	31.623
0.100	10.000	31.623
0.071	14.142	53.183
0.071	14.142	53.183
0.141	14.142	37.629
0.070	14.142	53.295
0.070	14.142	53.456
0.070	14.142	53.361
0.070	14.142	53.390

0.070	14.142	53.295
0.070	14.142	53.390
0.070	14.142	53.277
0.070	14.142	53.295
0.199	10.000	22.428
0.070	14.142	53.456
0.070	14.142	53.277
0.070	14.142	53.361
0.070	14.142	53.426
0.070	14.142	53.343
0.070	14.142	53.295
0.070	14.142	53.295
0.071	14.142	53.248
0.070	14.142	53.343
0.070	14.142	53.390
0.141	14.142	37.606
0.212	14.142	30.705
0.212	14.142	30.705
0.200	10.000	22.361
0.141	14.142	37.606
0.100	10.000	31.623
0.071	14.142	53.183
0.141	14.142	37.606
0.141	14.142	37.606
0.200	10.000	22.374
0.071	14.142	53.183
0.071	14.142	53.230
0.071	14.142	53.248
0.071	14.142	53.183
0.100	10.000	31.661
0.100	10.000	31.623
0.071	14.142	53.183
0.100	10.000	31.651
0.100	10.000	31.623
0.099	10.000	31.718
0.070	14.142	53.456
0.099	10.000	31.728
0.099	10.000	31.785
0.099	10.000	31.746
0.070	14.142	53.456
0.070	14.142	53.438
0.070	14.142	53.420
0.100	10.000	31.700
0.070	14.142	53.390

0.071	14.142	53.248
0.100	10.000	31.623
0.100	10.000	31.623
0.100	10.000	31.623
0.100	10.000	31.623
0.100	10.000	31.623
0.071	14.142	53.183
0.100	10.000	31.623
0.141	14.142	37.606
0.100	10.000	31.623
0.100	10.000	31.623
0.100	10.000	31.623
0.071	14.142	53.248
0.071	14.142	53.183
0.071	14.142	53.230
0.071	14.142	53.248
0.100	10.000	31.623
0.100	10.000	31.623
0.141	14.142	37.606
0.100	10.000	31.661
0.069	14.142	53.764
0.070	14.142	53.438
0.070	14.142	53.379
0.070	14.142	53.361
0.070	14.142	53.456
0.099	10.000	31.785
0.070	14.142	53.438
0.099	10.000	31.739
0.099	10.000	31.718
0.070	14.142	53.361
0.070	14.142	53.379
0.099	10.000	31.774
0.099	10.000	31.718
0.099	10.000	31.728
0.070	14.142	53.313
0.070	14.142	53.343
0.070	14.142	53.343
0.100	10.000	31.690
0.096	10.000	32.265
0.071	14.142	53.183
0.100	10.000	31.651
0.071	14.142	53.248
0.071	14.142	53.183
0.100	10.000	31.623

0.212	14.142	30.705
0.199	10.000	22.394
0.070	14.142	53.343
0.099	10.000	31.735
0.070	14.142	53.372
0.070	14.142	53.372
0.099	10.000	31.746
0.099	10.000	31.728
0.099	10.000	31.718
0.070	14.142	53.277
0.070	14.142	53.295
0.100	10.000	31.690
0.100	10.000	31.623
0.100	10.000	31.651
0.071	14.142	53.248
0.100	10.000	31.661
0.100	10.000	31.623
0.100	10.000	31.623
0.100	10.000	31.623
0.100	10.000	31.651
0.141	14.142	37.606
0.100	10.000	31.623
0.069	14.142	53.764
0.099	10.000	31.803
0.099	10.000	31.814
0.070	14.142	53.438
0.099	10.000	31.831
0.099	10.000	31.774
0.070	14.142	53.504
0.098	10.000	31.864
0.099	10.000	31.818
0.100	10.000	31.623
0.100	10.000	31.623
0.071	14.142	53.183
0.071	14.142	53.183
0.100	10.000	31.623
0.071	14.142	53.183
0.100	10.000	31.623
0.100	10.000	31.623
0.071	14.142	53.183
0.200	10.000	22.374
0.068	14.142	54.071
0.068	14.142	54.095
0.069	14.142	53.910
0.069	14.142	53.678

0.070	14.142	53.600
0.097	10.000	32.095
0.097	10.000	32.125
0.069	14.142	53.727
0.096	10.000	32.272
0.070	14.142	53.438
0.099	10.000	31.757
0.099	10.000	31.746
0.070	14.142	53.295
0.071	14.142	53.248
0.070	14.142	53.313
0.070	14.142	53.313
0.070	14.142	53.390
0.070	14.142	53.361
0.070	14.142	53.325
0.070	14.142	53.295
0.070	14.142	53.643
0.070	14.142	53.504
0.070	14.142	53.408
0.070	14.142	53.420
0.070	14.142	53.379
0.070	14.142	53.379
0.070	14.142	53.426
0.070	14.142	53.492
0.070	14.142	53.390
0.070	14.142	53.504
0.070	14.142	53.552
0.070	14.142	53.408
0.070	14.142	53.559
0.099	10.000	31.757
0.100	10.000	31.700
0.070	14.142	53.361
0.070	14.142	53.504
0.070	14.142	53.426
0.069	14.142	53.844
0.071	14.142	53.248
0.071	14.142	53.248
0.071	14.142	53.248
0.071	14.142	53.183
0.071	14.142	53.248
0.071	14.142	53.183
0.071	14.142	53.183
0.071	14.142	53.183
0.100	10.000	31.623

0.071	14.142	53.183
0.100	10.000	31.651
0.068	14.142	54.145
0.069	14.142	53.849
0.069	14.142	53.667
0.097	10.000	32.111
0.098	10.000	31.979
0.098	10.000	31.950
0.097	10.000	32.030
0.097	10.000	32.034
0.069	14.142	53.966
0.071	14.142	53.248
0.424	7.071	10.856
0.299	10.000	18.298

Nota: Elaboración propia con datos obtenidos de QGIS

*Método Taylor & Schwarz*

SUMATORIA DE LONGITUD REAL	7580.84
SUMATORIA DE $L/S^{1/2}$	22285.87
PENDIENTE %	11.57

Nota: Elaboración propia con datos obtenidos de QGIS

Pendiente es de 11.57%, 6.60 grados.

## **ANEXO B**

Mapa de ubicación de la microcuenca Tutunichapa

Mapa del ráster de la microcuenca Tutunichapa

Mapa pedológico de la microcuenca Tutunichapa

Mapa de uso de suelos del año 2024 de la microcuenca Tutunichapa

Mapa de pendientes de la microcuenca Tutunichapa

Mapa de patrón de drenaje de la microcuenca Tutunichapa

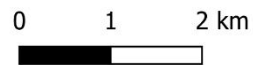
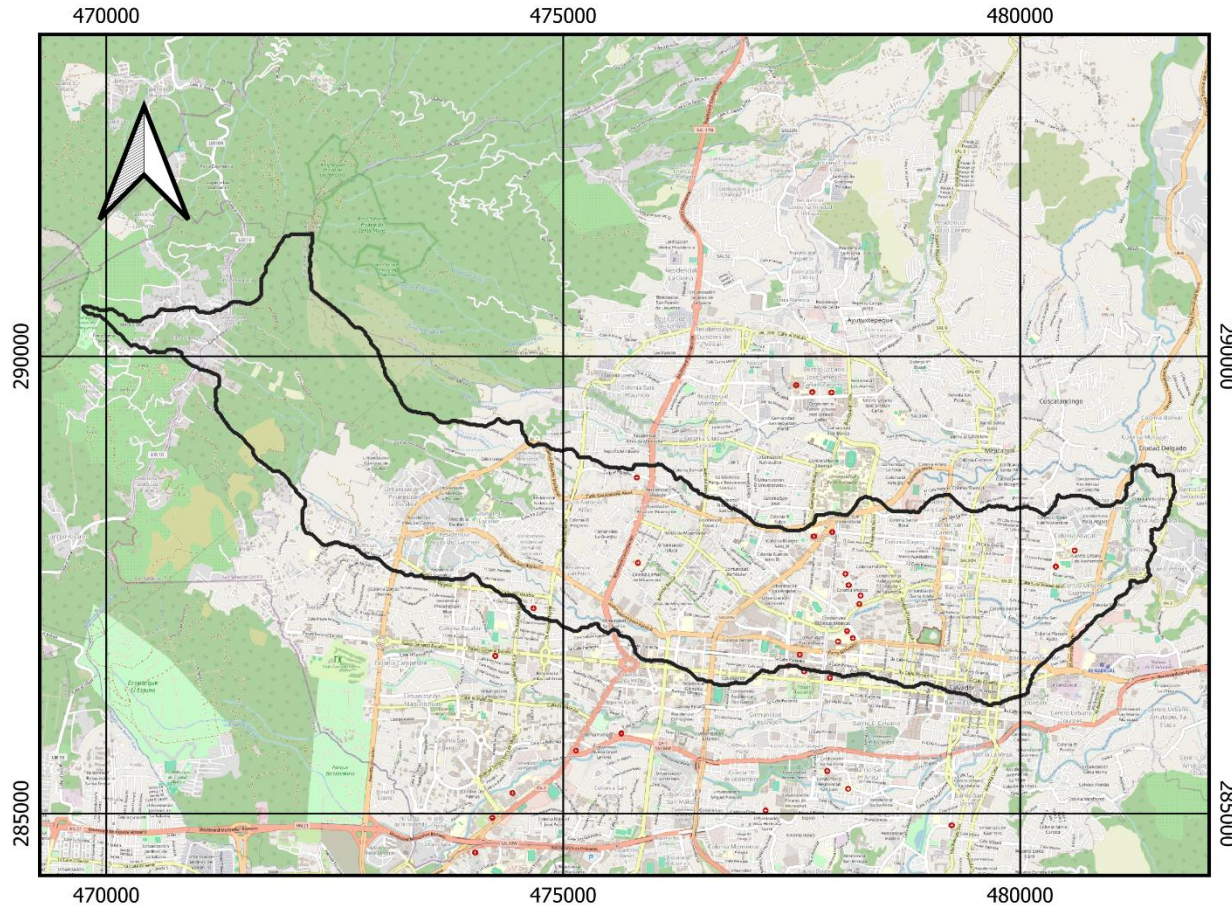
Mapa de orden de corrientes de la microcuenca Tutunichapa

Mapa de recarga potencial anual de la microcuenca Tutunichapa

Mapa de inundación de la microcuenca Tutunichapa

Mapa de Ubicaciones Propuestas para Lagunas de Infiltración

### MAPA DE UBICACION DE LA MICROCUENCA TUTUNICHAPA SOBRE IMAGEN SATELITAL



ESCALA 1:63000

SISTEMA DE COORDENADAS DE REFERENCIA SIRGAS 2007

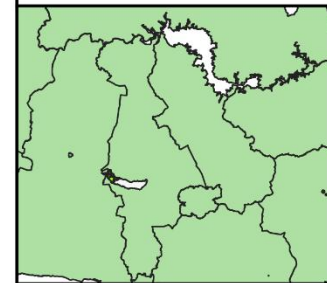
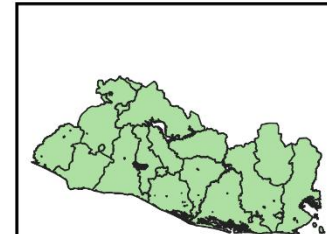


ESTUDIO TÉCNICO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE MEDIDAS ENFOCADAS EN LA REDUCCIÓN DEL IMPACTO HIDROLÓGICO EN LA MICROCUENCA TUTUNICHAPA

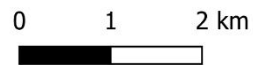
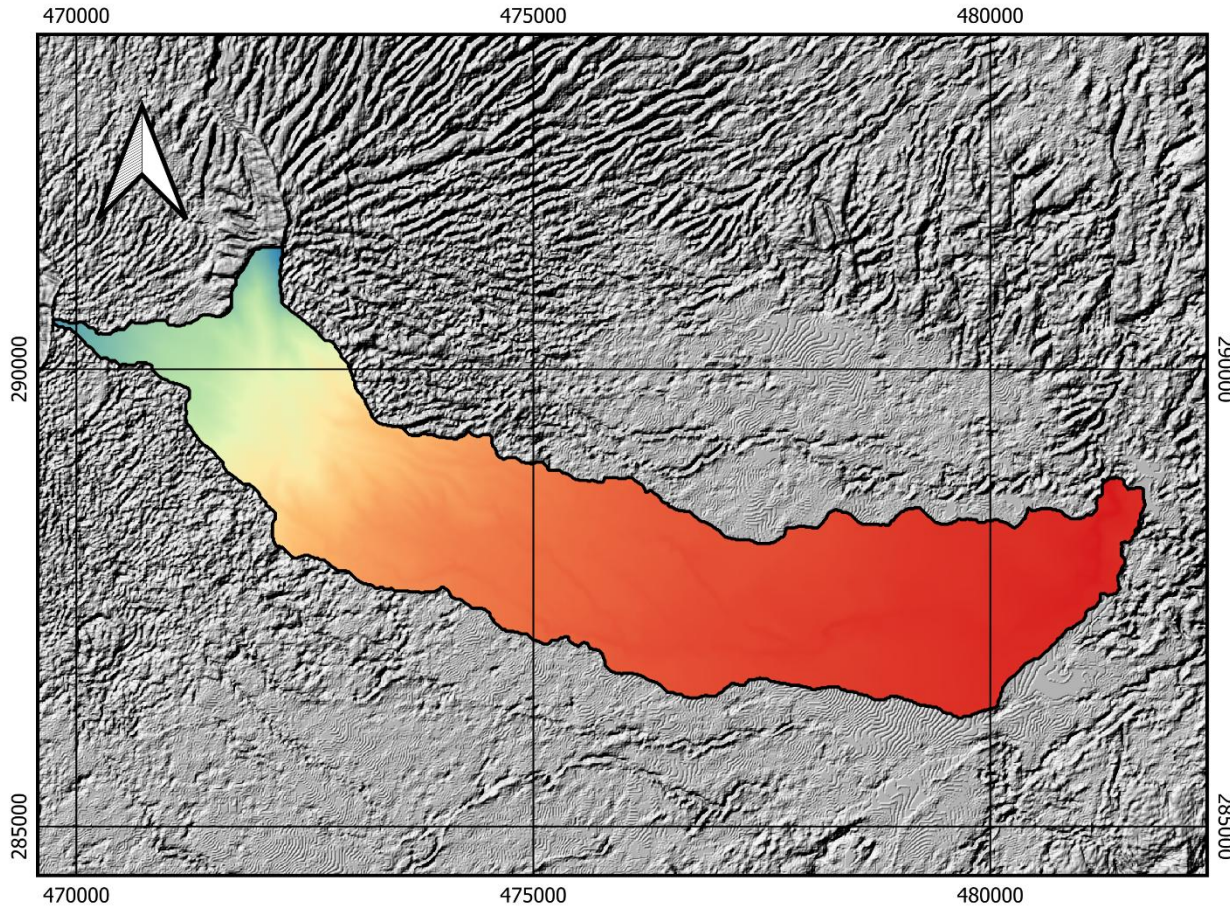
#### LEYENDA

▭ PARTEAGUAS

#### MAPA DE UBICACIÓN MICROCUENCA TUTUNICHAPA



### MAPA DEL RASTER DE LA MICROCUENCA TUTUNICHAPA



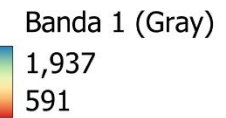
ESCALA 1:63000

SISTEMA DE COORDENADAS DE REFERENCIA SIRGAS 2007



ESTUDIO TÉCNICO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE MEDIDAS ENFOCADAS EN LA REDUCCIÓN DEL IMPACTO HIDROLÓGICO EN LA MICROCUENCA TUTUNICHAPA

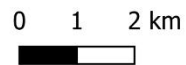
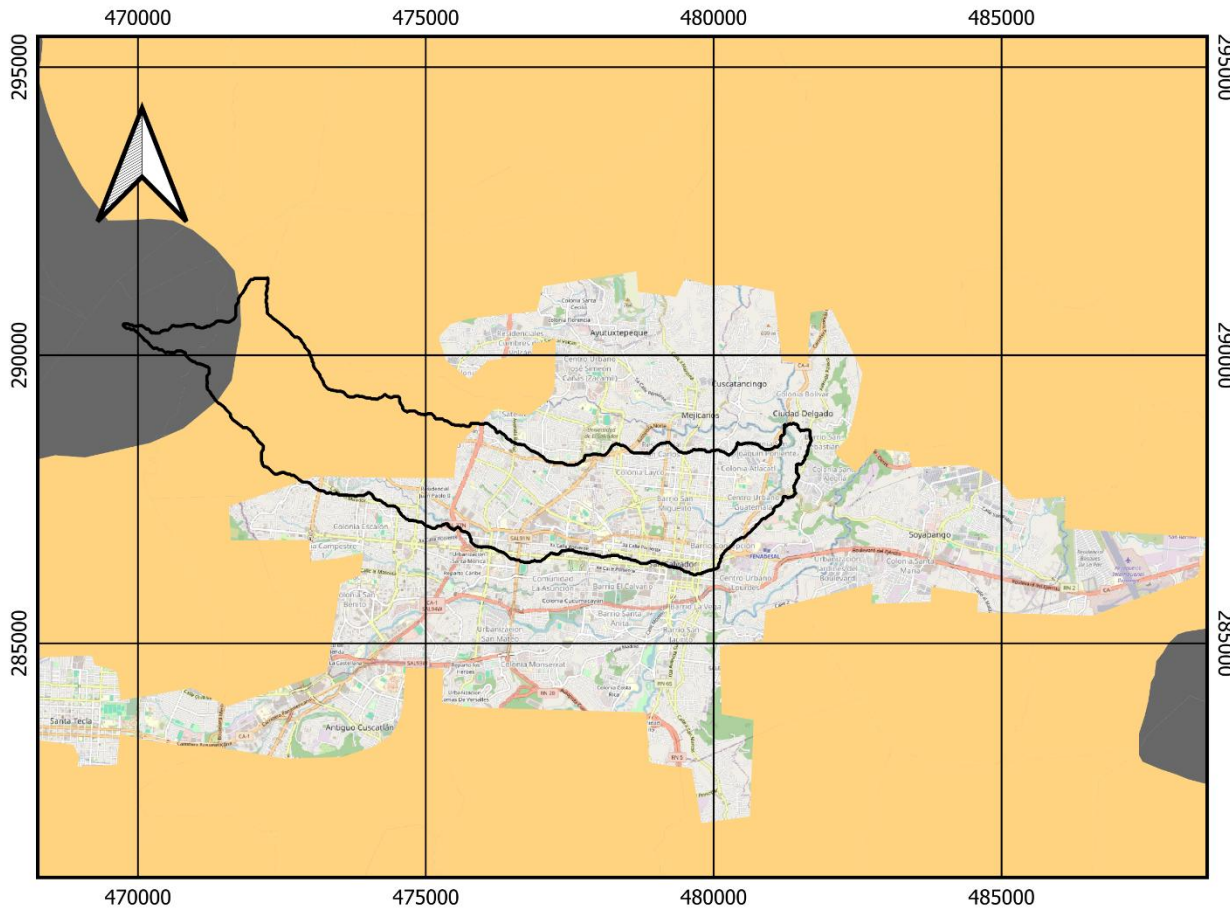
#### LEYENDA (m)



#### MAPA DE UBICACIÓN MICROCUENCA TUTUNICHAPA



### MAPA PEDOLÓGICO DE LA MICROCUENCA TUTUNICHAPA






ESCALA 1:100000

SISTEMA DE COORDENADAS DE REFERENCIA SIRGAS 2007

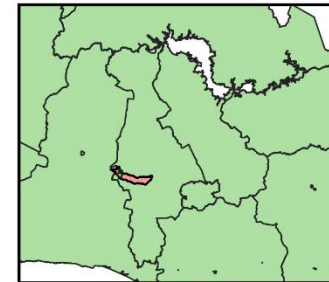


ESTUDIO TECNICO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE MEDIDAS ENFOCADAS EN LA REDUCCIÓN DEL IMPACTO HIDROLOGICO EN LA MICROCUENCA TUTUNICHAPA

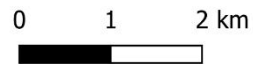
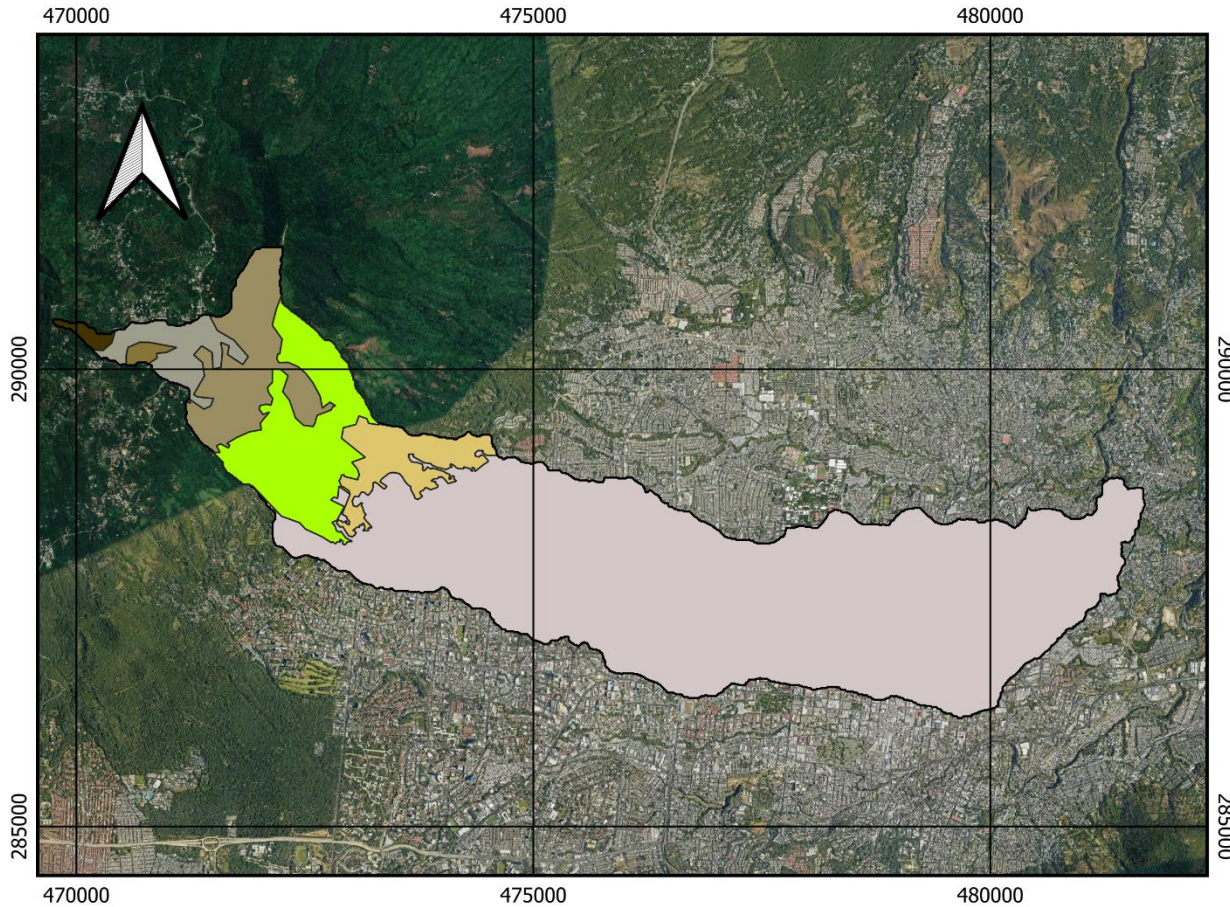
#### LEYENDA

-  DELIMITADA
-  LITOSOLES
-  ANDISOLES

#### MAPA DE UBICACIÓN MICROCUENCA TUTUNICHAPA



### MAPA DE USO DE SUELOS DE LA MICROCUENCA TUTUNICHAPA



ESCALA 1:63000

SISTEMA DE COORDENADAS DE REFERENCIA SIRGAS 2007

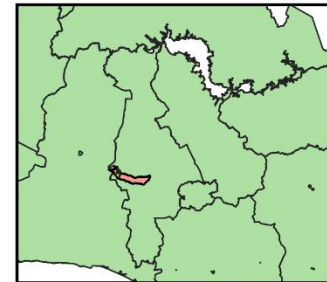


ESTUDIO TECNICO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE MEDIDAS ENFOCADAS EN LA REDUCCIÓN DEL IMPACTO HIDROLOGICO EN LA MICROCUENCA TUTUNICHAPA

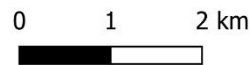
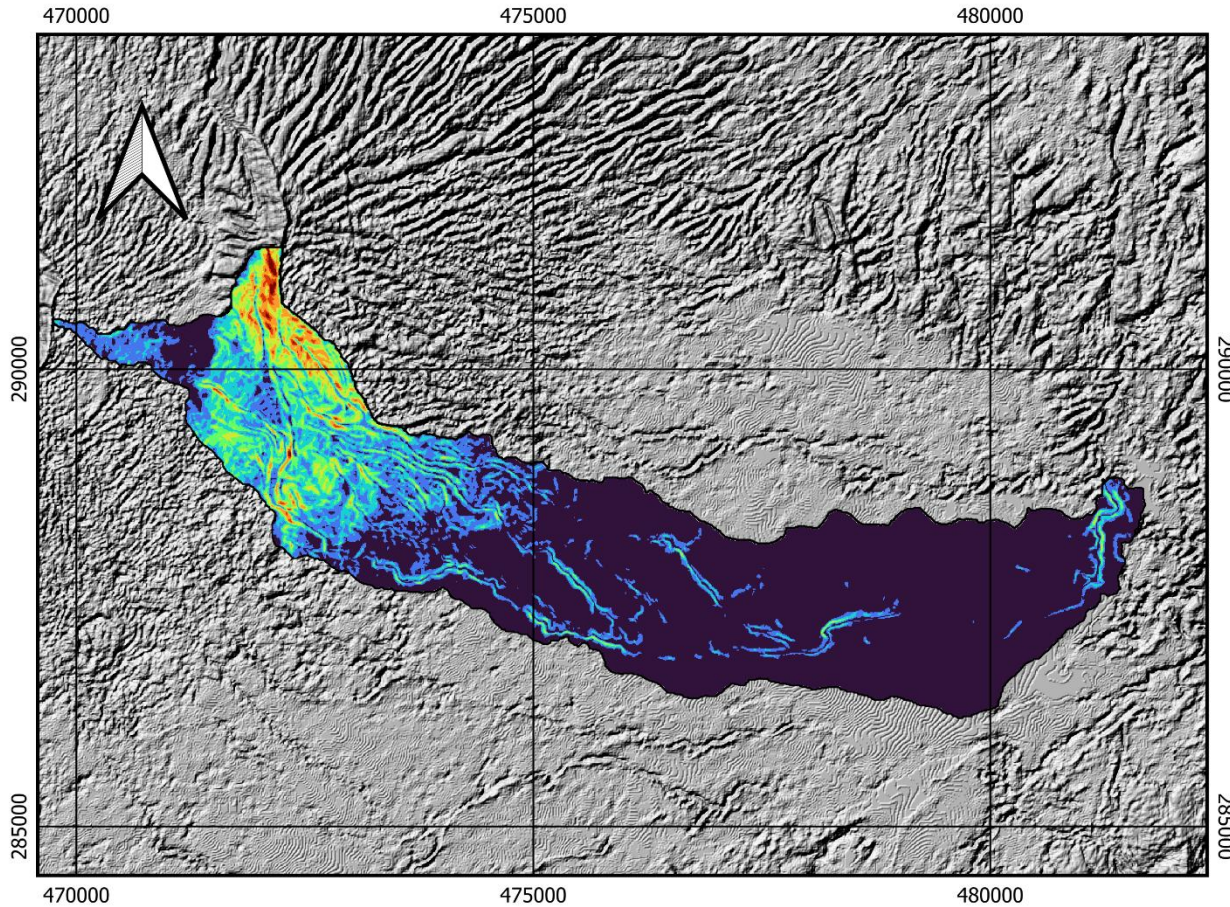
#### LEYENDA

-  PASTOS NATURALES
-  CAFÉ 1
-  CAFÉ 2
-  CAFÉ 3
-  CAFÉ 4
-  URBANIZACIÓN 1
-  URBANIZACIÓN 2

#### MAPA DE UBICACIÓN MICROCUENCA TUTUNICHAPA



### MAPA DE PENDIENTES EN PORCENTAJE DE LA MICROCUENCA TUTUNICHAPA



ESCALA 1:63000









SISTEMA DE COORDENADAS DE REFERENCIA SIRGAS 2007



ESTUDIO TECNICO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE MEDIDAS ENFOCADAS EN LA REDUCCIÓN DEL IMPACTO HIDROLOGICO EN LA MICROCUENCA TUTUNICHAPA

#### LEYENDA

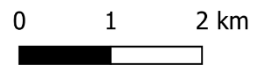
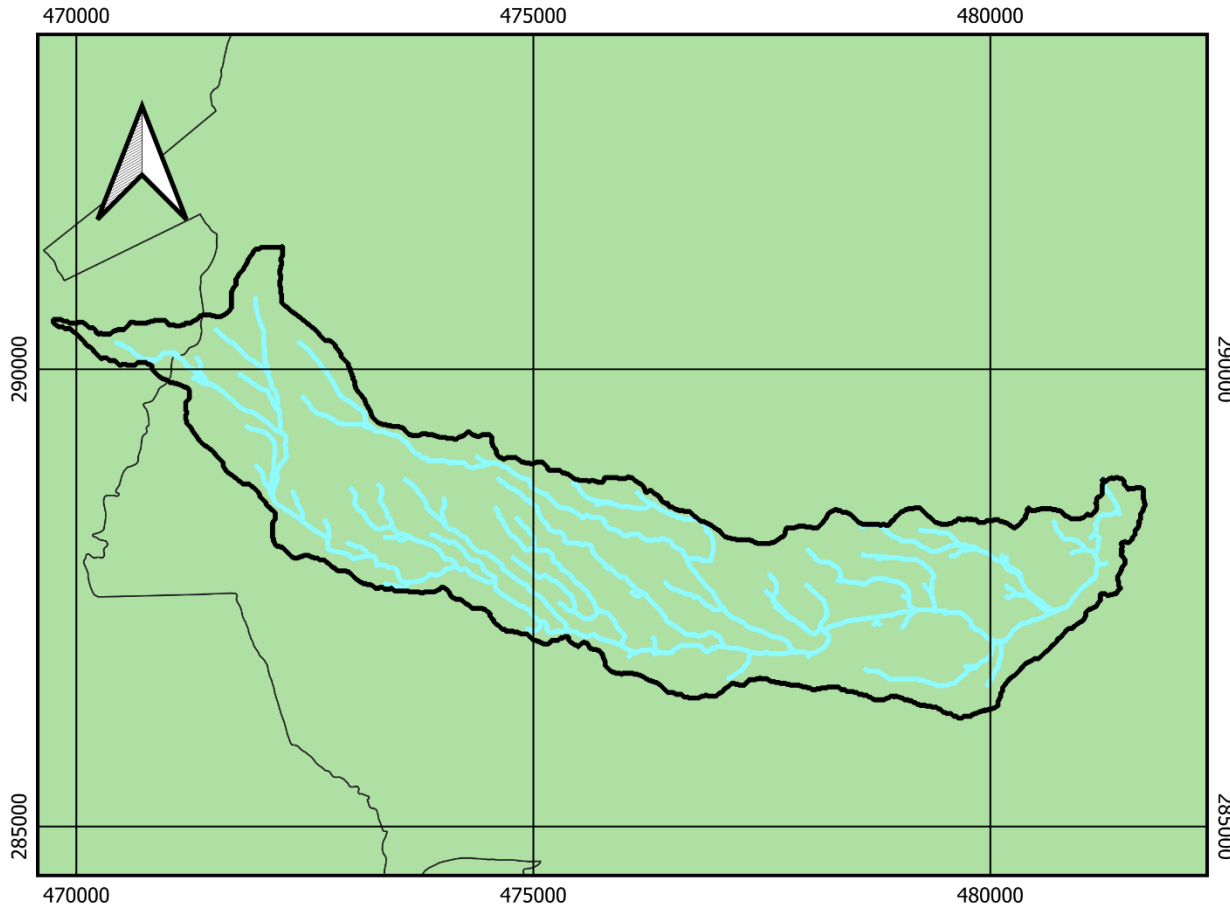
Banda 1 (Gray)

-  <= 16%
-  16 - 32%
-  32 - 47%
-  47 - 63%
-  63 - 79%
-  79 - 95%
-  95 - 110%
-  110%-126%

#### MAPA DE UBICACIÓN MICROCUENCA TUTUNICHAPA



### MAPA DE PATRON DE DRENAJE DE LA MICROCUENCA TUTUNICHAPA



ESCALA 1:63000

SISTEMA DE COORDENADAS DE REFERENCIA SIRGAS 2007

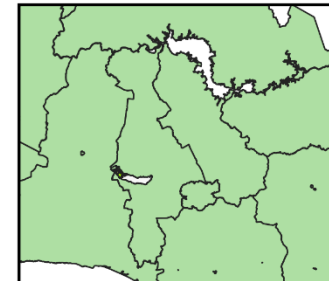


ESTUDIO TECNICO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE MEDIDAS ENFOCADAS EN LA REDUCCIÓN DEL IMPACTO HIDROLOGICO EN LA MICROCUENCA TUTUNICHAPA

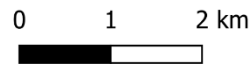
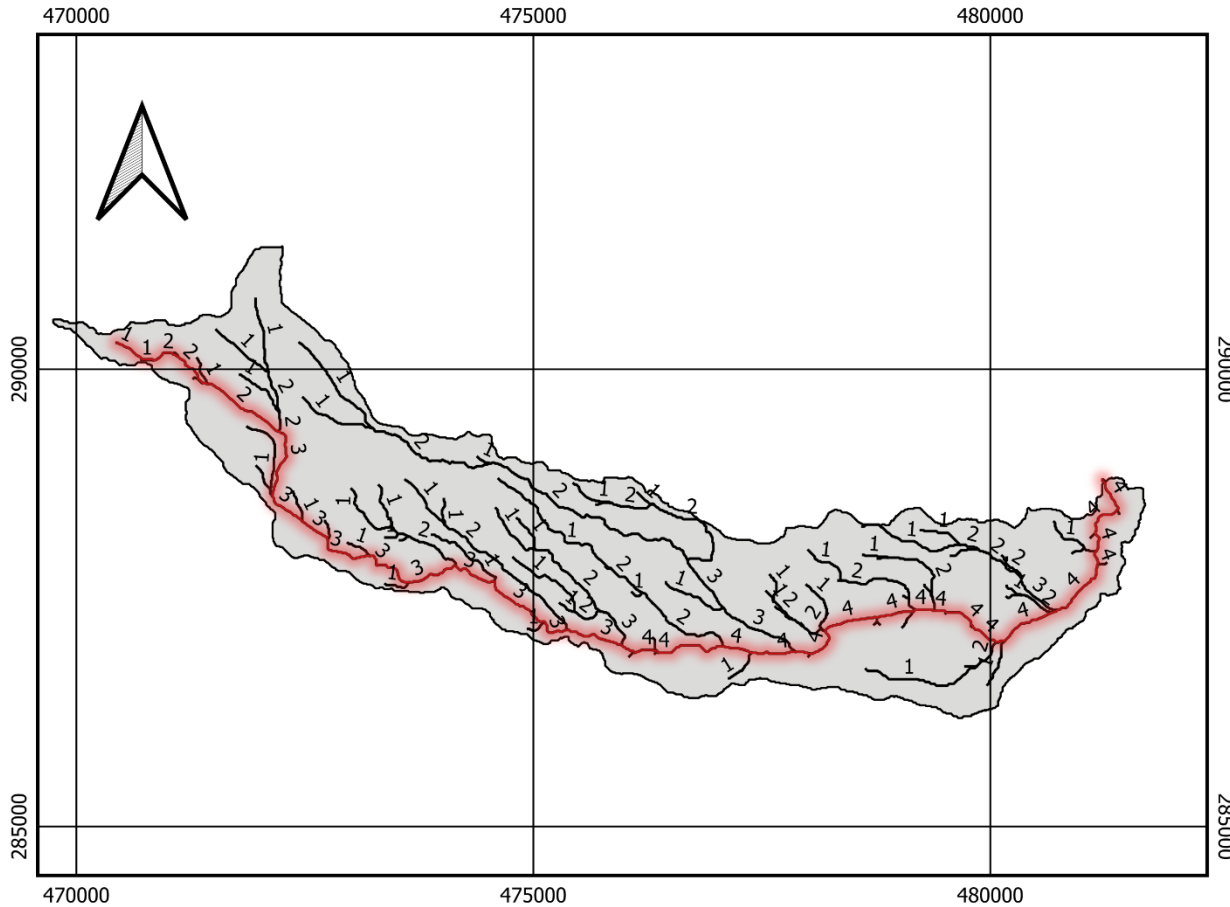
#### LEYENDA

-  PARTEAGUAS
-  DRENAJE

#### MAPA DE UBICACIÓN MICROCUENCA TUTUNICHAPA



### MAPA DE ORDEN DE LAS CORRIENTES DE LA MICROCUENCA TUTUNICHAPA



ESCALA 1:63000

SISTEMA DE COORDENADAS DE REFERENCIA SIRGAS 2007



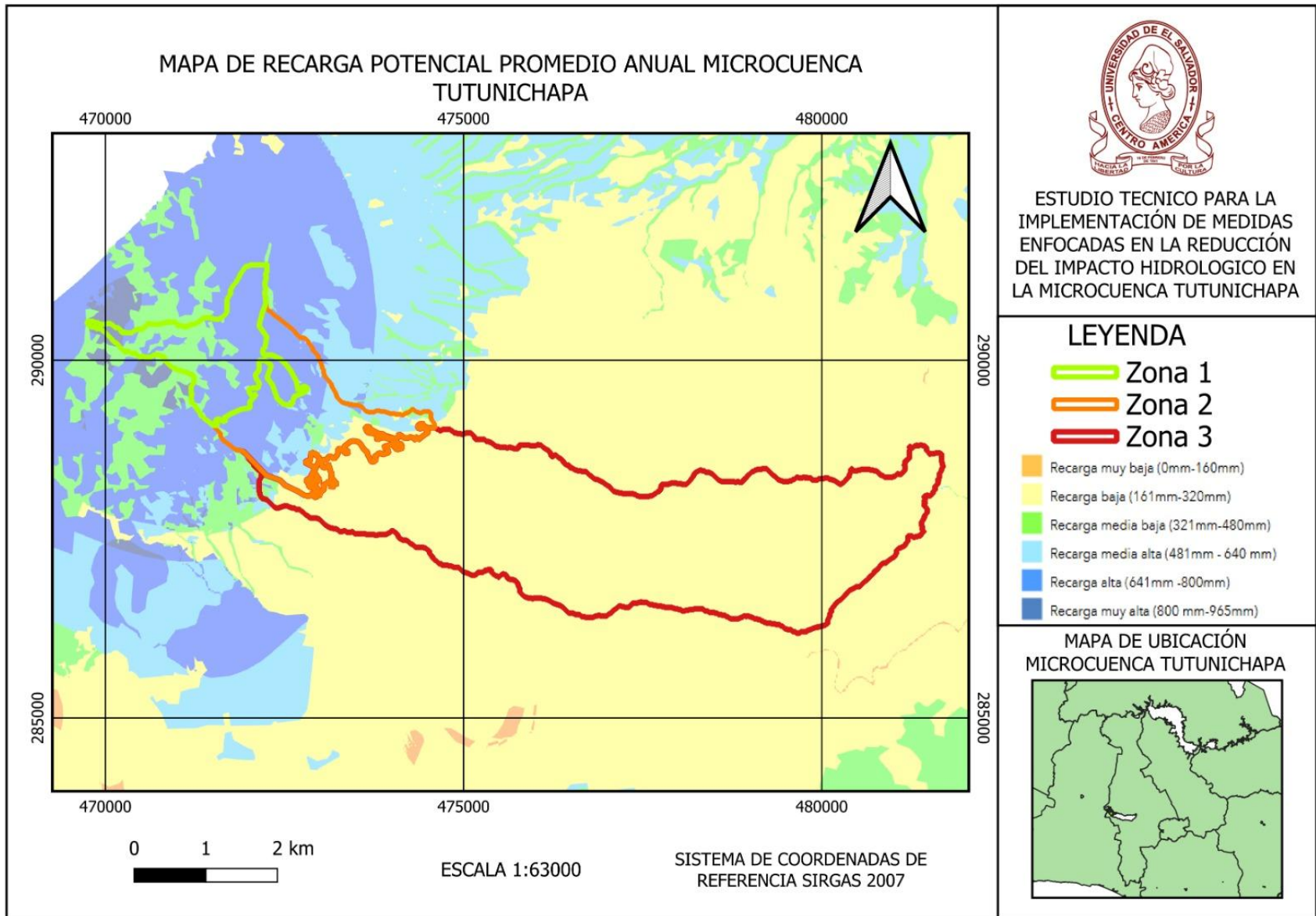
ESTUDIO TECNICO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE MEDIDAS ENFOCADAS EN LA REDUCCIÓN DEL IMPACTO HIDROLOGICO EN LA MICROCUENCA TUTUNICHAPA

#### LEYENDA

- CAUCE PRINCIPAL
- ORDEN DE CORRIENTES

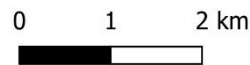
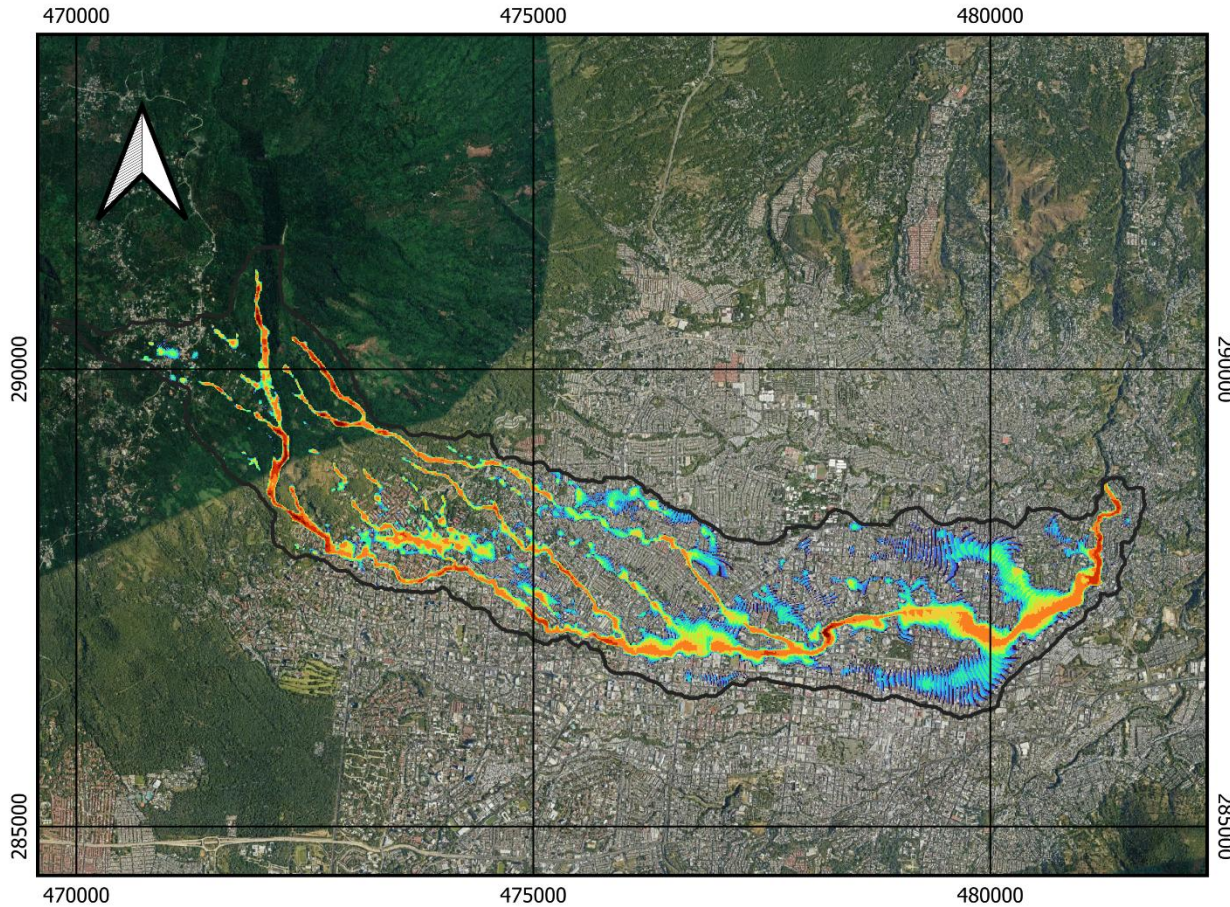
#### MAPA DE UBICACIÓN MICROCUENCA TUTUNICHAPA





ESTUDIO TECNICO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE MEDIDAS ENFOCADAS EN LA REDUCCIÓN DEL IMPACTO HIDROLOGICO EN LA MICROCUENCA TUTUNICHAPA

MAPA DE INUNDACION EN LA MICROCUENCA TUTUNICHAPA



ESCALA 1:63000

SISTEMA DE COORDENADAS DE REFERENCIA SIRGAS 2007



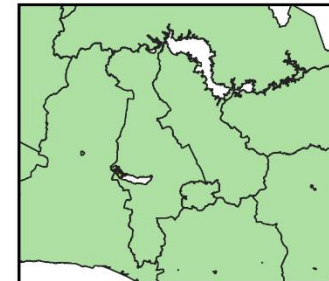
ESTUDIO TECNICO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE MEDIDAS ENFOCADAS EN LA REDUCCIÓN DEL IMPACTO HIDROLOGICO EN LA MICROCUENCA TUTUNICHAPA

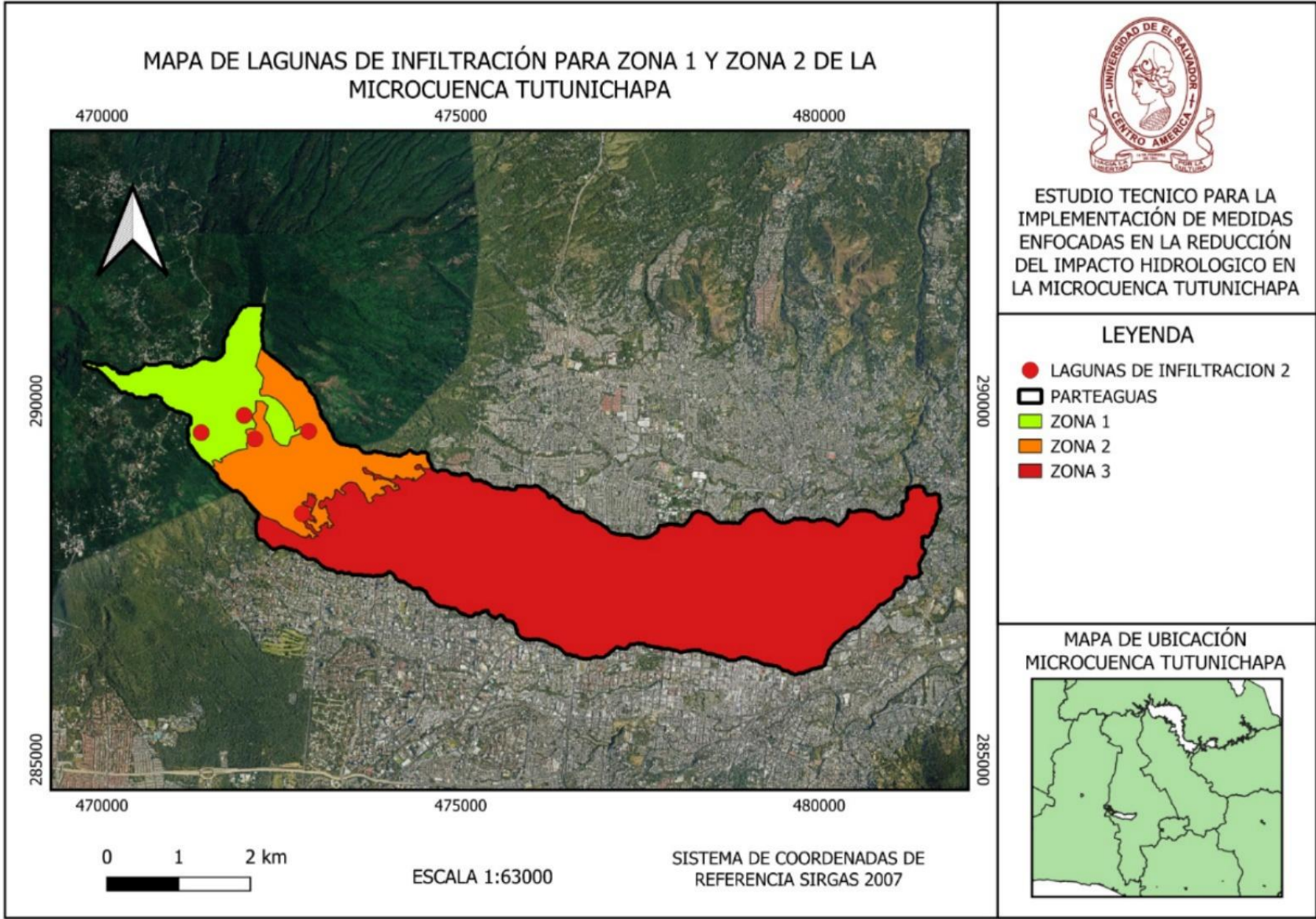
LEYENDA

Banda 1 (Gray)

- <= 0.2 m
- 0.2 - 0.5 m
- 0.5 - 1.0 m
- 1.0 - 2.0 m
- 2.0 - 3.0 m
- 3.0 - 5.0 m
- 5.0 - 10.0 m
- 10.0 - 15.0 m
- > 15.0 m

MAPA DE UBICACIÓN MICROCUENCA TUTUNICHAPA





## **ANEXO C**

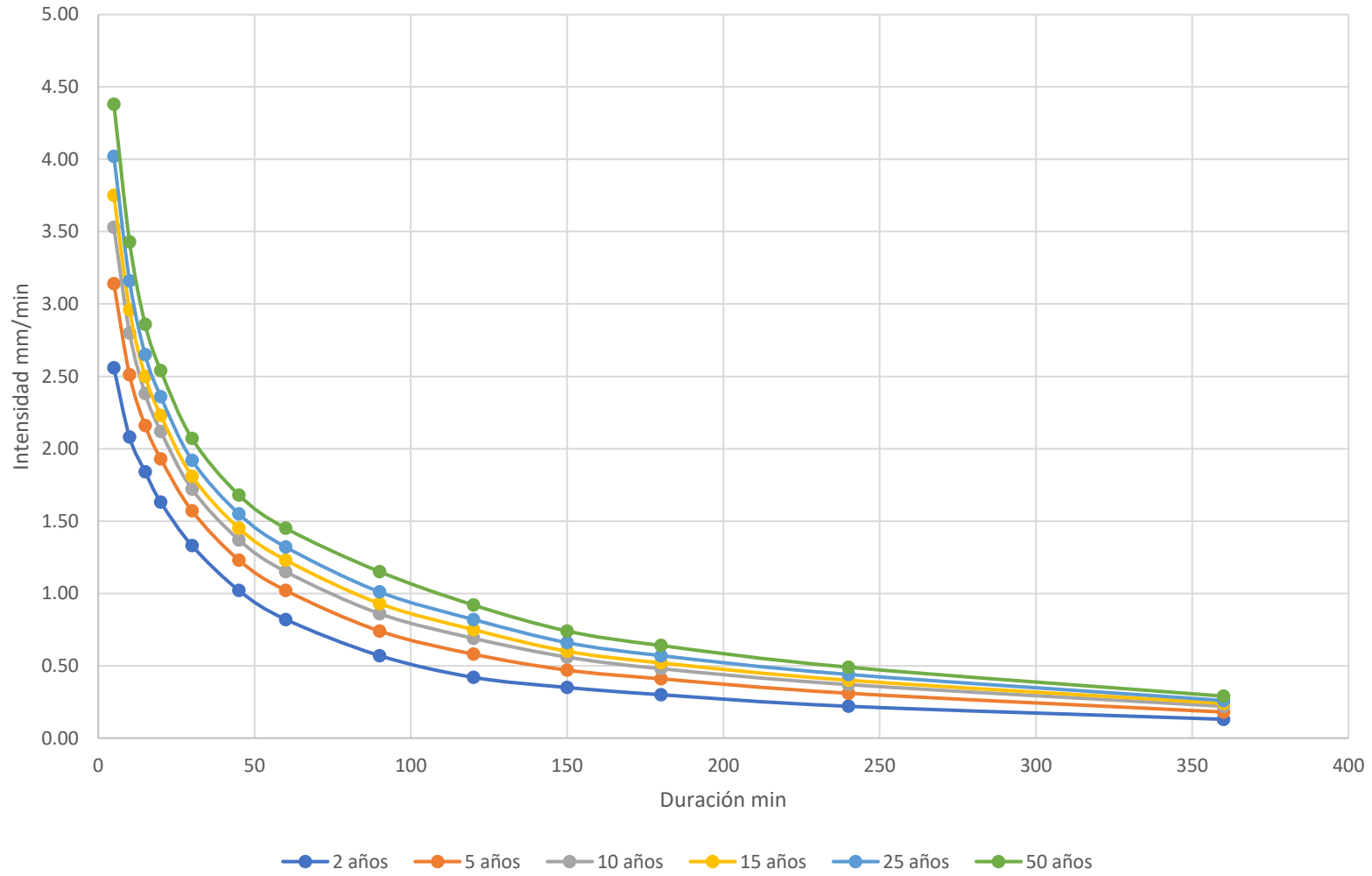
Curvas IDF estación meteorológica UES

Curvas IDF estación meteorológica San Salvador

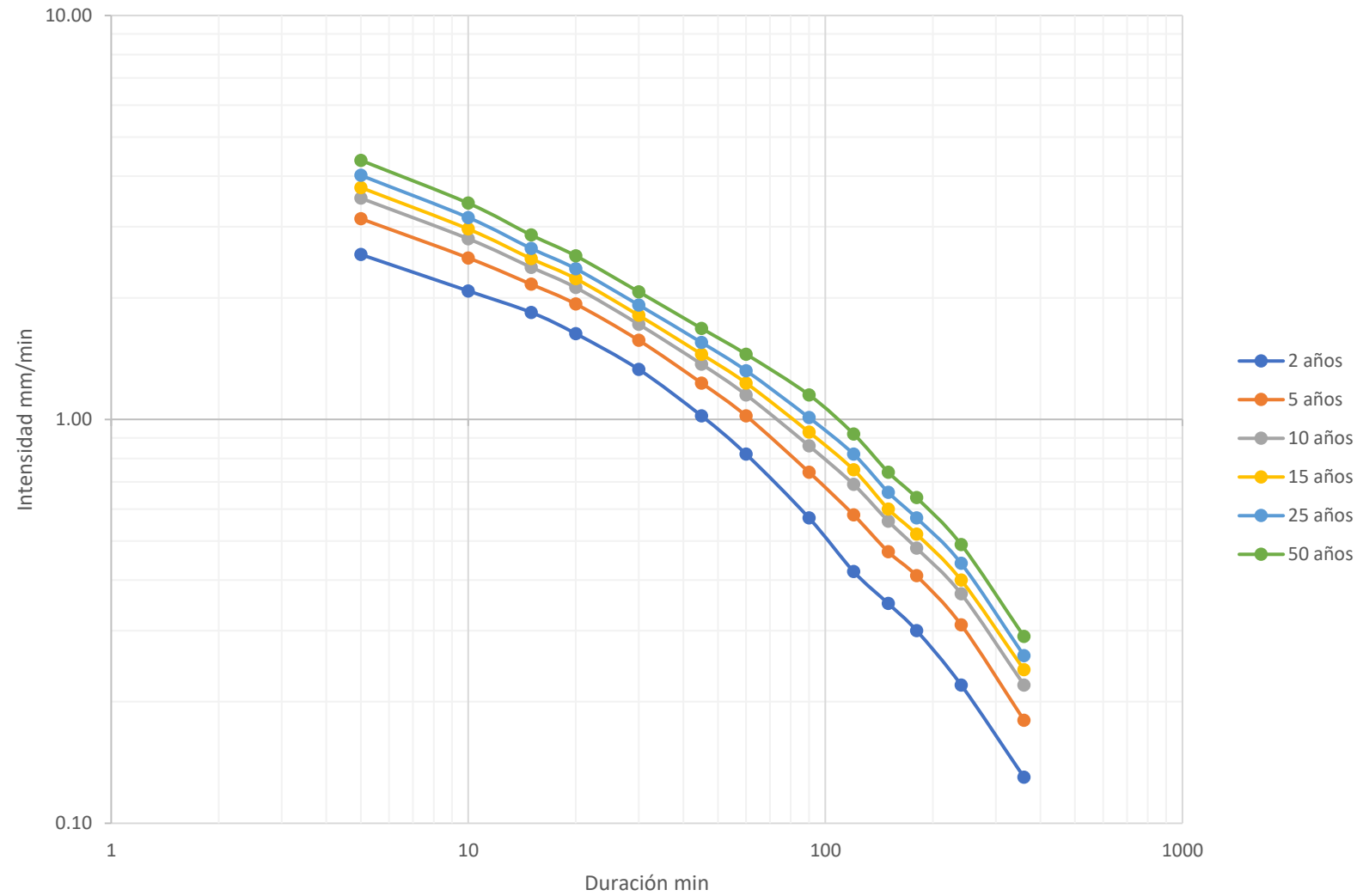
Curvas IDF estación meteorológica Boquerón

<b>ESTACION METEREOLÓGICA UES 1952-1979</b>													
<b>Periodo de retorno</b>	<b>Duración (minutos) / Intensidad(mm/min)</b>												
	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>45</b>	<b>60</b>	<b>90</b>	<b>120</b>	<b>150</b>	<b>180</b>	<b>240</b>	<b>360</b>
<b>2</b>	2.56	2.08	1.84	1.63	1.33	1.02	0.82	0.57	0.42	0.35	0.30	0.22	0.13
<b>5</b>	3.14	2.51	2.16	1.93	1.57	1.23	1.02	0.74	0.58	0.47	0.41	0.31	0.18
<b>10</b>	3.53	2.80	2.38	2.12	1.72	1.37	1.15	0.86	0.69	0.56	0.48	0.37	0.22
<b>15</b>	3.75	2.96	2.50	2.23	1.81	1.45	1.23	0.93	0.75	0.60	0.52	0.40	0.24
<b>25</b>	4.02	3.16	2.65	2.36	1.92	1.55	1.32	1.01	0.82	0.66	0.57	0.44	0.26
<b>50</b>	4.38	3.43	2.86	2.54	2.07	1.68	1.45	1.15	0.92	0.74	0.64	0.49	0.29

### CURVAS IDF ESTACION METEREologica UES ESCALA NATURAL

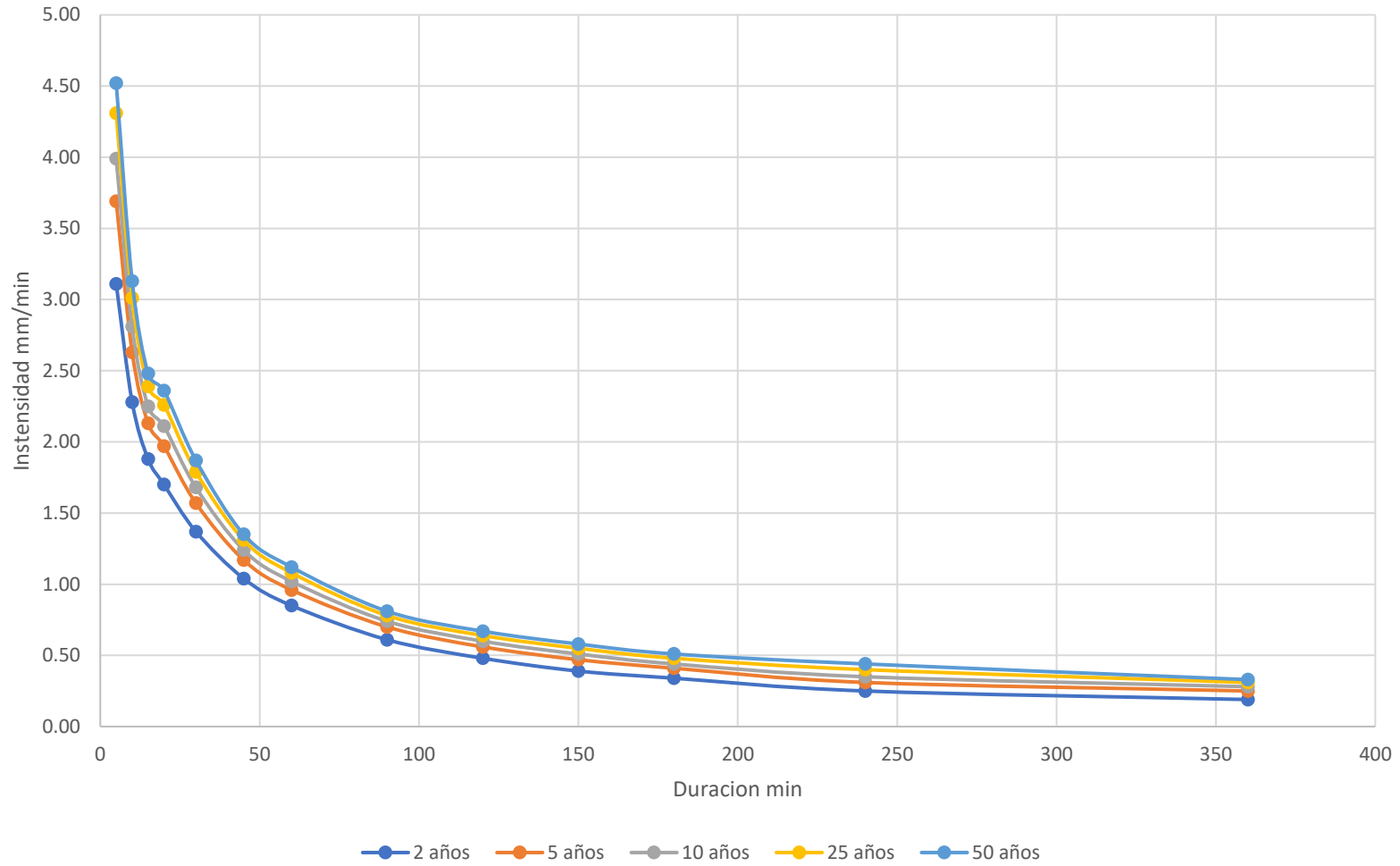


CURVAS IDF ESTACION METEREologica UES ESCALA LOGARITMICA

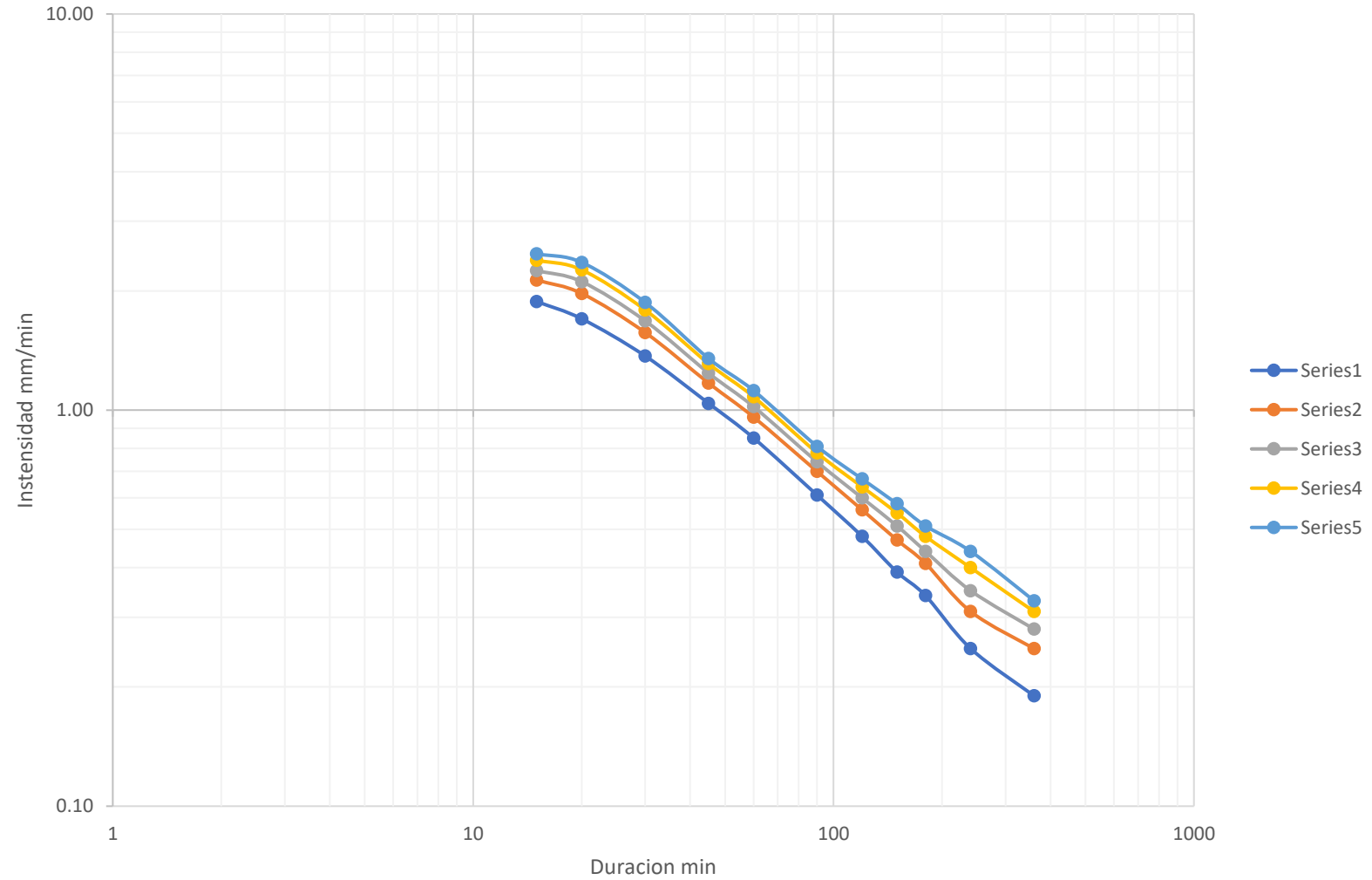


<b>ESTACION METEREOLÓGICA SAN SALVADOR 1955-1985</b>													
<b>Periodo de retorno</b>	<b>Duración (minutos) / Intensidad(mm/min)</b>												
	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>45</b>	<b>60</b>	<b>90</b>	<b>120</b>	<b>150</b>	<b>180</b>	<b>240</b>	<b>360</b>
<b>2</b>	3.11	2.28	1.88	1.70	1.37	1.04	0.85	0.61	0.48	0.39	0.34	0.25	0.19
<b>5</b>	3.69	2.63	2.13	1.97	1.57	1.17	0.96	0.70	0.56	0.47	0.41	0.31	0.25
<b>10</b>	3.99	2.81	2.25	2.11	1.68	1.24	1.02	0.74	0.60	0.51	0.44	0.35	0.28
<b>25</b>	4.31	3.01	2.39	2.26	1.79	1.31	1.08	0.78	0.64	0.55	0.48	0.40	0.31
<b>50</b>	4.52	3.13	2.48	2.36	1.87	1.35	1.12	0.81	0.67	0.58	0.51	0.44	0.33

### CURVAS IDF ESTACION METEREologica SAN SALVADOR ESCALA NATURAL

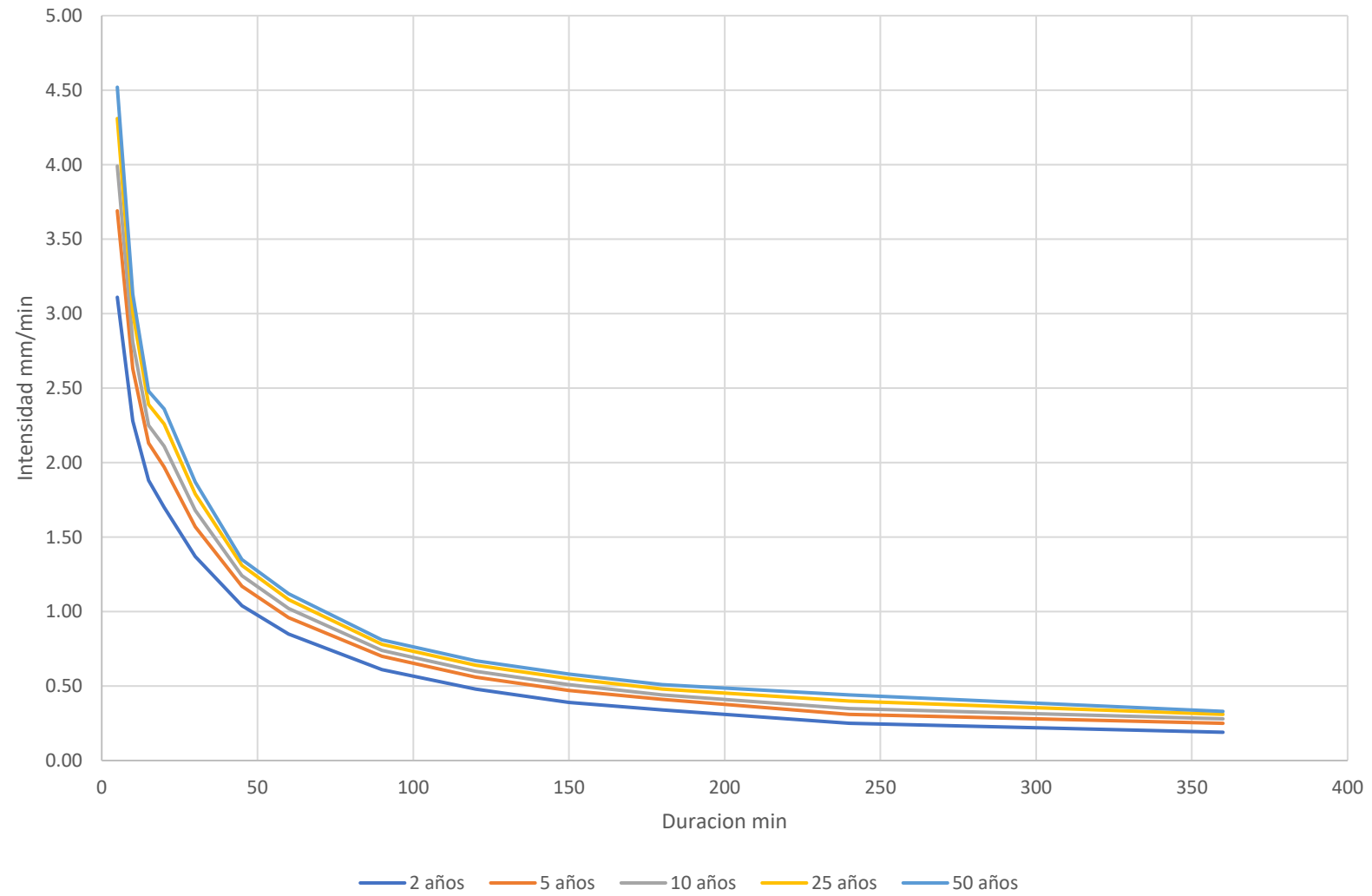


CURVAS IDF ESTACION METEREologica SAN SALVADOR ESCALA LOGARITMICA



<b>ESTACION METEREologica BOQUERON 1967-1993, 2004-2007</b>													
<b>Periodo de retorno</b>	<b>Duracion (minutos) / Intensidad(mm/min)</b>												
	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>45</b>	<b>60</b>	<b>90</b>	<b>120</b>	<b>150</b>	<b>180</b>	<b>240</b>	<b>360</b>
<b>2</b>	3.11	2.28	1.88	1.70	1.37	1.04	0.85	0.61	0.48	0.39	0.34	0.25	0.19
<b>5</b>	3.69	2.63	2.13	1.97	1.57	1.17	0.96	0.70	0.56	0.47	0.41	0.31	0.25
<b>10</b>	3.99	2.81	2.25	2.11	1.68	1.24	1.02	0.74	0.60	0.51	0.44	0.35	0.28
<b>25</b>	4.31	3.01	2.39	2.26	1.79	1.31	1.08	0.78	0.64	0.55	0.48	0.40	0.31
<b>50</b>	4.52	3.13	2.48	2.36	1.87	1.35	1.12	0.81	0.67	0.58	0.51	0.44	0.33

CURVAS IDF ESTACION METEREologica BOQUERON ESCALA NATURAL



### CURVAS IDF ESTACION METEREologica BOQUERON ESCALA LOGARITMICA

