



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA

TESIS

MODELACIÓN Y ANÁLISIS FORENSE DE UNA LLUVIA
EXTRAORDINARIA EN LA CIUDAD DE MORELIA

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
INGENIERO CIVIL

PRESENTA

JORGE EDUARDO OCHOA GARCÍA

ASESOR

DR. JUAN PABLO MOLINA AGUILAR



MORELIA, MICHOACÁN, MÉXICO

AGOSTO DE 2022



DIRECTORIO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Dr. Ramiro Silva Orozco

Director

Dr. Carlos Alberto Júnez Ferreira

Secretario Académico

M.C. Amir Ramiro Chávez Guzmán

Secretario Administrativo

Dr. Benjamín Lara Ledesma

Jefe del Departamento de Hidráulica

Dr. Juan Pablo Molina Aguilar

Asesor

Dra. Gabriela Cochran Tapia

Revisor

Dra. Claudia Margarita García Paulin

Revisor



*Con dedicación a todos los que me apoyaron,
aunque no les guste...*



AGRADECIMIENTOS

En primera instancia, quiero extender mis agradecimientos a la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por abrirme sus puertas para la realización de mis estudios de licenciatura y por darme la oportunidad de desarrollar este proyecto.

Le extiendo mi gratitud a la planta académica de la Facultad que estuvo muy presente en mi desarrollo profesional, donde puntualmente destaque lo siguiente:

Le extiendo mi gratitud a mi asesor, el Dr. Juan Pablo Molina Aguilar por aceptarme como su tesista y por su completo apoyo y confianza al proyecto realizado, así como haberme dado la oportunidad de poder desarrollar libremente el trabajo y por haber realizado la revisión del mismo dándome recomendaciones y puntos de vista, así como orientaciones y atenciones siempre atinadas.

De igual forma quiero presentar mi reconocimiento a la Dra. Gabriela Cochran Tapia por su gran apoyo brindado para poder llevar a cabo trámites de gran importancia dentro de la facultad, por haberme impartido las asignaturas de Metodología de la Investigación y Marco Legal de la Construcción que me hicieron extender mi panorama para incluir elementos puntuales en este trabajo, así como por su confianza y atención brindada en mi desarrollo académico.

Reconozco y agradezco la importancia de la Dra. Claudia Margarita García Paulin, pues fue durante su asignatura impartida de Comunicación Oral y Escrita que comencé a desarrollar los primeros pasos para la conformación de lo que sería mi trabajo presentado, así como por haberme aceptado en su curso y su participación como revisor en este proyecto.

Amplíe mi correspondencia al Dr. Alfonso Gutiérrez López de la Universidad Autónoma de Querétaro por haberme aceptado en la estancia de investigación del Programa Delfin desarrollada en el año 2021 por extender mis perspectivas sobre temas de gran relevancia en la hidrología y por haberme introducido al análisis



forense sobre riesgos hidrológicos y a la modelación utilizando el programa IBER, donde partí para poder ejecutar la presente investigación a partir de un análisis realizado en la ciudad de Querétaro.

Agradezco igualmente al Dr. Antonio Hurtado Beltrán por haberme instruido para mi participación en la OlimpiANEIC 2022 en Boca del Río, Veracruz y por haberme aceptado en el Verano Nicolaita de la Investigación en su décima edición, en donde desarrollé habilidades y conocimientos que, si bien no se relacionan con la parte técnica presentada en este trabajo, sí son de gran importancia para el mejoramiento de la sociedad en base a puntos de vista de la ingeniería civil.

Por muy profesional que pueda resultar la realización y presentación de este trabajo, sería un crimen dejar sin mencionar a las siguientes personas que fueron la variable personal y profesional más importante:

A mis amigos, que a su vez también son mis mejores amigos, a quienes va dirigido mi mayor agradecimiento, con quienes estoy en deuda por su incondicional estímulo, apoyo, con los que los desvelos eran infravalorados, a quienes les tengo una devoción inestimable y que son como hermanos que me ha dado la vida:

Me faltaría espacio para expresar mi enorme gratitud, respeto y valía hacia Marco Antonio, a quien desde que conocí me di cuenta de su brillantez y devoción por las actividades que siempre realiza, por lo contagiosas que son sus conversaciones matemáticas, filosóficas y de cultura pop y por siempre tener que estar aguantándome cuando me fastidio por muy insignificantes que puedan estar las circunstancias, aunque ese reconocimiento puede que sea compartido. Expreso igualmente mi aspasviento hacia él porque es mi colega a quien le deposito mi mayor confianza, teniendo el reconocimiento de poder compartir agradables tertulias donde las temáticas sobran. Juntos formamos un tándem mortal del que siempre estaré plenamente retribuido y con el que inequívocamente he realizado los mejores proyectos en conjunto.



Bajo el mismo esquema y con una falta de espacio para reconocer su gran valor, hago manifiesto de mi reconocimiento y lealtad a Juan Pablo, mi compatriota, a quien desde que conocí me tuvo en una estima muy alta y en un aprecio espontáneo que resuelta ser un regocijo en mí; su acompañamiento a lo largo de la carrera siempre fue un motivante para superarme más y su dedicación una situación inmediata para esforzarme tanto como lo hace él. Fácilmente reconocible como el único y, definitivamente, mejor amigo de la licenciatura, no tengo como expresar mi asombro hacia su persona por saber que siempre estuvo ahí y por la que tengo un aprecio inconmensurable tanto como por haber contribuido en equipos que eran invulnerables como por su siempre disposición de traerme dulces de Zamora, por seguir viviendo grandes aventuras desde la distancia y por tener un gran corazón y esencia cautivadora e inspiradora... ¡sigamos adelante!

No tengo más que elogios, buenas referencias, ferviente gratificación y una inconmensurable reciprocidad hacia Luis Gustavo, quien, aunque siempre discreto, ha estado ahí y hemos tenido la oportunidad de coincidir en la licenciatura, donde seguimos simpatizando y compartiendo muchas travesías; me enorgullece verlo triunfar, ser un gran hombre y superar adversidades que para cualquiera hubieran sido insuperables, puntualmente también por otorgarme sus siempre atinados comentarios y observaciones hacia cualquier circunstancia que pudiera acontecer y por igualmente tener que lidiar conmigo en los momentos más inoportunos. Propia y diplomáticamente siempre atento, responsable e inteligente, es un honor contar con su persona.

Una mención especial desde lo personal hacia Armando Abel, quien, así como le he agradecido en sus cumpleaños, es una persona talentosa, expresándole mi admiración por siempre salir adelante y siempre estar ahí presente para ir por las promociones de crepas, a pesar de que la tradición haya comenzado de una manera completamente diferente; también por su acompañamiento en lo personal los cinco años de la universidad a pesar de que ya no teníamos relación académica, pero su amistad y los



momentos vividos durante ese tiempo hicieron que mi trayecto fuera más reconfortante y sólido.

No me puedo quedar sin mencionar a mis lugartenientes camaradas por su acompañamiento, colaboración, respeto, aliento y atinadas aventuras, desventuras y experiencias atravesadas juntos que hicieron que mi trayecto académico fuera más gratificante:

A Jessica Monserrat, que desde que llegué a la sección 03 me tomaba en cuenta y cuando estábamos en la sección 02 éramos un equipo imbatible.

A Luis Eduardo, porque desde la formación de nuestro grupo de relaciones sociales casi siempre ha estado ahí, siendo una persona brillante y perspicaz en arquitectura.

A Perlita *Shihuaha* Dolores, porque en el último semestre de la licenciatura nos hicimos muy unidos tras haber estado frecuentándonos tres años

A Layla *Danone* Sánchez, pese a que frecuentemente nunca se presentaba a las reuniones pactadas siempre tuvo el criterio y la buena voluntad de reunirse conmigo para poder discutir los pormenores que acontecían en mi estancia académica y en nuestro grupo de conocidos en común.

Finalmente, agradezco infinitamente a mi familia por haber estado presente conmigo en mi desarrollo personal y por ser siempre un motivante para seguir adelante.



RESUMEN

El 22 de octubre del año 2018 se presentó una tormenta con el paso del huracán Willa (categoría 5 según la escala Saffir-Simpson) que provocó graves afectaciones en la ciudad de Morelia al generar inundaciones y encharcamientos en calles y avenidas importantes. En este trabajo se realiza una modelación hidrológica que permita identificar una representación estimada del comportamiento del flujo durante y después de la tormenta. En el aspecto socioeconómico, se presenta la realización de un análisis forense para obtener propiamente las características demográficas de la zona de estudio delimitada para conocer el número de población y sus diversas condiciones que son más susceptibles a ser afectadas por la llegada de avenidas a las calles con mayor probabilidad de ser afectadas. Analizando ambas partes, se determinan las causas de la inundación y las afectaciones que generó, así como la implementación de recomendaciones para mejorar la resiliencia ante esta clase de fenómenos en la capital michoacana.

ABSTRACT

On October 22, 2018, a storm occurred with the passage of Hurricane Willa (category 5 according to the Saffir-Simpson scale) that caused serious affectations in the city of Morelia by generating flooding and puddling in important streets and avenues. In this work, hydrological modeling is carried out to identify an estimated representation of the flow behavior during and after the storm. In the socioeconomic aspect, a forensic analysis is presented to obtain the demographic characteristics of the study area delimited to know the number of population and its various conditions that are more susceptible to be affected by the arrival of floods to the streets most likely to be affected. By analyzing both parts, the causes of the flooding and the effects it generated are determined, as well as the implementation of recommendations to improve resilience to this kind of phenomena in the capital of Michoacan.

Palabras clave (keywords): inundación, hidrometeorología, vulnerabilidad, modelación, socioeconómico.



ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	1
ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS.....	4
ÍNDICE DE TABLAS	5
ÍNDICE DE GRÁFICAS	1
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	3
1.1. Planteamiento del problema.....	3
1.2. Hipótesis	4
1.3. Objetivos.....	5
1.3.1. Objetivo general	5
1.3.2. Objetivos particulares.....	5
1.4. Importancia del estudio	6
1.5. Limitaciones del estudio.....	7
1.6. Definición de términos	9
CAPÍTULO II. REVISIÓN DE BIBLIOGRAFÍA.....	11
2.1. Introducción.....	11
2.2. Descripción y análisis de investigaciones relacionadas	11
2.2.1. Inundaciones	11
2.2.2. Vulnerabilidad.....	13
2.2.3. Resiliencia	16
2.2.4. Estaciones meteorológicas	18
2.2.5. Modelación de inundaciones	20
2.2.6. Análisis forense.....	22
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA.....	27
3.1. Introducción	27
3.2. Zona de estudio	27
3.2.1. Localización geográfica.....	27
3.2.2. Hidrografía y aspectos hidrológicos	32
3.2.3. Edafología y litología.....	37
3.2.4. Topografía.....	41



3.2.5.	Fisiografía	44
3.2.6.	Uso y tipo de suelo	46
3.2.7.	Vegetación y Áreas Naturales Protegidas	48
3.2.8.	Climatología.....	54
3.2.8.1.	Temperatura.....	55
3.2.8.2.	Estaciones climatológicas	58
3.2.8.3.	Zonas de heladas	60
3.2.8.4.	Zonas de granizadas	61
3.2.9.	Aspectos socioeconómicos.....	62
3.2.9.1.	Demografía	62
3.2.9.2.	Grado de marginación.....	68
3.2.9.3.	Educación	71
3.2.9.4.	Salud.....	75
3.2.9.5.	Infraestructura característica.....	78
3.2.9.6.	Comercio.....	82
3.2.9.7.	Programas de desarrollo	89
3.3.	Materiales	96
3.3.1.	Sistemas de Información Geográfica.....	96
3.3.2.	Modelo Digital de Elevación.....	97
3.3.3.	Información climatológica.....	100
3.3.4.	Periodo de retorno.....	107
3.3.5.	Parámetros de tiempo	108
3.3.5.1.	Instante inicial.....	108
3.3.5.2.	Tiempo máximo de simulación	109
3.3.5.3.	Intervalo de resultados	109
3.3.6.	Imagen satelital georreferenciada.....	110
3.3.7.	Rugosidad de Manning.....	111
3.3.8.	Análisis probabilístico de datos.....	114
3.3.8.1.	Modelos de distribución	115
3.3.8.2.	Prueba de bondad de ajuste.....	118



3.3.9.	Intensidad de lluvia	119
3.3.10.	Metodología Dick-Peschke	122
3.3.11.	Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia.....	122
3.3.12.	Hietograma	123
3.3.13.	Método del Bloque Alterno.....	125
3.4.	Procedimiento	125
3.4.1.	Caracterización de la zona de estudio	126
3.4.2.	Redes Irregulares de Triángulos Rectángulos.....	127
3.4.3.	Condiciones hidrodinámicas iniciales	129
3.4.4.	Escurrimiento superficial por el Servicio de Conservación de Suelos	131
3.4.4.1.	Balance hídrico.....	133
3.4.4.2.	Número de curva de escurrimiento.....	133
3.4.4.3.	Grupo hidrológico del suelo	135
3.4.5.	Ecuaciones de Saint-Venant	137
CAPÍTULO IV. RESULTADOS		140
4.1.	Introducción.....	140
4.2.	Análisis de datos: modelación hidrológica	140
4.2.1.	Selección de función de distribución	140
4.2.2.	Curvas IDF para diferentes periodos de retorno	145
4.2.3.	Construcción de hietograma	147
4.2.4.	Modelación hidrológica.....	149
4.3.	Análisis forense	154
4.3.1.	Crónica general del huracán Willa.....	154
4.3.2.	Análisis hidrometeorológico	156
4.3.2.1.	Génesis de la tormenta	157
4.3.2.2.	Vientos y presión	157
4.3.2.3.	Mareas.....	159
4.3.2.4.	Lluvia	160
4.3.3.	Análisis hidráulico.....	163
4.3.4.	Análisis integrador	164



4.3.5. Análisis de sectores socioeconómicos.....	168
4.3.5.1. Sector social.....	168
4.3.5.2. Sector infraestructura	172
4.3.5.3. Sector económico.....	174
4.3.6. Diagnóstico final.....	175
4.3.6.1. Contraste con eventos históricos.....	175
4.3.6.2. Resumen de causas y efectos	177
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	187
5.1. Conclusiones.....	187
5.2. Recomendaciones	189
REFERENCIAS	191
ANEXOS	202
Anexo 1. Tablas de precipitaciones y hietogramas asignados para diferentes periodos de retorno.....	202
Anexo 2. Modelaciones del comportamiento del flujo para diferentes periodos de retorno a cada hora y en las cuatro avenidas más importantes.	208



ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 2.1. Clasificación y tipo de inundaciones que se pueden presentar en un espacio en específico bajo ciertas condiciones</i>	<i>12</i>
<i>Figura 2.2. Sectores que se enfocan en la determinación de vulnerabilidad</i>	<i>15</i>
<i>Figura 2.3. Sectores de la comunidad tangibles para la evaluación de desastres durante el análisis forense.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 3.1. Ubicación del municipio de Morelia en México..</i>	<i>28</i>
<i>Figura 3.2. Ubicación de la zona de estudio en la mancha urbana del municipio de Morelia.</i>	<i>29</i>
<i>Figura 3.3. Delimitación de la zona de estudio por medio de las colonias afectadas en la zona sur-poniente tras el paso del huracán Willa.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 3.4. Imagen satelital de la zona de estudio.</i>	<i>31</i>
<i>Figura 3.5. Ubicación de la región hidrológica Lerma-Santiago en la República Mexicana.</i>	<i>32</i>
<i>Figura 3.6. Localización del municipio de Morelia en la RH Lerma-Santiago.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 3.7. Localización del municipio de Morelia en la subcuenca del Río Chiquito.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 3.8. Ríos y corrientes presentes en el municipio de Morelia y, en específico, en la zona de estudio</i>	<i>36</i>
<i>Figura 3.9. Unidades edafológicas presentes en el municipio de Morelia con enfoque en la zona de estudio</i>	<i>37</i>
<i>Figura 3.10. Unidades de paisaje presentes en el municipio de Morelia con enfoque en la zona de estudio</i>	<i>39</i>
<i>Figura 3.11. Representación topográfica del municipio de Morelia, indicando las elevaciones usuales de la zona de estudio.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 3.12. Curvas de nivel donde se puede observar el comportamiento del terreno en la zona de estudio</i>	<i>43</i>
<i>Figura 3.13. Subprovincias fisiográficas con presencia en el municipio de Morelia</i>	<i>44</i>
<i>Figura 3.14. Uso de suelo en el municipio de Morelia con énfasis en la zona de estudio ..</i>	<i>47</i>
<i>Figura 3.15. Vegetación existente en el municipio de Morelia con acercamiento a la zona de estudio.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 3.16. Áreas Naturales Protegidas (ANP) que tienen presencia en el municipio de Morelia</i>	<i>51</i>
<i>Figura 3.17. a) Temperatura anual mínima promedio y, b) Temperatura anual máxima promedio registradas en la zona de estudio.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 3.18. Régimen térmico del municipio de Morelia</i>	<i>56</i>
<i>Figura 3.19. Características del régimen crítico en función de la altitud.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 3.20. Ubicación de las EMC en el municipio de Morelia, con énfasis en la zona de estudio.....</i>	<i>58</i>



<i>Figura 3.21. Zonas de heladas del municipio de Morelia con una aproximación a la zona de estudio.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 3.22. Zonas de granizadas del municipio de Morelia con una aproximación a la zona de estudio</i>	<i>61</i>
<i>Figura 3.23. Colonias que componen la zona de estudio.</i>	<i>62</i>
<i>Figura 3.24. Número de habitantes por manzana.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 3.25. Número de personas por manzana en función de su edad; a) Población entre 0 y 14 años; b) Población entre 15 y 29 años; c) Población entre 30 y 59 años; y d) Población mayor a 60 años.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 3.26. Número de viviendas por manzana, incluyendo las que cuentan con comercios independientes o microempresas.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 3.27. Indicadores demográficos de la zona de estudio, así como infraestructura pública, otros tipos de infraestructuras se indican en los apartados subsecuentes.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 3.28. Grado de marginación apreciable dentro de las colonias afectadas y aledañas.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 3.29. Porcentaje de población con limitación de movimiento</i>	<i>70</i>
<i>Figura 3.30. Escuelas de educación básica, media superior y superior en la zona de estudio.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 3.31. Escuelas de educación complementaria en la zona de estudio.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 3.32. Centros de salud, consultorios y hospitales ubicados en la zona de estudio..</i>	<i>75</i>
<i>Figura 3.33. Porcentaje de derechohabientes a un seguro médico</i>	<i>77</i>
<i>Figura 3.34. Ubicación de museos, monumentos, teatros y oficinas legislativas y de gobierno.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 3.35. Ubicación de financieras y empresas de transporte</i>	<i>80</i>
<i>Figura 3.36. Ubicación de comercios al por mayor y al por menor en la zona de estudio.</i>	<i>82</i>
<i>Figura 3.37. Ubicación de comercios al por mayor y al por menor en la zona de estudio.</i>	<i>83</i>
<i>Figura 3.38. MDE de Michoacán.....</i>	<i>98</i>
<i>Figura 3.39. MDE de la microcuenca del Río Chiquito.</i>	<i>99</i>
<i>Figura 3.40. Ventana del programa IBER en donde se ingresan los parámetros de tiempo.....</i>	<i>110</i>
<i>Figura 3.41. Imagen satelital de la microcuenca del Río Chiquito</i>	<i>111</i>
<i>Figura 3.42. Ventana de asignación de coeficiente de rugosidad de Manning para diferentes usos de suelo.</i>	<i>114</i>
<i>Figura 3.43. Ventana principal del software Hidroesta.</i>	<i>119</i>
<i>Figura 3.44. Ingreso de los valores del hietograma (intensidad en mm/h vs. tiempo en segundos) en el programa IBER.....</i>	<i>124</i>
<i>Figura 3.45. Representación de la división de triángulos R en triángulos T para la formulación de la metodología RTIN para MDE.....</i>	<i>128</i>



Figura 3.46. Enmallado de la microcuenca del Río Chiquito empleando la metodología RTIN. Se observan los triángulos que determinan el comportamiento del terreno, teniendo una menor composición de triángulos en donde el terreno es más homogéneo. 129

Figura 3.47. Comparación del tamaño del tamaño de los elementos de la malla RTIN y el cauce del Río Chiquito; a la izquierda la ventana de asignación de las condiciones hidrodinámicas iniciales para cada elemento de la malla. 131

Figura 3.48. Ventana de asignación del escurrimiento superficial por el modelo del SCS. 132

Figura 3.49. RTIN sobrepuesto sobre la imagen satelital georreferenciada para la asignación en IBER del CN. 137

Figura 4.1. Ajuste de la serie de datos de precipitación máxima anual en el programa Hidroesta a una distribución Normal. 140

Figura 4.2. Ajuste de la serie de datos de precipitación máxima anual en el programa Hidroesta a una distribución Log-Normal de 2 parámetros. 141

Figura 4.3. Ajuste de la serie de datos de precipitación máxima anual en el programa Hidroesta a una distribución Log-Normal de 3 parámetros. 141

Figura 4.4. Ajuste de la serie de datos de precipitación máxima anual en el programa Hidroesta a una distribución Gamma de 2 parámetros. 142

Figura 4.5. Ajuste de la serie de datos de precipitación máxima anual en el programa Hidroesta a una distribución Gamma de 3 parámetros. 142

Figura 4.6. Ajuste de la serie de datos de precipitación máxima anual en el programa Hidroesta a una distribución Log-Pearson tipo III. 143

Figura 4.7. Ajuste de la serie de datos de precipitación máxima anual en el programa Hidroesta a una distribución Gumbel. 143

Figura 4.8. Ajuste de la serie de datos de precipitación máxima anual en el programa Hidroesta a una distribución Log-Gumbel. 144

Figura 4.9. Cálculo de la ecuación intensidad máxima en Hidroesta. 147

Figura 4.10. Ventana del procesamiento de datos para la modelación, donde ejecuta el comportamiento del flujo desde un tiempo de 0 segundos hasta uno de 18,000 segundos, equivalentes a las 5 horas de duración de la tormenta. 149

Figura 4.11. Modelación de la inundación para un $Tr = 17.72$ años en la microcuenca del Río Chiquito desde las 22:00 del 21 de octubre hasta las 05:00 del 22 de octubre. 150

Figura 4.12. Representación del comportamiento del huracán Willa. Fuente: elaboración propia con datos del NHC. 159

Figura A2.1. Modelación de la inundación para un $Tr = 2$ años en la microcuenca del Río Chiquito desde las 22:00 del 21 de octubre hasta las 05:00 del 22 de octubre. 208

Figura A2.2. Modelación de la inundación para un $Tr = 5$ años en la microcuenca del Río Chiquito desde las 22:00 del 21 de octubre hasta las 05:00 del 22 de octubre. 212

Figura A2.3. Modelación de la inundación para un $Tr = 10$ años en la microcuenca del Río Chiquito desde las 22:00 del 21 de octubre hasta las 05:00 del 22 de octubre. 216



Figura A2.4. Modelación de la inundación para un $Tr = 25$ años en la microcuenca del Río Chiquito desde las 22:00 del 21 de octubre hasta las 05:00 del 22 de octubre..... 220

Figura A2.5. Modelación de la inundación para un $Tr = 50$ años en la microcuenca del Río Chiquito desde las 22:00 del 21 de octubre hasta las 05:00 del 22 de octubre..... 224

Figura A2.6. Modelación de la inundación para un $Tr = 100$ años en la microcuenca del Río Chiquito desde las 22:00 del 21 de octubre hasta las 05:00 del 22 de octubre. 228

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1. Cauce del Río Chiquito en la colonia Félix Ireta. 180

Fotografía 2. Puente vehicular del Río Chiquito, no se suele ver afectada la circulación en el mismo tras problemas de lluvias extremas. 180

Fotografía 3. Precipitación acumulada en los bordes del Río Chiquito por una fuerte lluvia ocurrida en 2021. 181

Fotografía 4. Cruce de calles en colonia Félix Ireta tras lluvia, cerca no hay sistema de drenaje para poder evacuar el agua de la superficie..... 181

Fotografía 5. Escuela de nivel preescolar ubicada en colonia Electricistas. 182

Fotografía 6. Desnivel ubicado en Avenida Ventura Puente, donde tras el paso de lluvias intermitentes se suele inundar. 182

Fotografía 7. Centros comerciales en la colonia Electricistas, en la cota más baja de la microcuenca del Río Chiquito, debajo de la Loma de Santa María. 183

Fotografía 8. Con el paso del tiempo, se han venido incrementando las edificaciones en la Loma de Santa María, provocando un cambio de uso de suelo e impidiendo la infiltración de la precipitación. 183

Fotografía 9. El escurrimiento superficial proveniente de la Loma de Santa María se suele estancar en la Avenida Camelinas al presentar inclusive lluvias de baja intensidad. 184

Fotografía 10. Avenida Camelinas (entre colonias Bosque Camelinas y Electricistas) presentó encharcamientos y en algunos puntos inundaciones tras el paso del huracán Willa en 2018. 184

Fotografía 11. En la Avenida Camelinas se concentran varios centros financieros cerca de las zonas más propensas a inundarse de la región sur. 185

Fotografía 12. El Boulevard García de León se encuentra entre las colonias Chapultepec Sur, Nueva Chapultepec y Chapultepec Oriente y desde que se tiene el registro histórico ha manifestado inundaciones tras el paso de tormentas moderadas y fuertes. 186



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Herramientas computacionales más comunes para la modelación de flujos	21
Tabla 3.1. Propiedades geométricas de las colonias que componen la zona de estudio.....	31
Tabla 3.2. Propiedades geométricas y geográficas de las subcuencas del municipio de....	35
Tabla 3.3. Unidades de paisaje litológico pertenecientes al municipio de Morelia.	40
Tabla 3.4. Uso de suelo en el municipio de Morelia.....	47
Tabla 3.5. Vegetación del municipio de Morelia	50
Tabla 3.6. Zonas protegidas del municipio de Morelia	53
Tabla 3.7. Propiedades geométricas del régimen térmico del municipio de Morelia	57
Tabla 3.8. Propiedades geográficas de las estaciones climatológicas del municipio de Morelia.	59
Tabla 3.9. Información demográfica y socioeconómica de las escuelas de diferentes niveles educativos que se encuentran en la zona de estudio.	72
Tabla 3.10. Información socioeconómica y demográfica de escuelas especiales presentes en la zona de estudio	74
Tabla 3.11. Información de las unidades médicas ubicadas en la zona de estudio.	76
Tabla 3.12. Información de los museos, monumentos y teatros que se localizan en la zona de estudio.	78
Tabla 3.13. Cantidad de unidades económicas correspondientes a las instituciones financieras y a las empresas de envíos en la zona de estudio.....	81
Tabla 3.14. Comercios en general apreciados en la zona de estudio y la cantidad de personas ocupadas en cada uno.	84
Tabla 3.15. Cantidad de comercios por unidad económica en la zona de estudio.	88
Tabla 3.16. Variables climatológicas evaluadas por la estación climatológica 16081	101
Tabla 3.17. Registro de la información climatológica de la estación 16081	102
Tabla 3.18. Información de precipitación histórica de la estación 16081	103
Tabla 3.19. Registro de la estación climatológica 16081 de días en los que ha llovido más de 43.5 mm.....	106
Tabla 3.20. Periodo de retorno en función de la zona a proteger	107
Tabla 3.21. Valores predeterminados del coeficiente de rugosidad de Manning para diferentes usos de suelo.	112
Tabla 3.22. Clasificación de la intensidad de la lluvia.....	120
Tabla 3.23. Números de curva de escurrimiento para usos selectos de tierra agrícola, urbana y suburbana.....	134
Tabla 4.1. Delta teórico (diferencia entre probabilidad observada y estimada) para cada una de las funciones de distribución de probabilidad usadas.	144
Tabla 4.2. Precipitaciones asignadas a diferentes periodos de retorno.	145
Tabla 4.3. Precipitaciones asignadas para cada duración de tormenta en función de la precipitación de 24 horas y el periodo de retorno.	145



Tabla 4.4. Intensidades asignadas para cada duración de tormenta en función de la precipitación de 24 horas y el periodo de retorno. 146

Tabla 4.5. Precipitaciones a partir de las curvas IDF para un $Tr = 17.72$ años. 148

Tabla 4.6. Flujo con el paso del tiempo con un $Tr = 17.72$ en Av. Ventura Puente. 151

Tabla 4.7. Flujo con el paso del tiempo con un $Tr = 17.72$ en Blvd. García de León. 151

Tabla 4.8. Flujo con el paso del tiempo con un $Tr = 17.72$ en Av. Camelinas. 151

Tabla 4.9. Flujo con el paso del tiempo con un $Tr = 17.72$ en Av. Solidaridad. 151

Tabla 4.10. Tabla resumen del análisis hidrometeorológico, simplificando las características generales del huracán Willa antes de llegar a las costas de Sinaloa. 161

Tabla A1.1. Precipitaciones a partir de las curvas IDF para un $Tr = 2$ años. 202

Tabla A1.2. Precipitaciones a partir de las curvas IDF para un $Tr = 5$ años. 203

Tabla A1.3. Precipitaciones a partir de las curvas IDF para un $Tr = 10$ años. 204

Tabla A1.4. Precipitaciones a partir de las curvas IDF para un $Tr = 25$ años. 205

Tabla A1.5. Precipitaciones a partir de las curvas IDF para un $Tr = 50$ años. 206

Tabla A1.6. Precipitaciones a partir de las curvas IDF para un $Tr = 100$ años. 207

Tabla A2.1. Flujo con el paso del tiempo con un $Tr = 2$ en Av. Ventura Puente. 209

Tabla A2.2. Flujo con el paso del tiempo con un $Tr = 2$ en Blvd. García de León. 209

Tabla A2.3. Flujo con el paso del tiempo con un $Tr = 2$ en Av. Camelinas. 209

Tabla A2.4. Flujo con el paso del tiempo con un $Tr = 2$ en Av. Solidaridad. 209

Tabla A2.5. Flujo con el paso del tiempo con un $Tr = 5$ en Av. Ventura Puente. 213

Tabla A2.6. Flujo con el paso del tiempo con un $Tr = 5$ en Blvd. García de León. 213

Tabla A2.7. Flujo con el paso del tiempo con un $Tr = 5$ en Av. Camelinas. 213

Tabla A2.8. Flujo con el paso del tiempo con un $Tr = 5$ en Av. Solidaridad. 213

Tabla A2.9. Flujo con el paso del tiempo con un $Tr = 10$ en Av. Ventura Puente. 217

Tabla A2.10. Flujo con el paso del tiempo con un $Tr = 10$ en Blvd. García de León. 217

Tabla A2.11. Flujo con el paso del tiempo con un $Tr = 10$ en Av. Camelinas. 217

Tabla A2.12. Flujo con el paso del tiempo con un $Tr = 10$ en Av. Solidaridad. 217

Tabla A2.13. Flujo con el paso del tiempo con un $Tr = 25$ en Av. Ventura Puente. 221

Tabla A2.14. Flujo con el paso del tiempo con un $Tr = 25$ en Blvd. García de León. 221

Tabla A2.15. Flujo con el paso del tiempo con un $Tr = 25$ en Av. Camelinas. 221

Tabla A2.16. Flujo con el paso del tiempo con un $Tr = 25$ en Av. Solidaridad. 221

Tabla A2.17. Flujo con el paso del tiempo con un $Tr = 50$ en Av. Ventura Puente. 225

Tabla A2.18. Flujo con el paso del tiempo con un $Tr = 50$ en Blvd. García de León. 225

Tabla A2.19. Flujo con el paso del tiempo con un $Tr = 50$ en Av. Camelinas. 225

Tabla A2.20. Flujo con el paso del tiempo con un $Tr = 50$ en Av. Solidaridad. 225

Tabla A2.21. Flujo con el paso del tiempo con un $Tr = 100$ en Av. Ventura Puente. 229

Tabla A2.22. Flujo con el paso del tiempo con un $Tr = 100$ en Blvd. García de León. 229

Tabla A2.23. Flujo con el paso del tiempo con un $Tr = 100$ en Av. Camelinas. 229

Tabla A2.24. Flujo con el paso del tiempo con un $Tr = 100$ en Av. Solidaridad. 229



ÍNDICE DE GRÁFICAS

<i>Gráfica 4.1. Curva IDF para una duración de 5 horas de tormenta y diferentes periodos de retorno.....</i>	<i>146</i>
<i>Gráfica 4.2. Hietograma para un Tr = 17.72 años.....</i>	<i>148</i>
<i>Gráfica 4.3. Comportamiento del flujo con un Tr = 17.72 en Av. Ventura Puente.....</i>	<i>152</i>
<i>Gráfica 4.4. Comportamiento del flujo con un Tr = 17.72 en Blvd. García de León.....</i>	<i>152</i>
<i>Gráfica 4.5. Comportamiento del flujo con un Tr = 17.72 en Av. Camelinas.....</i>	<i>153</i>
<i>Gráfica 4.6. Comportamiento del flujo con un Tr = 17.72 en Av. Solidaridad.....</i>	<i>153</i>
<i>Gráfica 4.7. La presión registrada por la EMA de Isla María Madre durante el paso de Willa.....</i>	<i>162</i>
<i>Gráfica 4.8. Velocidad del viento registrada por la EMA de Isla María Madre durante el paso de Willa.....</i>	<i>162</i>
<i>Gráfica A1.1. Hietograma para un Tr = 2 años.....</i>	<i>202</i>
<i>Gráfica A1.2. Hietograma para un Tr = 5 años.....</i>	<i>203</i>
<i>Gráfica A1.3. Hietograma para un Tr = 10 años.....</i>	<i>204</i>
<i>Gráfica A1.4. Hietograma para un Tr = 25 años.....</i>	<i>205</i>
<i>Gráfica A1.7. Hietograma para un Tr = 50 años.....</i>	<i>206</i>
<i>Gráfica A1.7. Hietograma para un Tr = 100 años.....</i>	<i>207</i>
<i>Gráfica A2.1. Comportamiento del flujo con un Tr = 2 en Av. Ventura Puente.....</i>	<i>210</i>
<i>Gráfica A2.2. Comportamiento del flujo con un Tr = 2 en Blvd. García de León.....</i>	<i>210</i>
<i>Gráfica A2.3. Comportamiento del flujo con un Tr = 2 en Av. Camelinas.....</i>	<i>211</i>
<i>Gráfica A2.4. Comportamiento del flujo con un Tr = 2 en Av. Solidaridad.....</i>	<i>211</i>
<i>Gráfica A2.5. Comportamiento del flujo con un Tr = 5 en Av. Ventura Puente.....</i>	<i>214</i>
<i>Gráfica A2.6. Comportamiento del flujo con un Tr = 5 en Blvd. García de León.....</i>	<i>214</i>
<i>Gráfica A2.7. Comportamiento del flujo con un Tr = 5 en Av. Camelinas.....</i>	<i>215</i>
<i>Gráfica A2.8. Comportamiento del flujo con un Tr = 5 en Av. Solidaridad.....</i>	<i>215</i>
<i>Gráfica A2.9. Comportamiento del flujo con un Tr = 10 en Av. Ventura Puente.....</i>	<i>218</i>
<i>Gráfica A2.10. Comportamiento del flujo con un Tr = 10 en Blvd. García de León.....</i>	<i>218</i>
<i>Gráfica A2.11. Comportamiento del flujo con un Tr = 10 en Av. Camelinas.....</i>	<i>219</i>
<i>Gráfica A2.12. Comportamiento del flujo con un Tr = 10 en Av. Solidaridad.....</i>	<i>219</i>
<i>Gráfica A2.13. Comportamiento del flujo con un Tr = 25 en Av. Ventura Puente.....</i>	<i>222</i>
<i>Gráfica A2.14. Comportamiento del flujo con un Tr = 25 en Blvd. García de León.....</i>	<i>222</i>
<i>Gráfica A2.15. Comportamiento del flujo con un Tr = 25 en Av. Camelinas.....</i>	<i>223</i>
<i>Gráfica A2.16. Comportamiento del flujo con un Tr = 25 en Av. Solidaridad.....</i>	<i>223</i>
<i>Gráfica A2.17. Comportamiento del flujo con un Tr = 50 en Av. Ventura Puente.....</i>	<i>226</i>
<i>Gráfica A2.18. Comportamiento del flujo con un Tr = 50 en Blvd. García de León.....</i>	<i>226</i>
<i>Gráfica A2.19. Comportamiento del flujo con un Tr = 50 en Av. Camelinas.....</i>	<i>227</i>
<i>Gráfica A2.20. Comportamiento del flujo con un Tr = 50 en Av. Solidaridad.....</i>	<i>227</i>



<i>Gráfica A2.21. Comportamiento del flujo con un $Tr = 100$ en Av. Ventura Puente.....</i>	<i>230</i>
<i>Gráfica A2.22. Comportamiento del flujo con un $Tr = 100$ en Blvd. García de León</i>	<i>230</i>
<i>Gráfica A2.23. Comportamiento del flujo con un $Tr = 100$ en Av. Camelinas.....</i>	<i>231</i>
<i>Gráfica A2.24. Comportamiento del flujo con un $Tr = 100$ en Av. Solidaridad.....</i>	<i>231</i>



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del problema

Las inundaciones son una respuesta de que se presenta en un espacio físico ante un fenómeno hidrometeorológico que, a nivel internacional cobra cada vez importancia e impacto, se estima que las mismas son posiblemente la causa más importante en pérdidas económicas en lo referente a fenómenos naturales, siendo además el más típico en presentarse en el mundo (Wang *et al.*, 2011). De acuerdo con la OECD (2016), las inundaciones a nivel mundial superan unas pérdidas mayores a los \$40,000 millones de dólares anualmente. Bajo ese panorama, se presupone un incremento en el número de personas vulnerables a los desastres relacionados con las inundaciones para el año 2050 (UNESCO World Water Assessment Programme, 2012), esto en conjunto con el incremento de la población en zonas propensas a inundaciones, por el cambio climático y por el acrecentamiento en el nivel de los océanos y mares.

En la República Mexicana, las inundaciones provocan daños temporales y permanentes en los sectores agrícolas, comerciales, industriales, educativos y habitacionales. El Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) identificó en el año 2016 que, de todas las pérdidas provocadas por eventos naturales, el 86% fue debido a fenómenos hidrometeorológicos. De esa cantidad, más del 70% se debió a la manifestación de intensas lluvias que provocaron a su vez inundaciones en el país. Se recoge también que, anualmente, se registran más de 120 defunciones relacionadas con esta problemática, misma que también provoca más de cinco millones de personas afectadas, más de 111 mil damnificados, 23,155 viviendas dañadas, 108 escuelas afectadas y 586 unidades económicas dañadas (CENAPRED, 2016; Vázquez y Palazuelos, 2017).



La ciudad de Morelia no es ajena a la problemática ya que históricamente ha manifestado inconvenientes referentes a las inundaciones en algunos sectores problemáticos de la ciudad y, a pesar de que no es nueva la aparición de esta complicación, sí se ha venido intensificando con los años.

1.2.Hipótesis

La presencia de los ríos Grande y Chiquito en Morelia es uno de los factores más importantes para la proliferación de la acumulación preocupante de agua en algunas de las calles y avenidas más importantes de la ciudad, el comportamiento topográfico de la ciudad ha permitido que en los puntos más bajos se puedan presentar problemas relacionados con la inundación, pero también la rápida conformación de asentamientos humanos sobre terrenos irregulares lo ha permitido.

El crecimiento de la población ha provocado entonces que se ocupen zonas que anteriormente habían sido de cultivo, ciénegas y depresiones naturales donde se captaba agua, incluyendo las márgenes de los ríos Grande y Chiquito (Hernández y Vieyra, 2010). La falta de una planeación urbana, de respetar las estipulaciones establecidas por el ordenamiento territorial para conocer cuáles son las restricciones territoriales, la segregación socio-espacial y socio-ambiental de los habitantes, la escasa responsabilidad de las autoridades y de sus instituciones de control y de la falta de conocimiento que se tuvo para el desarrollo de las áreas urbanas (Bernal, 2018), fue lo que contribuyó en gran medida a que las circunstancialidades generadas por las inundaciones empeoraran.

Retomando las condiciones topográficas de la ciudad, parte de la problemática presentada también es asociada a una red de drenaje ineficiente. Bajo este planteamiento, menciona UNISDR (2012) que la inadecuada gestión de los recursos hídricos, de la planeación realizada para los sistemas de alcantarillado de los residuos sólidos en algunas de las colonias más importantes de la ciudad permite que las mismas presenten problemas de inundaciones en dichos sectores de la ciudad.



El programa IBER, entre todas sus características, es un software que se utiliza para simular el flujo turbulento de superficie libre y el movimiento de aguas poco profundas, resolviendo ecuaciones bidimensionales de aguas someras promediadas en profundidad mediante las ecuaciones de Saint-Venant (Cea *et al.*, 2010), con lo que se puede predecir entonces el comportamiento que tuvo el flujo del agua cuando se generó la inundación de la ciudad provocada por el huracán Willa en el 2018 para determinar el tirante que tuvo el agua en diferentes puntos de la zonas afectadas, sabiendo cuáles fueron las primeras colonias en manifestar el inconveniente, la velocidad con la que se propagó a otras partes de las colonias más importantes de la ciudad y el tiempo que tomó en provocar las el incremento en el nivel del agua sobre las calles, confirmando así que el tirante en algunos las anegaciones alcanzó el metro de altura para la tarde del 22 de octubre, apenas 36 horas después que fue registrada como tormenta tropical y 12 horas después de haber alcanzado la categoría 5.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Realizar la modelación de la inundación provocada por la tormenta ocurrida entre la madrugada del 22 de octubre del año 2018 teniendo en cuenta la precipitación total diaria y asignando diferentes periodos de retorno a diferentes duraciones de tormenta, misma que fue provocada por la precipitación ininterrumpida generada por el huracán Willa que fue reportado como categoría 5 según la escala de Saffir-Simpson en las colonias Electricistas, Ventura Puente y Chapultepec Sur de la ciudad de Morelia, México.

1.3.2. Objetivos particulares

- Conocer el historial de inundaciones de la ciudad de Morelia para determinar el comportamiento general que han tenido esos desastres a lo largo de la historia moderna de la ciudad, de tal forma que se puedan obtener las causas por las cuales se presentan típicamente.



- Identificar las zonas vulnerables de la ciudad y establecer la zona de estudio donde se registraron las afectaciones efectuadas.
- Construir hietogramas sintéticos de precipitación para diferentes periodos de retorno a partir de la información climatológica disponible y tomando como base la teoría sobre hidrología superficial.
- Emplear la herramienta IBER para efectuar una modelación estimada de la inundación acaecida en los tiempos establecidos mediante parámetros geoestadísticos que permitan establecer una aproximación significativa los eventos.
- Realizar un análisis forense en donde se permitan conocer los aspectos socioeconómicos que tuvieron lugar antes, durante y después del evento, así como también la recopilación de información hidrometeorológica, una revisión de planes y programas de acción que resulte en la elaboración de un diagnóstico final.
- Efectuar una propuesta de solución ante la problemática presentada que permita tomar medidas más efectivas para la preparación de estas emergencias en base a los resultados obtenidos.

1.4. Importancia del estudio

La vulnerabilidad que tiene la población de las colonias Electricistas, Ventura Puente y Chapultepec Sur de sufrir inundaciones es muy grande, por lo tanto, describir el comportamiento que tuvo la tormenta en base a la información proporcionada por los pluviómetros resulta imprescindible para poder estimar el comportamiento que tuvo la precipitación en la zona que generó la inundación, así como el tirante de este en diferentes puntos de las zonas afectadas. Establecer esta información permite entonces estimar cuáles son las primeras zonas en inundarse, cuáles son las que pueden presentar daños y en qué tiempo.

Determinando las variables mencionadas, es posible poder proponer entonces un plan de acción que permita a la población poder prevenirse ante las eventualidades provocadas por intensas lluvias que se generan principalmente por la presencia de



huracanes en el Océano Pacífico, por lo que es sustanciosa también la revisión de los planes actuales que se tienen para la comunidad y evaluar si los mismos requieren una actualización una vez establecida la modelación de la inundación y prevenir así a la población.

Actualmente, a pesar de que hay muchos estudios que incluyen la modelación de la simulación de una inundación de cierto lugar en específico tanto a nivel internacional como en el país, pocos son los estudios que han incluido un análisis forense que permita estipular las particularidades acontecidas que permitan a la comunidad en general entender la problemática partiendo de la modelación realizada, en donde se establezcan estrategias que permitan mejorar el conocimiento que se tiene del tópico en donde se incluya información política y social. En este estudio se presenta entonces un análisis hidrometeorológico e hidrológico para evaluar las características matemáticas y técnicas del tema para posteriormente realizar un análisis que tenga un enfoque que pueda ser de mejor conocimiento público, una vez determinados los resultados de la simulación correspondiente.

1.5. Limitaciones del estudio

Como en cualquier estudio basado en la estadística y en la implementación de modelos matemáticos capaces de realizar una representación y caracterización de un evento en particular, no es cien por ciento infalible, esto pese a que la elaboración del mismo es en base a los alcances de información y tecnológicos que mejor se pueden implementar. En específico, se contemplan las siguientes limitantes:

- Naturalmente, la información registrada por medio de los pluviómetros que se emplearon para la medición de lecturas relacionadas con la precipitación que tuvo lugar en el periodo de estudio influye en la información registrada.
- La escala temporal empleada es la que se encuentra en la base de datos de la CONAGUA de las estaciones climatológicas que maneja, mismas que registran la información de forma horaria, lo cual impide conocer la información detallada a un



menor tiempo. Si bien se considera que la información registrada a cada día puede brindar el detallado suficiente para la realización de la modelación por medio de una distribución, realizar una mayor aproximación en cuanto a la escala temporal permite identificar más aproximadamente el detalle de la misma.

- Para poder tener las condiciones de la tormenta en específico se cuenta con la implementación de un método de distribución, de modo que de ese valor de 24 horas que se cuenta se pueda dispensar la precipitación a través del tiempo en intervalos mucho menores, de tal manera que se pueda apreciar un comportamiento aproximado de la lluvia. El inconveniente es la misma distribución, que tratará de simular cómo es que se presentó la tormenta y el comportamiento del flujo pero sin llegar a ser completamente exacta.
- Es complicado determinar si en toda la zona de estudio llovió uniformemente la misma cantidad, por lo que al ingresar la información de intensidad en el software empleado y asignar los hietogramas en la microcuenca se presentará de forma empírica y representativa en toda la zona aún si en algunas regiones llovió más que en otras.
- El programa IBER cuenta con la limitante de no reconocer la presencia de sistemas de alcantarillado y saneamiento por los cuales se pueda evacuar la avenida que se presenta en la superficie, por lo que no es posible conocer con exactitud si el tirante registrado en las gráficas del comportamiento del flujo corresponde también con el funcionamiento que tuvo el sistema en cuestión, por lo que es muy probable que los resultados mostrados sean sensiblemente mayores a los que se presentaron realmente el día de la inundación.
- Las condiciones del equipo de cómputo utilizado son la limitante más importante, ya que tomando en cuenta las características del funcionamiento del mismo se seleccionó la escala temporal a utilizada y la delimitación de la zona de estudio. El programa IBER exige muchos recursos de un ordenador promedio y es por ello que no resulta sencillo permitir una zona de estudio que abarque otras colonias que igualmente presentaron daños por la inundación y que no fueron consideradas por el impacto que



tuvo el desastre respecto a las demás y por su cercanía a la zona donde se registró la mayor problemática. Directamente, las características internas del equipo utilizado también influyen en la escala temporal utilizada, ya que al ser una más aproximada sería necesario más tiempo de procesamiento de la información y de la obtención de resultados.

1.6. Definición de términos

Inundación. Se recoge por medio de (WMM/UNESCO, 2013), dentro del glosario internacional de hidrología que la definición oficial de inundación es un aumento de agua por arriba del nivel normal del cauce. Esto implica entonces que el nivel normal al que se refiere el glosario es cuando la superficie del agua se encuentra en tales condiciones que no presenta ningún daño ni peligro para la población, por lo que es considerada como tal cuando la superficie del agua rebasa un punto en el que resultan pérdidas económicas en una región.

Zona de estudio. Se entenderá por zona de estudio a la región geográfica de una comunidad o zona rural en donde se desarrollará el estudio completo, abarcando la recopilación de datos existentes, la modelación matemática y la simulación para poder representar los resultados gráficamente y posteriormente interpretarlos.

Modelación. Consiste en la simulación de un sistema físico con elementos espacio-temporales que se encuentran fundamentada mediante la implementación de funciones matemáticas que puedan permitir dicha simulación en base a los datos recopilados y manipulados para adaptarse a las condiciones que se requieran determinar.

Análisis forense. A pesar de que la palabra forense deriva del latín *forensis*, cuyo significado es “relativo al foro”, en la actualidad se emplea prácticamente para la comprobación de cómo es que sucedió un hecho en específico (Herrera, 2010).



Estadística. En lo referente al análisis de datos, es una ciencia que se encarga de recolectar, diseñar, describir analizar e interpretar los mismos datos para transformarlos en información para tomar decisiones teniendo en cuenta determinadas características que se encuentren en una incertidumbre (Quezada, 2010).

Escala temporal. Se entenderá como los intervalos de periodo de tiempo que servirán para la obtención de resultados parciales que, juntándolos todos, permitan la paráfrasis de la información completa para poder reproducirla en conjunto y establecer entonces las acciones ocurridas mediante el lapso seleccionado.

Pluviómetro. Se refiere al equipo que se utiliza para la medición de la cantidad de agua atmosférica en sus diferentes estados que precipita en un lugar en específico. Los pluviómetros típicamente registran las lecturas en milímetros.

Tirante. En hidráulica, es la distancia vertical desde el punto más bajo de un espacio físico determinado (regularmente canales y ríos, aunque tradicionalmente también se puede extrapolar a otros elementos) a la superficie del agua (French, 1985).



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE BIBLIOGRAFÍA

2.1. Introducción

En este capítulo se presenta la revisión bibliográfica de los conceptos clave tratados en esta investigación: inundación, vulnerabilidad, resiliencia, estaciones meteorológicas, interpolación espacial, modelación de inundaciones y análisis forense. La recopilación de la información se hizo conforme a la búsqueda de los conceptos clave en repositorios de tesis de universidades y en la búsqueda de artículos de divulgación científica en bases de datos de Internet, donde se cuenta con la visualización de trabajos de libre acceso y otros en donde, por medio de la cuenta institucional de la UMSNH.

2.2. Descripción y análisis de investigaciones relacionadas

2.2.1. Inundaciones

Haciendo énfasis en los estudios realizados a las inundaciones acaecidas en la ciudad de Morelia con el propósito de presentar históricamente dichos aportes y su concurrencia, varios autores hacen menciones de los eventos desde diferentes puntos de vista, mismos que se relacionan con la naturaleza de esta investigación.

A través del tiempo, ha habido muchas investigaciones que se han enfocado en el estudio de las inundaciones, sus antecedentes y sus consecuencias en prácticamente todos los niveles de análisis (social, físico, biológico, etc.) y considerando diferentes alcances de análisis bajo cualquier circunstancia mediante la cual han sido generadas (ya sea debido a las inundaciones costeras o las provocadas por intensas lluvias).

El término inundación ha tenido varias definiciones que han variado con el paso del tiempo, pero en lo que todas están prácticamente de acuerdo es la referente al flujo de agua que se acumula sobre áreas físicas que habitualmente se encuentran

secas y cuando ocurren en espacios o ambientes construidos, el término se enfatiza en desbordamientos de grandes cuerpos de agua sobre tierra en un área construida (Martínez, 2016). Para conocer más concretamente el término de la inundación, la misma puede ser complementada en función a lo que la genera, misma variable que se puede determinar estableciendo su clasificación y sus tipos, teniendo en cuenta que hay ambientes en donde las inundaciones se originan por motivos que no siempre tienen que ver con el desbordamiento de cuerpos de agua ya existentes, a pesar de que unos sean más frecuentes que otros o que tengan mayor número de incidencias en el mundo.

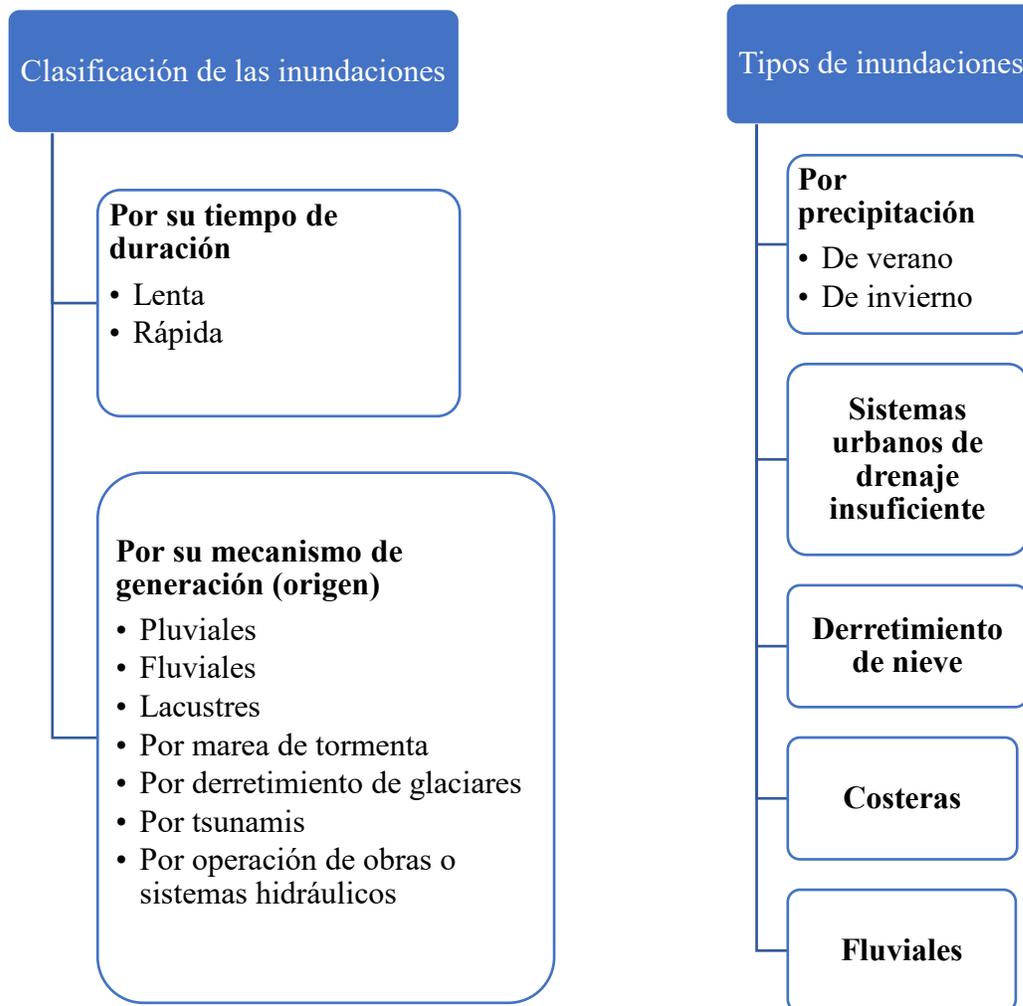


Figura 2.1. Clasificación y tipo de inundaciones que se pueden presentar en un espacio en específico bajo ciertas condiciones (Pablo, 2012).



Pablo (2012), recogió que las inundaciones pueden clasificarse de acuerdo a diversos parámetros, tales como su tiempo de duración y el mecanismo que las generan (Tabla 2.1). Así mismo, Pablo (2012) determinó el tipo de inundaciones conforme a su origen para cada clasificación de las mismas.

Auténticamente, las inundaciones en Morelia han sido estudiadas en diversos campos de aplicación que no necesariamente se aplican en un entorno ingenieril. En lo respectivo a la historia de la ciudad, (Oseguera, 2014) hace un recorrido general de los desastres e historia ambiental en general de la ciudad de Morelia, observando los factores geohistóricos relacionados con las inundaciones que permita asociarlos con la parte socioambiental y las acciones emprendidas por el gobierno en turno que fueron impulsadas para resolver tal cuestión.

Más adelante, Arreygue *et al.* (2005), Arreygue (2008) y Arreygue-Rocha *et al.* (2012) realizaron estudios hidrológicos y geomorfológicos que se presentan en las partes más susceptibles de la zona de estudio, haciendo énfasis en la región cercana al Río Chiquito y la eventualidad histórica de inundaciones que han sido provocadas por éste, proponiendo igualmente una modelación del Río Chiquito mediante el uso del software HEC-RAS, analizando las características hidráulicas y ultimando que la morfología del río ha sido modificada en el pasado, trayendo como consecuencia que se presenten desbordamientos e inundaciones en lo que antes eran sus antiguos cauces, mismos que actualmente se encuentran compuestos por la presencia de infraestructura como calles, viviendas, fábricas y comercios, siendo las precipitaciones extremas y las intervenciones antrópicas los factores más importantes para la presencia de desbordamientos.

2.2.2. Vulnerabilidad

Con el paso del tiempo, el enfoque que se le ha dado a los trabajos investigativos relacionados con la vulnerabilidad ante las anegaciones ha ido evolucionando paulatinamente, (Turner *et al.*, 2003) recogieron que la noción que



tienen los investigadores sobre la vulnerabilidad ha cambiado sobre las últimas tres décadas y de forma consecuente ha habido intentos de definir y captar lo que se entiende por el término, estipulando entonces una conceptualización de vulnerabilidad referente a inundaciones como el grado en el que un espacio físico o sistema en general puede ser susceptible a las mismas ocasionada por la ostentación y perturbación, que se conjuga entonces con su capacidad o incapacidad de enfrentarse, recuperarse o adaptarse; bajo este esquema, Balica *et al.* (2009) y Cajigal, (2019) incluyeron que, al no ser un significado nuevo y que ha ido cambiando, han emergido de la investigación otros conceptos como riesgos y desastres, impactos climáticos y, sobre todo, resiliencia.

Para la evaluación de la vulnerabilidad Balica (2009) estableció una metodología basada en indicadores que permiten a los responsables de la toma de decisiones y de formulación de las políticas de acción establecer los objetivos que permitan la reducción de la misma y que permitan también supervisar los avances, proponiendo una ecuación que conecte los valores de todos los componentes y factores (exposición, susceptibilidad y resiliencia) sin la necesidad de realizar una interpolación o balance de la información, permitiendo hacer comparaciones entre diferentes escalas geográficas.

Para la elaboración de una metodología que involucre los factores asociados con la vulnerabilidad para la generación de mapas de riesgos, Flax *et al.* (2002) desarrollaron una sistematización de evaluación del riesgo y vulnerabilidad a la que denominan Evaluación de la Vulnerabilidad en la Comunidad (CVAT, por sus siglas en inglés), donde además de incluir desastres como tormentas, viento, tornados e inundaciones, también involucra la ubicación de instalaciones de servicios, policía, bomberos, hospitales, refugios, etc. Carter (2005) y Chakraborty *et al.*, (2005), por su parte, utilizaron como ejemplo los huracanes Katrina y Rita para analizar de forma conjunta los elementos de amenaza, consecuencia y vulnerabilidad, proponiendo



reducir la vulnerabilidad hacia los daños materiales y el riesgo de inundación y enfocarse más en la parte social.

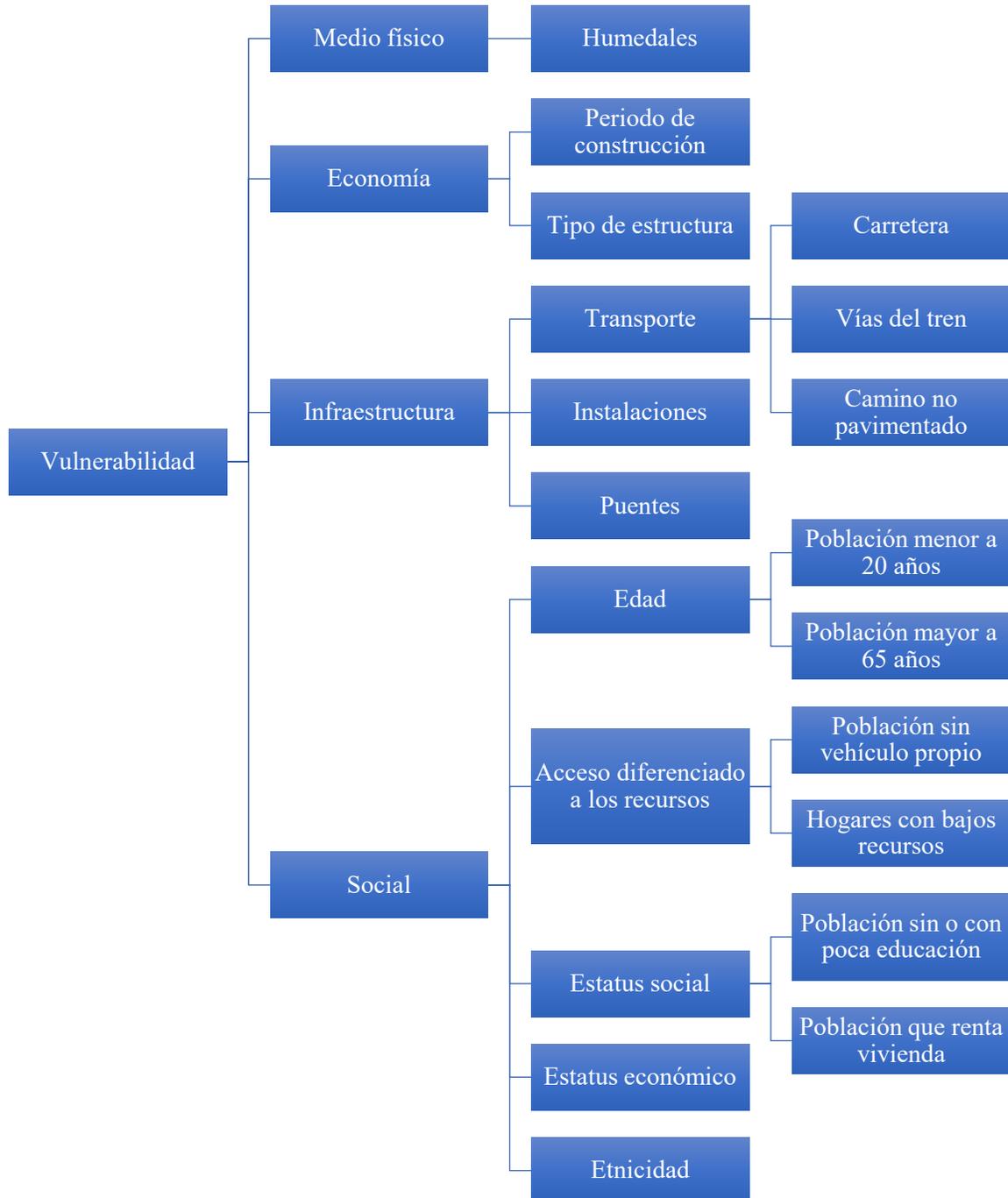


Figura 2.2. Sectores que se enfocan en la determinación de vulnerabilidad (Peck et al., 2007)



Peck *et al.* (2007) recogieron información de las investigaciones anteriores y perfecciona el alcance del significado, incluyendo dentro de la vulnerabilidad ante inundaciones los factores físicos, económicos, sociales y de infraestructura, desglosando cada componente en indicadores específicos, siendo el valor medio de los cuatro la vulnerabilidad global a las inundaciones.

Dado a que la vulnerabilidad en las personas es un componente esencial en los estudios que se realizan de evaluación de riesgo de inundación, una comprensión profunda del futuro riesgo de inundación en un entorno en específico requiere una comprensión de la respuesta de la vulnerabilidad de la gente a los cambios en los riesgos de inundación (Wang, 2021). Para establecer una metodología que proporcione la obtención de la vulnerabilidad hacia las inundaciones de una región usando Sistemas de Información Geográfica (SIG, por sus siglas en español), Peck *et al.* (2007) formularon entonces un diagrama que permita el ingreso de los cuatro componentes y sus respectivas capas.

2.2.3. Resiliencia

La palabra resiliencia tiene su origen en el latín dentro del término *resilio*, el cual significa ‘volver atrás’ (Bernal, 2018). Por otro lado, en términos de aplicación metodológica, resiliencia no es un concepto que resulte específico y fácil de definir ya que hay quienes la definen como la protección de las infraestructuras o de las comunidades, aunque la definición más ampliamente aceptada para el término es la que menciona que es la capacidad de reducir la magnitud, el impacto de una perturbación y como un sistema es capaz de absorber, adaptarse y/o recuperarse con rapidez de un evento potencialmente turbulento (NIAC, 2009).

El primero en aplicar el término resiliencia en un sistema determinado fue Holling (1973), quien señaló el concepto y su relación en un sistema ecológico y su potencial para absorber diversos cambios originados dentro del mismo entorno, mismos que pueden modificar la población de seres vivos que habiten en él.



A pesar de que el origen del concepto de resiliencia se remota a varios años antes, en lo que compete al dominio de la ingeniería ha sido relativamente nuevo en comparación a otras áreas del conocimiento e incluye sistemas técnicos diseñados por ingenieros en donde se tiene una interacción con los humanos y la tecnología; sistemas de infraestructura tales como distribución del agua, plantas nucleares, transporte, presas y demás elementos pueden considerarse subdominios correspondientes a la ingeniería (Hosseini *et al.*, 2015).

Cuando la resiliencia se incrementa dentro del ecosistema, tiene por consiguiente un aumento en las probabilidades para que el mismo no se vea alterado o, por lo menos, no a grandes proporciones para que no se modifique su estructura original; dada esta descripción, es deducible entonces que la resiliencia es lo opuesto a la vulnerabilidad, puesto que si hay un sistema que es vulnerable, aún si se presentan desastres pequeños estos pueden ser devastadores (Bernal, 2013).

A pesar de que pueden aplicarse de la misma forma la resiliencia ingenieril y la ecológica, Kuang y Liao (2020) destacaron que las dos tienen interpretaciones diferentes, ya que la parte de la ingeniería concierne más a la estabilidad de un sistema y a la velocidad con la que puede regresar a sus circunstancias originales tras haberse presentado la perturbación, mientras que la parte ecológica tiene más su aplicación en la capacidad de supervivencia del sistema a través de los cambios. Dado a que una inundación no siempre resulta peligrosa, ellos definen la resiliencia ante inundaciones como la habilidad de evitar o minimizar el daño de las inundaciones cuando las mismas ocurren o, en el caso en el que haya daños considerables y se presenten grandes pérdidas económicas, la resiliencia a las inundaciones es la capacidad de recuperarse rápidamente de la catástrofe hasta que el espacio en cuestión alcance un estado de funcionamiento óptimo previo al desastre. Con esto, Kuang y Liao (2020) combinaron las definiciones de ecología y de ingeniería para adaptarla a un concepto que dependa más de las circunstancialidades del evento y de sus consecuencias.



Para la medición de la resiliencia respecto a los desastres, Bruneau *et al.* (2003) instituyeron cuatro escenarios de evaluación: tecnología, organización, sociedad y economía; y, a pesar de que lo enfoca la resiliencia ante eventos sísmicos, Zhang *et al.*, (2021) retoman la metodología y la emplean para su consideración ante las inundaciones.

2.2.4. Estaciones meteorológicas

A finales del siglo XIX, dada la cada vez más presente necesidad de tener un registro sistematizado del tratamiento de la información climática y meteorológica surge la Organización Meteorológica Internacional (OMI, por sus siglas en español) que pasó a llamarse Organización Meteorológica Mundial (OMM, por sus siglas en español) a mediados del siglo XX, organismo especializado de las naciones unidas para la determinación de los elementos meteorológicos del tiempo, clima, la hidrología operativa y las ciencias geofísicas conexas, creciendo en relevancia la medición de las variables meteorológicas en los últimos años para el monitoreo del comportamiento de las cuencas hidrográficas, realizar monitoreos del cambio climático y en la determinación de políticas relacionadas con el medio ambiente (Ureña, 2011; Pardo-García *et al.*, 2017).

Constantemente, la OMM ha publicado la “Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos”, la cual empezó a publicarse desde 1954. En su primera versión, recoge que las observaciones meteorológicas se emplean para el análisis meteorológico, predicciones y avisos de tiempo violento para el estudio del clima, así como para la hidrología y la meteorología agrícola. No fue hasta la edición de 1996 que se incluían temas y capítulo y temas revisados, así como información relatando los últimos avances conforme al registro de la información meteorológica (OMM, 1996); ahí, se mencionó que, en una estación que realiza observaciones de superficie se determinan las siguientes variables meteorológicas:

- a) Tiempo presente
- b) Tiempo pasado



- c) Dirección y velocidad del viento
- d) Tipo de nubes
- e) Condensación
- f) Altura de la base de las nubes
- g) Temperatura
- h) Humedad relativa
- i) Humedad del suelo
- j) Humedad del ozono
- k) Presión atmosférica
- l) Precipitación
- m) Capa de nieve
- n) Insolación y/o radiación solar
- o) Temperatura del suelo
- p) Evaporación

La OMM (2010), también indicó que los requisitos a cumplir los instrumentos de medición son: fiabilidad y estabilidad, facilidad de funcionamiento, calibración y mantenimiento, sencillez de diseño, durabilidad y nivel de costo aceptable.

Desde luego, depende del organismo administrador de las estaciones y su poder adquisitivo y sus intereses de medición que cuenten o no con una base de estaciones capaz de medir todas las variables o no. En México, se observa un rezago tecnológico al tener el Servicio Meteorológico Nacional (SMN, por sus siglas en español) dificultades para mantener operativas las estaciones, por lo que muchas de las veces la información que se extrae está demasiado incompleta y difícilmente se puede emplear para un análisis adecuado; así también, no se cuenta con mucho personal que se encuentre capacitado para su operación y mantenimiento (CONAGUA, 2010).

El cambio tecnológico puede afectar los registros de datos, por lo que Ureña, (2011) menciona que para preservar la calidad de la información climatológica es precisa la



utilización de estaciones meteorológicas automáticas (EMA) en lugar de las Estaciones Meteorológicas Convencionales (EMC), ya que permiten el acceso a la información meteorológica en tiempo real y de lugares alejados. A pesar de que aún no se cuenta con la infraestructura ni el presupuesto suficiente para la implementación de las EMA, algunas instituciones públicas, privadas y organismos operadores de agua cuentan con su propio sistema de monitoreo de la información meteorológica, registrándola en una base de datos que puede ser de dominio público o no. No obstante, en la mayoría de las regiones del país se siguen utilizando EMC y son las gestionadas por la CONAGUA y por el SMN (Servicio Meteorológico Nacional), por lo que en la mayoría de los casos no es posible medir otras variables con la precisión adecuada del lugar y sus características específicas.

2.2.5. Modelación de inundaciones

Para la modelación matemática del flujo de agua existe una gran variedad de herramientas computacionales que permiten realizar la labor adecuadamente y que han mejorado con el paso de los años, (Bladé *et al.*, 2014; Pinos y Tible, 2019) recogieron adecuadamente la información competente a los softwares de análisis de flujos más comunes.

Néelz *et al.* (2009) establecieron una guía con las características de los softwares más empleados para la modelación de flujos, misma que se complementa con las aportaciones de herramientas propuestas por Bladé *et al.* (2014); y Pinos y Tible, (2019).

- I. El nombre del software
- II. Si el código tiene capacidad de determinar la captación de impacto
- III. El nombre del desarrollador
- IV. Si el software es comercial, es propiedad interna de una empresa o es un código de investigación científica.
- V. Si el software cuenta con la capacidad de hacer modelaciones en una o dos dimensiones.



*Tabla 2.1. Herramientas computacionales más comunes para la modelación de flujos
 (Néelz et al., 2009; Bladé et al., 2014; Pinos y Timble, 2019).*

(I) Herramienta	(II) Captura de choque	(III) Desarrollador	(IV) Estatus de disponibilidad	(V) Modelación
Mike-21	No	DHI	Comercial	1D y 2D
Sobek	Sí	DELTARES	Comercial	1D
TUFLOW	No	BMT-WBM	Comercial	1D
JFLOW	No	JBA	Interno	
Iber	No	UPC, USC, UC	Comercial	1D y 2D
DIVAST	No	Cardiff Univ.	Investigación	2D

Bladé *et al.* (2014) puntualizaron entonces que Iber es un modelo matemático bidimensional que se emplea para la simulación del flujo, mismo que fue realizado mediante una colaboración entre el Grupo de Ingeniería Matemática, el Instituto Flumen de la Universidad Politécnica de Cataluña, el Grupo de Ingeniería Matemática de la Universidad de Santiago de Compostela y el Grupo de Ingeniería y Medio Ambiente de la Universidad de Coruña y promovido por el Centro de Estudios Hidrográficos, siendo sus principales usos característicos la modelación del transporte de mezclas de sedimentos, de hábitat fluvial, de calidad de aguas y, para los fines que este trabajo competen, permitir la evaluación de zonas inundables.

De entre los trabajos que se han realizado bajo la implementación de este software, se encuentran los de Bladé *et al.* (2017), que consiste en la modelación de la propagación de una inundación en las galerías de servicio de una central nuclear; Pinos y Timble (2019), que realizan una evaluación del comportamiento de modelos hidráulicos bidimensionales que tengan por objeto la generación de mapas de inundación en cuencas de ríos de montaña; y González-Cao *et al.* (2021) que hacen



una reconstrucción de una inundación histórica acaecida en Badajoz, España, en 1876.

2.2.6. Análisis forense

En la actualidad, no se cuentan con muchos estudios que involucren las inundaciones con la realización de un análisis forense. El mismo, de hecho, se encuentra relacionado con la información recopilada en apartados de vulnerabilidad y resiliencia. Hurst (2007), en su investigación, estableció que el término “forense” aplicado a las subdisciplinas de las geociencias aparecieron por primera vez a finales de la década de 1970 con un enfoque más idealizado hacia la contaminación de los suelos y a los recursos del agua subterránea, surgiendo términos como geoquímica forense y geología forense que se utilizaban para describir el uso de dichas técnicas para identificar potenciales fuentes de contaminación.

Posteriormente, Keating, *et al.* (2016) expresaron una metodología en donde incluye cinco elementos que forman parte de un análisis forense de desastres, entre los que incluye el riesgo ante inundaciones: el análisis de la fuente del problema, las revisiones de la información histórica, el diagnóstico longitudinal, los escenarios retrospectivos y la comunicación eficaz, llamándolo como Capacidad de Revisión Posterior al Evento (PERC, por sus siglas en inglés).

En México, Herrera (2018); y Ramírez y Herrera (2015), instauraron entonces una guía metodológica para el análisis forense aplicado a las inundaciones, en donde, en orden cronológico de recopilación y análisis, se obtengan:

a) Recopilación e integración de información

Involucra la obtención y recopilación de la información que permita identificar y describir las etapas previas del incidente. Esta parte de la guía involucra cualquier característica de tipo hidrometeorológica muy general, así como también



aspectos socioeconómicos, ambientales y político-sociales. Para poder presentar una adecuada estructuración de esta información en el presente trabajo, en el *Capítulo III* se presentan los aspectos generales a considerar para la zona de estudio: geografía, fisiografía, geología, hidrología, los aspectos socioeconómicos que permiten identificar las variables a considerar para el análisis de un desastre hidrometeorológico y los programas y leyes estatales y municipales que aplican para la región estudiada, todo eso aplicable ya sea a la caracterización de la cuenca a la cual pertenece la zona de estudio o a la misma.

En este trabajo, sin embargo, también se propone la implementación de una cronología que permita conocer mejor cuál fue el comportamiento de la tormenta los días previos y posteriores a la inundación que incluya cualquier detalle referente a las características generales de la tormenta sin abundar en aspectos a profundidad en lo referente al análisis hidrometeorológico e hidrológico.

b) Análisis hidrometeorológico e hidrológico

Comprender los aspectos hidrometeorológicos e hidrológicos de la tormenta permiten conocer cuál fue su relevancia en la parte técnica. Se incluye el génesis de la tormenta desde días previos a los que la permitieron ser considerada depresión tropical y sus propiedades de presión y velocidad del viento, para comprender mejor el comportamiento destructivo que pudo haber tenido y, en consecuencia, los efectos negativos que causó en las regiones terrestres donde tuvo influencia. La bibliografía consultada también incluye la implementación de las distribuciones espacio-temporales de la información de precipitación de la tormenta y su administración mediante interpolación Kriging, así como cualquier parámetro estadístico que pueda caracterizar el registro de la tormenta; esta información se presenta en el *Capítulo III* para permitir una mejor comprensión del manejo de las variables extraídas de las estaciones climatológicas.



c) Análisis hidráulico

Dependiendo de la información regional que se tenga, el análisis hidráulico puede no realizarse en función de la guía metodológica propuesta en la bibliografía, pues para que pueda ser procedente tiene que existir información actualizada y al alcance de las obras hidráulicas y de protección (si las hay) dentro o con influencia en la zona de estudio, lo que incluye tener alcance en el comportamiento de presas, embalses, estaciones de bombeo, sistemas de abastecimiento de agua potable, sistemas de alcantarillado y presas. Si no se cuenta con pesquisa técnica de las obras hidráulicas, se puede complementar con la información otorgada por los organismos e instituciones públicas o privadas encargadas de la operación y mantenimiento de las obras hidráulicas de la región.

d) Análisis integrador

Esta parte del análisis forense depende en gran medida de la información previa establecida por parte de las autoridades y organismos que se encarguen de evaluar los peligros naturales que pueden surgir de forma nacional, estatal, municipal o local. Incluye la revisión de planes y programas de acción y desarrollo más específicos y particulares de la zona de estudio que se puedan encontrar por parte de las instituciones ambientales e hidrológicas de la comunidad y de las notas periodísticas de los medios de comunicación para identificar el seguimiento que se le dio al desastre. Para integrar la información, la metodología presenta la generación de mapas de inundación y determinación de afectaciones a partir de Modelos Digitales de Elevación (MDE) y la precipitación recabados. Integra igualmente el sector socioeconómico (*Figura 2.3*), estableciendo las afectaciones en asentamientos humanos y determinando las pérdidas económicas en viviendas, empresas y comercios en general; si no existe esa información o si no se cuenta con informes históricos se permiten hacer estimaciones que se encuentren en función del comportamiento del tirante del agua en diversos puntos de las zonas afectadas



pertenecientes a la región en estudio, en conjunto con los detalles otorgados en su momento por las instituciones como Protección Civil hacia medios de comunicación.

Para la generación de mapas que describan el comportamiento del flujo, en esta investigación se presenta en dos espacios diferentes las características cuantitativas y cualitativas, siendo las primeras presentadas en *Análisis de Datos*, mientras que las segundas en *Análisis forense*.

e) Diagnóstico final

Se refiere especialmente a la recopilación social de la información que, en conjunto con los detalles expuestos del análisis hidrometeorológico, hidrológico, hidráulico y la información general de la zona permita entonces una anticipación de conclusiones respecto a cuáles fueron las causas y los efectos que dejó a su paso la inundación. También involucra un contraste con información histórica de inundaciones acaecidas en la zona de estudio para comprender si las inundaciones se han llevado a cabo por las mismas condiciones o la estudiada en este caso es representada por un fenómeno atípico. Involucra la implementación de conclusiones y recomendaciones que, para este trabajo, se presentan en el *Capítulo V*.

Ramírez y Herrera (2016) incluyeron igualmente de una forma general el análisis forense en inundaciones, concertando el significado como una metodología aplicada después de la ocurrencia del evento, dando la reconstrucción del evento para saber qué fue lo que ocurrió, qué factores contribuyeron, cuáles fueron las fallas, quiénes fueron los principales actores afectados y a los que se les atribuyen los daños, de modo que se oriente una evaluación del suceso una vez se tengan los puntos mencionados y que se finalice con un objetivo de acción que sugiera lo que sea más conveniente.

La evaluación de estos puntos resulta sustanciosa para ayudar o para mejorar el sistema de prevención de inundaciones y poder reducirlos en el futuro lo más que

se pueda, reduciendo la vulnerabilidad ante inundaciones de la zona y aumentando su resiliencia.

Los recientes estudios realizados por Bronstert *et al.* (2018) y Adeel *et al.* (2020) crearon una inventiva comprensiva sobre los impactos generados tras el paso de las inundaciones en regiones del mundo como Alemania, Canadá, Estados Unidos y México formulando un análisis hacia tres sectores específicos: social, de infraestructura y económicos.

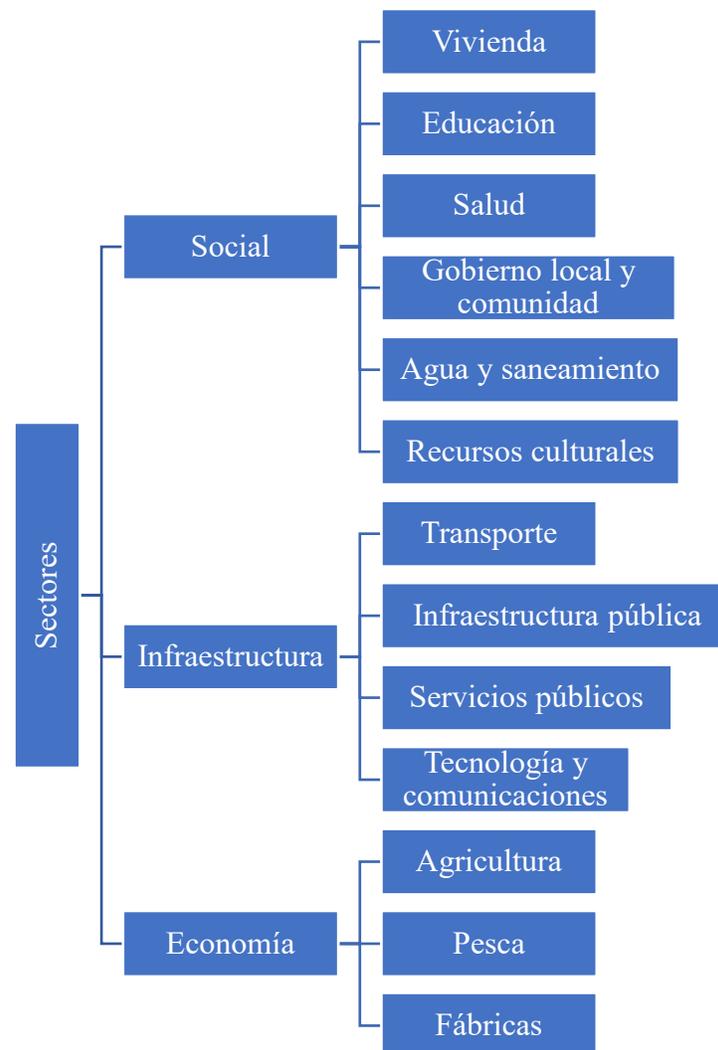


Figura 2.3. Sectores de la comunidad tangibles para la evaluación de desastres durante el análisis forense.



CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1. Introducción

El tema central de este capítulo es indicar las características presentes que resulten competentes para la investigación en la zona de estudio, así como también abundar en la metodología utilizada para la realización de los gráficos, fotografías, mapas y tablas presentes para que todo en su conjunto pueda llevar a cabo el abordamiento propuesto en los objetivos y en la ratificación de la hipótesis establecida en la presente investigación.

3.2. Zona de estudio

Primeramente, la zona de estudio es la delimitación geográfica del espacio donde se lleva a cabo el estudio en cuestión, mismo que se encuentra establecido desde diferentes parámetros o capas, de tal forma que se permitan entender los aspectos físicos, geográficos, ambientales, climatológicos e hidrológicos del territorio analizado y que resulte fundamental para discurrir en su vinculación con los materiales considerados, los procedimientos llevados a cabo y su posterior análisis de los resultados obtenidos.

3.2.1. Localización geográfica

La zona de estudio se localiza en la ciudad de Morelia en el interior de la República Mexicana, dentro de lo que es considerada la región occidente del país. El municipio se encuentra al norte del estado de Michoacán. Se halla dentro de los paralelos 19°27'06" y 19°50'12", así como los meridianos 101°01'43" y 101°30'32". El municipio representa aproximadamente el 2% de la superficie total del estado y cuenta con un área de 146 kilómetros cuadrados. La cabecera municipal, la ciudad de Morelia, es la capital del estado y a su vez es el municipio más poblado y más grande del mismo.

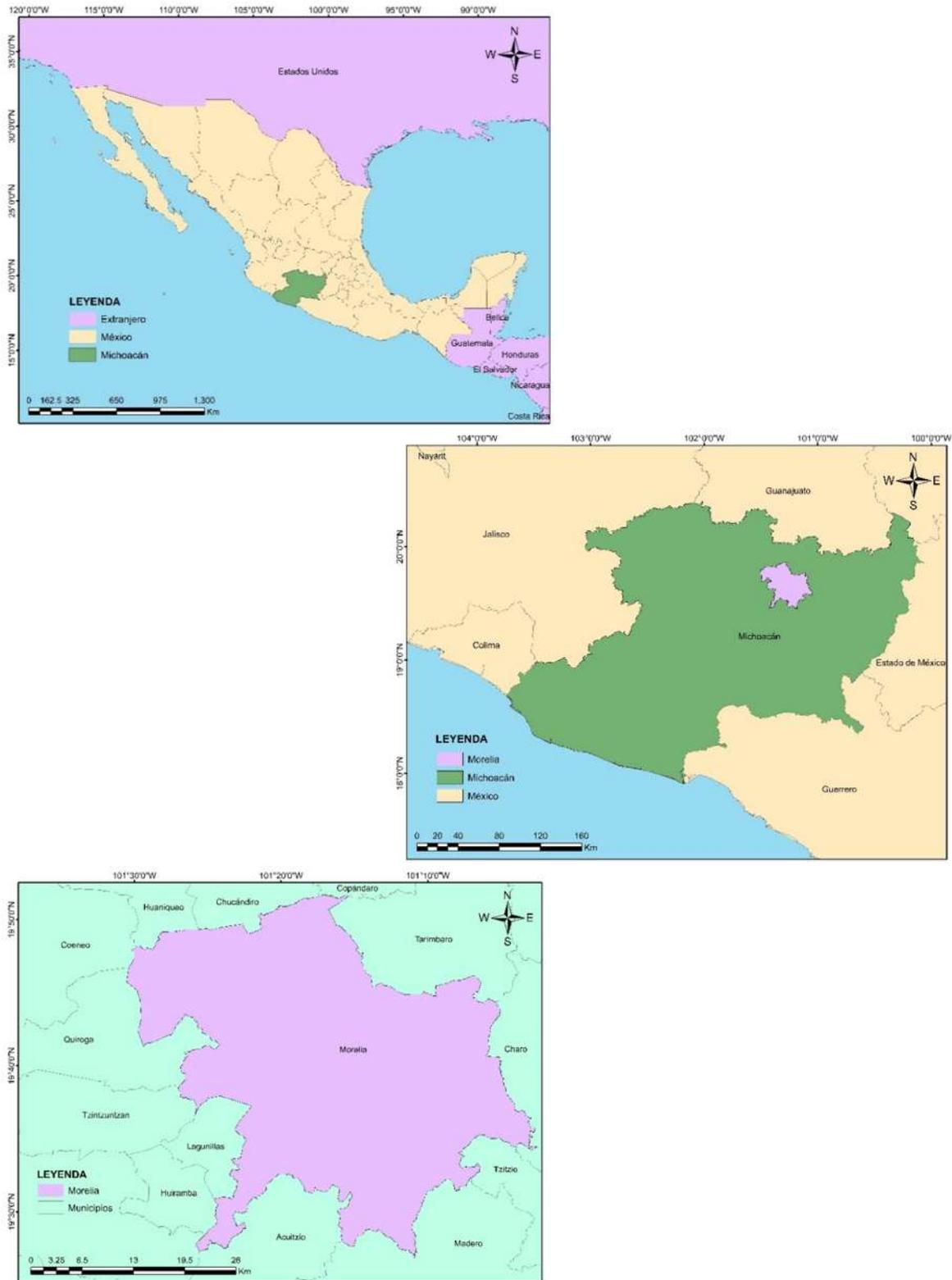


Figura 3.1. Ubicación del municipio de Morelia en México. Fuente: elaboración propia con datos del INEGI.

Dentro de la propia mancha urbana de la ciudad de Morelia está presente la zona de estudio, misma que se ubica en la zona sur y zona poniente, y está constituida principalmente por comercios al por menor, comercios de grandes franquicias, hospitales, centros comerciales, escuelas y hoteles, así como también viviendas de tipo medio residencial, medio residencial, departamentos y casas habitación en algunas zonas.

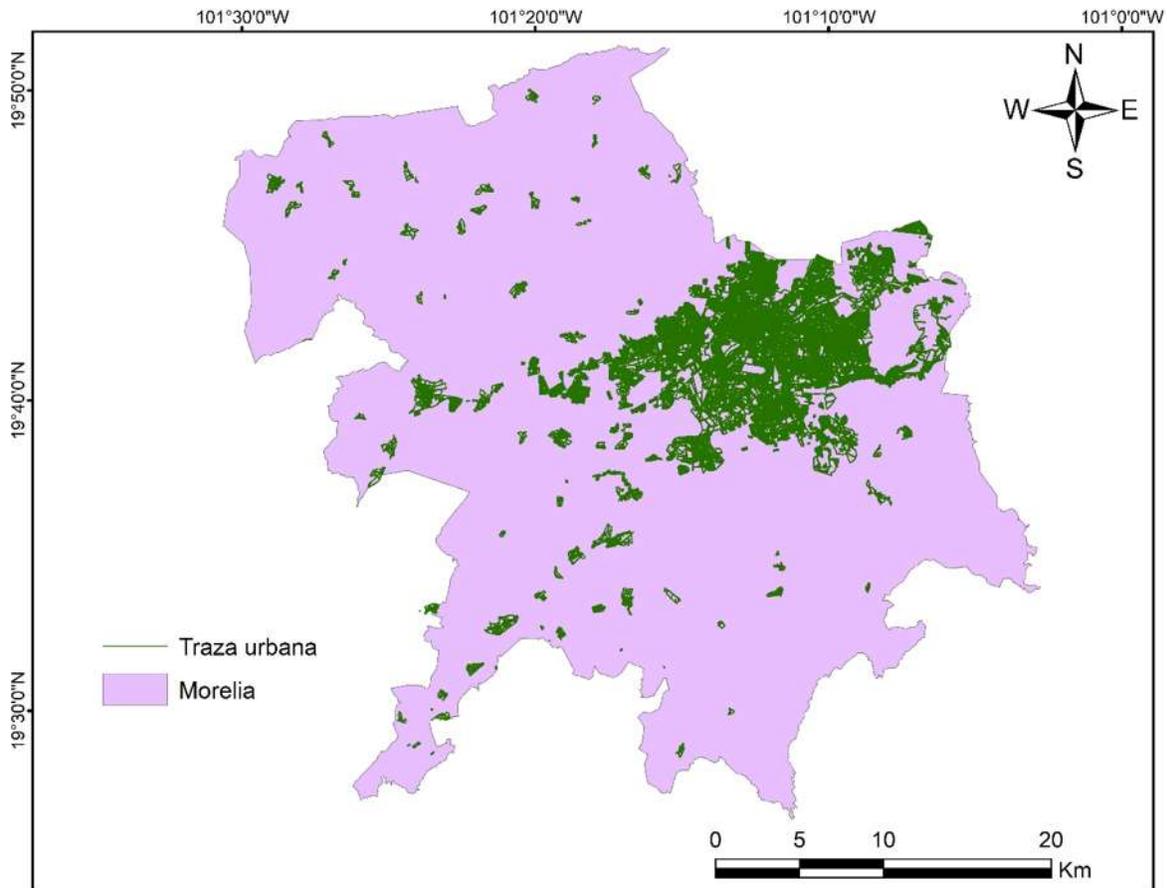


Figura 3.2. Ubicación de la zona de estudio en la mancha urbana del municipio de Morelia. Fuente: elaboración propia con datos del INEGI.

Para la demarcación de la zona de estudio, se consideró delimitar las colonias que se vieron afectadas por las lluvias acontecidas la madrugada del 22 de octubre del año 2018 en la zona sur y poniente de la ciudad y que presentaron encharcamientos de significancia en algunos sectores de las mismas. Las colonias afectadas fueron: Nueva Jacarandas, Ventura Punte, Félix Ireta, La Loma, Electricistas, Bosque Camelinas, Camelinas, Chapultepec Sur

y Chapultepec Oriente. No en todas las colonias se presentaron los mismos problemas de inundación, pero para poder evidenciar el comportamiento de la inundación en la zona de estudio propuesta, en el capítulo de *Resultados* se detalla el comportamiento de la lluvia y del flujo a través de las zonas afectadas y, de esta forma, determinar cuáles fueron las que sufrieron más afectaciones y las que no presentaron muchas contrariedades.

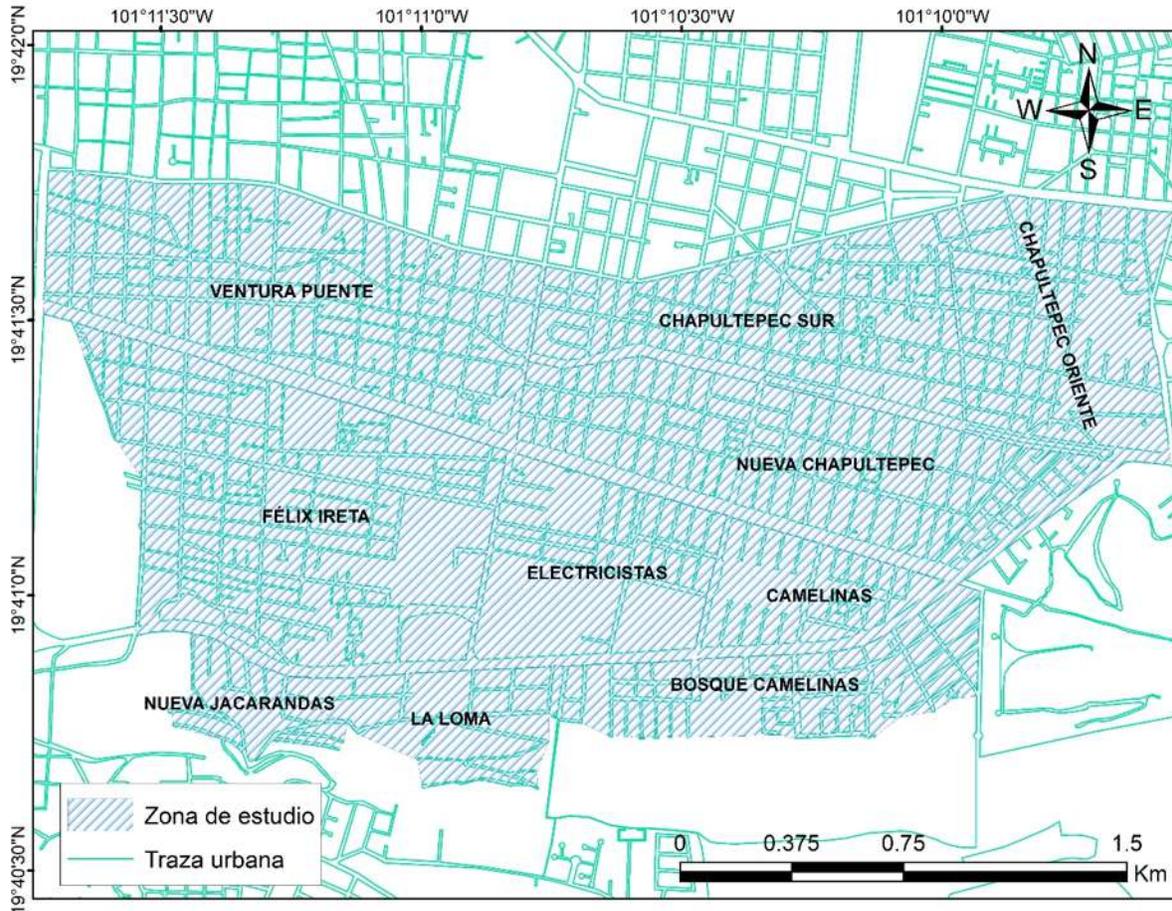


Figura 3.3. Delimitación de la zona de estudio por medio de las colonias afectadas en la zona sur-poniente tras el paso del huracán Willa. Fuente: elaboración propia con datos del IMPLAN.

En la *Figura 3.3*, se incluye la traza urbana, misma que representa las calles y manzanas que componen la sección de la ciudad que se analiza. De la ubicación geográfica de la zona de estudio, se obtuvieron las áreas de cada colonia en kilómetros cuadrados para determinar el área total de toda la región. La delimitación de las colonias se realizó con base

a composición real de las mismas, no obstante, en las colonias Nueva Jacarandas, La Loma y Bosque Camelinas (colonias que forman parte de la zona sur de la ciudad), se consideró únicamente el fragmento compuesto donde hay traza urbana, para que el posterior análisis pudiera ser realizado en base al comportamiento del flujo en las calles del sitio.

Tabla 3.1. Propiedades geométricas de las colonias que componen la zona de estudio

Colonia	Área (km ²)	Perímetro (km)
Nueva Jacarandas	0.128135	1.703788
Félix Ireta	1.106916	4.505962
Ventura Puente	0.974723	4.482873
La Loma	0.241732	2.358548
Electricistas	0.472208	2.837144
Camelinas	0.26119	2.278748
Bosque Camelinas	0.397808	3.510985
Nueva Chapultepec	0.804232	4.610679
Chapultepec Sur	0.620385	3.91666
Chapultepec Oriente	0.577594	3.16842
Zona de estudio	5.584923	33.373807



Figura 3.4. Imagen satelital de la zona de estudio. Fuente: Google Earth.

3.2.2. Hidrografía y aspectos hidrológicos

Una región hidrológica consiste en un sistema de grandes cuencas que se delimitan en función de las características hidrológicas y morfológicas que puedan tener. En el país, existen 37 regiones hidrológicas las cuales no necesariamente vienen dadas en base a la división política estatal o municipal de alguna región en específico y su parteaguas se viene dando propiamente en las regiones en donde se comparten las características mencionadas previamente y los estudios o programas que existan que se basen en el estudio del área compuesta por las mismas.



Figura 3.5. Ubicación de la región hidrológica Lerma-Santiago en la República Mexicana.
Fuente: elaboración propia con datos del INEGI.



La región hidrológica en la que se encuentra en la zona de estudio de esta investigación es la Lerma-Santiago, misma que abarca territorio de algunos de los estados del país: Aguascalientes, Colima, Guanajuato, Jalisco, Estado de México, Michoacán, Nayarit, Querétaro y Zacatecas. La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), establece que la Región Hidrológico Administrativa VIII de la República Mexicana viene siendo la otrora que incluye la ciudad de Morelia (*Figura 3.5*) y, por ende, la zona de estudio. Su extensión territorial es de 191,500 km².

En cuanto a los aspectos sociales, la región cuenta con un total de 253 municipios que corresponden a una fracción del total de cada uno de los nueve estados en los que tiene influencia. El principal uso que se le da al agua superficial y subterránea es principalmente para cuestiones agrícolas y en segunda instancia a las cuestiones públicas urbanas (CONAGUA, 2010).

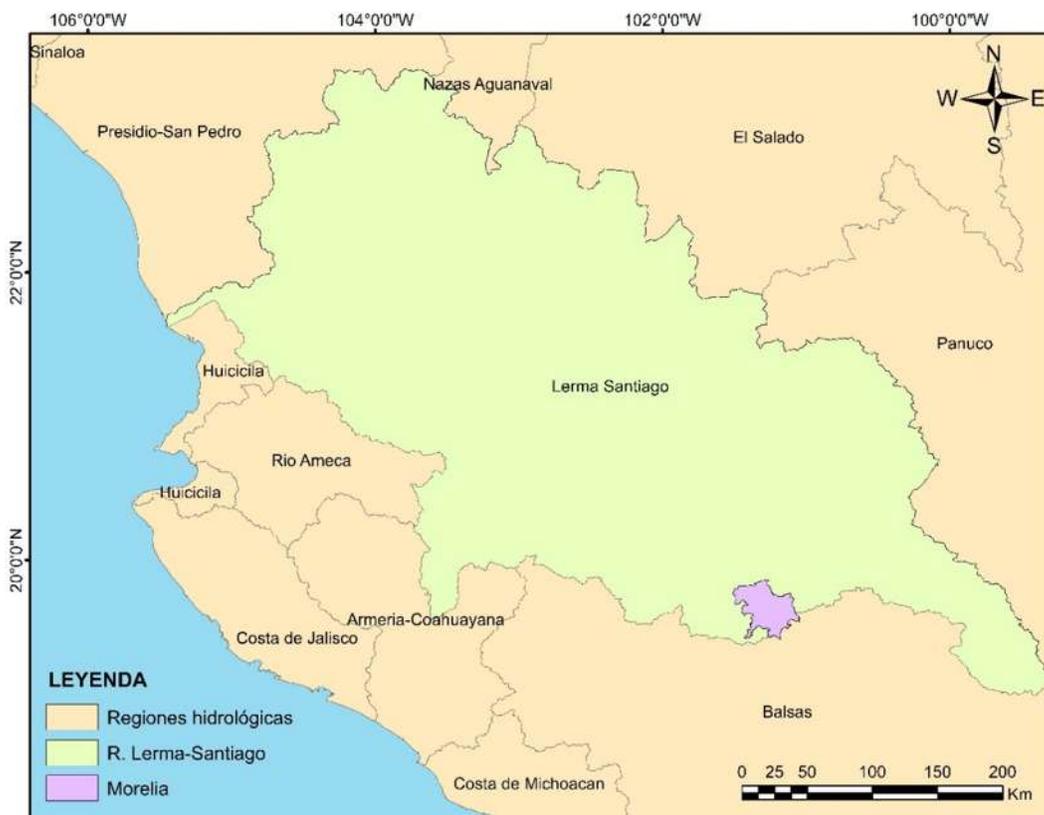


Figura 3.6. Localización del municipio de Morelia en la RH Lerma-Santiago. Fuente: elaboración propia con datos del INEGI.

En cuanto a las subcuencas hidrológicas, el municipio de Morelia cuenta con 18, las cuales a su vez corresponden a la RH Lerma-Santiago y, por lo tanto, comparten en cierta forma las características presentes en la misma, aunque para aterrizar la información de forma muy particular, se establecen las particularidades correspondientes a la zona de estudio en base a la subcuenca a la pertenecen para considerar datos más fidedignos a la región. Las colonias en estudio se ubican por completo en la subcuenca del Río Chiquito (Figura 3.7).

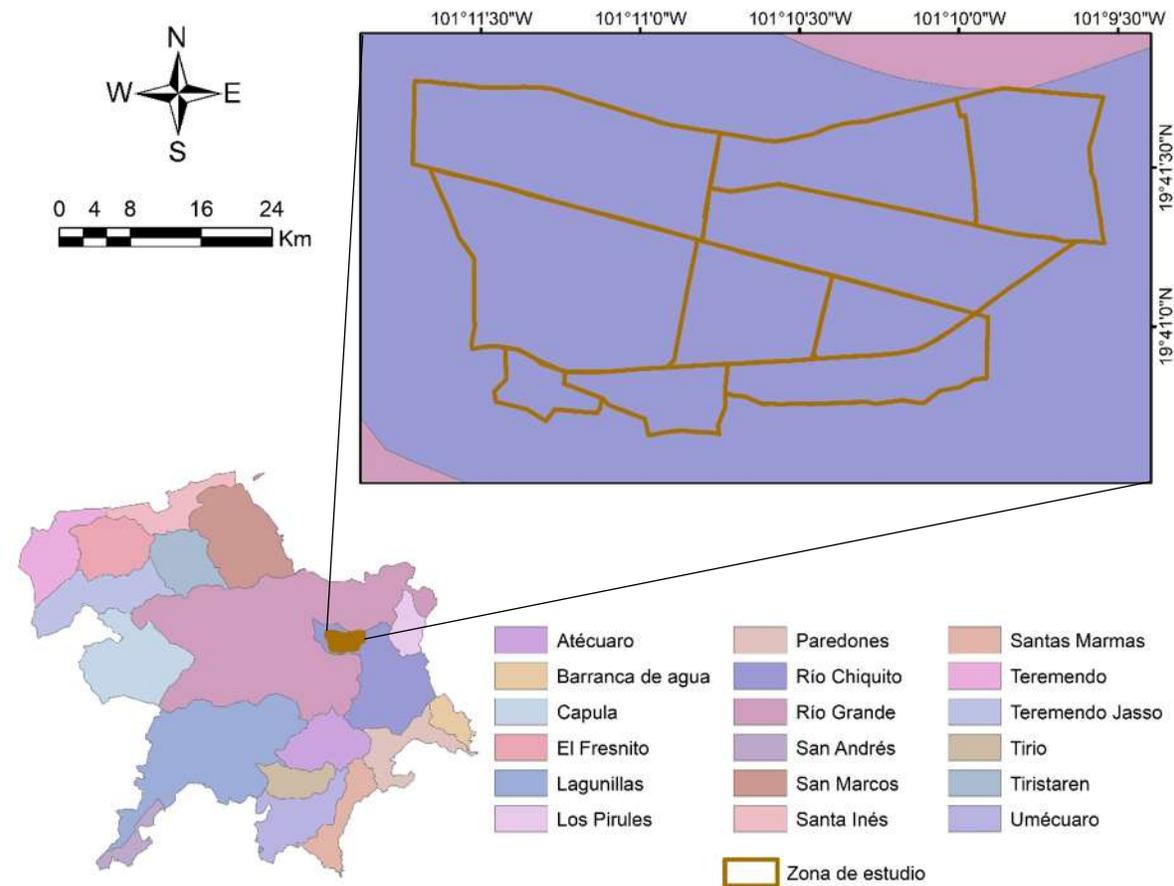


Figura 3.7. Localización del municipio de Morelia en la subcuenca del Río Chiquito.
Fuente: elaboración propia con datos del INEGI.

En la *Tabla 3.2* se presentan las propiedades geométricas de las subcuencas que se ubican en el municipio de Morelia y que a su vez forman parte del sistema de subcuencas de la región Lerma-Santiago. En lo correspondiente a la subcuenca del Río Chiquito, que es la



que impera en el lindero establecido de colonias afectadas, cuenta con las siguientes características:

La cuenca del Río Chiquito abarca una superficie de casi 90 km² y se ubica en la periferia suroriente de la ciudad de Morelia, suministrando cerca del 3% del abasto de agua a la ciudad y situándose al sur y en la parte alta de la cuenca endorreica del lago de Cuitzeo. Actualmente la región compuesta por la subcuenca del Río Chiquito sufre de una fuerte presión de la ciudad de Morelia, misma que no sólo radica en lo que es la expansión de la mancha urbana hacia la misma, sino que también dentro de lo competente en la fuente de recursos naturales, ya que la misma ha servido de recursos hídricos y forestales, además de brindar servicios ambientales como la regulación microclimática en la ciudad, siendo también un espacio de recreación y apreciación estética de la población (Sánchez y Urquijo, 2020).

Tabla 3.2. Propiedades geométricas y geográficas de las subcuencas de Morelia

Subcuenca	Área (km ²)	Perímetro (km)	Altitud (msnm)	
			Menor	Mayor
Umécuaro	48.434	44.968	2178	2596
Teremendo Jasso	57.213	46.421	2155	3217
El Fresnito	45.773	29.362	2128	2561
Tiristaren	39.928	29.196	2125	2664
Santa Inés	32.416	42.830	2095	2559
Tirio	23.560	24.528	2049	2502
Atécuaro	43.465	31.099	2046	2638
San Andrés	14.396	31.722	2022	3426
Capula	79.405	46.989	2002	3081
Teremendo	46.282	37.552	1993	3339
Lagunillas	161.808	93.554	1979	3426
Río Chiquito	87.576	52.787	1880	2607
Los Pirules	18.519	20.311	1875	2381
Río Grande	310.027	127.390	1860	3083
San Marcos	81.506	48.351	1838	2760
Santas Marmas	31.669	41.717	1629	2641
Barranca de Agua	14.823	24.411	1390	2593
Paredones	36.156	51.875	1265	2626

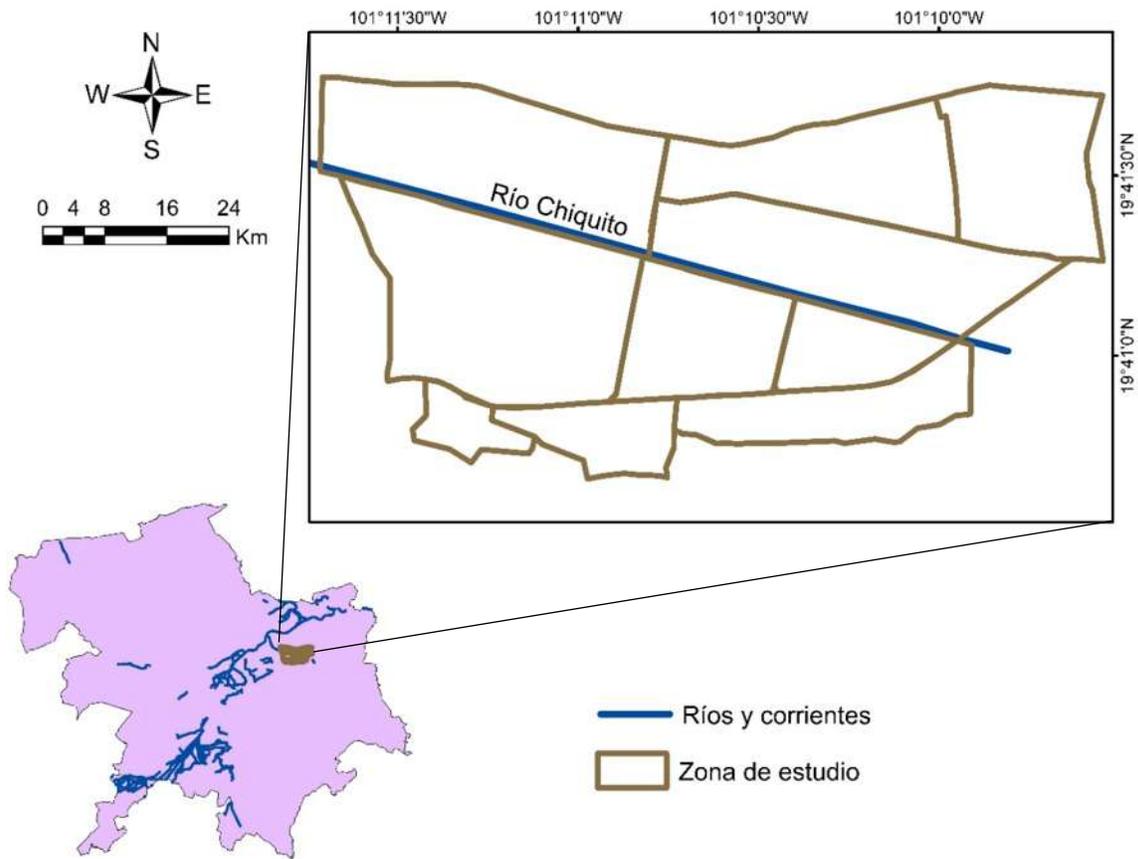


Figura 3.8. Ríos y corrientes presentes en el municipio de Morelia y, en específico, en la zona de estudio. Fuente: elaboración propia con datos del IMPLAN.

Dentro de la zona de estudio, en lo correspondiente a los ríos y corrientes de agua presentes en la región y que, a su vez, en ocasiones, pueden ocasionar problemas de inundaciones al sobrepasar el nivel de sus márgenes en temporadas de lluvia extrema se encuentra el Río Chiquito, el cual es homónimo a la subcuenca dentro de la cual se localiza. Dicho río parte (de oriente a poniente) a partir de las Cañadas del Rincón, cerca del Ejidal Ocolusen, recorriendo la ciudad hasta el poniente, donde une sus aguas con las del Río Grande. El agua que lleva el Río Chiquito rara vez se desborda del mismo, evento que no sucede durante los meses pertenecientes a las temporadas de primavera y verano, incrementándose sus posibilidades durante la temporada de lluvias del Pacífico mexicano. En realidad, actualmente el río rara vez se encuentra con gran capacidad de agua, por lo que en varias zonas del mismo su tirante no llega a sobrepasar los 50 cm.

3.2.3. Edafología y litología

La edafología consiste en estudiar las características con las que se encuentra compuesto un suelo, cuyas propiedades varían conforme a varios factores medioambientales, como lo son el tipo de roca del cual se originan, el relieve, el tiempo, el clima que anualmente se presenta en una zona en particular, así como el uso de suelo y la vegetación efectiva. Con esto, la importancia de estudiar la edafología recae en poder generar proyectos de investigación, así como para crear y/o mejorar programas medioambientales o de índole similar para poder darle un buen uso al suelo en cuestión y, de esta forma, poder desarrollar planes de tipo forestal, pecuario, agrícola o de construcción (arquitectura e ingeniería civil). En la *Figura 3.9*, se muestra la edafología característica de la zona de estudio, así como la descripción de dichos suelos.

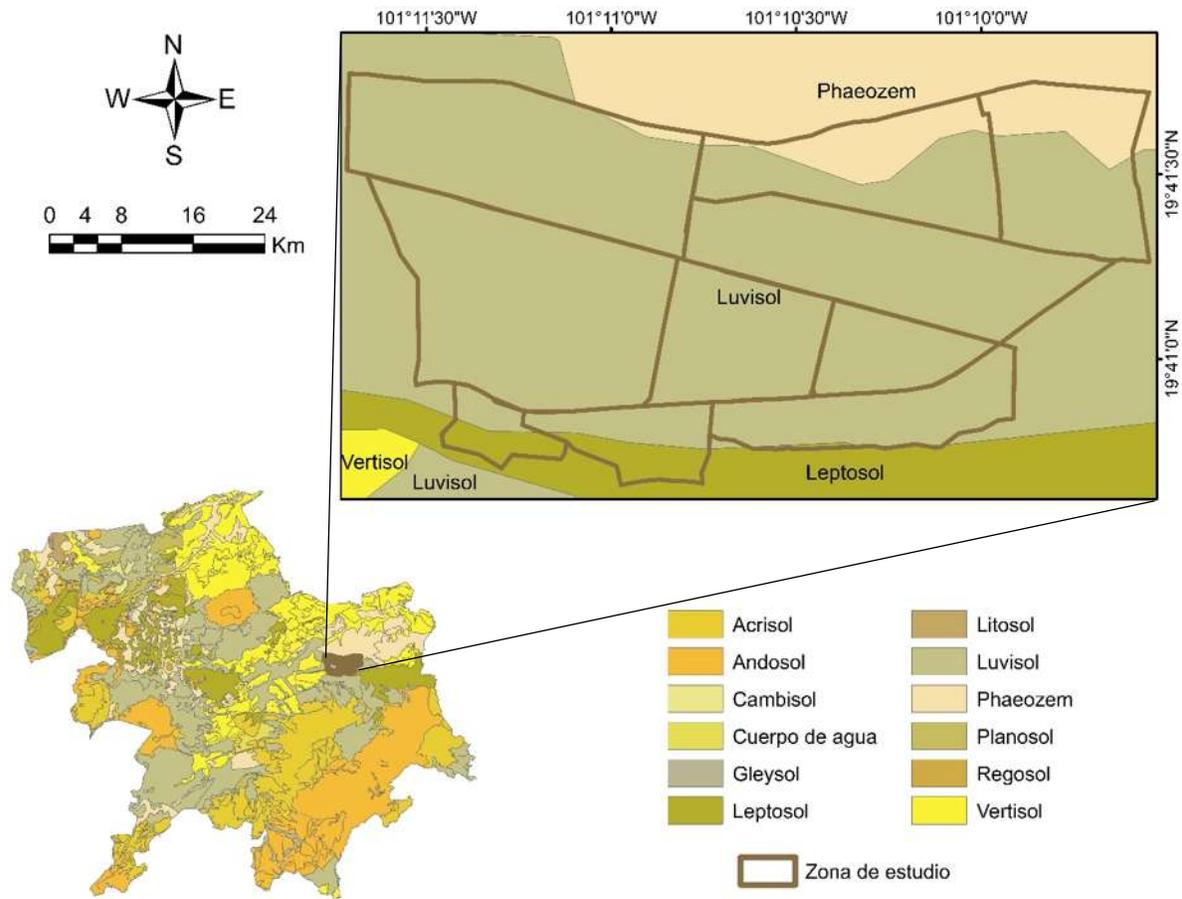


Figura 3.9. Unidades edafológicas presentes en el municipio de Morelia con enfoque en la zona de estudio. Fuente: elaboración propia con datos del IMPLAN.



Leptosol

- Incluyen antiguos Litosoles y otros suelos con menos de 25 cm de espesor o con gravas.
- Son muy susceptibles a la erosión.
- Se localizan generalmente en las zonas montañosas con más de 40% de pendiente.
- Los tipos de vegetación más relacionados con los afloramientos rocosos son el matorral desértico rosetófilo, la selva baja caducifolia y el bosque de encino.
- El uso principal de este suelo es para agostadero.

Luvisol

- Suelos rojos, grises o pardos claros, susceptibles a la erosión especialmente aquellos con alto contenido de limo y los situados en pendientes fuertes.
- Los luvisoles son generalmente fértiles para la agricultura.
- Son el quinto grupo de suelos más abundante de México y su distribución abarca bosques de encino en la Sierra Madre Occidental.

Phaeozem

- Suelos de clima semiseco, subhúmedo, de color superficial pardo a negro, fértiles en magnesio y potasio, aunque con pocos o ningún carbonato en el subsuelo.
- El relieve donde se desarrollan es generalmente plano o ligeramente ondulado.
- En México, constituyen los suelos más importantes para la agricultura de temporal.

Vertisol

- Suelos pesados formados bajo condiciones alternadas de saturación-sequía, que presentan grietas anchas, abundantes y profundas cuando están secos y con más de 30% de arcillas expandibles.
- Las obras de construcción asentadas sobre estos suelos suelen tener especificaciones especiales para evitar daños por movimiento o inundación.
- Son bastante estables frente a la erosión y se encuentran frecuentemente en zonas agrícolas de regadío, como los bajíos de Michoacán.

Fuente: INEGI, 2011.

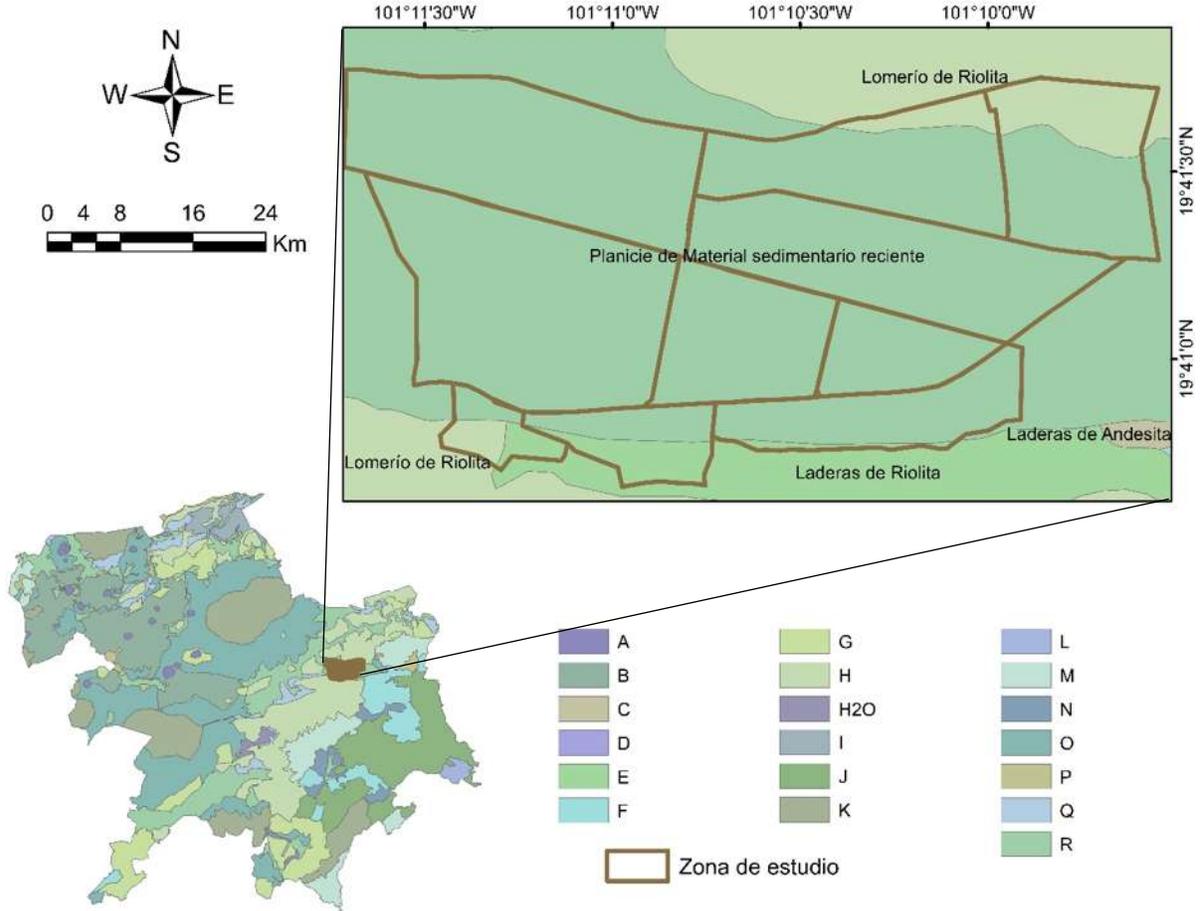


Figura 3.10. Unidades de paisaje presentes en el municipio de Morelia con enfoque en la zona de estudio. Fuente: elaboración propia con datos del IMPLAN.

Por su parte, la litología es una ciencia que tiene su énfasis en la geología, ésta misma se encarga de establecer desde un punto de vista de origen y génesis la clasificación de las rocas que se encuentran en un paisaje litológico en específico. En la *Figura 3.10*, se muestra una representación de la litología existente en el municipio de Morelia y en la zona de estudio, misma información que se complementa con la *Tabla 3.3*, donde se incluye el significado de las claves indicadas en la figura en cuestión. De esta tabla y en función de la representación mostrada en la figura, se indican tres unidades de paisaje litológico que forman parte de la zona de estudio: el lomerío de riolita, las laderas de riolita y la planicie de material sedimentario reciente.



Tabla 3.3. Unidades de paisaje litológico pertenecientes al municipio de Morelia.

Clave	Elemento litológico	Clave	Elemento litológico
A	Cono de Basalto	J	Montaña de Andesita
H2O	Cuerpo de agua	K	Montaña de Basalto
B	Derrame de lavas de Basalto	L	Montaña de Conglomerado
C	Laderas de Andesita	M	Montaña de Riolita
D	Laderas de Basalto	N	Piedemonte de Andesita
E	Laderas de Riolita	O	Piedemonte de Basalto
F	Lomerío de Andesita	P	Piedemonte de Material sedimentario reciente
G	Lomerío de Basalto	Q	Piedemonte de Riolita
H	Lomerío de Riolita	R	Planicie de Material sedimentario reciente
I	Mesa de Riolita		

De esta caracterización de la zona de estudio con respecto a su información litológica, se obtienen entonces dos tipos de rocas: ígneas y metamórficas.

La **riolita** es una roca volcánica, también conocida como roca ígnea extrusiva, misma que es producto de la cristalización de los materiales que son expulsados de los materiales, presentando propiedades ingenieriles que dependen de su grado de solidificación, presentando de esta forma una amplia variedad en cuanto a su resistencia y permeabilidad. La riolita es un grano fino que presenta características similares a un granito, mostrando bandeamientos formados por el flujo viscoso de lava durante la destrucción.

Por otra parte, el material sedimentario reciente, cuya influencia se extiende en la mayoría de la zona correspondiente a las limitaciones de las colonias, está formada por la cementación de partículas de arena, arcilla, grava o cantos, presentando de esta forma características de estabilidad que se encuentran en función del tamaño de los granos, los planos de estratificación, las fracturas normales a la estratificación y el grado de cementación. (Suárez, 1998).

3.2.4. Topografía

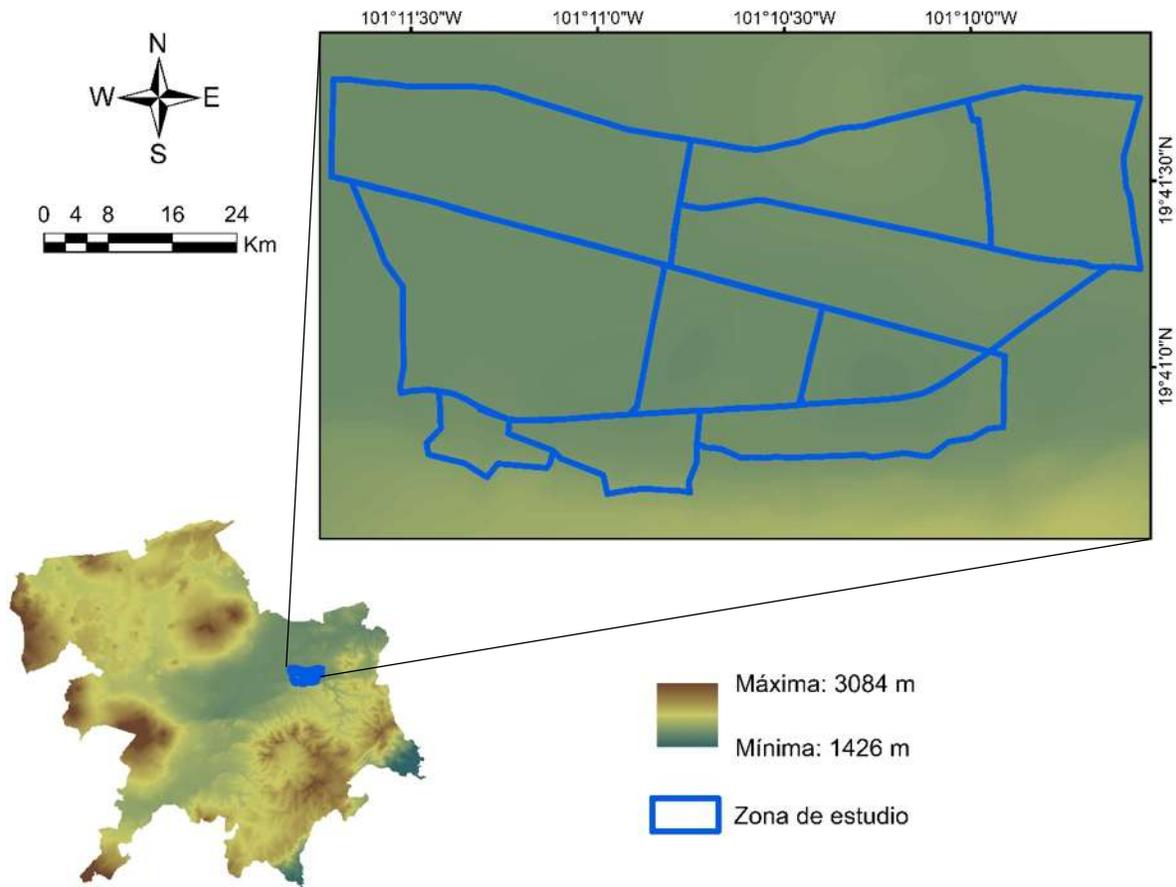


Figura 3.11. Representación topográfica del municipio de Morelia, indicando las elevaciones usuales de la zona de estudio. Fuente: elaboración propia con datos del IMPLAN.

La representación topográfica es la visualización gráfica del relieve perteneciente a una región en estudio, en donde se permiten observar las subregiones con mayor altura y diferenciarlas con las que son de menor altura. Para el municipio de Morelia, la elevación con el menor registro corresponde a la establecida por la cuenca del río Balsas, mientras que la región más alta es la perteneciente al Cerro del Águila, con una elevación de 3,084 msnm. En la *Figura 3.11*, se ilustra el comportamiento de la topografía del municipio de Morelia, donde la ciudad capital tiene elevaciones que pueden llegar a superar los 2,000 msnm en



algunos puntos, mientras que la más baja se localiza al norte de la misma y llega a ser menor a los 1,800 msnm.

Sin embargo, en lo competente a la zona de estudio, no se permite identificar adecuadamente el comportamiento topográfico del lugar, por lo que en la *Figura 3.12* se muestran curvas de nivel realizadas a partir del Modelo Digital de Elevaciones (Apartado 3.2.1) sobrepuestas a la región comprendida por las colonias en estudio. Se muestran curvas principales a cada 50 metros que son características de grandes cambios en la topografía de la región, así como también curvas secundarias que indican diferencias a cada 10 metros de altura y se pueda observar con mayor detalle el comportamiento de alturas en subregiones donde no hay cambios tan bruscos de elevación.

Por lo anterior, se puede apreciar que la región comprendida por las colonias Nueva Jacarandas, La Loma y Bosque Camelinas (de poniente a oriente en la zona sur) presentan un comportamiento importante en las curvas de nivel, puesto que consiste en la región de Lomas de Santa María, región que se ubica a más de 2,100 msnm y cuyo acceso se encuentra en la colonia La Loma. Por otro lado, en la región central de la zona de estudio no se presentan grandes cambios en el comportamiento del relieve, ya que la cota que impera en la región es de 1950 msnm. Ya en la región norte de las colonias analizadas, se muestra un incremento en la elevación sobre la colonia Chapultepec Sur.

El Río Chiquito, con esto, se encuentra localizado en la región más baja de la zona de estudio, donde apenas hay diferencia de alturas, donde la curva principal considerada es de 1950 metros para todo el largo del río a partir de las colonias Félix Ireta y Ventura Puente. Este comportamiento en las curvas de nivel permite identificar un posible proceder en las inundaciones acaecidas por la zona, puesto que se forma una región con una cota baja correspondiente al Río Chiquito, rodeada de las regiones sur y norte de la zona de estudio, mismas que cuentan con elevaciones superiores.

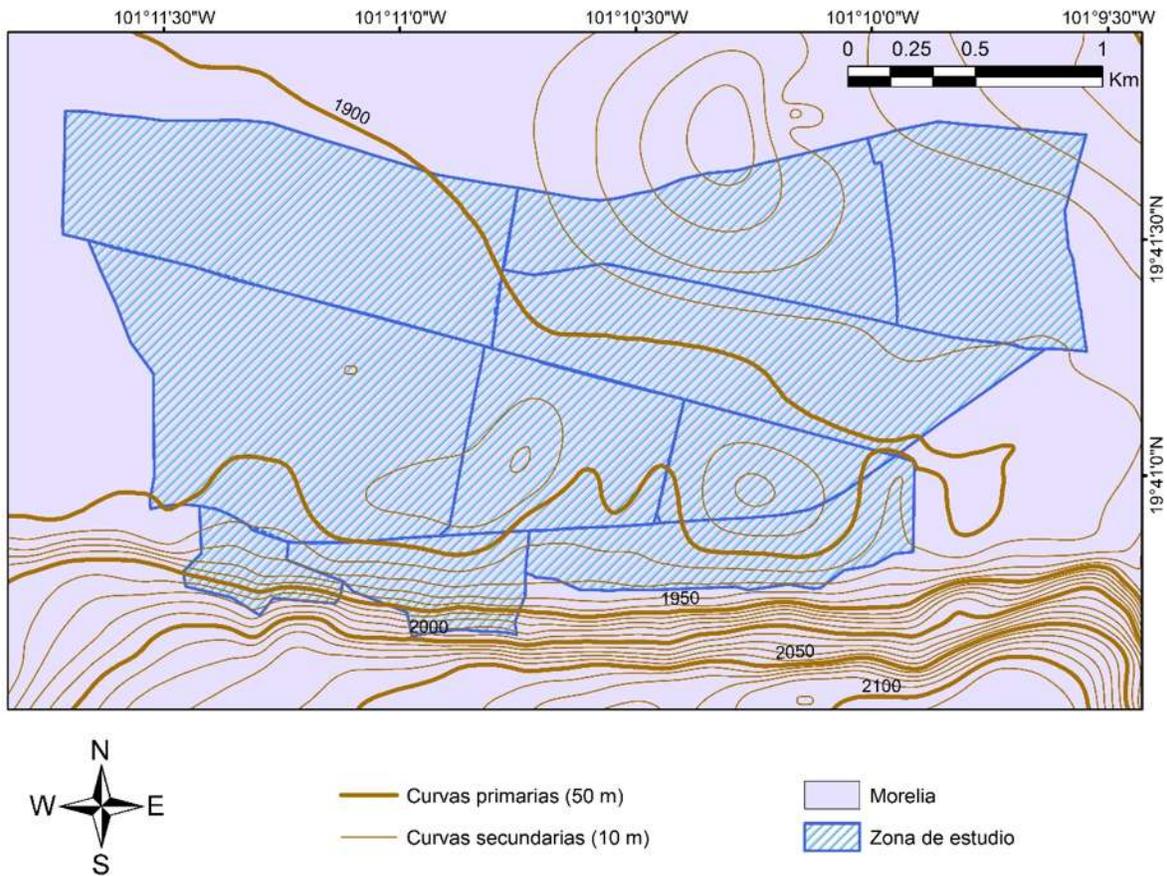


Figura 3.12. Curvas de nivel donde se puede observar el comportamiento del terreno en la zona de estudio. Fuente: elaboración propia con datos del IMPLAN.

Para poder identificar y apreciar más explícitamente el comportamiento de la topografía en la zona de estudio, la *Figura 3.12* tiene la representación en cuanto a curvas de nivel donde se muestran dos categorías de curvas de nivel (a cada 50 metros y a cada 10 metros), dando justificación a lo mencionado con anterioridad. La región más baja de la zona de estudio está dada por las colonias Electricistas y Camelinas.

3.2.5. Fisiografía

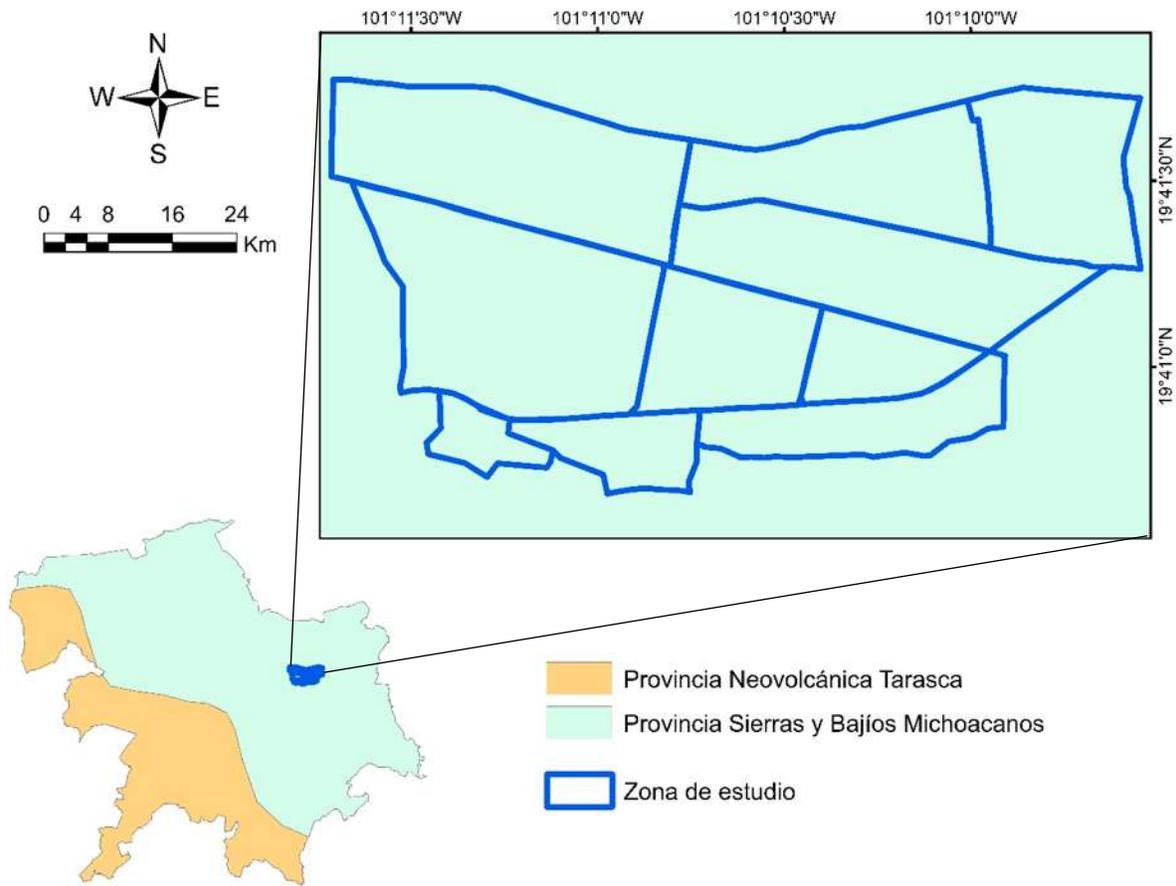


Figura 3.13. Subprovincias fisiográficas con presencia en el municipio de Morelia. Fuente: elaboración propia con datos del INEGI.

Bates y Jackson (1980), definen la fisiografía como una descripción elemental de los rasgos con los que cuenta una superficie, mismos en donde se incluye el comportamiento de los cuerpos de agua, el aire y la tierra, siendo una disciplina en donde se le da origen y representación a las formas del relieve de una región. En México, las unidades mayores de relieve llevan el nombre de provincias fisiográficas, mientras que una caracterización más focalizada a las mismas es llamada subprovincias fisiográficas; actualmente en el país se han llevado a cabo diversos métodos para clasificar los territorios con criterios fisiográficos, mismos métodos que han recibido controversia por las variables que se toman en cuenta y



por la compleja transformación que ha tenido el término de fisiografía con el paso de los años (Lugo Hubp y Córdova, 1992).

En el municipio de Morelia, hay dos subprovincias fisiográficas que tienen presencia, las cuales son la Neovolcánica Tarasca y la de Sierras y Bajíos Michoacanos, en donde la segunda es la que cubre completamente la zona de estudio (Figura 3.13). Las dos subprovincias pertenecen a su vez a la provincia del Eje Neovolcánico, la cual el INEGI (1992), describe de la siguiente forma:

Colinda al norte con la Llanura Costera del Pacífico, la Sierra Madre Occidental, la Masa del Centro, la Sierra Madre Oriental, y la Llanura Costera del Golfo Norte, al sur con la Sierra Madre del Sur y la Llanura Costera del Golfo Sur. Por el oeste llega al Océano Pacífico y por el este hasta el Golfo de México. Abarca parte de los estados de Jalisco, Michoacán, Guanajuato, Querétaro, México, Hidalgo, Colima, Puebla y Veracruz; así como todo el estado de Tlaxcala y la Ciudad de México. Se caracteriza como una enorme masa de rocas volcánicas de todos los tipos, acumulada en innumerables y sucesivas etapas, desde mediados del Terciario (unos 35 millones de años atrás) hasta el presente.

Esta región está integrada por grandes sierras volcánicas y coladas lávicas, conos dispersos o en enjambre, amplios escudo-volcanes de basalto y depósitos de arenas y cenizas, entre otras formaciones que se encuentran dispersas entre llanuras. Las amplias cuencas cerradas ocupadas por lagos (Pátzcuaro, Cuitzeo, Texcoco, El Carmen y Totolcingo, entre otros) por depósitos de lagos antiguos (Zumpango, Chalco, Xochimilco, varios llanos del Bajío Guanajuatense, etc.) constituyen otro rasgo esencial de la provincia. Estos lagos se formaron por el bloqueo del drenaje original, debido a las lavas u otros productos volcánicos, o por el afallamiento.

En la provincia el clima dominante es templado subhúmedo, pero en el poniente impera el semicálido y en el norte el semiseco. En las altas cumbres se presentan climas fríos subhúmedos y en los picos más altos climas.



3.2.6. Uso y tipo de suelo

La *Figura 3.14* se realizó tomando en cuenta los metadatos existentes del INEGI, partiendo desde lo general (uso de suelo de la República Mexicana) hasta lo particular (zona de estudio). En ella, se muestran tres tipos de usos de suelo característicos del municipio de Morelia, mismos que son retomados y detallados en la *Tabla 3.4*.

Como las colonias afectadas bajo análisis se encuentran predominantemente en la zona sur-oriental de la ciudad se presenta entonces un uso de suelo de tipo complementario, el cual consiste en prácticamente en la zona urbana; por otro lado, en menor medida se concentra en la zona sur un uso de suelo forestal, mismo que viene siendo dado por la presencia de la Loma de Santa María.

Suelo complementario: es un suelo caracterizado por no estar presente de forma natural o estar desprovisto de vegetación, lo cual implica que ha sido retomado por la comunidad para urbanizar la región y poder asentarse, construyendo edificaciones y pavimentando calles y avenidas. Los cuerpos de agua que pudieran estar presentes también forman parte de esta métrica.

Suelo agrícola-pecuario-forestal: son regiones que se encuentran en su entorno natural, presentando vegetación que se muestra en su forma natural y no es empleada para fines recreativos o para su aprovechamiento. Típicamente, estas regiones están constituidas por espacios que, en base a la normativa presente gestionada por el gobierno del estado, se encuentran protegidas y, por lo tanto, no se pueden utilizar bajo ninguna circunstancia para su urbanización. La excepción a esta mención está en el zoológico de la ciudad, mismo que se encuentra en la zona oeste de la ciudad, el cual se encuentra en cierta forma urbanizado, pero, con respecto al hábitat que se encuentra en el mismo, está protegido y se encuentra en un entorno pecuario.

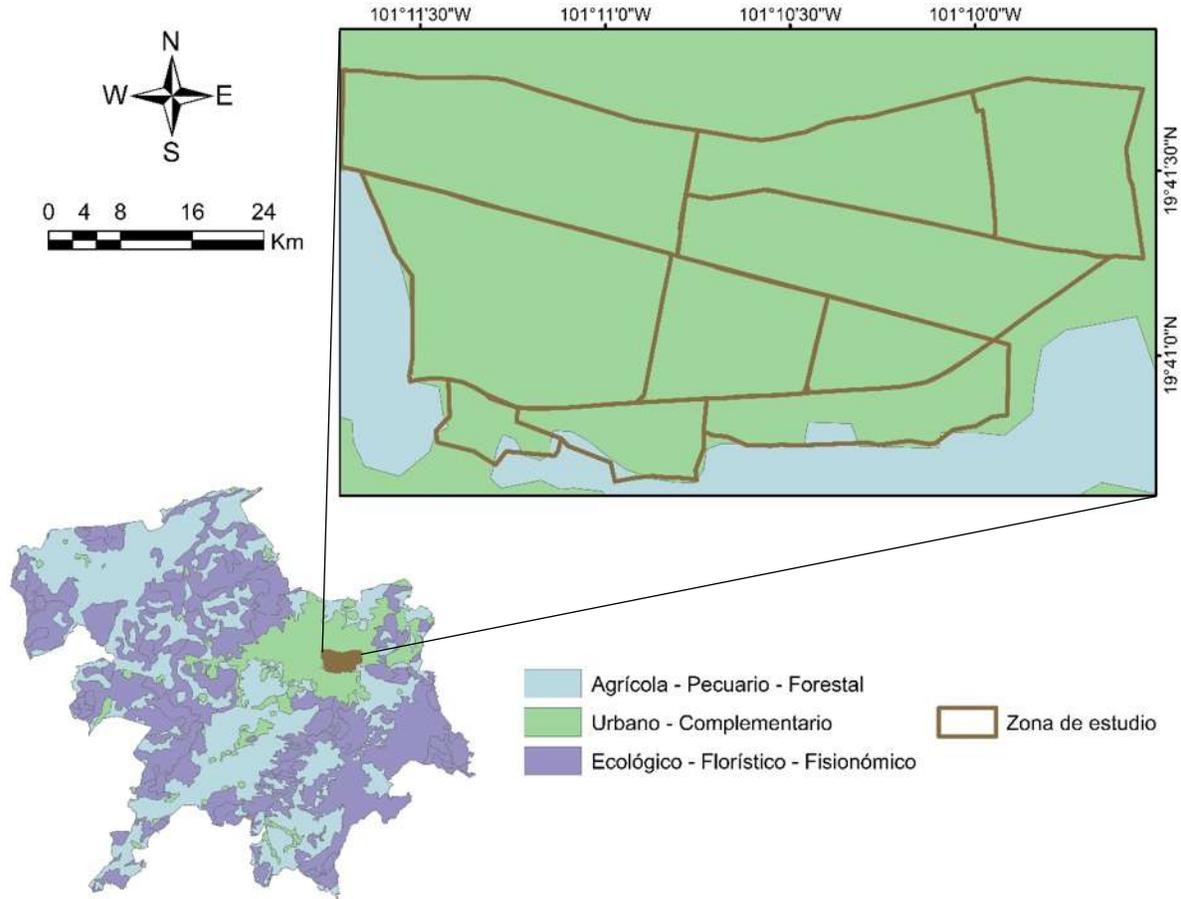
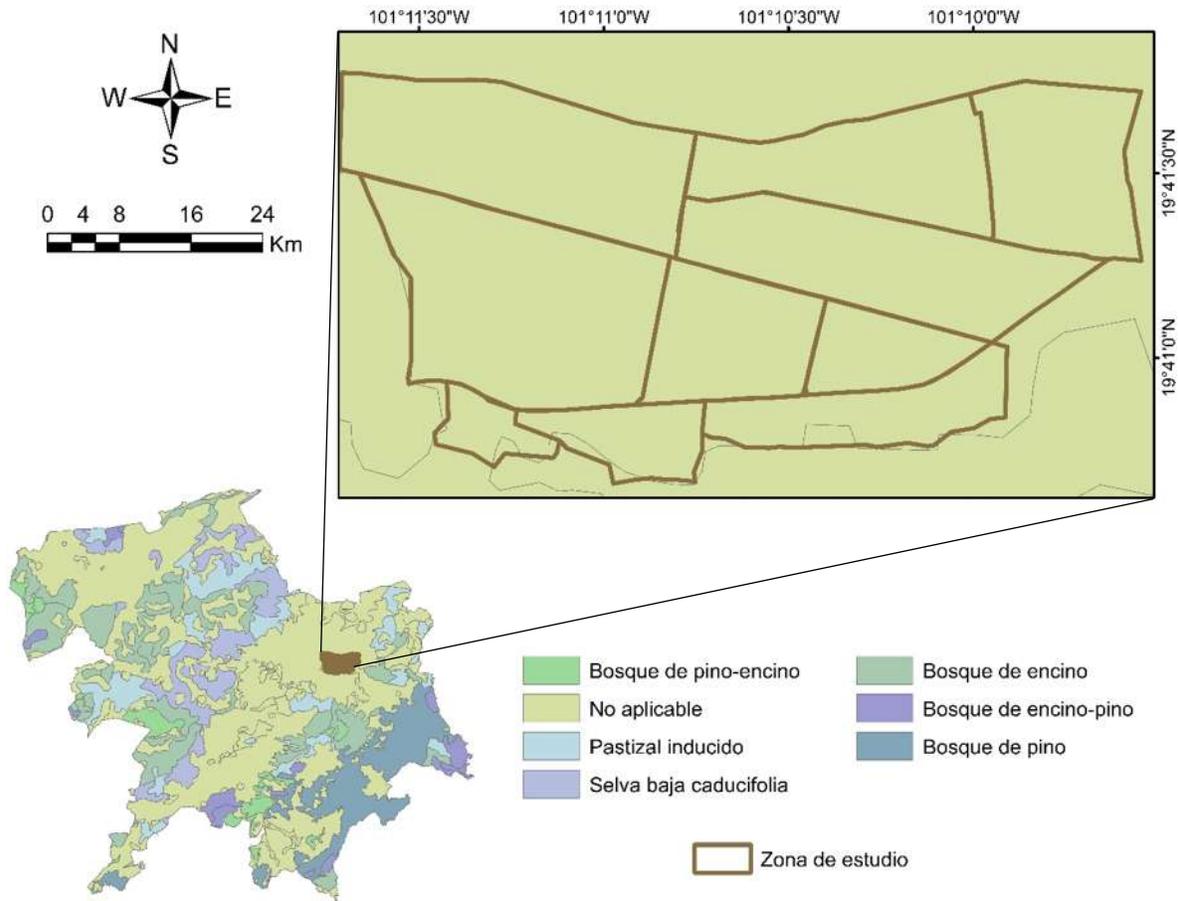


Figura 3.14. Uso de suelo en el municipio de Morelia con énfasis en la zona de estudio.
 Fuente: elaboración propia con datos del INEGI.

Tabla 3.4. Uso de suelo en el municipio de Morelia

Uso De Suelo	Detalle	Área (km ²)
Agrícola-Pecuaria-Forestal	No Aplicable	477.101
Complementaria	Desprovisto de Vegetación	0.508
Complementaria	Asentamientos Humanos	35.227
Complementaria	Cuerpo de Agua	10.514
Complementaria	Zona Urbana	105.546
Ecológica-Florística-Fisonómica	No Aplicable	564.264

3.2.7. Vegetación y Áreas Naturales Protegidas



Para identificar la vegetación, se utilizaron los metadatos empleados para el uso de suelo por parte de la base de datos del INEGI, mismos que también contienen la información correspondiente a la vegetación a nivel nacional, mientras que en la *Figura 3.15* se representa la información obtenida a nivel municipal. De la vegetación manifestada en el municipio, destaca el bosque de pino-encino, el pastizal inducido y la mancha urbana correspondiente a las regiones donde hay asentamientos urbanos regulares e irregulares, provincianos y rurales. La ubicación y la consideración de la vegetación del mapa presentado respecto a los mapas pertenecientes a programas de desarrollo municipal, códigos de desarrollo urbano y modelos de ordenamiento urbano puede variar dependiendo de las consideraciones que se hayan



tenido en cuenta por parte del organismo gubernamental o no gubernamental bajo el cual se hayan manipulado los datos, así como de la fecha de captura de los mismos; no obstante, las diferencias presentadas entre mapas no resultan tan variables. Bajo este sentido, la zona de estudio muestra eminentemente una presencia absoluta de falta de vegetación, sin embargo, hay zonas muy reducidas donde hay terrenos baldíos y lotes sin construir que no se muestran por la escala bajo la que se encuentra realizada pero que a continuación se describen y se indican las regiones cuya presencia es más significativa en zonas particularmente cercanas a las colonias en estudio.

En Morelia, la vegetación más característica es el bosque de pino-encino, la cual representa poco más del 30% de la vegetación del mismo, teniendo su predominancia en la zona sur sobre los Cerro Verde, Coronilla Chica, La Espadilla y Coronilla Grande.

El pastizal inducido se encuentra ubicado en regiones presentes en el noroeste de la ciudad, aunque también en menor medida en las comunidades correspondientes al sur de la ciudad (Loma de Santa María y El Durazno) en pequeñas regiones donde no se encuentren asentamientos urbanos y que hayan sido lo suficientemente reducidos para poder apreciarse en el mapa.

Esta zona es relevante por los servicios ecosistémicos o servicios ambientales hidrológicos que están relacionados principalmente con procesos regulatorios del ciclo hidrológico. Estos procesos son la regulación de flujo hídrico, depuración del agua, así como su filtrado y almacenamiento. Los servicios asociados son la protección de inundaciones, el drenaje e irrigación natural, cursos de agua como medio de transporte, la disponibilidad de agua para consumo humano, la regulación de sedimentos y descontaminación del agua (IMPLAN, 2015). Al sur de la colonia Bosque Camelinas y al este de la colonia La Loma se encuentra la Loma de Santa María, la cual se encuentra protegida y, a pesar de que cuenta con vegetación tipo bosque encino-pino, no se encuentra considerada en el mapa al mostrar únicamente la vegetación aprovechable o, en su defecto, la no aplicable por la presencia de la zona urbana.



Tabla 3.5. Vegetación del municipio de Morelia

Tipo De Ecosistema	Tipo De Vegetación	Clasificación	Detalle	Área (km ²)
Bosque De Coníferas	Bosque De Pino	Primaria	No Aplicable	116.522
Bosque De Coníferas	Bosque De Pino-Encino	Primaria	No Aplicable	24.746
Bosque De Coníferas	Bosque De Pino-Encino	Secundaria	No Aplicable	11.92
Bosque De Encino	Bosque De Encino	Primaria	No Aplicable	98.387
Bosque De Encino	Bosque De Encino-Pino	Primaria	No Aplicable	14.598
Bosque De Encino	Bosque De Encino	Secundaria	No Aplicable	84.792
Bosque De Encino	Bosque De Encino-Pino	Secundaria	No Aplicable	19.341
No Aplicable	No Aplicable	No Aplicable	Desprovisto de Vegetación	0.508
No Aplicable	No Aplicable	No Aplicable	Asentamientos Humanos	35.227
No Aplicable	No Aplicable	No Aplicable	Cuerpo de Agua	10.514
No Aplicable	No Aplicable	No Aplicable	No Aplicable	477.1
No Aplicable	No Aplicable	No Aplicable	Zona Urbana	105.546
Selva Caducifolia	Selva Baja Caducifolia	Secundaria	No Aplicable	94.649
Vegetación Inducida	Pastizal Inducido	No Disponible	No Aplicable	99.308

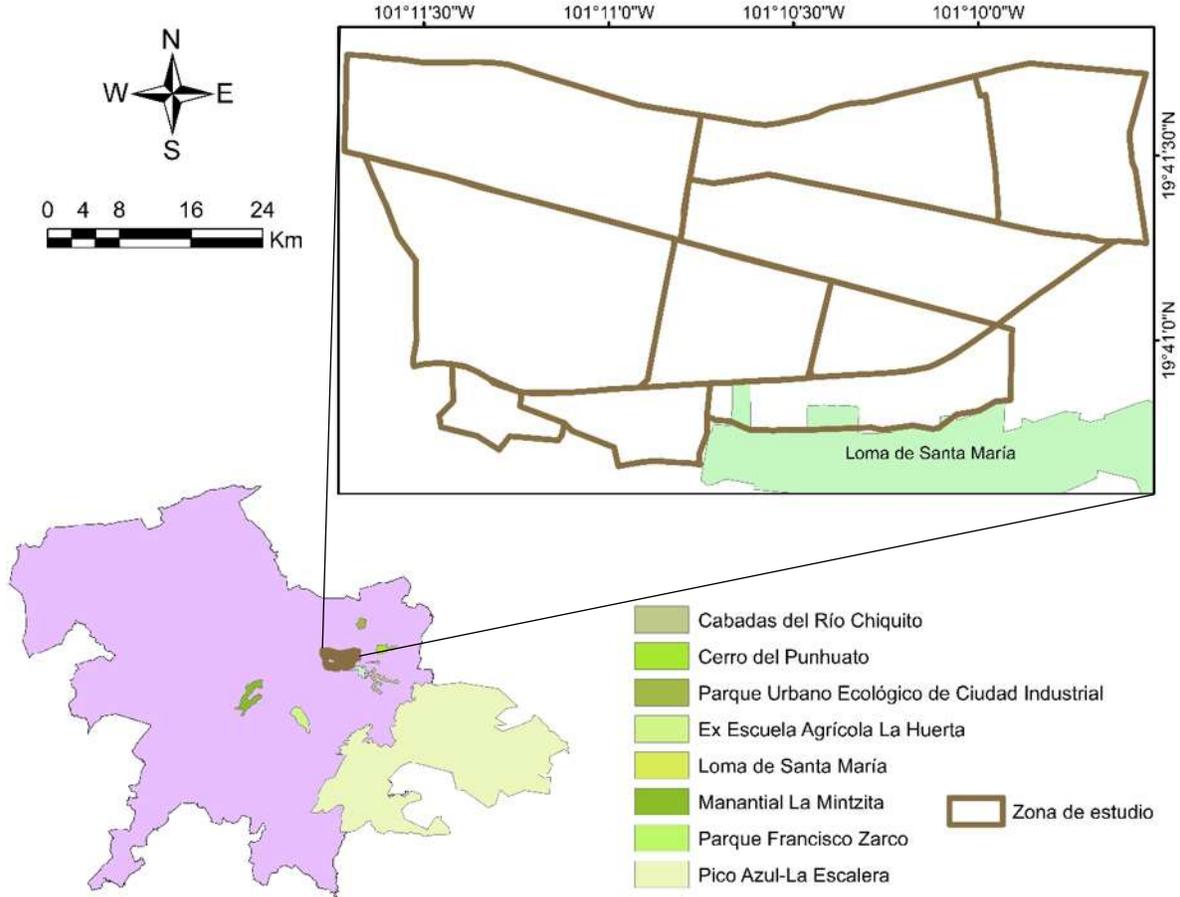


Figura 3.16. Áreas Naturales Protegidas (ANP) que tienen presencia en el municipio de Morelia. Fuente: elaboración propia con datos del INEGI.

La zona sur de la ciudad es de amplia relevancia y valía, puesto que la vegetación que se presenta en la región aún se encuentra conservada y además, como se ha descrito previamente, también tiene la particularidad de poder brindar captación de agua, convirtiendo el paisaje presentado en un atractivo para la región. Por tales motivos, las autoridades han puesto en marcha programas de Áreas Naturales Protegidas (ANP), mismos que sirven para poder declarar espacios de vegetación trascendentes en espacios libres de contaminación y basura, conservando de esta forma el medio ambiente de la región y preservando la flora y la fauna característica.



Estos espacios son establecidos bajo decretos municipales y estatales, los cuales establecen la prohibición total de poder ser utilizados para la construcción de nuevos asentamientos humanos o que se conviertan en espacios urbanizados y que, en cambio, puedan servir para el aprovechamiento de energía eólica o fotovoltaica. Las ANP se encuentran a lo largo de todo el estado de Michoacán, sin embargo, en lo correspondiente al municipio de Morelia la mayoría se encuentran ubicadas al sur de la mancha urbana, dentro de las que destacan el **Parque Francisco Zarco** y, localizada más en la zona oriente, **Cañadas del Río Chiquito**.

El texto publicado por IMPLAN (2015), recoge que en la zona sur existe el antecedente de un Decreto Federal que declara Zona Protectora Forestal Vedada a la cuenca hidrográfica del Río Chiquito, con fecha del 08 de septiembre de 1936 y cuyo documento establece que queda prohibido por tiempo indefinido la explotación comercial de los bosques existentes, con el objetivo de poder mantener en buenas condiciones forestales la zona para su mejor aprovechamiento, evitar la deforestación y la erosión de las tierras descubiertas que ha dado lugar a la reducción del caudal de la corriente de agua del Río Chiquito y su consecuente contaminación. A pesar de que este decreto no establece que el área conformada por la subcuenca quede estipulada como ANP, sí hace referencia a la prohibición del aprovechamiento comercial de los bosques que allí se ubican.

Es importante destacar que, bajo las características con las que actualmente se encuentran condicionadas la Loma de Santa María y Pico Azul – La Escalera, no son consideradas ANP y pertenecen a la categoría de **Zonas de restauración y protección ambiental**, la cual no es necesariamente una subcategoría de las ANP al regirse mediante estipulaciones diferentes. Como ambos espacios son los que tienen mayor influencia dentro de lo que es la zona de estudio, es importante destacar la información recogida por IMPLAN (2015) respecto al caso de estas dos zonas:

La **Loma de Santa María** se localiza al sur de la zona de estudio y, en un principio, se declaró como ANP mediante el decreto publicado el día 19 de agosto de 1993 en el Periódico Oficial del Estado (POE), donde se establecía que la misma era una zona sujeta a



preservación ecológica. Sin embargo, el decreto se derogó y se decretó nuevamente el día 31 de diciembre de 2009 aunque bajo la categoría de zonas de restauración y protección ambiental, en donde se estableció que las originalmente 232.79 ha bajo las que se encontraba compuesta se reducirían a 166.68 ha. Dicha zona es muy importante, puesto que es considerada una zona de captación de agua para las corrientes de agua superficial y subterránea.

Por su parte, **Pico Azul-La Escalera** (ubicada al sur de la comunidad de Santa María de Guido), fue declarada zona de protección ambiental con una extensión total de 23,107 ha, siendo la zona de protección de mayor cobertura del municipio, abarcando también municipios aledaños al sureste de Morelia. Dicho decreto se suscitó el día 13 de septiembre de 2011, teniendo la mayor concentración de bosque de encino y bosque de pino-encino de todo el municipio. Con estas condiciones, en esta zona se encuentran favorecidas la retención, infiltración y captación de agua que alimenta los ríos, arroyos y mantos subterráneos, evitando de esta forma la corrosión del suelo.

Tabla 3.6. Zonas protegidas del municipio de Morelia

Nombre	Fecha de decreto	Categoría	Área (ha)
Manantial la Mintzita	14/9/2016	Zona sujeta a preservación ecológica	412.778
Cañadas del Río Chiquito	29/4/2011	Zona de restauración y protección ambiental	205.195
Ex Escuela Agrícola La Huerta	31/1/2005	Zona sujeta a preservación ecológica	271.481
Parque Francisco Zarco	15/2/2008	Parque urbano ecológico	17.806
Parque Urbano Ecológico de Ciudad Industrial	10/7/1995	Parque urbano ecológico	89.112
Pico Azul-La Escalera	13/9/2011	Zona de restauración y protección ambiental	23538.614
Cerro Punhuato	26/1/2005	Zona sujeta a preservación ecológica	117.136
La Loma de Santa María	31/12/2009	Zona de restauración y protección ambiental	166.685



3.2.8. Climatología

La climatología se establece como las características meteorológicas o condiciones del estado atmosférico que se presentan en la superficie terrestre y que exteriorizan en el ambiente y en los elementos físicos presentes en el mismo. También se precisa el clima como el conjunto de estados de tiempo atmosférico que se producen en una determinada región, otorgando a la misma de una particular idiosincrasia (FECYT, 2004).

Las variables meteorológicas que se permiten medir en base a la determinación del clima de un sitio en específico, entre otras, son la precipitación, la velocidad del viento, la temperatura y la humedad. Dichas variables son trascendentes en la intrepidez de conocer los rasgos del suelo, la vegetación, la fauna y cualquier otro elemento que permita identificar las características físicas naturales de la región.

Para esta investigación, las variables consideradas para llevar a cabo la caracterización climatológica de la zona de estudio fueron la **precipitación**, la **temperatura**, la **zona de heladas** y la **zona de granizadas**, mismas que se relacionan con el análisis de la problemática acaecida en la región provocadas por el Huracán Willa incitando la inundación en gran parte de la ciudad.

Elementalmente, la **humedad** relativa de Morelia presenta una media anual de 54.8%, consecuencia de la influencia ejercida principalmente por la cercanía de la costa en el Pacífico y en menor medida por el Golfo de México. En menor escala influyen también los diferentes cuerpos de agua (Lago de Cuitzeo, presa de Cointzio, manantiales y ríos, etc.) cercanos al municipio o dentro de éste, que proporcionan cierta humedad al ambiente (IMPLAN, 2015).

A continuación, se presenta la información correspondiente a la temperatura, la zona de heladas y la zona de granizadas de la zona de estudio. La precipitación se muestra en el apartado de *Resultados*, puesto que forma parte la información obtenida a partir de los datos climatológicos manipulados directamente para la investigación.

3.2.8.1. Temperatura

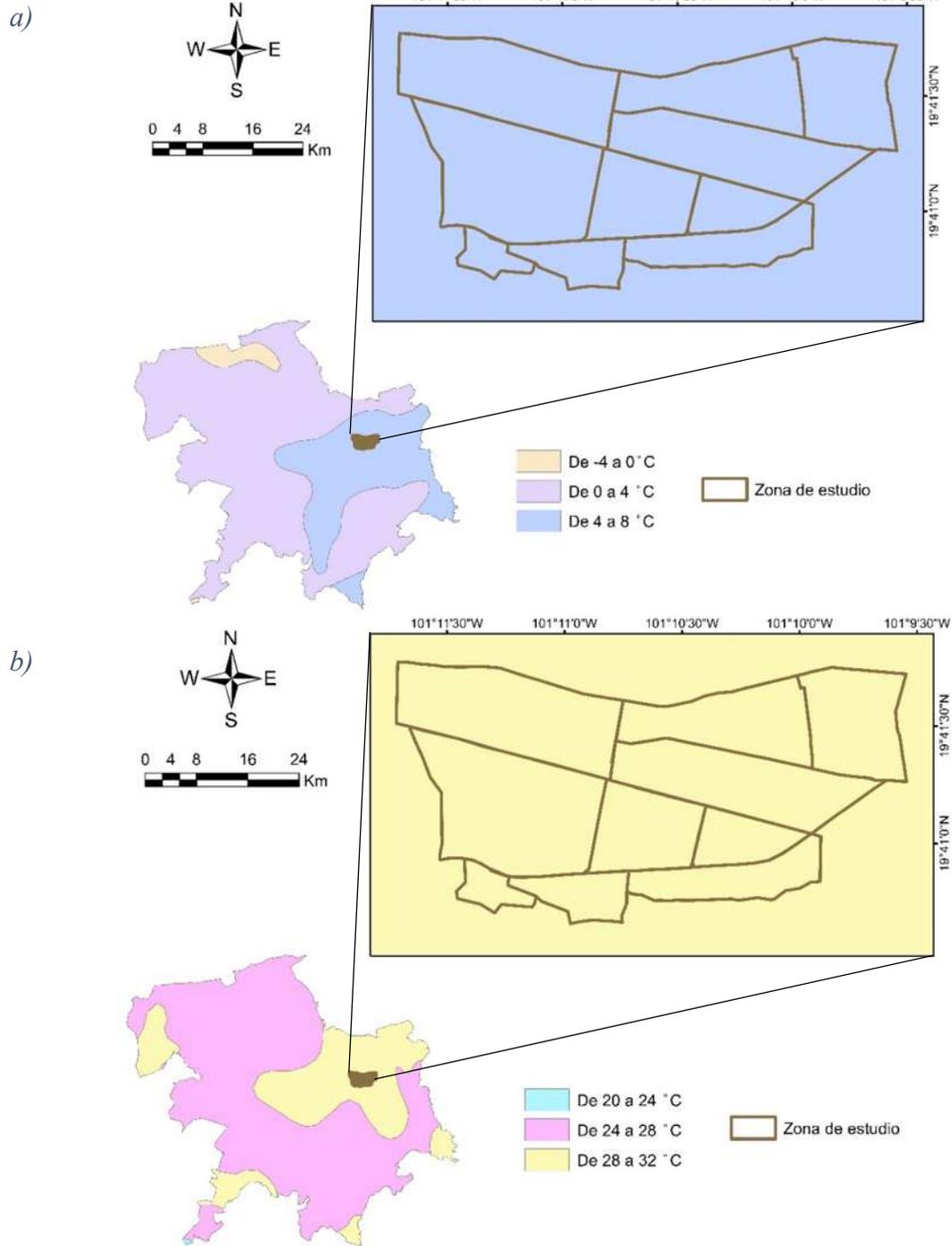


Figura 3.17. a) Temperatura anual mínima promedio y, b) Temperatura anual máxima promedio registradas en la zona de estudio. Fuente: elaboración propia con datos de IMPLAN.

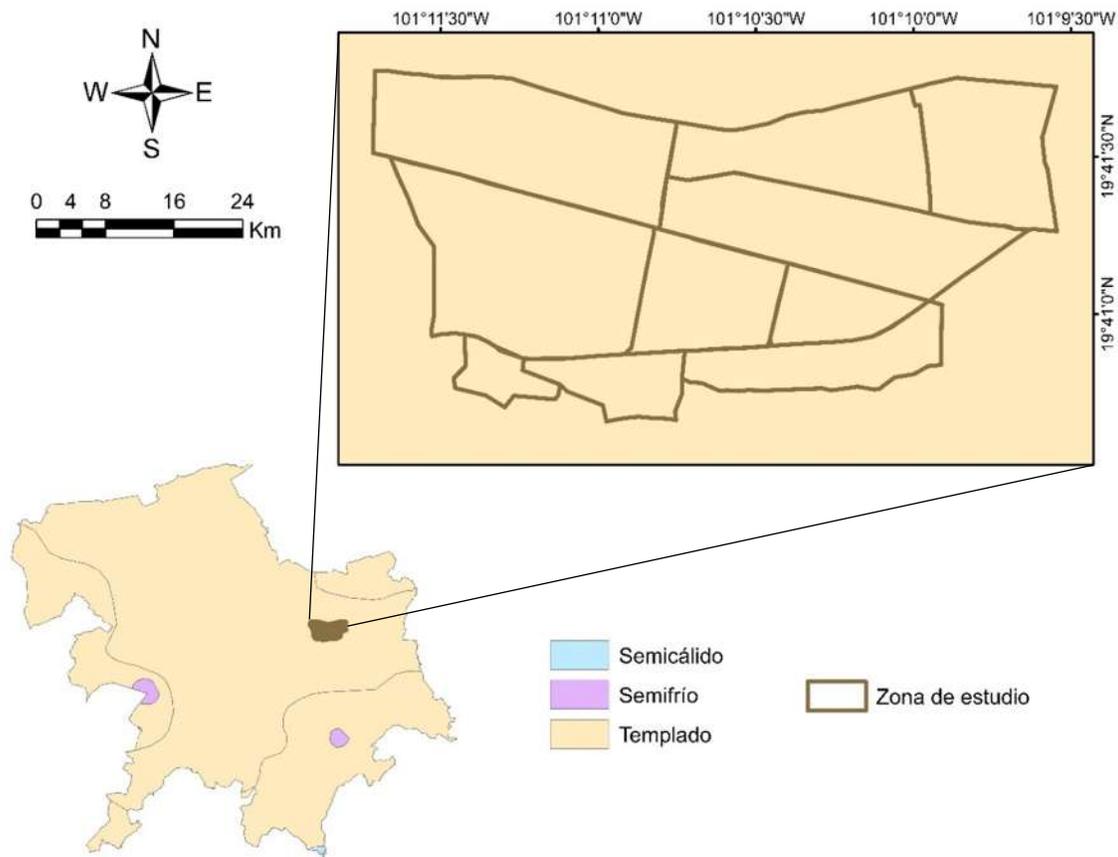


Figura 3.18. Régimen térmico del municipio de Morelia. Fuente: elaboración propia con datos del IMPLAN.

El clima que típicamente se registra en el municipio de Morelia se concentra en tres vertientes que se relacionan con la elevación correspondiente a cada sitio en específico. Dicho régimen térmico se muestra en la *Figura 3.18* y desarrollado en la *Tabla 3.7*, en donde se puede apreciar que el clima **Templado** es el que tiene la presencia por defecto en casi toda la extensión territorial del municipio, mientras que los climas **semifrío** y **semicálido** apenas tienen registro. La descripción con la que se caracterizan los diferentes climas presentes se indica de la siguiente forma:

- El clima semifrío cuenta con un verano fresco largo, cuya temperatura media anual oscila entre los 5°C y los 12°C mientras la temperatura del mes más frío se encuentra en ocasiones por debajo de los -8°C, mientras que el más cálido no es superior a los 22°C.

- El clima templado tiene temperaturas promedio que se encuentran entre los 12°C y los 18°C, siendo para el mes más frío una temperatura que extrañamente es menor a los -3°C, mientras que el mes más cálido puede fácilmente sobrepasar los 28°C.
- El verano es muy fresco en las regiones de clima semicálido, teniendo temperaturas promedio entre 17°C y 24°C, con registros en el mes más frío de aproximadamente 7°C y con el mes más cálido con temperaturas que pueden superar los 32°C.

*Tabla 3.7. Propiedades geométricas del régimen térmico del municipio de Morelia.
Datos: IMPLAN.*

Régimen térmico	Área (km ²)	Porcentaje (%)
Semifrío	8.426	0.706
Templado	1183.622	99.201
Semicálido	1.112	0.093

La latitud en relación con las variaciones de altimetría ha permitido que se generen condiciones que influyen en la distribución espacial del clima bajo los siguientes regímenes climatológicos predominantes por el municipio:

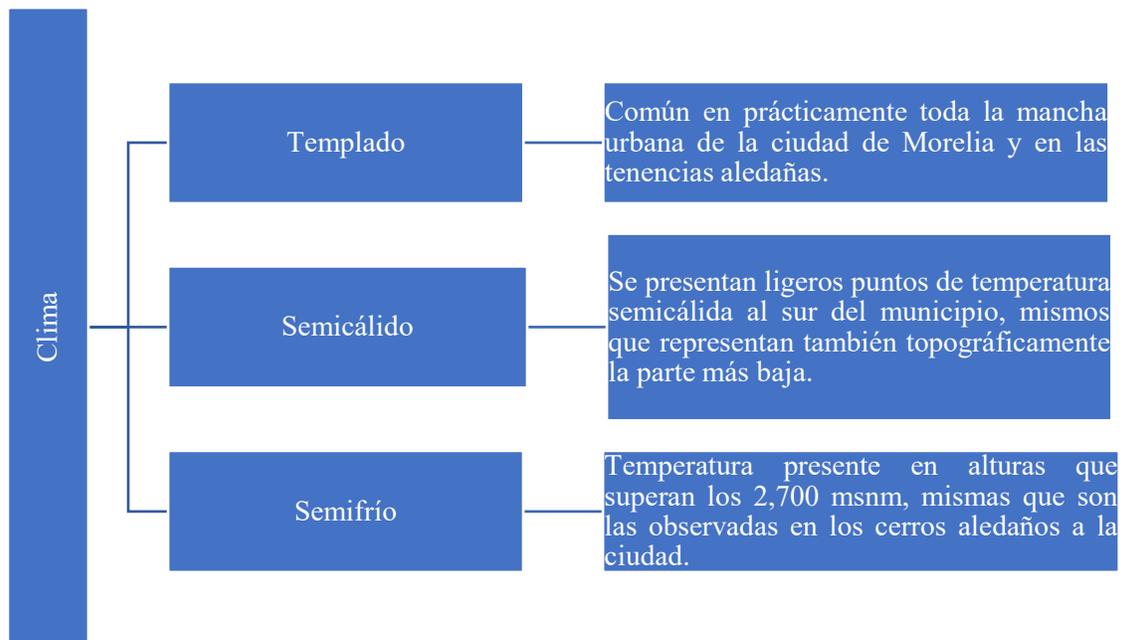


Figura 3.19. Características del régimen crítico en función de la altitud.

3.2.8.2. Estaciones climatológicas

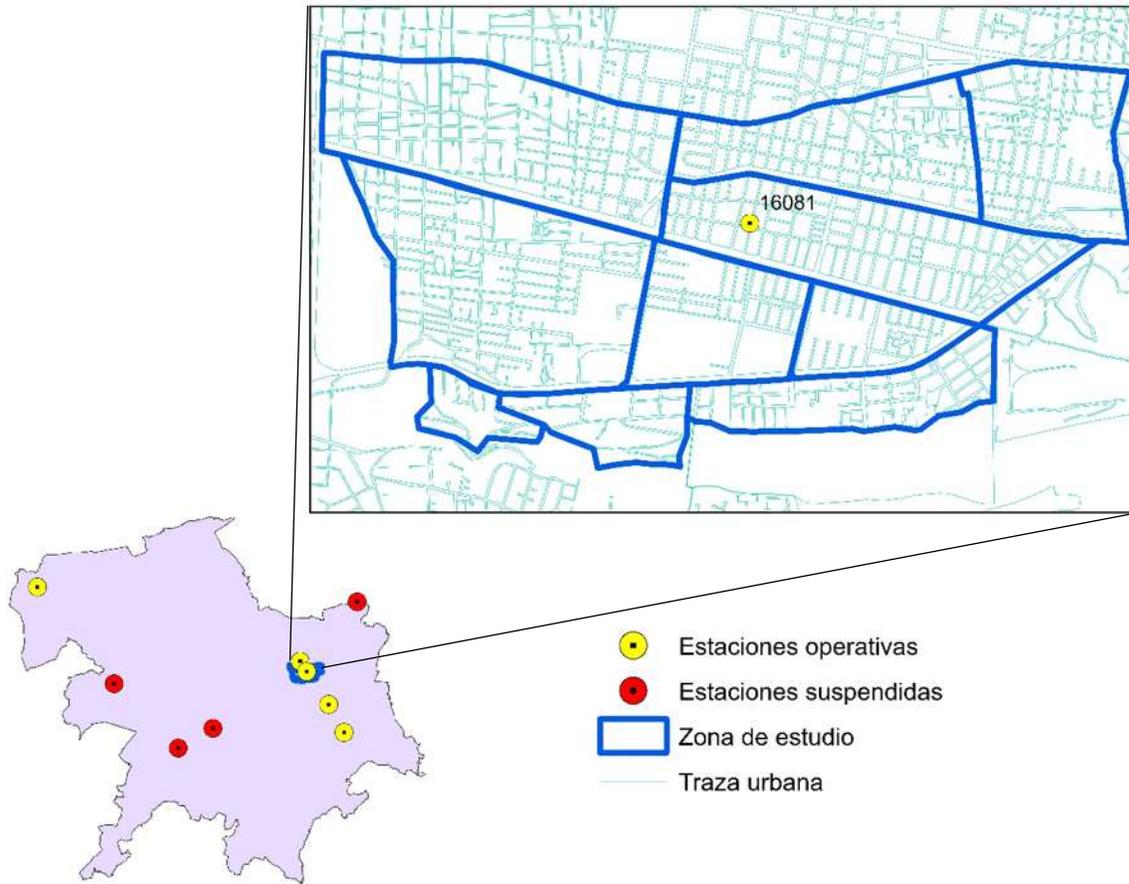


Figura 3.20. Ubicación de las EMC en el municipio de Morelia, con énfasis en la zona de estudio. Fuente: elaboración propia con datos de la CONAGUA.

En el municipio de Morelia, se cuentan con 9 estaciones climatológicas que son gestionadas por la CONAGUA y por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), mismos que cuentan con una amplia base de datos a nivel nacional de los registros históricos de las variables que son capaces de medir las Estaciones Meteorológicas Convencionales (EMC). En la *Figura 3.20* se aprecia la ubicación de las EMC a lo largo de la extensión del municipio, donde se puede apreciar que se cuentan con cinco operativas y cuatro suspendidas. Cuando una EMC gestionada por la CONAGUA tiene estado de suspensión, implica que la misma ha dejado de registrar información climatológica de la región por un periodo considerable de



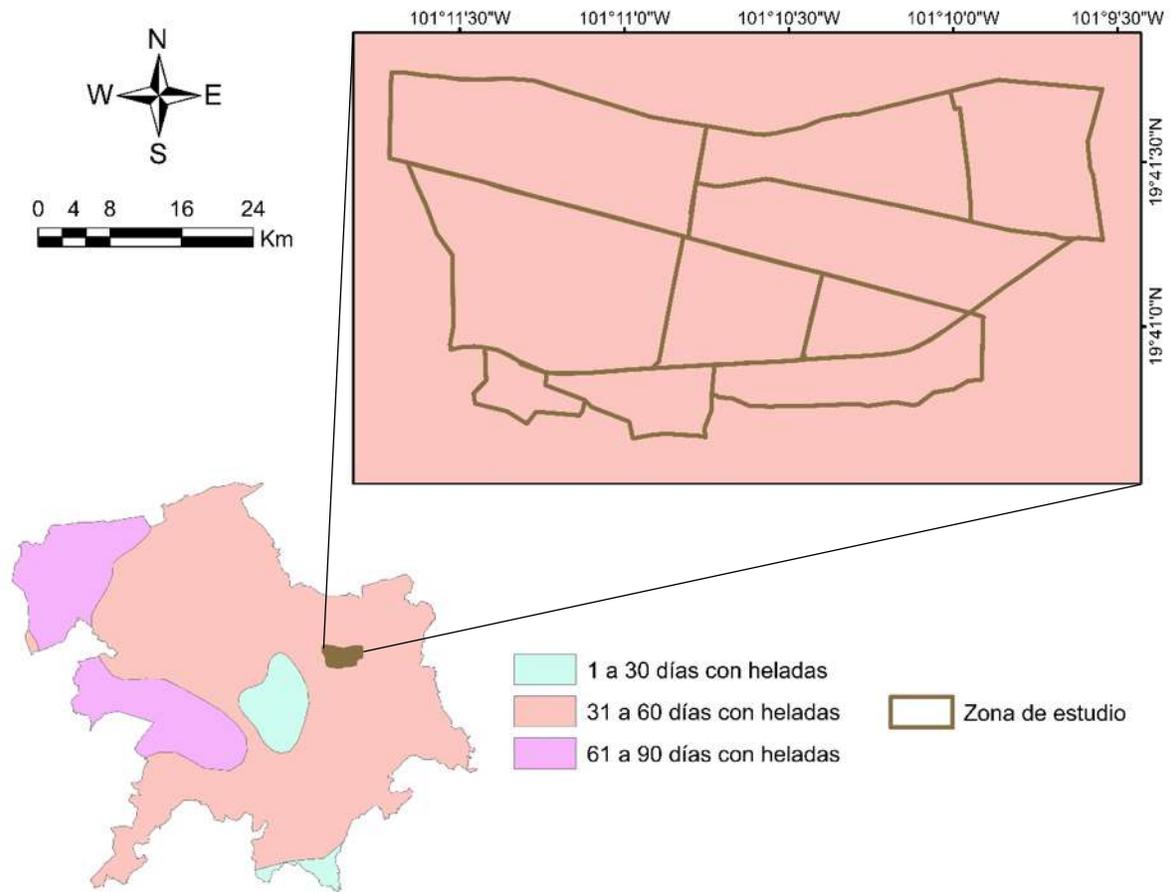
tiempo, factiblemente sin la posibilidad de poder utilizar su información para los fines de esta investigación. Por otra parte, una estación en operación registra datos hasta el día de la elaboración de este trabajo. Las 9 estaciones reciben el nombre de la comunidad o pueblo en el que se encuentran ubicadas, estando dos en la ciudad de Morelia y el resto en las comunidades de Jesús del Monte, San Miguel del Monte, Teremendo, Cointzio, Cuitzillo Grande, Santiago Undameo y Capula. En la *Tabla 3.8* se muestra la información geográfica correspondiente a cada EMC, indicando igualmente el código bajo el cual se encuentran identificadas en la base de datos de la CONAGUA.

Tabla 3.8. Propiedades geográficas de las estaciones climatológicas del municipio de Morelia.

Código	Nombre	Situación	Coordenadas		Elevación (m)
			Longitud	Latitud	
16055	Jesús del Monte	Operativa	-101.1514	19.6517	2180
16080	Morelia (OBS)	Operativa	-101.1833	19.7	1912.7
16081	Morelia	Operativa	-101.1761	19.6886	1908
16114	San Miguel del Monte	Operativa	-101.1342	19.6203	1965
16254	Teremendo	Operativa	-101.4778	19.7833	2188
16022	Cointzio	Suspendida	-101.2811	19.625	2096
16028	Cuitzillo Grande	Suspendida	-101.1194	19.7667	1987
16120	Santiago Undameo	Suspendida	-101.32	19.6028	2130
16247	Capula	Suspendida	-101.3917	19.675	2097

Las variables a necesitar de las estaciones, así como la extracción de su contenido se muestran en el apartado de *Materiales*, mientras que la manipulación de la información necesaria para la misma y los métodos a utilizar se desarrollan en el apartado de *Procedimiento*, ambos pertenecientes a este capítulo.

3.2.8.3. Zonas de heladas



Naturalmente, el territorio correspondiente a la zona de estudio se presenta entre 31 y 60 días con heladas al año, siendo las mismas más frecuentes durante los meses de enero y febrero, que son los meses correspondientes a la temporada invernal. No obstante, cuando se presentan frentes fríos próximos al estado de Michoacán las heladas se pueden suscitar en otras temporadas del año.

3.2.8.4. Zonas de granizadas

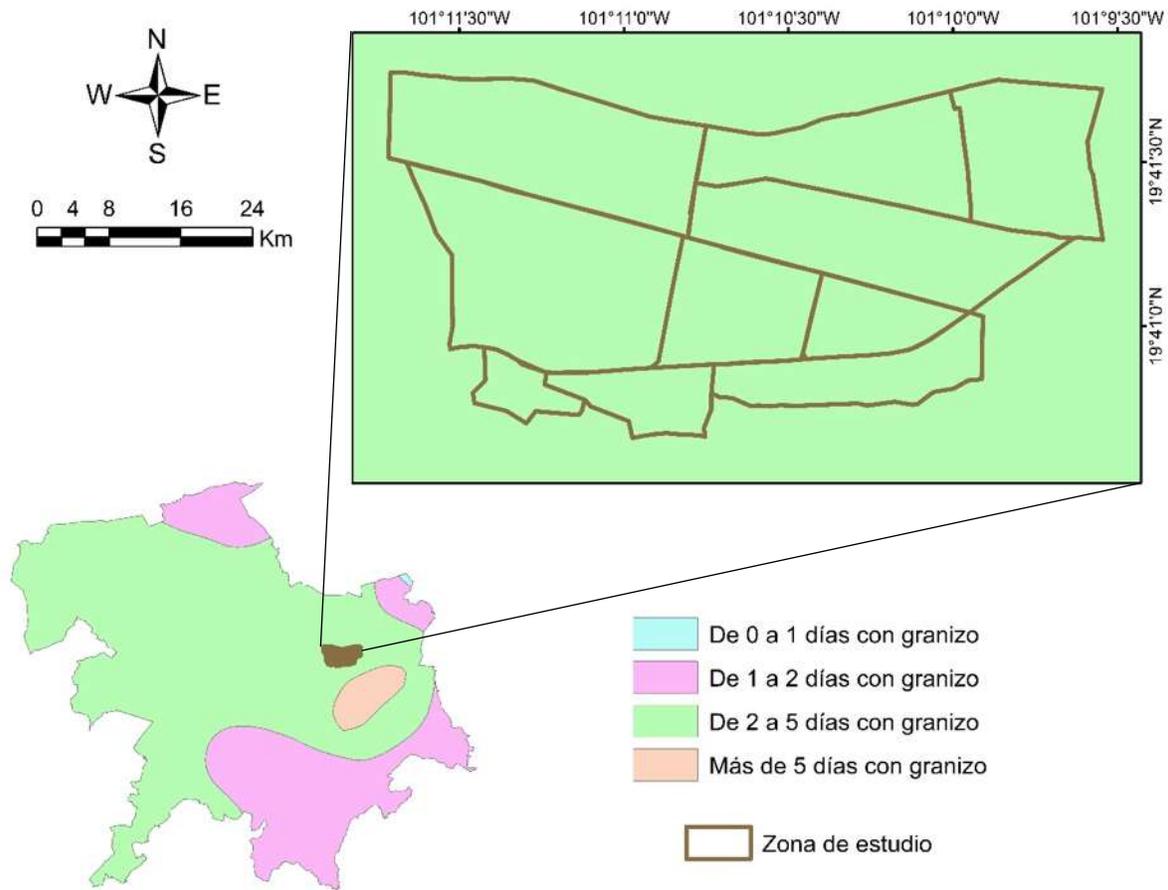


Figura 3.22. Zonas de granizadas del municipio de Morelia con una aproximación a la zona de estudio. Fuente: elaboración propia con datos del INEGI.

Las fechas en las que se pueden presentar las granizadas en la zona de estudio varían a lo largo del año e igualmente no se presentan uniformemente en toda la extensión de la misma, pudiendo haber colonias con caída de granizo mientras que otras pueden presentar ligeras lluvias. Según datos del INEGI, hay de entre 2 a 5 días al año con granizo en la parte baja del municipio, mientras que en la zona sur de la ciudad se pueden presentar mayor cantidad de días con este fenómeno. Dicha información se obtuvo en base a estimaciones y a registros anuales, por lo que puede haber años con mayor número días con granizo que otros.

3.2.9. Aspectos socioeconómicos

Para poder realizar un análisis desde el ámbito socioeconómico de la zona que presentó daños por la inundación, se hizo énfasis en identificar los elementos dentro de este apartado que se encuentran dentro de la zona de estudio, identificando su ubicación por medio de mapas, mismos que se enfatizan en las colonias de la zona sur de la ciudad afectadas. En esta información, se incluyen los semblantes educativos, comerciales, de infraestructura, de salud, y de los programas de desarrollo que tienen influencia en la región.

3.2.9.1. Demografía

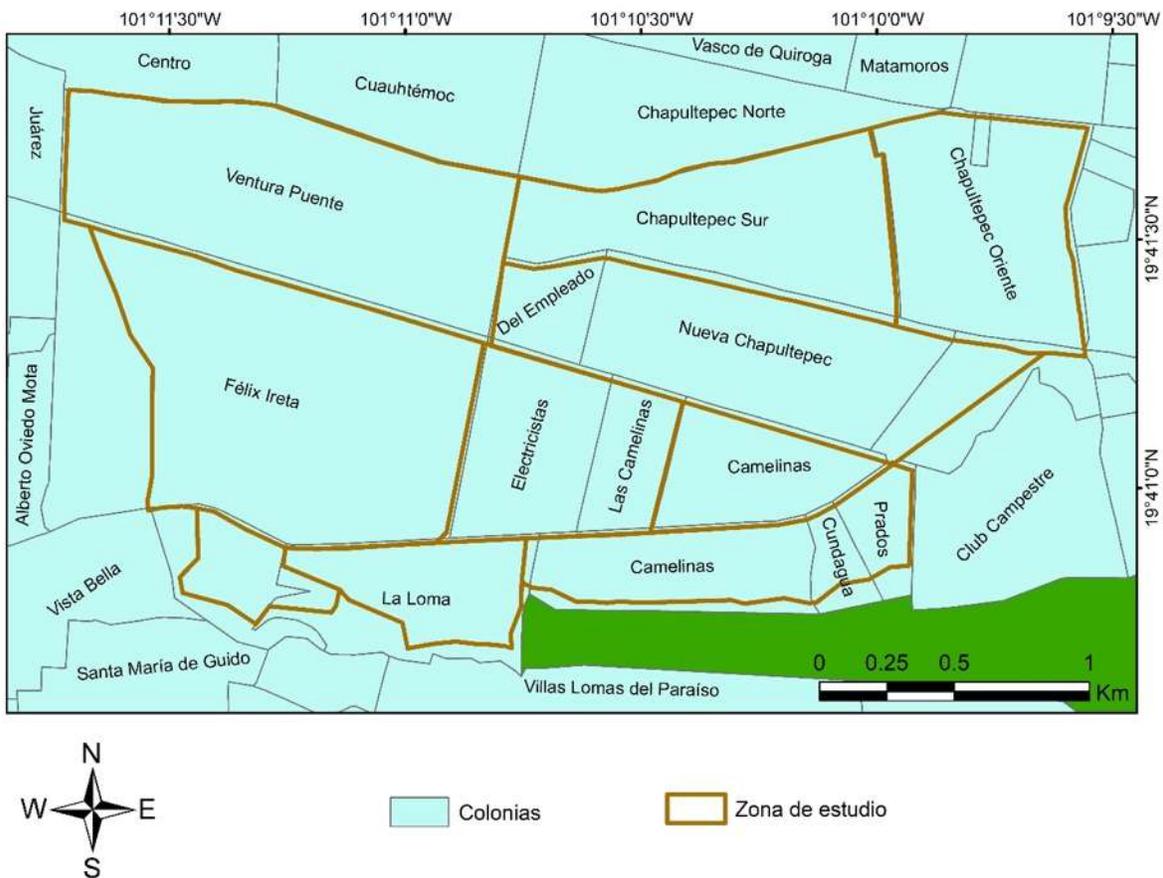


Figura 3.23. Colonias que componen la zona de estudio.



La zona de estudio es una región muy concurrida en la ciudad de Morelia, así como muy habitable en prácticamente el 95% del área total de la misma. De los registros extraídos del Inventario Nacional de Vivienda del INEGI, cuyos datos fueron obtenidos en el año 2010, se presenta la información perteneciente a este apartado, en donde se incluyen la cantidad de viviendas que manzanas que componen el área abarcada en la investigación y los indicadores relacionados con la demografía de la zona.

El motivo bajo el cual se indican datos registrados del realizado en el año 2010 es porque presentan de forma más particular y focalizada los resultados obtenidos por manzana, lo que permite para la presente investigación poder apreciar la información correspondiente a la demografía respecto de las colonias afectadas y así poder obtener un dato más preciso del número de manzanas y, por consiguiente de su población que fueron afectadas por la inundación. A pesar de que se comprenden 8 años entre la realización del censo y la formación del huracán Willa y que, por lo tanto, los números y las figuras presentadas no necesariamente coinciden con lo acontecido en el mes de octubre de 2018 en la zona, se realizó una comparación con los datos presentados por el Inventario Nacional de Vivienda del año 2016, mismo que a la fecha de la realización de este trabajo presenta la información en crudo, lo que significa que no han sido sometidos a un procesamiento adecuado o que se encuentre finalizado por parte del INEGI y que permita selectivamente identificar los indicadores demográficos de la zona de estudio apropiadamente. Por otra parte, al comparar los datos primarios que mayormente se pueden asociar a la zona de estudio, los mismos no presentan un cambio significativo respecto a la información extraída para el año 2010, por lo que el cambio de los números en la población y, sobre todo, en las viviendas, es parecido.

Para efectos prácticos y de visibilidad de las imágenes mostradas y en base a lo establecido en el *Capítulo II*, la zona de estudio compuesta en los mapas presentados en esta investigación se encuentra constituida por 9 colonias, mientras que, de forma oficial, la *Figura 3.23*, presenta la delimitación de la zona abarcada para éste trabajo y la delimitación real de las colonias que componen la zona sur-oriente de la ciudad de Morelia, así como una

zona sin asignación de colonia, misma que es la zona protegida de la Loma de Santa María.

De ahí, se identifican un total de 15 colonias, nombradas de sur a norte y de oeste a este:

- Nueva Jacarandas
- Félix Ireta
- Ventura Puento
- La Loma
- Electricistas
- Del Empleado
- Chapultepec Sur
- Camelinas
- Las Camelinas
- Bosque Camelinas
- Nueva Chapultepec
- Cundagua
- Prados del Campestre
- Cinco de Diciembre
- Chapultepec Oriente

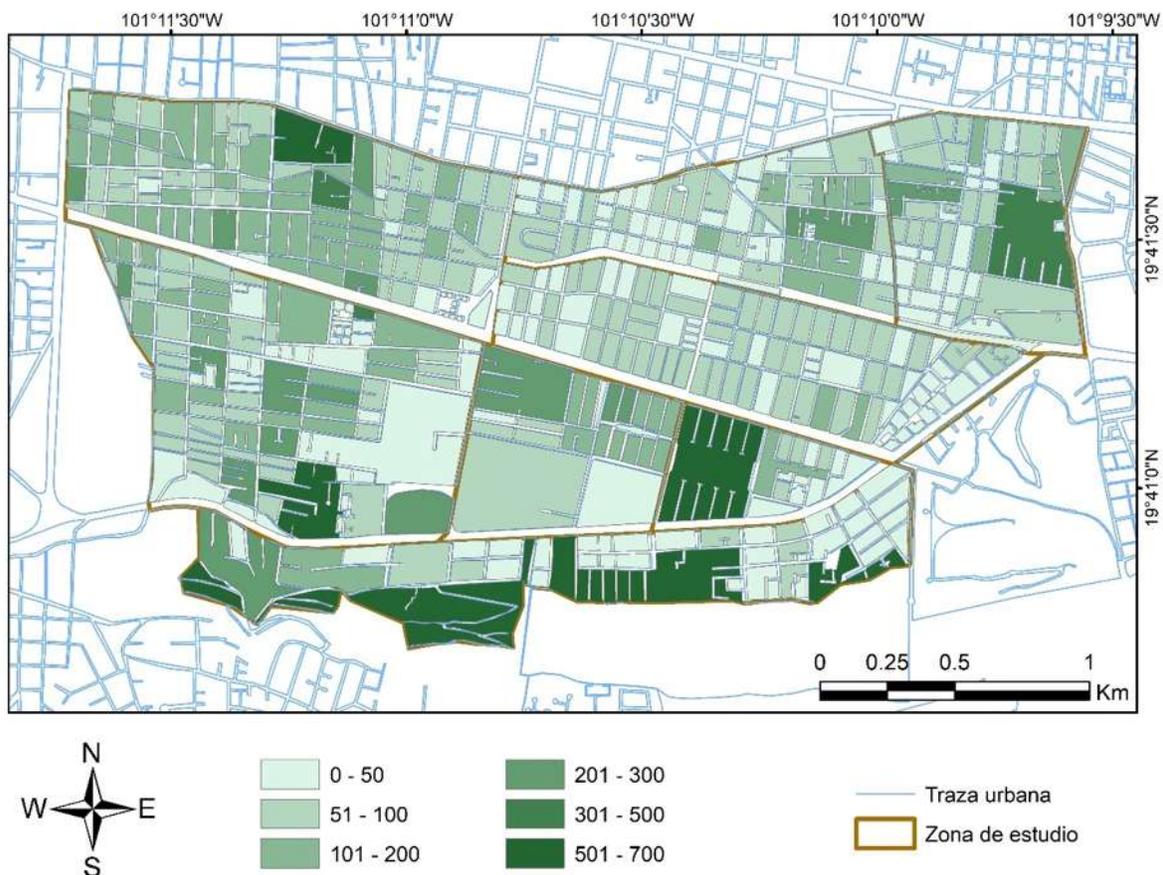


Figura 3.24. Número de habitantes por manzana.

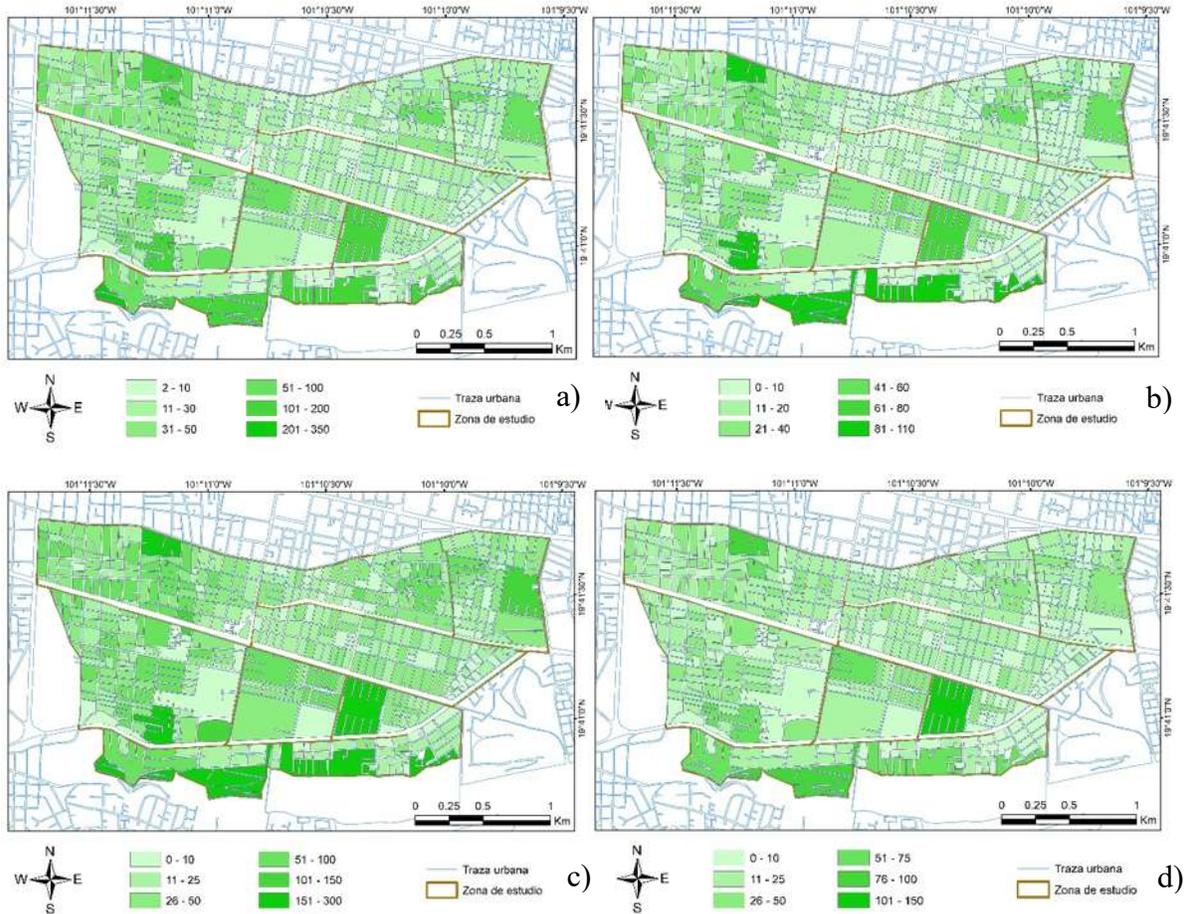


Figura 3.25. Número de personas por manzana en función de su edad; a) Población entre 0 y 14 años; b) Población entre 15 y 29 años; c) Población entre 30 y 59 años; y d) Población mayor a 60 años.

Las colonias con mayor número de vecinos son las delimitadas en las colonias del sur: Nueva Jacarandas, La Loma y Bosque Camelinas, así como en el la región con viviendas administradas por INFONAVIT ubicadas en la colona Camelinas. Éstas son las colonias que se encuentran a una mayor elevación, por lo que, anticipando a los resultados de la modelación de la inundación, en las partes altas de las mismas no se presentan problemas de inundaciones, quedando la problemática en las partes más bajas de las mismas.

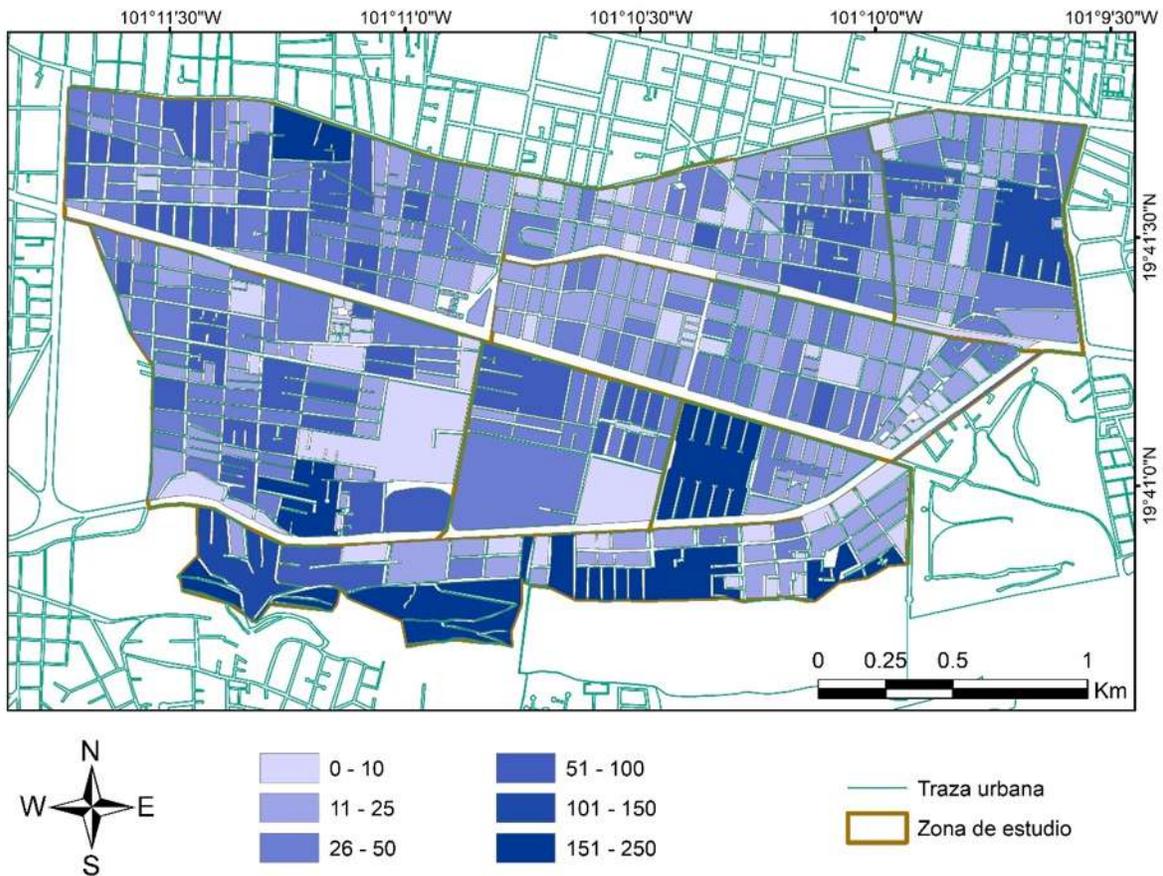


Figura 3.26. Número de viviendas por manzana, incluyendo las que cuentan con comercios independientes o microempresas.

En la *Figura 3.26* están indicadas respecto a la manzana en la que se encuentran ubicadas el rango de la cantidad de viviendas de la región, indicando moradas que no necesariamente estaban habitadas al momento de la realización del censo. La zona con mayor concentración de viviendas es la correspondiente a las colonias de Bosque Camelinas, La Loma y Nueva Jacarandas.

Para complementar numéricamente la información establecida en los mapas anteriores, se presenta la *Figura 3.27*, donde se incluyen los números correspondientes a la población, a las viviendas y a la infraestructura pública.

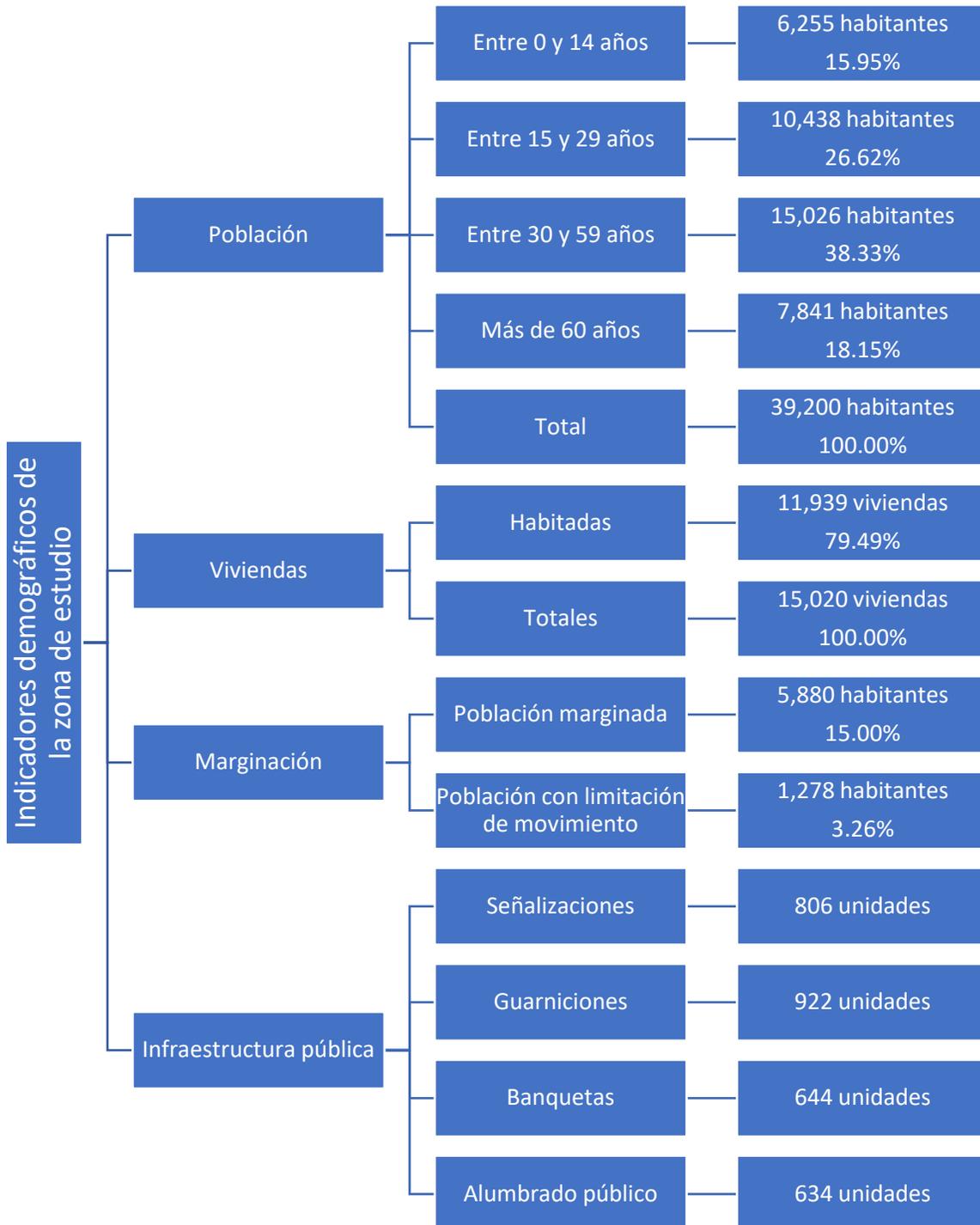


Figura 3.27. Indicadores demográficos de la zona de estudio, así como infraestructura pública, otros tipos de infraestructuras se indican en los apartados subsecuentes.

3.2.9.2. Grado de marginación

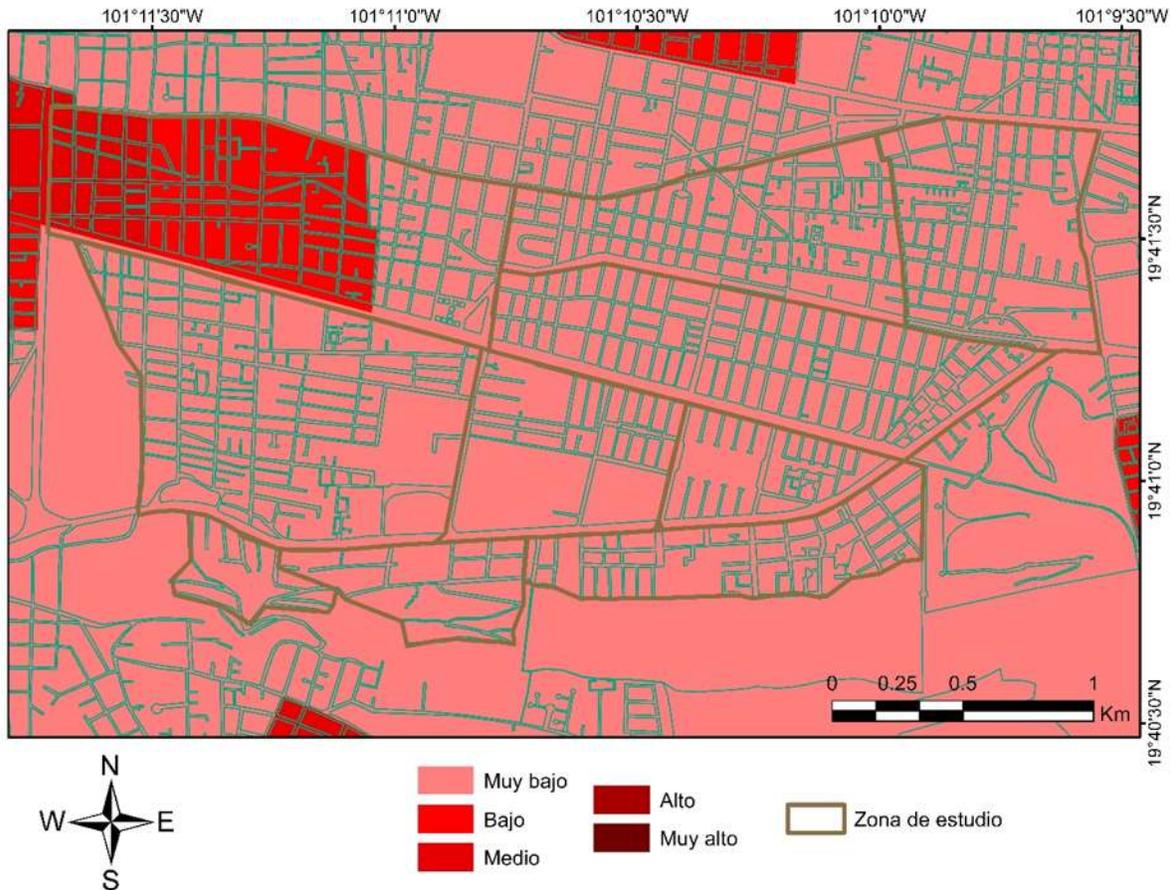


Figura 3.28. Grado de marginación apreciable dentro de las colonias afectadas y aledañas.
Fuente: elaboración propia con datos del IMPLAN.

El INEGI menciona que la marginación es el conjunto de problemas y desventajas sociales de una comunidad, poniendo especial énfasis en los grupos de personas y familias sobre el comercio u otras variables que se pudieran utilizar. Hacer un estudio de marginación resulta complejo y amplio por todas las características que se pueden tomar en cuenta para dar un veredicto de esta métrica aplicable a una comunidad en específico, por lo que en esta investigación se establece la marginación en función de la población y su nivel de educación, el estado y los servicios con los que cuentan sus viviendas y su disponibilidad de bienes. En la zona urbana de la ciudad de Morelia, se cuenta con equipamiento, el cual incluye servicios y establecimientos de distinta índole como lo son los de administración pública, abastos,



asistencia social, comercio, comunicación, cultura, deporte, educación, religioso, de recreación y de salud, contrastando fuertemente con la accesibilidad que se tiene en las comunidades locales y en algunas tenencias de la ciudad (IMPLAN, 2015).

En el caso de la zona de estudio, no se cuenta con marginación apreciable desde el punto de vista social. Naturalmente, la mayoría de los habitantes de la zona de estudio cuentan con los servicios suficientes para poder solventar sus necesidades económicas, así como suficiente poder adquisitivo para poder estar en hogares que cuentan con agua potable, luz, conexión a Internet, acceso a los medios de comunicación, calles pavimentadas, comercios de cualquier índole cerca y con un alto nivel educativo, o al menos en lo correspondiente a la media nacional.

En la subcuenca del Río Chiquito, el Consejo Nacional de Población (CONAPO) estipula que mayoritariamente en las comunidades rurales es en donde predomina un alto nivel de marginación en cuanto a la falta de educación, a la calidad de las viviendas, el acceso a los servicios de salud y a otros bienes aplicables. A pesar de en la colonia Félix Ierta (como se puede observar en la *Figura 3.28*) cuenta con un grado de marginación que es mayor al apreciado en las otras colonias consideradas para el estudio, no se compara con el que hay en colonias al sur de la ciudad pertenecientes a la misma subcuenca como Jesús del Monte, ni mucho menos a las que no se encuentran urbanizadas.

La población con limitación de movimiento también forma parte de la caracterización del grado de marginación de una comunidad, pero en este caso es doblemente importante, puesto que en el caso de un desastre natural como un terremoto o un huracán es indispensable identificar a un aproximado de la población en función de los censos realizados recientemente (2020), para determinar la dificultad de una persona de poder trasladarse a un centro social o refugio sin contratiempos. Ésta variable es también refulgente en la elaboración de un análisis forense que permita conocer un estimado de los afectados por la inundación en relación a su índice de mayor presencia en algunos sectores de las colonias damnificadas los que difícilmente pudieron evacuar sus hogares en caso de que el nivel del agua hubiera penetrado

sus hogares y, en su caso, lo que pasaría si se presentara un evento más destructivo al apreciado en 2018, sus consecuencias y su forma de controlarlo desde el punto de vista social.

En la *Figura 3.29* se presenta un mapa en donde se aprecia un gradiente de color en función del porcentaje de población con limitación de movimiento. Al estar cerca de instituciones médicas privadas y públicas, la población que requiere frecuentemente de servicios médicos que no necesariamente viven permanentemente en la zona de estudio que se encuentran en la región afectada, así como también población de la segunda y tercera edad que cuenta con limitaciones para trasladarse por estar en silla de ruedas, camillas, utilizando muletas o bastones o que requieren de cuidados especiales. Por esto, en promedio, el 3% de la población censada presenta esta dificultad.

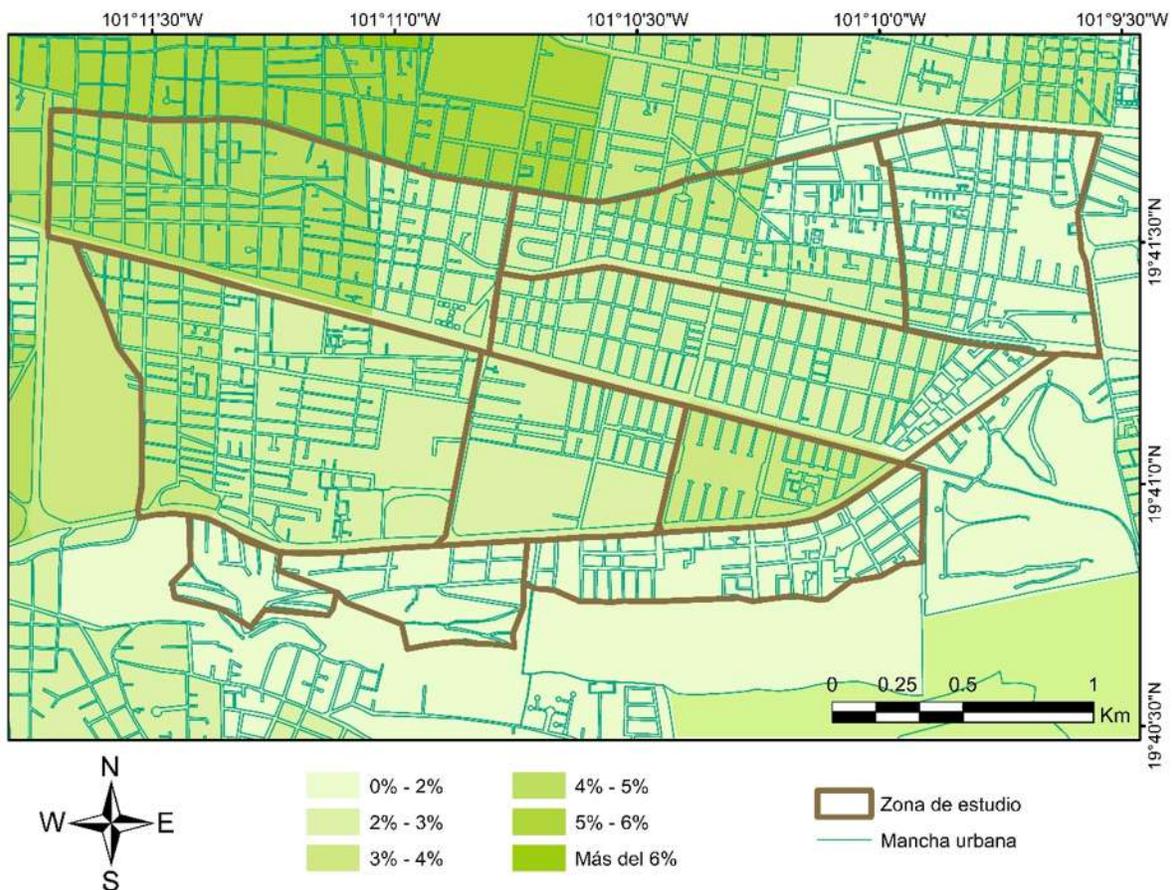


Figura 3.29. Porcentaje de población con limitación de movimiento. Fuente: elaboración propia con datos del IMPLAN.

3.2.9.3. Educación

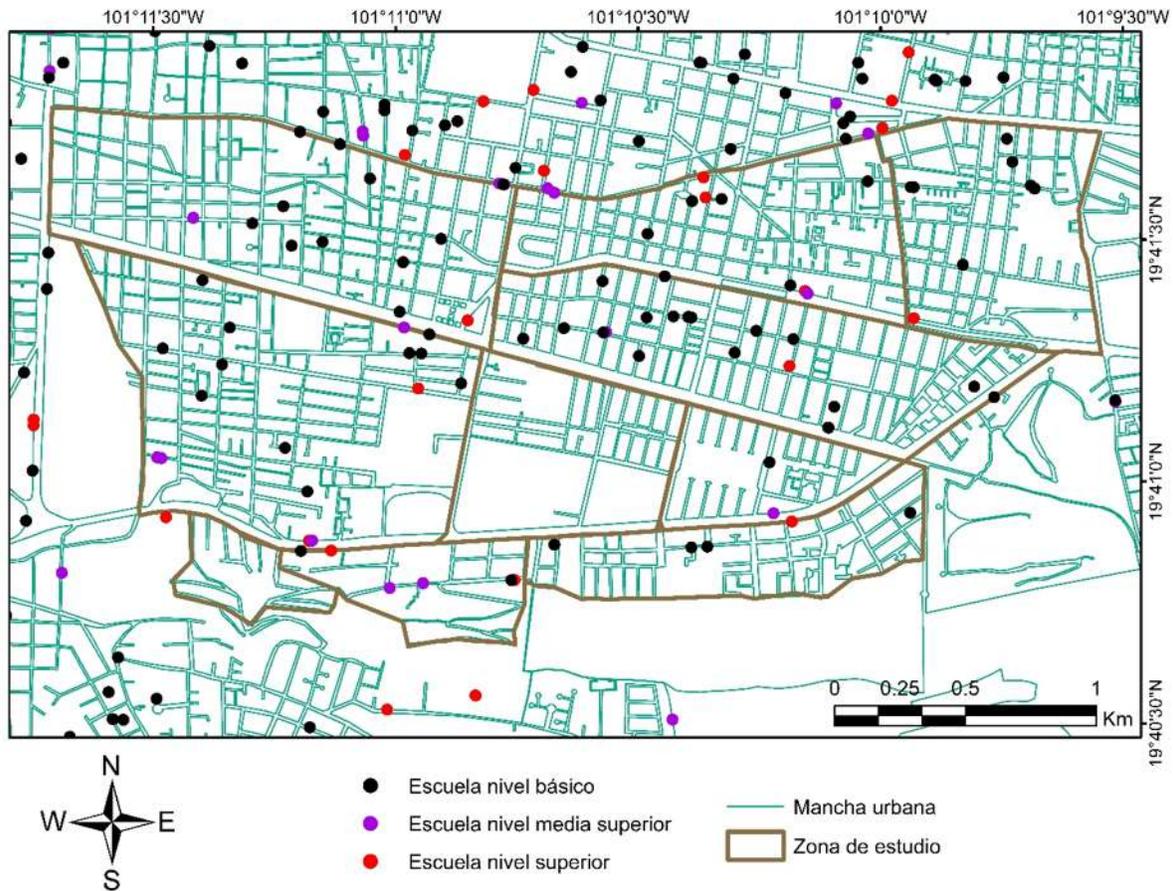


Figura 3.30. Escuelas de educación básica, media superior y superior en la zona de estudio. Fuente: elaboración propia con datos del IMPLAN.

La zona de la ciudad cercana a las colonias de la región sur-poniente es particularmente interesante en lo referente al sector educativo, ya que cuenta con una gran cantidad de instituciones públicas y privadas. En la *Tabla 3.9*, se muestra por números la cantidad de personas y espacios internos dentro de las instalaciones de las escuelas de nivel básico, media superior y superior, identificando si consisten en escuelas privadas o públicas; en ella, se destaca que, a la publicación de los datos informativos (2020), se contaban con 111 instituciones donde todos los días por las mañanas y/o por las tardes se concentran más de 12,500 personas entre docentes, personal administrativo, investigadores y alumnos. Desde el acontecimiento de la inundación provocada por el huracán Willa hasta la información



proporcionada por el INEGI, no han habido grandes cambios en la cantidad de personas que fueron censadas.

Tabla 3.9. Información demográfica y socioeconómica de las escuelas de diferentes niveles educativos que se encuentran en la zona de estudio.

Nivel educativo	Cantidades					
	Sector	Alumnos	Personal	Aulas	Laboratorios	Talleres
Básica	73	7600	901	475	0	0
Privada	50	3168	459	247	0	0
Pública	23	4432	442	228	0	0
Media superior	15	1243	197	66	9	3
Privada	14	920	168	56	9	3
Pública	1	323	29	10	0	0
Superior	23	1839	862	363	31	14
Privada	21	472	580	161	31	14
Pública	2	1367	282	202	0	0
Total general	111	10682	1960	904	40	17

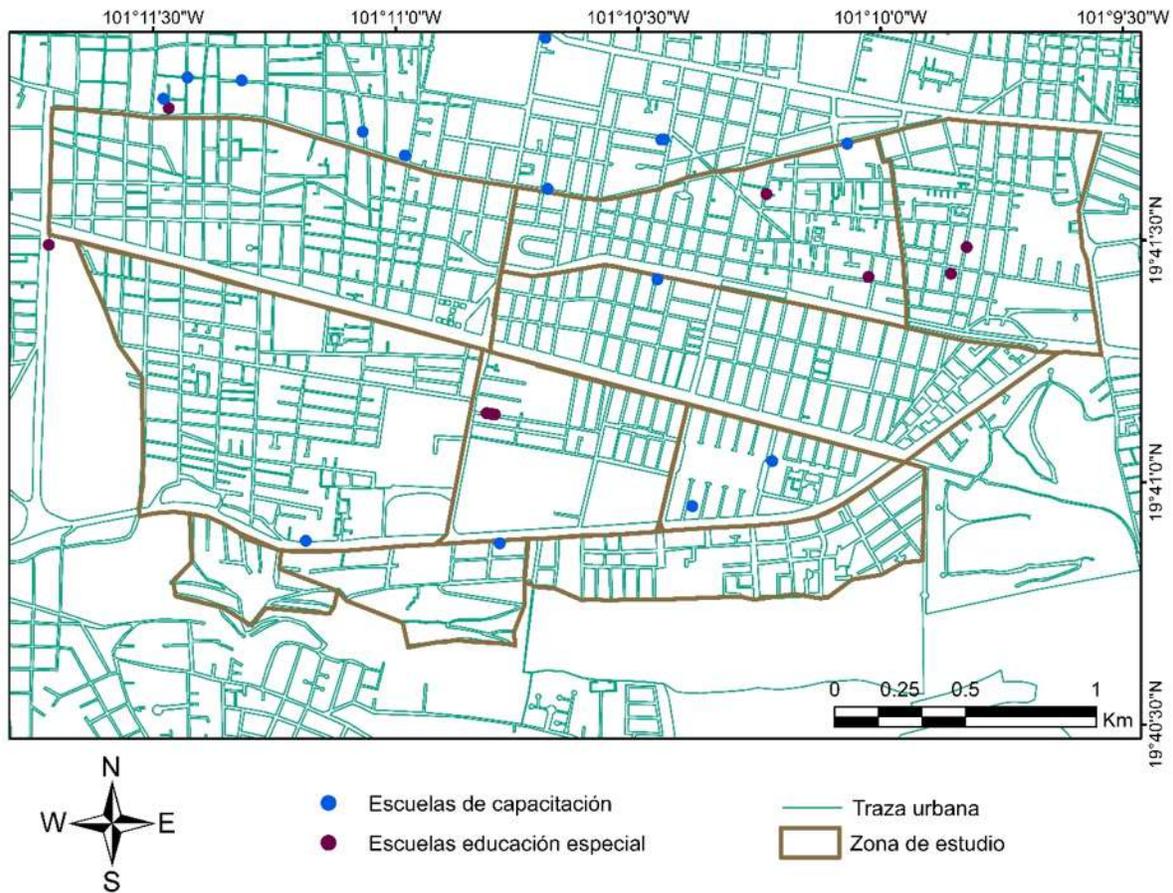


Figura 3.31. Escuelas de educación complementaria en la zona de estudio. Fuente: elaboración propia con datos del IMPLAN.

Siguiendo en la línea de la consideración de los aspectos demográficos y socioeconómicos en relación a la educación, se presentan también las escuelas que no corresponden a la educación conforme a nivel educativo y se enfocan en la capacitación al trabajo o en educación especial. En la *Figura 3.31* se muestra la ubicación de las mismas dentro y en las cercanías de la zona de estudio, mientras que en la *Tabla 3.10* se desarrolla conforme a su información demográfica, mostrando de igual forma los números que se tenía al momento de la realización del censo por parte del INEGI que se relacionan en cercanía al momento de la presencia del huracán Willa y, por consiguiente, a los días de análisis que se presentan en esta investigación, por lo que la información presentada en 2016 no difiere en gran cantidad respecto a los acontecimientos de 2018.



Tabla 3.10. Información socioeconómica y demográfica de escuelas especiales presentes en la zona de estudio

Escuela y sector	Personal	Docentes	Alumnos (si aplica)	Aulas (si aplica)	Talleres (si aplica)
Capacitación para el trabajo	22	13	65	0	0
Formación para trabajo	22	13	65	0	0
Privada	22	13	65	0	0
Educación especial	221	119	2497	41	6
CAM	73	32	293	41	6
Pública	73	32	293	41	6
USAER	148	87	2204	0	0
Pública	148	87	2204	0	0
Total general	243	132	2562	41	6

No todas las instituciones de educación especial cuentan con aulas como talleres que presenten equipamiento especial que se pudiera ver perjudicado con la llegada de fuertes avenidas a la ciudad, no obstante, el impacto que pueden tener sobre las aulas es el mismo respecto a las instituciones de educación básica, media superior y superior. La cantidad de alumnos, personal administrativo y docente es muy inferior al registrado en las escuelas de nivel educativo y el sector educativo al que se encuentran adscritos los institutos está en función de su función (las escuelas de capacitación se encuentran registradas como instituciones privadas, mientras que las de educación especial como públicas).

Para entender las escuelas de educación especial presentes, se tienen de dos tipos: CAM y USAER. Las CAM (Centro de Atención Múltiple) son para escolarizar a la población que cuente con discapacidades o que requiera formación para el trabajo para personas que no pueden integrarse a un sistema educativo, mientras que las USAER (Unidades de Servicio de Apoyo a la Educación Regular) son instituciones que se encargan de brindar educación a la población que encuentre dificultades para poder aprender o que cuente con dificultades de acceso a la misma.

3.2.9.4. Salud

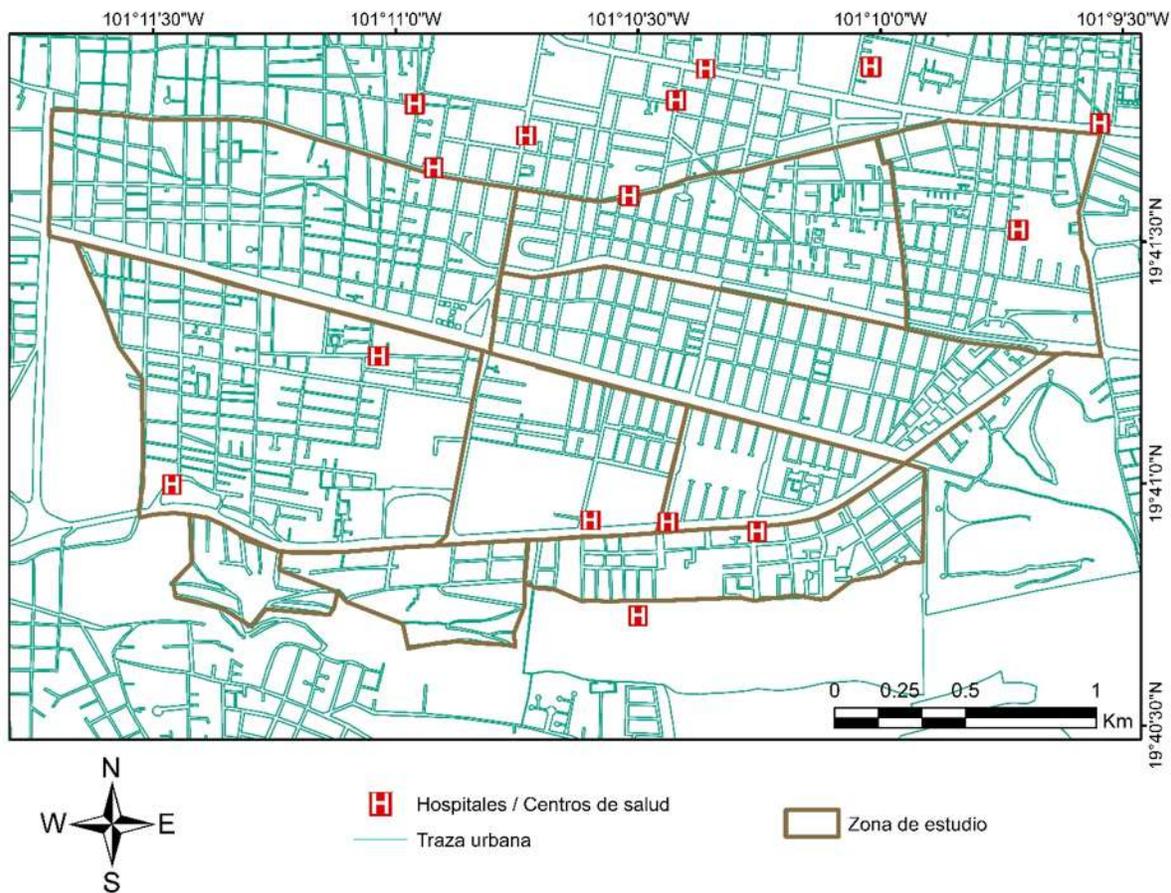


Figura 3.32. Centros de salud, consultorios y hospitales ubicados en la zona de estudio. Fuente: elaboración propia con datos del INEGI.

La zona de estudio es particularmente importante dentro del sector salud, puesto que dentro de ella y muy cercana a ella se encuentran registradas a la fecha de elaboración de esta investigación 9 centros de salud. Para considerarse como centro de salud, se tomaron en cuenta unidades que contaran con consultorios médicos independientemente de que fueran farmacias, consultorios particulares u hospitales. También el INEGI considera en sus datos los centros que sean privados y públicos, así como su nivel de atención respecto a la edificación en la que se encuentren y considera el Sistema Nacional para el Desarrollo Integral de la Familia (DIF) como parte de los centros de salud sin contar con consultorios o camas pero considerando que se trata de un establecimiento gubernamental que también apoya a las familias con asistencia social.



Tabla 3.11. Información de las unidades médicas ubicadas en la zona de estudio.

Nombre de institución	Clave	Nombre de la unidad	Consultorios	Camas	Nivel de atención	Longitud	Latitud
Sistema Nacional para el Desarrollo Integral de la Familia	DIF	DIF Morelia	0	0	No Aplica	-101.175	19.679
Instituto Mexicano del Seguro Social	IMSS	IMSS Unidad 075	14	74	Segundo Nivel	-101.177	19.682
Servicios Médicos Privados	SMP	Hospital Star Médica	2	32	Segundo Nivel	-101.191	19.683
Servicios Médicos Privados	SMP	CL	2	18	Segundo Nivel	-101.175	19.693
Servicios Médicos Privados	SMP	Centro Médico Valladolid, S.A de C.V.	1	6	Segundo Nivel	-101.162	19.692
Servicios Médicos Privados	SMP	Hospital Memorial, S.A de C.V.	2	19	Segundo Nivel	-101.174	19.682
Servicios Médicos Privados	SMP	Grupo Médico Latino de Morelia S.A de C.V.	1	12	Segundo Nivel	-101.184	19.688
Servicios Médicos Privados	SMP	Farmacias Benavides	1	0	Primer Nivel	-101.184	19.688
Servicios Médicos Privados	SMP	Unidad Médica Benavides (UMEB)	1	0	Primer Nivel	-101.182	19.694

En la *Tabla 3.11* se presenta la información que corresponde a cada una de las 9 unidades médicas que se encuentran en la zona de estudio, así como su cantidad de camas y consultorios, su nivel de atención (si se trata de un edificio que no es exclusivamente para fines hospitalarios).

En la *Figura 3.33* se muestran en sectores de la zona de estudio realizados en base al porcentaje de derechohabientes a un seguro médico (ya sea particular o privado). En términos generales, las colonias Félix Ireta, Electricistas, Nueva Jacarandas, La Loma, Bosque Camelinas, Camelinas, Chapultepec Sur y Nueva Chapultepec muestran que la mayoría de los habitantes cuentan con seguro médico, mientras que en las colonias Ventura Puente y Chapultepec Oriente es aproximadamente la mitad.



Figura 3.33. Porcentaje de derechohabientes a un seguro médico. Fuente: elaboración propia con datos del INEGI.



3.2.9.5. Infraestructura característica

Parte del estudio integrador que involucra la realización de un análisis forense cuando se presenta un desastre de orden hidrometeorológico es la consideración de los daños que pueden ser ocasionados por una inundación o los daños que ya hayan sido causados. Parte del estudio integrador incluye las pérdidas de bienes provocadas por la avenida, por lo que es imperioso identificar la infraestructura y el comercio que se encuentre dentro de la zona que se vio afectada por el acontecimiento de esta índole provocado por el huracán Willa y que permita conocer lo que se puede perder en caso de que se llegue a presentar un evento de mayor intensidad.

Teatros, monumentos y oficinas gubernamentales

La zona sur-oriente de la ciudad, al ser una región importante de la mancha urbana donde se concentra gran parte del comercio importante de la misma, también presenta infraestructura de orden público que incluye la existencia de centros de convenciones, monumentos, teatros y oficinas gubernamentales de diversa índole. En la *Figura 3.34* se muestran los espacios registrados de esta categoría, teniendo 93 oficinas de gobierno (estatal o municipal), dos museos/monumentos y un teatro, siendo estos dos últimos localizados en el Centro de Convenciones de la ciudad. En la *Tabla 3.12* y se presentan los museos y teatros regionales.

Tabla 3.12. Información de los museos, monumentos y teatros que se localizan en la zona de estudio.

Nombre	Ubicación	Colonia	Categoría	Latitud	Longitud
Orquidario de Morelia	Centro de Convenciones y Exposiciones de Morelia	Félix Ireta	Museo	19.685117	-101.181
Planetario de Morelia Licenciado Felipe Rivera	Centro de Convenciones y Exposiciones de Morelia	Félix Ireta	Museo	19.684781	-101.183
Teatro José María Morelos	Centro de Convenciones y Exposiciones de Morelia	Félix Ireta	Teatro	19.6823	-101.181

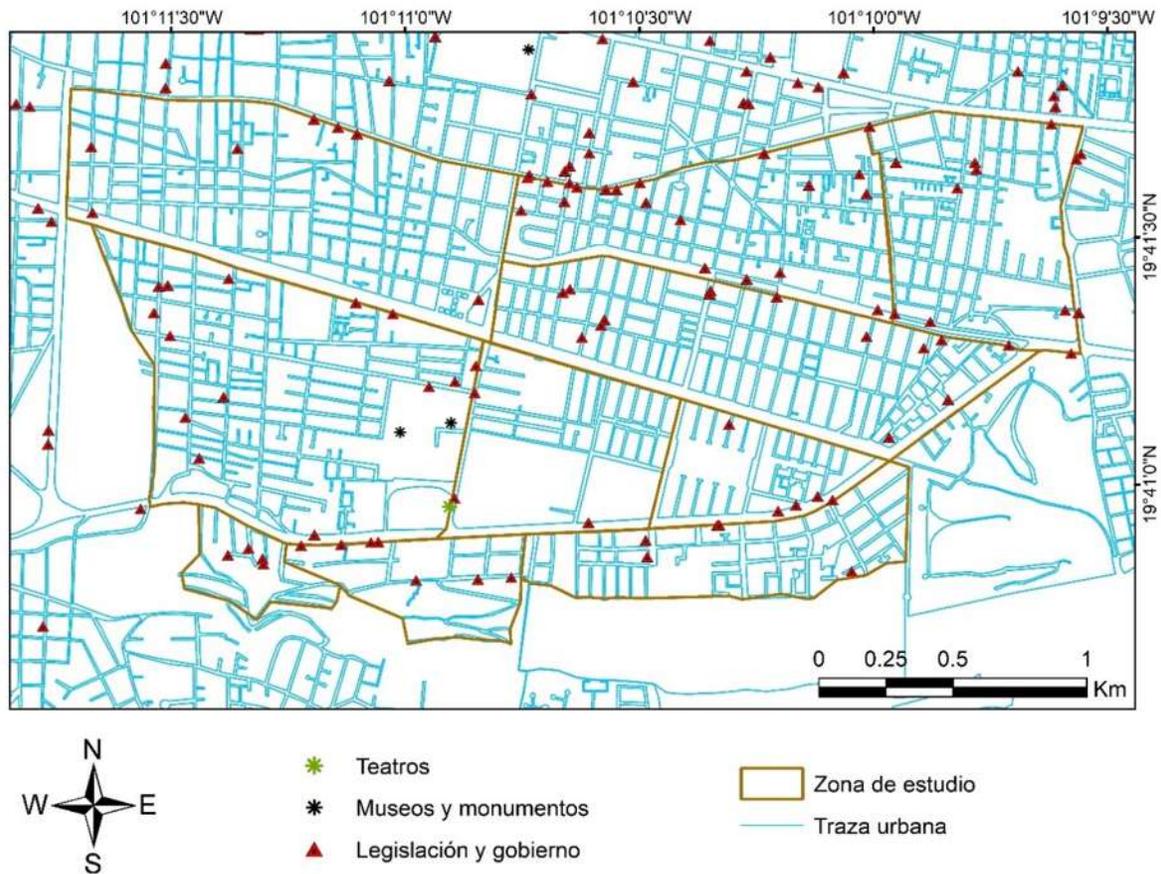


Figura 3.34. Ubicación de museos, monumentos, teatros y oficinas legislativas y de gobierno. Fuente: elaboración propia con datos del INEGI y de IDEA (Infraestructura de Espacios Abiertos).

En cuanto a las oficinas gubernamentales se tienen en la región, entre otras, el Tribunal Electoral del Estado de Michoacán, el Instituto Municipal de Planeación de Morelia (IMPLAN), la Oficina Alternativa del Congreso del Estado, la Junta Local de Conciliación y Arbitraje del estado de Michoacán, la Secretaría del Bienestar, la Secretaría del Desarrollo Social y Humano y la Dirección de Catastro. Las instituciones gubernamentales se encuentran regidas por las siguientes razones sociales:

- Gobierno del Estado
- Gobierno Federal
- Instituto Nacional Electoral
- Secretaría de Educación Pública
- Suprema Corte de Justicia de la Nación
- Instituto Mexicano del Seguro Social
- Secretaría de Relaciones Exteriores
- Dirección del Empleo de Gobierno del Estado
- Procuraduría Agraria
- Instituto de la Juventud Michoacana
- Tesorería Municipal de Morelia
- Instituto Nacional de Migración

Bancos, aseguradoras y servicios de transporte y correos

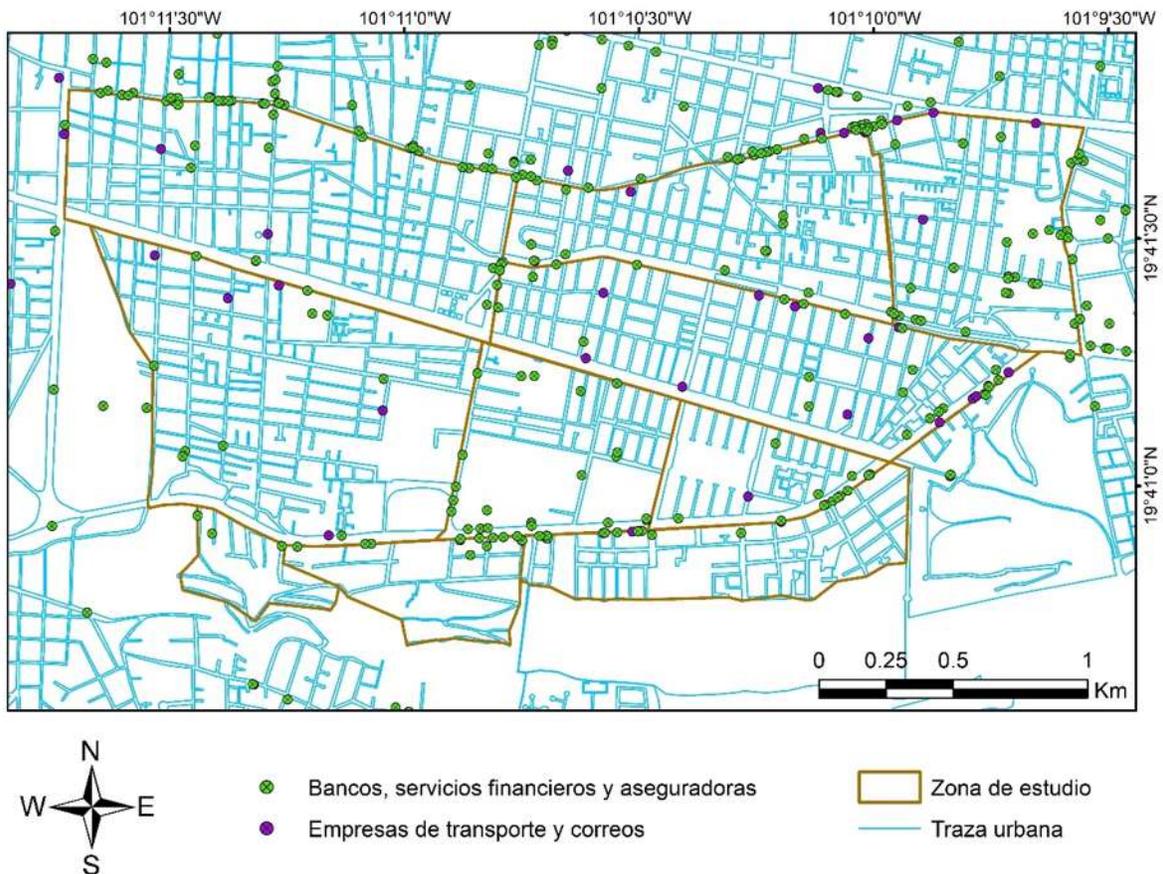


Figura 3.35. Ubicación de financieras y empresas de transporte. Fuente: elaboración propia con datos del INEGI.



Dentro de la infraestructura característica con la que cuenta la región sur-oriente de la mancha urbana, también se encuentra una amplia cantidad de establecimientos de carácter financiero y de servicios de transporte de paquetes y correos. La mayoría de las financieras que se localizan en la región son bancos importantes en el país que cuentan con varias sucursales en los centros comerciales y avenidas más importantes, seguido de empresas que se encargan de otorgar créditos y otras más que son dedicadas al aseguramiento de bienes inmuebles. En segunda instancia quedan constituidas las empresas dedicadas al envío de productos que operan internacional y nacionalmente, al ser una zona muy concurrida y con una amplia cantidad de comercios (Apartado 3.2.9.4), la presencia de proveedores de servicios de envíos es indispensable para la región. Hasta el censo del año 2016, se registra las siguientes unidades:

Tabla 3.13. Cantidad de unidades económicas correspondientes a las instituciones financieras y a las empresas de envíos en la zona de estudio

Servicio	Cantidad
Instituciones financieras	
Cajeros automáticos	40
Sucursal bancaria	39
Casa de cambio	4
Aseguradora	78
TOTAL	161
Empresas de envíos	
Servicios de paquetería y correos	28
TOTAL	28

3.2.9.6. Comercio

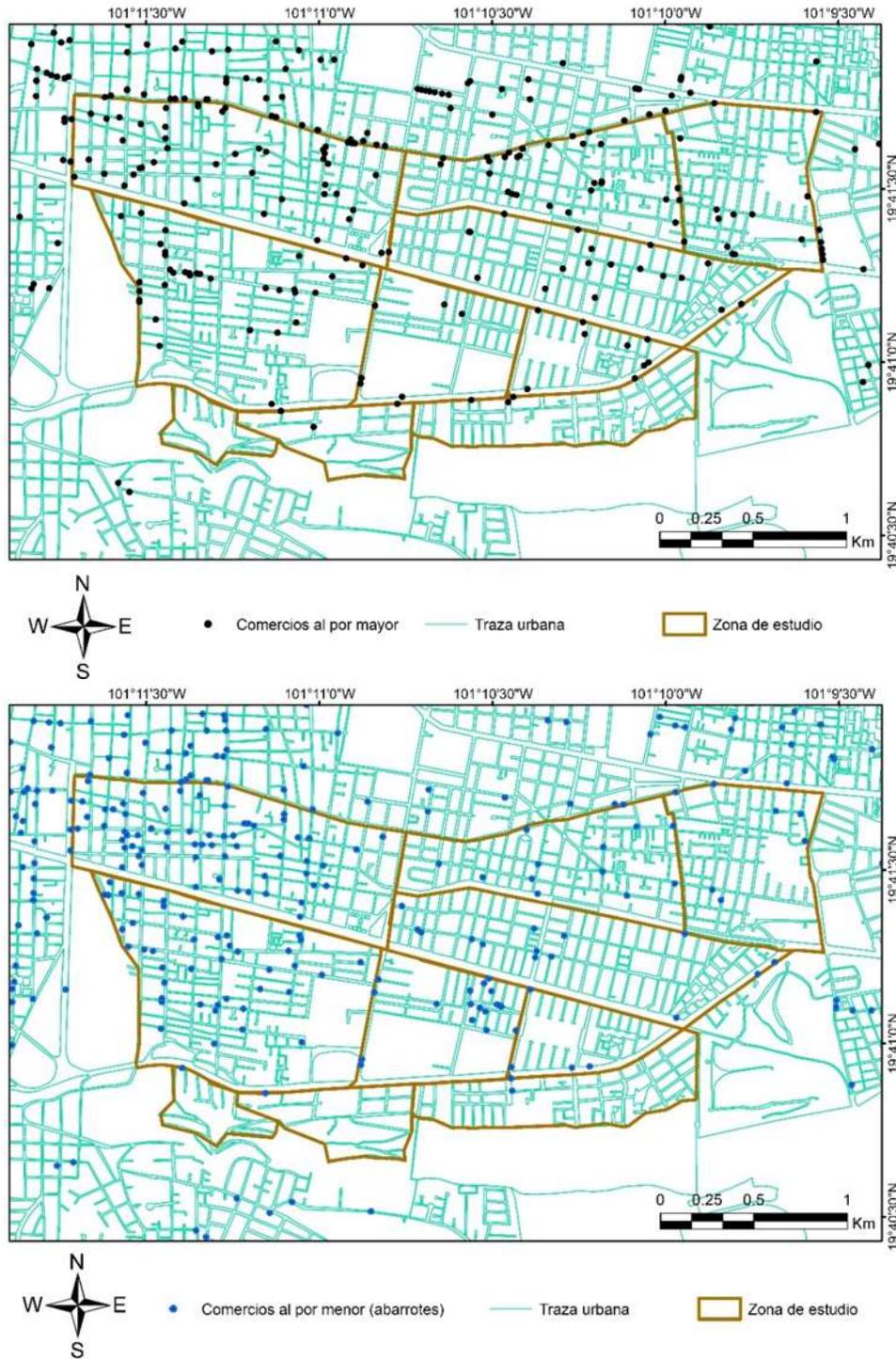


Figura 3.36. Ubicación de comercios al por mayor y al por menor en la zona de estudio.
Fuente: elaboración propia con datos del INEGI.

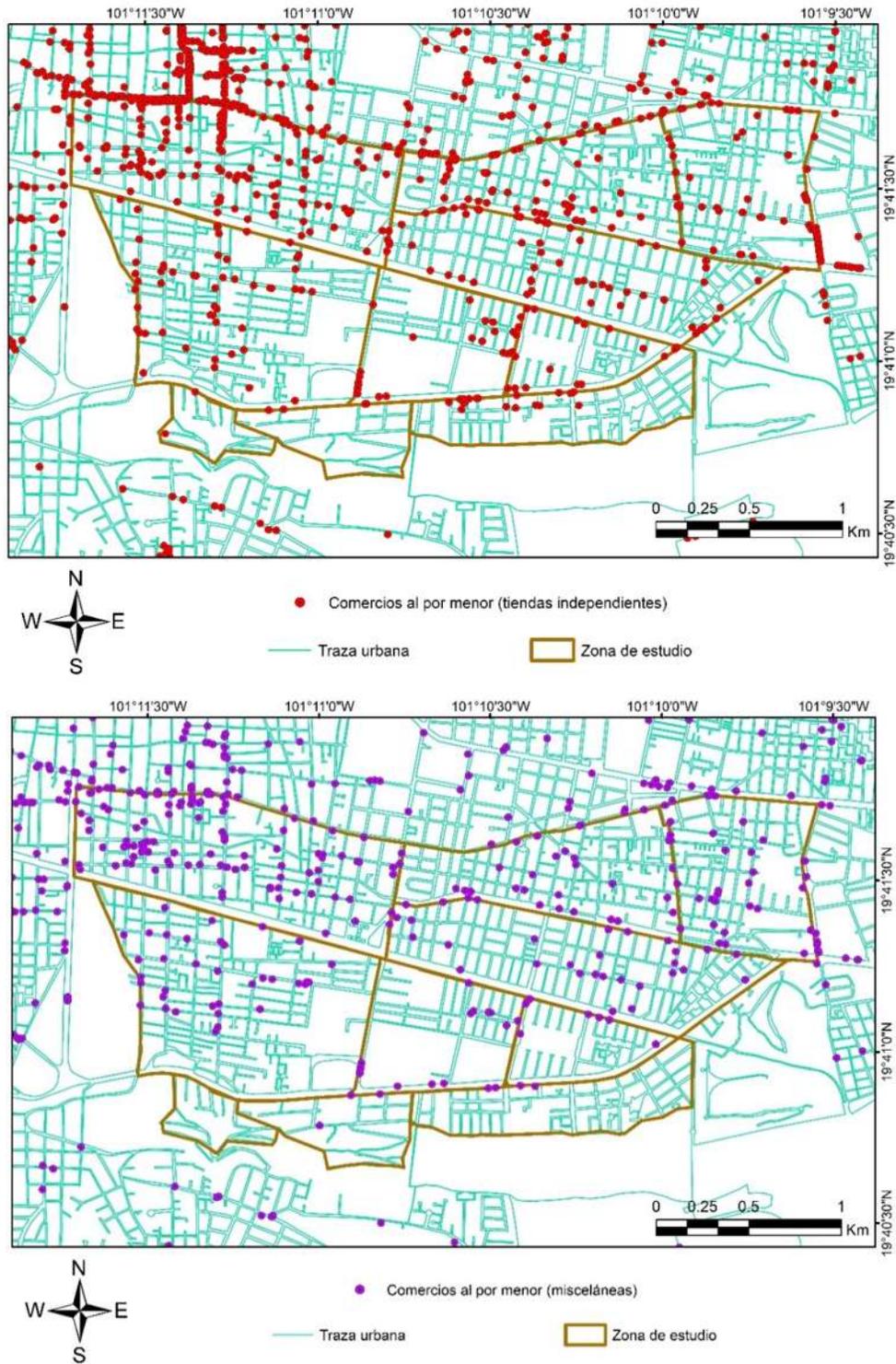


Figura 3.37. Ubicación de comercios al por mayor y al por menor en la zona de estudio.
Fuente: elaboración propia con datos del INEGI.



Tabla 3.14. Comercios en general apreciados en la zona de estudio y la cantidad de personas ocupadas en cada uno.

Tipo de comercio	Personas ocupadas	Tipo de comercio	Personas ocupadas
Comercio al por mayor de artículos y accesorios para diseño y pintura	0 a 30 personas	Comercio al por menor de artículos ortopédicos	0 a 5 personas
Comercio al por mayor de artículos y aparatos deportivos	0 a 5 personas	Comercio al por menor de artículos de mercería	0 a 5 personas
Comercio al por mayor de artículos de perfumería y cosméticos	0 a 5 personas	Comercio al por menor de artículos y aparatos deportivos	0 a 5 personas
Comercio al por mayor de calzado	0 a 5 personas	Comercio al por menor de bebidas no alcohólicas y hielo	0 a 5 personas
Comercio al por mayor de carnes rojas	6 a 10 personas	Comercio al por menor de bicicletas	0 a 5 personas
Comercio al por mayor de cemento, tabique y grava	0 a 50 personas	Comercio al por menor de bisutería y accesorios de vestir	0 a 5 personas
Comercio al por mayor de cerveza	0 a 5 personas	Comercio al por menor de blancos	0 a 5 personas
Comercio al por mayor de cigarros, puros y tabaco	31 a 50 personas	Comercio al por menor de calzado	0 a 5 personas
Comercio al por mayor de combustibles de uso industrial	0 a 5 personas	Comercio al por menor de carne de aves	0 a 5 personas
Comercio al por mayor de desechos de plástico	0 a 5 personas	Comercio al por menor de carnes rojas	0 a 10 personas
Comercio al por mayor de dulces y materias primas para repostería	11 a 30 personas	Comercio al por menor de cerveza	0 a 5 personas
Comercio al por mayor de envases en general	0 a 5 personas	Comercio al por menor de cigarros, puros y tabaco	0 a 5 personas



Tabla 3.14b. Comercios en general apreciados en la zona de estudio y la cantidad de personas ocupadas en cada uno.

Tipo de comercio	Personas ocupadas	Tipo de comercio	Personas ocupadas
Comercio al por mayor de equipo de telecomunicaciones, fotografía y cinematografía	6 a 10 personas	Comercio al por menor de discos y cassettes	0 a 5 personas
Comercio al por mayor de equipo y material eléctrico	6 a 10 personas	Comercio al por menor de disfraces, vestimenta regional y vestidos de novia	0 a 5 personas
Comercio al por mayor de fertilizantes, plaguicidas y semillas para siembra	0 a 5 personas	Comercio al por menor de dulces y materias primas para repostería	0 a 5 personas
Comercio al por mayor de fibras, hilos y telas	0 a 5 personas	Comercio al por menor de equipo y material fotográfico	0 a 5 personas
Comercio al por mayor de frutas y verduras frescas	0 a 5 personas	Comercio al por menor de frutas y verduras frescas	0 a 5 personas
Comercio al por mayor de juguetes y bicicletas	0 a 5 personas	Comercio al por menor de instrumentos musicales	0 a 5 personas
Comercio al por mayor de libros	0 a 5 personas	Comercio al por menor de juguetes	0 a 5 personas
Comercio al por mayor de madera para la construcción e industria	0 a 5 personas	Comercio al por menor de leche, otros productos lácteos y embutidos	0 a 5 personas
Comercio al por mayor de maquinaria y equipo agropecuario, forestal y para la pesca	0 a 5 personas	Comercio al por menor de lencería	0 a 5 personas
Comercio al por mayor de materiales metálicos	11 a 30 personas	Comercio al por menor de lentes	0 a 10 personas



Tabla 3.14c. Comercios en general apreciados en la zona de estudio y la cantidad de personas ocupadas en cada uno.

Tipo de comercio	Personas ocupadas	Tipo de comercio	Personas ocupadas
Comercio al por mayor de medicamentos veterinarios y alimentos para animales	0 a 5 personas	Comercio al por menor de otros alimentos	0 a 5 personas
Comercio al por mayor de mobiliario y equipo de oficina	0 a 5 personas	Comercio al por menor de paletas de hielo y helados	0 a 5 personas
Comercio al por mayor de mobiliario, equipo e instrumental médico	11 a 30 personas	Comercio al por menor de desechables	0 a 5 personas
Comercio al por mayor de otra maquinaria y equipo de uso general	6 a 10 personas	Comercio al por menor de productos naturistas y complementos alimenticios	0 a 5 personas
Comercio al por mayor de otras materias primas para otras industrias	0 a 5 personas	Comercio al por menor de revistas y periódicos	0 a 5 personas
Comercio al por mayor de otros alimentos	0 a 5 personas	Comercio al por menor de ropa de bebé	0 a 5 personas
Comercio al por mayor de otros materiales para la construcción, excepto madera y metálicos	0 a 5 personas	Comercio al por menor de ropa de cuero y piel	0 a 5 personas
Comercio al por mayor de partes y refacciones para vehículos	0 a 5 personas	Comercio al por menor de ropa, excepto de bebé y lencería	0 a 30 personas
Comercio al por mayor de pescados y mariscos	6 a 10 personas	Comercio al por menor de semillas y granos alimenticios, especias y chiles secos	0 a 5 personas
Comercio al por mayor de pintura	0 a 5 personas	Comercio al por menor de sombreros	0 a 5 personas



Tabla 3.14d. Comercios en general apreciados en la zona de estudio y la cantidad de personas ocupadas en cada uno.

Tipo de comercio	Personas ocupadas	Tipo de comercio	Personas ocupadas
Comercio al por mayor de productos farmacéuticos	0 a 5 personas	Comercio al por menor de telas	0 a 5 personas
Comercio al por mayor de productos químicos para la industria	0 a 5 personas	Comercio al por menor de vinos y licores	0 a 5 personas
Comercio al por mayor de ropa, bisutería y accesorios de vestir	0 a 5 personas	Comercio al por menor en mini súper	0 a 5 personas
Comercio al por mayor de vidrios y espejos	0 a 5 personas	Comercio al por menor en supermercados	101 a 250 personas
Comercio al por menor de artículos de joyería y relojes	0 a 5 personas	Comercio al por menor en tiendas de abarrotes, ultramarinos y misceláneas	0 a 10 personas
Comercio al por menor de artículos de perfumería y cosméticos	0 a 5 personas	Comercio al por menor en tiendas departamentales	51 a 100 personas
Comercio al por menor de artículos de papelería	0 a 5 personas	Farmacias con minisúper	0 a 15 personas

El comercio es indispensable para que una comunidad pueda generar ingresos en su medio socioeconómico y permita mejorar las condiciones financieras del territorio. Para la microcuenca del Río Chiquito, el IMPLAN (2015) reconoce que hay más de 18,000 unidades económicas y aproximadamente 690 sectores económicos, siendo la mayoría de los mismos establecimientos de microempresas o pequeños locales que típicamente llegan a emplear entre 1 y 5 personas, representando aproximadamente el 86% de las unidades económicas. Anualmente, se ha observado un aumento en el tamaño y en el número de personas que ocupa dichas unidades económicas, establecido originalmente por el Instituto Mexicano para la Competitividad (IMCO, 2014).

La zona correspondiente a Electricistas, Camelinas, Félix Ireta, Nueva Chapultepec, Chapultepec Sur y Chapultepec Oriente presentan una gran afluencia de personas por la alta



presencia de comercios que se encuentran en la región, pues a partir de los resultados extraídos del censo realizado por el INEGI en el año 2010, se estima que se cuentan con la siguiente cantidad de comercios (Figuras 3.36 y 3.37):

Tabla 3.15. Cantidad de comercios por unidad económica en la zona de estudio.

Tipo de unidad económica	Cantidad registrada al 2016
Comercio al por mayor	161
Comercio al por menor (abarrotes)	164
Comercio al por menor (tiendas independientes)	682
Comercio al por menor (misceláneas)	298
Unidades económicas totales	1,305

En lo referente a las tiendas independientes, significa que son tiendas como boutiques, y ventas de sombreros, pintura, instrumentos musicales, equipo y oficina y demás microempresas que funcionan de forma independientes y no forman parte de franquicias que funcionen de forma municipal, estatal, nacional o internacional. En cuanto a las misceláneas, se incluyen los mini súper, vinos y licores, lácteos, semillas y demás unidades que por lo regular se dedican a la venta de alimentos y demás productos de consumo humano.

La cantidad de unidades económicas registradas es muy grande, por lo que en la *Tabla 3.15* sintetiza los comercios existentes en la zona y la cantidad de personas que se encuentran ocupadas en los mismos en promedio.



3.2.9.7. Programas de desarrollo

La revisión de los programas de desarrollo de carácter sectorial, municipal, estatal y nacional permite identificar si la zona de estudio cuenta con planes de acción que se realicen previamente, durante y después de la inundación. Gran parte de la información presente en los mismos enfatiza cuáles son las zonas más susceptibles a presentar inundaciones ya sea por eventos hidrometeorológicos de gran importancia, un mal funcionamiento del sistema de alcantarillado de la región cuando se presentan lluvias de corta intensidad, incumplimientos en los códigos de desarrollo y que se construya en zonas que tienen mayor probabilidad de presentar la problemática o inclusive una combinación de todas.

De forma general, se identificaron cinco elementos principales de amplia relevancia que incluyen la información enfatizada sobre inundaciones, sus causas y planes de acción. En orden de aplicabilidad: El Atlas Nacional de Riesgos, la Ley General de Protección Civil, el Programa Sectorial de Medio Ambiente del Estado de Michoacán de Ocampo, el Plan Municipal de Desarrollo de Morelia y Programa Parcial de Desarrollo Urbano de la Zona Sur de Morelia.

Atlas Nacional de Riesgos (ANR)

El riesgo de desastres, entendido como la probabilidad de pérdida, depende de dos factores fundamentales que son el peligro y la vulnerabilidad. Comprender y cuantificar los peligros, evaluar la vulnerabilidad y con ello establecer los niveles de riesgo, es sin duda el paso decisivo para establecer procedimientos y medidas eficaces de mitigación para reducir sus efectos. Es por ello prioritario desarrollar herramientas y procedimientos para diagnosticar los niveles de peligro y de riesgo que tiene nuestro país a través de sistemas organizados de información como se plantea en la integración del Atlas Nacional de Riesgos, ANR, basado éste en los atlas estatales y municipales (CENAPRED, 2006).

Como parte del trabajo emprendido bajo el proyecto del Atlas Nacional de Riesgos, el CENAPRED se ha concentrado en la tarea de conjuntar la información y las experiencias



generadas a través de la investigación y la colaboración con diferentes instituciones del ámbito académico, gubernamental y de la sociedad civil, para elaborar una serie de publicaciones y material de difusión, que permitan, en primera instancia a las unidades estatales de protección civil, y también a instituciones interesadas en la prevención y mitigación del riesgo, contar con guías metodológicas cuyo objetivo es el establecer procedimientos que, de manera práctica y directa, ayude a sintetizar y generar información con una terminología y base conceptual homogéneas orientadas al conocimiento del riesgo, la cual será integrada en un documento o sistema denominado genéricamente “Atlas de Riesgos”(CENAPRED, 2006).

En lo referente a la importancia que tiene la implementación del ANR en el país, la Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos del año 2006, se establece que el estudio de los peligros, al igual que la vulnerabilidad y el riesgo, se ha colocado como tema de interés en ámbitos académicos, un referente en los análisis de desarrollo urbano y una necesidad de las autoridades en los tres niveles de gobierno. Sin embargo, existe una diversidad en las metodologías que se utilizan en México, lo que llega a ocasionar que, en ocasiones los resultados no sean útiles para quien más lo requiere: la población en general.

En el ANR, se incluyen los lineamientos generales que se identifican dentro del mismo contenido, así como los aspectos generales geográficos y tecnológicos que permitan la selección de la información en función del tipo de desastre que se requiera consultar y si consiste en desastres de orden hidrometeorológico o referentes a los provocados por terremotos. Dentro de la parte característica, la CENAPRED (2006), dentro de la guía elaborada, contiene la metodología a abarcar por parte de los estados y los municipios para que los mismos puedan crear su propio atlas estatal o municipal y, de esta forma, se pueda tener acceso directo hacia una comunidad en específico y poder entonces establecer las características y el mismo riesgo que tiene en ser susceptible a sufrir los peligros previamente mencionados.



En el municipio de Morelia, actualmente no cuenta con un atlas de riesgos y peligros actualizado, sin embargo, el Programa Parcial de Desarrollo Urbano de la Zona Sur de Morelia (IMPLAN, 2015), expresa que, con relación a las inundaciones, el Atlas de Riesgo de Morelia muestra que existen zonas potencialmente inundables en las colonias Ocolusen, Terrazas del Campestre, Club Campestre, 5 de Diciembre, y sobre el periférico Nueva España que pueden afectar al IMSS y parte de las colonias La Loma y Bosque Camelinas. También se indican zonas con potencial de inundación en Residencial Fuentes de Morelia. Para la zona poniente de la ciudad, no se cuenta con un Programa Parcial de Desarrollo.

Ley General de Protección Civil (LGPC)

La LGPC (DOF, 2020) establece principalmente lo que la misma ley entiende por desastre hidrometeorológico para daptarse a las definiciones de las organizaciones internacionales mencionadas en el *Capítulo II*, así como el plan de acción a seguir por las autoridades que se encarguen de salvaguardar la integridad de la comunidad. De la LGPC, se presentan los siguientes artículos:

Artículo 2. Para los efectos de esta Ley se entiende por:

XXIV. Fenómeno Hidrometeorológico: Agente perturbador que se genera por la acción de los agentes atmosféricos, tales como: ciclones tropicales, lluvias extremas, inundaciones pluviales, fluviales, costeras y lacustres; tormentas de nieve, granizo, polvo y electricidad; heladas; sequías; ondas cálidas y gélidas; y tornados.

Artículo 5. Las autoridades de protección civil, enumeradas en el artículo 27 de esta Ley, deberán actuar con base en los siguientes principios:

- I.** Prioridad en la protección a la vida, la salud y la integridad de las personas;
- II.** Inmediatez, equidad, profesionalismo, eficacia y eficiencia en la prestación del auxilio y entrega de recursos a la población en caso de emergencia o desastre;



- III. Subsidiariedad, complementariedad, transversalidad y proporcionalidad en las funciones asignadas a las diversas instancias del gobierno;
- IV. Publicidad y participación social en todas las fases de la protección civil, pero particularmente en la de prevención;
- V. Establecimiento y desarrollo de una cultura de la protección civil, con énfasis en la prevención en la población en general;
- VI. Legalidad, control, eficacia, racionalidad, equidad, transparencia y rendición de cuentas en la administración de los recursos públicos;
- VII. Corresponsabilidad entre sociedad y gobierno, y
- VIII. Honradez y de respeto a los derechos humanos.

Artículo 10. La Gestión Integral de Riesgos considera, entre otras, las siguientes fases anticipadas a la ocurrencia de un agente perturbador:

- I. Conocimiento del origen y naturaleza de los riesgos, además de los procesos de construcción social de los mismos;
- II. Identificación de peligros, vulnerabilidades y riesgos, así como sus escenarios;
- III. Análisis y evaluación de los posibles efectos;
- IV. Revisión de controles para la mitigación del impacto;
- V. Acciones y mecanismos para la prevención y mitigación de riesgos;
- VI. Desarrollo de una mayor comprensión y concientización de los riesgos, y
- VII. Fortalecimiento de la resiliencia de la sociedad.

Artículo 21. En una situación de emergencia, el auxilio a la población debe constituirse en una función prioritaria de la protección civil, por lo que las instancias de coordinación deberán actuar en forma conjunta y ordenada, en los términos de esta Ley y de las demás disposiciones aplicables. También se hará del conocimiento de la Secretaría de la Defensa



Nacional y la Secretaría de Marina para que se implemente el Plan de Auxilio a la Población Civil en caso de desastres y el Plan General de Auxilio a la Población Civil, respectivamente.

Programa Sectorial de Medio Ambiente del Estado de Michoacán de Ocampo (PSMAEMO)

El PSMAEMO (PSMA, 2015) es un instrumento de planeación que establece las acciones necesarias para implementar la política ambiental establecida en el Plan de Desarrollo Integral del Estado de Michoacán 2015 – 2021 (PLADIEM). En el programa se manifiestan las 9 Prioridades Transversales, los 3 Ejes de Gobernanza, sus Objetivos, Líneas Estratégicas, Acción, su Corresponsabilidad Programática y Proyectos Prioritarios, que derivan de la Prioridad Transversal, Sustentabilidad Ambiental, Resiliencia y Prosperidad Urbana y las Prioridades Transversales de las instituciones con las que se guiará el quehacer de las dependencias y entidades del sector y de otras que inciden con sus programas, así como los Ayuntamientos y ciudadanos que participan activamente.

En dicho programa, se hace mención de que los eventos meteorológicos adversos Los eventos meteorológicos adversos en los últimos años se han visto incrementados en frecuencia y magnitud por el innegable fenómeno de cambio climático global, que cada vez produce mayores impactos en el hombre, el ambiente y los recursos hídricos. En Michoacán se han presentado sequías, granizadas y heladas, huracanes e inundaciones, provocando afectaciones en la población y la economía, en mayor o menor grado.

Finalmente, dentro de las Acciones de Mitigación y adaptación a los efectos del cambio climático y fomento al Uso de las Energías Renovables y Limpias, el PSMAEMO hace un énfasis tangible de la importancia que tiene el cambio climático y su impacto en la percepción de la población en la actualidad, pues ahora se presentan lluvias más intensas y en mayor número, además de presentar variantes en su duración, aumento en el nivel del mar, derretimiento de los casquetes polares, asimismo con los diferentes eventos climatológicos: granizadas, heladas, ciclones, inundaciones, deslizamientos, sequías, etc. Los efectos del cambio climático tendrán consecuencias graves en el mediano y largo plazo.



Plan Municipal de Desarrollo de Morelia (PMDM)

El último PMDM vigente y aprobado cuenta con fecha del año 2020 y fue desarrollado por el IMPLAN, la Secretaría de Desarrollo Acuario, Territorial y Urbano (SEDATU) y el Gobierno Municipal; no obstante, el mismo no cuenta con información referente a riesgos de carácter hidrometeorológico, por lo que también se cuenta con el PMDM del año 2018 que al 2021 mantiene su vigencia y cuenta con tres ejes: bienestar social, prosperidad económica y sustentabilidad ambiental. Relativo al eje de sustentabilidad ambiental, el PMDM instauro su información respecto al panorama que se tiene en el municipio ante el contexto ambiental global, haciendo énfasis en el cambio climático.

Con lo anterior, el PMDM (2018), contextualiza que existe el consenso de que los humanos han ejercido presión sobre el ambiente hasta el punto en que han sobrepasado los límites tolerables de varios procesos necesarios para mantener el bienestar de la población. Esto es cierto para el caso del cambio climático (medido en concentración de dióxido de carbono en la atmósfera y en la cantidad de energía que recibe la superficie de la tierra), de pérdida de biodiversidad (número de especies extintas por año) y del ciclo del nitrógeno (cantidad de nitrógeno atmosférico removido para el uso del humano). Para el Municipio de Morelia CENAPRED registró entre los años 2000 y 2015 distintos fenómenos naturales que afectaron de alguna manera a la población. Los eventos que se presentaron fueron de tipo geológico, hidrometeorológico, químico y sanitario. En total fueron 28 eventos registrados, de los cuales los hidrometeorológicos se presentaron en mayor porcentaje. Los daños por este fenómeno se tuvieron principalmente en las viviendas y algunas muertes por fuertes lluvias y granizadas; en 2010 una lluvia torrencial afectó a la producción de maíz (226 productores). Cabe señalar que debido a las lluvias también se presentaron inundaciones, siendo las más destacadas en septiembre de 2005 donde se desbordaron el río Grande y el río Chiquito afectando 25 colonias y en agosto de 2010 nuevamente el río Chiquito se desbordó afectando 15 colonias. Estos eventos han resultado más recurrentes en los años recientes; en 2018 se presentaron dos inundaciones fuertes en la ciudad de Morelia (PMDM, 2018).



Por último, el PMDM (2018) también destaca que en la zona urbana consolidada de la ciudad de Morelia existen menos problemas de este tipo y menor porcentaje de viviendas desocupadas, sin embargo, existe un grupo de asentamientos irregulares ubicados en las laderas del cerro del Quinceo, así como la localidad de La Aldea que comparten características de precariedad como viviendas con piso de tierra y sin agua potable, entre otras desventajas. Estos espacios representan zonas críticas que requieren de atención inmediata, al ser también áreas que en los últimos años han experimentado una acelerada expansión y algunos de ellos en condiciones de peligro por procesos de deslizamientos, flujos de avenidas de agua o inundaciones.

Programa Parcial de Desarrollo Urbano de la Zona Sur de Morelia (PPDUZUM)

El PPDUZUM se establece originalmente por el IMPLAN para poder identificar mejor las características estipuladas originalmente por el PMDM y darle un enfoque a la zona sur de Morelia y se puedan conocer mejor las zonas protegidas de la región y las características geológicas, hidrológicas, edafológicas y socio-culturales del espacio. En dicho programa, se hace mención de la Loma de Santa María y lo que presentar en las inundaciones acaecidas históricamente en la zona de estudio, especialmente en la apreciada en 2018.

Como resultado de varios estudios ambientales, la Loma de Santa María se ha constituido como Zona de Restauración y Protección Ambiental (ZRPA), ya que entre otros atributos naturales, presta de servicios ambientales a la ciudad. La Loma representa una barrera física que limita la accesibilidad a las áreas urbanas del sur, debido a la pendiente topográfica y la falla geológica de La Paloma que la delimita, que se dispone longitudinalmente sobre la misma; estas características del relieve se presentan en otras partes de la zona de estudio, y disminuyen la aptitud para el desarrollo urbano. Si bien es complejo contar con estudios precisos de infiltración, es bien sabido que los procesos de urbanización la disminuyen y generan aumento en las escorrentías y susceptibilidad de inundaciones aguas abajo hacia la ciudad de Morelia (IMPLAN, 2015).



Es importante destacar que el PPDUZUM también presenta un apartado referente al drenaje pluvial de toda la zona sur del municipio de Morelia, misma que no únicamente se limita a la mancha urbana, sino que también tiene su influencia en las tenencias y comunidades que forman parte del municipio. El propósito fundamental del sistema de drenaje pluvial consiste en encausar adecuadamente las precipitaciones pluviales, para disminuir el riesgo de ocurrencia de inundaciones, que pueden afectar a la población tanto en sus bienes como en su persona; la forma más simple de hacerlo es evitando que los desarrollos habitacionales se asienten en zonas inundables y que los cauces y sus márgenes permanezcan libres de construcciones.

Actualmente, para la zona oriente no se cuenta con un programa parcial de desarrollo urbano.

3.3. Materiales

La información perteneciente a este apartado identifica las variables para poder llevar a cabo el análisis de la modelación de la inundación y el posterior análisis forense, estableciendo la información en base a elementos cualitativos y cuantitativos, dependiendo de la naturaleza del mismo y su propósito para la presente investigación. Se presentan únicamente los elementos indispensables a ingresar en IBER y que éste pueda realizar la modelación del flujo, por lo que las variables que se refieren al funcionamiento del programa se encuentran en el apartado de *Procedimiento*.

3.3.1. Sistemas de Información Geográfica

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG o GIS por sus siglas en inglés) permitieron la obtención de los mapas de información espacial indicada en el apartado perteneciente a la *Zona de estudio*, mismos que a su vez fungen para la correcta caracterización desde el ámbito hidrológico hasta el social de las colonias afectadas por la inundación. Para ello, el SIG empleado fue ArcGIS, mismo que fue adecuado



para poder objetivar toda la información extraída de los metadatos publicados oficialmente por las organizaciones del INEGI y del IMPLAN, con el propósito de indicar información prudente y conforme a las características establecidas por el proyecto. De forma general, las capas empleadas para llevar a cabo el manejo de la información en formato *shapefile* fueron las siguientes:

- Países del América
- República Mexicana
- Estado de Michoacán
- Municipio de Morelia
- Traza urbana
- Climatología
- Hidrología nacional y municipal
- Fisiografía
- Edafología
- Uso y tipo de suelo
- Demografía
- Elementos socioeconómicos

Por otra parte, bajo el uso del mismo SIG, se pudo identificar la información perteneciente a las variables climatológicas a emplear para su evaluación en la región afectada, así como el Modelo Digital de Elevaciones de la ciudad de Morelia.

En cuanto a la selección de la zona de estudio, se realizó en base al comportamiento de la capa de la traza urbana de la ciudad, delimitando las colonias conforme las manzanas que se presentan. De esta forma y sabiendo que dicho límite de las colonias estaba compuesto por el cruce entre calles, por lo que se realizó manualmente el proceso de delimitación.

3.3.2. Modelo Digital de Elevación

El Modelo Digital de Elevación (DEM, por sus siglas en inglés) muestra las alturas del terreno respecto al nivel del mar, lo que permite identificar adecuadamente las diferencias que existen en la topografía de una zona de estudio en particular y poder anticipar el posible comportamiento que se encuentre en base a la morfología local teniendo en cuenta la variable que se requiera analizar.

Para la implementación del MDE correspondiente a la región comprendida en esta investigación, el INEGI cuenta con una Biblioteca Digital de Mapas (www.inegi.org.mx/app/mapas) en donde cualquier información geográfica se encuentra de orden público a nivel nacional y se puede acceder a la base de datos estatal, municipal y regional que se requiera, por lo que el MDE puede ser tomado con la capa del país, la de Michoacán o inclusive las cartas topográficas (si la zona de estudio incluye más de una).

Para el desarrollo de este trabajo, se utilizó el MDE del estado de Michoacán porque la base de datos del INEGI indica que es de una creación más reciente a diferencia de las cartas topográficas, ofreciendo una mejor resolución en la información particular del sitio. No obstante, para poder ingresar la información del MDE al programa IBER, se consideró hacer un recorte de la microcuenca del Río Chiquito para emplear una región representativa para poder describir el comportamiento del flujo en toda la cuenca, ya que ejecutándolo a partir de la zona de estudio no permitirá apreciar el movimiento general del flujo en regiones aledañas a la zona de estudio, especialmente en lo correspondiente a la Loma de Santa María.

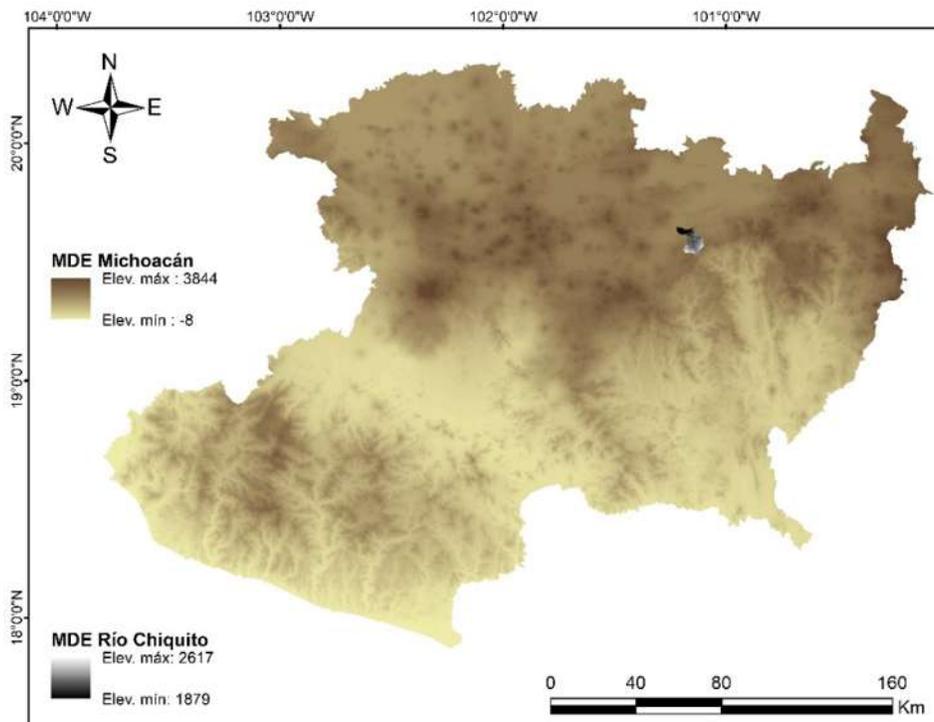


Figura 3.38. MDE de Michoacán.

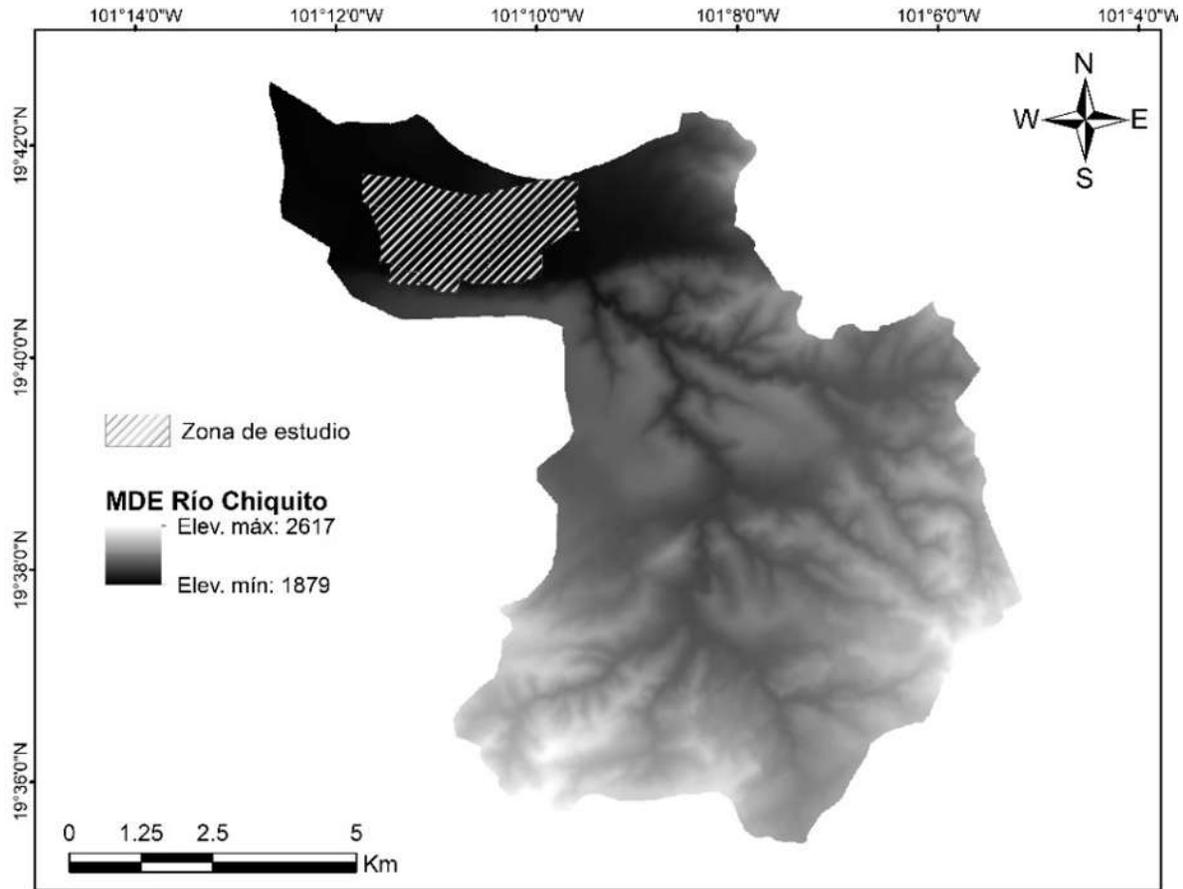


Figura 3.39. MDE de la microcuenca del Río Chiquito.

Para llevar a cabo un análisis más general del comportamiento del flujo en la región resultaría adecuado poder considerar un MDE de mayor resolución, no obstante, las limitaciones del equipo de software empleado para llevar a cabo la modelación impiden que se pueda considerar de esta forma, por ende, del MDE del estado de Michoacán se realizó un recorte conservando las mismas propiedades del original teniendo en cuenta las dimensiones de la microcuenca del Río Chiquito.



3.3.3. Información climatológica

La selección de estaciones climatológicas se utiliza para obtener una descripción de las variables climatológicas que inciden en la disposición y aprovechamiento de agua en la zona de estudio. La mayoría de las estaciones registran información pluvial, temperatura y evaporación; sin embargo, es común encontrar varias estaciones que solo registran una de estas variables. Los registros utilizados para la selección de las estaciones son los de precipitación, los cuales se utilizan posteriormente para cuantificar el volumen de lluvia de la cuenca (UNESCO, 2006).

De las Estaciones Meteorológicas Convencionales (EMC), se obtuvo la información correspondiente a las variables climatológicas que afectan directamente el análisis de la inundación: la temperatura y la precipitación. Lo más propio para poder obtener aún más variables referentes a la meteorología del lugar se pudo presentar si se manejaran Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMA), no obstante, en la ciudad de Morelia aún no se cuenta con una inversión e infraestructura que permita la implementación de EMA y por consiguiente no es posible conocer variables en escala temporal adecuada de la zona de estudio que permitan conocer más las características del huracán. Las estaciones gestionadas por el SMN y la CONAGUA son las indispensables para poder recoger la información histórica del clima de la zona cercana a la región en estudio.

Como se indicó en la *Figura 3.20* y la *Tabla 3.8*, en el municipio de Morelia se cuentan con 9 estaciones climatológicas gestionadas por estos organismos, de los cuales se permitió extraer la data histórica de la climatología y la precipitación de la estación 16081, misma que se encuentra dentro de la zona de estudio previamente establecida.

La CONAGUA en su registro de la información climatológica ([Normales Climatológicas por Estado \(conagua.gob.mx\)](#)) presenta el contenido que, para la estación climatológica escogida, las variables climatológicas que se evalúan tienen registro hasta el 31 de octubre de 2015, casi tres años antes de la fecha de estudio de este trabajo. Para considerar la información climatológica posterior a la disponible en la base de datos, se gestionó en la dirección estatal de la comisión el acceso a dicha información.



*Tabla 3.16. Variables climatológicas evaluadas por la estación climatológica 16081.
Fuente: CONAGUA.*

Clave	Elemento	Unidad
1	Temperatura ambiente 8 horas	°C
2	Temperatura mínima	°C
3	Temperatura máxima	°C
5	Precipitación 24 horas	mm
18	Evaporación 24 horas	mm
30	Días con tormenta	(0 no hay, 1 si hay)
31	Días con granizo	(0 no hay, 1 si hay)
32	Días con niebla	(0 no hay, 1 si hay)
35	Días con nieve	(0 no hay, 1 si hay)
43	Cobertura nubosa	(0 despejado, 1 medio nublado, 2 nublado)
91	Días con helada	(0 no hay, 1 si hay)

Con el significado de las claves utilizadas en la base de datos para el registro de la información climatológica, se identificaron los valores que se presentaron durante los días 21 y 22 de octubre de 2018, ya que fue en la madrugada del día 22 en donde se presentó la tormenta y se consideran el día anterior para identificar las condiciones previas al evento que provocaron que varias partes de la zona de estudio manifestaran encharcamientos e inundaciones. El resumen de dicha información se encuentra en la *Tabla 3.16*.

La estación 16081 no registra los días con nieve y los días con helada, por lo que no se encuentran disponibles esas variables. En lo respectivo a la precipitación, se identifica que el día 22 de octubre tiene un registro de 43.5 mm de precipitación, valor que resulta altamente superior al día anterior y al posterior. Es un dato importante, ya que desde que se tiene el registro de la estación 16081 muy pocas veces se ha llegado a presentar una acumulación importante durante el mes de octubre.



*Tabla 3.17. Registro de la información climatológica de la estación 16081.
Fuente: CONAGUA*

Clave	Valor registrado		
	Día 21	Día 22	Día 23
1	16	15	15.5
2	25	23	27
3	15	13	14.5
5	6.7	43.5	2.3
18	1.2	0.68	4.26
30	0	1	0
31	0	0	0
32	0	0	0
43	2	2	2

Para poder observar el comportamiento de la lluvia a través del tiempo, se realizó un análisis de datos de la información histórica de la precipitación para la estación. Sabiendo que el inicio del registro fue en el año 1947, en la *Tabla 3.18* se presenta la acumulación de la precipitación por mes y por año, teniendo los totales para cada mes.



Tabla 3.18. Información de precipitación histórica de la estación 16081. Fuente: CONAGUA.

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1947					33.6	118.4	72.2		127.4	63.7	24.6	92.9
1948	42.5	0	0	23.6	16.2	96.5	230.2	120.3	69.9	24.2	15.5	0.6
1949	0		0	0	65.9	110.8	130.4	110.6	87.8	38.6	0	0
1950	0	2	12.5	9.6	64.5	116.8	228.9	75.5	193.7	32.2	0	10.2
1951	0	0	0.5	12.5	65.7	142.8	161.5	88.6	148.1	66.3	24.2	0
1952	3.5	0	0	28.9	67.7	227.2	165.8	189.5	191.1	0	63.3	2.3
1953	2.1	8.4	11.7	0	4.6	139.9	206.2	155.1	90.6		51	20.2
1954	6	8.5	0	30.5	80.6	109.2	212.5	141.5	149.4	81.8	8.4	0
1955	3.7	0	0	0	13.7	87.3	169.4	227.5	178.2	105	20.9	0
1956	0	0	0	42.1	101.2	142.5	234.3	176.4	80.8	36.2	16.2	15.6
1957	0	4.3	0	0	26.5	130.4	126.1	149.6	62.8	44	0.8	1.4
1958	134.9	0.5	0	12.3	76.4	147.2	272.9	189.3	214.1	51.8	42.5	9.7
1959	9.8	8.8	144.4	144.4	85.7	108.5	232.2	214.8	82.4	79.8	0.2	3.6
1960	6.6	0	0	2.2	28	57.8	141.9	180.2	101.5	49.3	0	14
1961	15.7	1.3	2.2	0	34	157.3	136.9	77.3	78	29.8	22.1	2.3
1962	0	0	0.2	7.8	47.8	118.5	128.5	168.6	247.1	52.1	0	18.8
1963	0	1	14	0	53.4	190.1	181.5	182.6	131	63.5	4.7	16.8
1964	18.3	0	15.5	8.7	41.6	244.3	119.9	124.3	145.9	86.4	17.6	22
1965	9.5	45.3	0	5.5	47.8	171.6	192.4	258.6	130.1	56.9	7.8	0
1966	14.5	11.8	21.5	44.1	100.5	151.9	197	183.8	55.9	98.7	0	4.7
1967	90.7	0	28.4	28.5	45.7	173.1	157.2	139.6	240.3	109.5	11.2	3.7
1968	0	25.9	9	24.4	56.5	183.8	231.5	116.7	123.8	70.2	4	13.5
1969	2.5	0	0	6.2	6.2	81.2	188.2	173.3	226.5	34.9	1.5	4.4
1970	0	33.6	0	0	16.2	171.8	182.4	147	203.3	43.3	13.3	0
1971	4.3	3.5	23.6	5.1	61.5	221.9	198.4	167.1	156.4	91.4	0.8	2.6
1972	2.1	0.3	15	22.6	92.7	178	270.4	151.5	228.6	25.1	34.2	0
1973	0.5	0.2	0	14.8	46.7	122.9	223.4	117.1	181	160	0.5	3
1974	0	13.3	58.3	31.8	21.7	142.1	282.9	181.9	125.8	18.4	14.7	3.1
1975	23.8	0	0	0	37.1	141.5	142.5	188.7	169.1	30.1	0	0
1976	0	0.7	22.1	7	35	200	270.4	147.9	165.1	171.6	35.5	4.7
1977	19.6	8.8	0	13.1	80.8	80.8	150.5	142.6	159.6	38.5	16.2	3.1
1978	19.4	4.5	14.5	1.1	27.5	153.2	249.2	197.2	136	102.9	1.5	0
1979	0	29	0	0	9.1	97.7	184.7	94	126.5	0	1.4	38.4



Tabla 3.18b. Información de precipitación histórica de la estación 16081. Fuente: CONAGUA.

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1980	97	4.8	0	35.9		85.8	135.2	234.2	153.8	24.5	12.3	3.1
1981	63.8	18.1	1.2	15.9	52.5	178.5	108.2	154.3	48.1	32.8	10.5	16.7
1982	0	8	0.7	22.9	47	33.2	176.5	141	60.2	17.8	6.2	8.3
1983	22	2.8	16.7	0	57	85.6	291.6	188.7	85.8	39.4	20.1	2.1
1984	13.1	7.4	0.2	0	23.4	84.1	177.4	125.2	124.2	29.4	5.1	11.7
1985	0.4	2.1	15.5	13.5	46.9	147.5	195.9	138.4	70	49.4	12.5	8
1986	3.3	0.6	2	13.2	57.5	139	134.2	144.9	112	38.3	11.3	4.7
1987	0	1	4.9	35.6	11	84.9	162.7	183	53.2	0	28.6	0.9
1988	3.9	0.2	29	1.7	0	134	260.3	240.4	150.3	24.9	2	0
1989	14.2	0.3	0	0	13.4	71.8	60.7	177.7	155.9	37.6	6.9	19
1990	10.5	9.1	5.3	9.8	74.6	192.3	209	167	125.3	86.6	1.8	3.8
1991	10.2	3.2	0	0.3	52.9	111.4	281.8	163.4	222.5	65.7	4.6	2.5
1992	131	20	0.5	27.5	74.2	23	179.2	194.4	208.4	77.3	25.4	0.5
1993	6.4	7.5	4.7	19.3	0.8	257	241	222.4	112.7	52.7	7.5	0
1994	15.6	4.8	0	1.4	27.7	233.5	74.4	110.1	130.5	91.9	3.8	1.1
1995	4.6	22.3	5.2	12.9	87	94.2	146.9	205.2				
1996		0	2.6	3.1	45.3	111.6	108	99	118.1	21.4	4.4	0
1997	3.5	0	48.6	25.8	55.4	171.1	194.6	113.9	51.6	14.6	32	2.1
1998	0.2	0	0	0	0	187	142	236.4	287.9	131.6	3.3	0
1999	0	0	3.6	0.7	34.7	201.1	208.3	164.5	80.2	29.3	0	8.4
2000	0	8.5	0	0	69.5	185.1	68.8	76.2	32.7	49.7	13.1	15
2001		0.4	7.2	18.2	74.9	179.7	173.6	209.6	107.7	70.9	5.8	0
2002	17.2	32.8	16	12.8	92	284	158.9	136.9	193	52.4	51.8	5.3
2003	136.3	0	4	7.6	37.7	148.6	195.7	143.1	205.9	85.5	7	0
2004	19.2	0	15.4	15.8	58.7	177.7	185.8	192.5	188	56.6	0	4.5
2005	11.8	10.6	14.8	5	15.5	52.1	146.4	256.9	176.5	57.4	8.8	1
2006	29.4	0.2	5	5.4	85.1	30.5	185.9	181.2	159.5	103.6	2.8	0.3
2007	9.2	24.9	3.5	8.2	33.5	102.8	172.7	166.7	142.9	17.7	9.6	0.5
2008	0	2.5	0	33.8	10.2	97	156.3	174.4	80.1	29.7	0	0
2009	13.5	5	1	12.5	48.8	104.8	141.8	125.4	236.6	29.2	0	2.1
2010	64.3	151.8	0	1.5	33.3	125.9	294.7	267.6	92.9	0	0	0
2011	2	0	9.5	5	14.5	79.1	258.6	93.2	80.6	9.9	3.8	2.8
2012	0	45.7	15.7	0	18.8	95.3	92.9	176	71.1	27	65.6	1.1



Tabla 3.18c. Información de precipitación histórica de la estación 16081. Fuente: CONAGUA.

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
2013	7.4	0	9.8	1.4	53.7	98.7	141.6	155.6	166.8	40.5	31.6	20.3
2014	9.8	12.5	0	2	85.4	74.6	122.1	63.5	123.6	121.5	9.3	1.5
2015	0.1	10.8	114.2	6.4	114.6	94	137.4	65.4	51	36.5	1.7	19
2016	2.1	1.3	9.8	2.4	72	79.5	95.4	113.1	76.2	13	25.3	5
2017	16.2	0.2	42.3	5.3	30.7	196.4	156.9	113.1	96.6	33.3	0	0
2018	26.8	0.5	0	9.5	92.7	156.8	126.9	167	122.2	108.3	76.1	22
2019	14.1	2.8	0	0	37.8	138.6	117.5	78.8	61	56.15	30.8	5.3
2020	10.1	23.7	9.8	8.2	9.2	45	118.1	118	68.7	4.5	0	0.3
2021	0.2	0	2.7	0.4	13.4	90.3	120.8	121	115.5	44.6	19.2	5
2022	2	1.1	7.5	7.1								
Σ	1221.4	659.2	822.3	934.8	3455.4	9980.1	13129.1	11578	9807.6	3869.4	1015.2	515.5

Tras identificar los valores de la tabla, se observa que el mes de octubre es el quinto mes en el que más se ha acumulado precipitación a través del tiempo en la zona de estudio, con un total de 3869 mm obtenidos sin considerar los meses de los años 1953 y 1995, en los cuales la estación climatológica no registró la información correspondiente. Otra característica importante a destacar es que, si se analiza únicamente el registro del mes de octubre para todos los años, se identifica que para el mes de octubre de 2018 se contó con una precipitación de 108.3 mm, la cual es muy superior a la precipitación que se ha tenido en otros años y siendo apenas superado por los de los años 1967, 1973, 1976, 1998 y 2014.

Finalmente, por parte del análisis de datos correspondiente a la información climatológica de la estación 16081, se presenta en una escala diaria el registro de la precipitación de los años en los que más ha llovido desde que se cuenta con el registro, de modo que se pueda identificar la posición de la tormenta del 22 de octubre de 2018 desde un panorama general.



Tabla 3.19. Registro de la estación climatológica 16081 de días en los que ha llovido más de 43.5 mm

Mes	Día	Año	Precipitación (mm)	Mes	Día	Año	Precipitación (mm)
Junio	22	1964	85.30	Agosto	12	2001	48.00
Junio	8	1998	80.10	Agosto	2	1957	47.50
Julio	9	1974	75.40	Agosto	19	1960	47.30
Agosto	6	1998	66.30	Septiembre	19	1976	47.30
Septiembre	4	1988	66.00	Agosto	11	2006	46.50
Septiembre	23	1967	64.70	Septiembre	21	1991	46.40
Marzo	15	2015	63.70	Marzo	21	1959	46.10
Febrero	4	2010	63.50	Abril	21	1959	46.10
Septiembre	9	1973	60.20	Agosto	9	1975	46.10
Junio	15	1976	60.00	Julio	28	1974	46.00
Julio	31	1992	60.00	Septiembre	12	2002	46.00
Mayo	31	2002	59.00	Julio	2	2010	46.00
Junio	1	2002	59.00	Septiembre	30	2014	46.00
Junio	14	1999	57.50	Julio	3	1958	45.70
Septiembre	1	1969	56.50	Agosto	5	2008	45.20
Septiembre	5	1950	53.80	Junio	25	1993	44.70
Agosto	8	1989	53.00	Junio	25	1976	44.50
Octubre	11	2001	51.70	Julio	30	1988	44.50
Enero	24	1980	51.50	Julio	4	2014	44.30
Junio	26	2009	51.00	Julio	28	1950	43.80
Octubre	8	1976	50.50	Julio	28	1966	43.80
Junio	8	1993	50.30	Junio	20	1970	43.70
Septiembre	28	1991	50.20	Agosto	26	1980	43.70
Enero	18	1958	50.10	Agosto	30	1966	43.50
Agosto	15	1962	49.80	Septiembre	12	2006	43.50
Septiembre	3	1962	48.50	Julio	1	2009	43.50
Septiembre	8	1998	48.30	Octubre	22	2018	43.50

En la *Tabla 3.15* se muestran los días en los que se registró una precipitación igual o mayor a la generada por el huracán Willa. En total hay 54 datos de los 27045 días en los que la estación determinó la variable en cuestión y tres de ellos son iguales al registrado el 22 de octubre, por lo que se determina que únicamente ha habido 50 días en los que se ha generado una mayor precipitación, siendo dos de esos días entradas del mes de octubre.



3.3.4. Periodo de retorno

El período de retorno (T_r), expresado en años, se define como el número promedio de años en que un evento puede ser igualado o excedido. Habiendo obtenido el valor de los parámetros de la distribución de probabilidad que mejor se ajusta a los datos, los valores para cierto periodo de retorno (o equivalente probabilidad de ser igualado o superado) ya se pueden obtener directamente de la expresión matemática de dicha distribución de probabilidad (o de tabulaciones de la misma), no directamente de los (CONAGUA, 2011).

En general, para un cierto periodo de retorno dado, a mayor duración menor será la intensidad promedio en dicha duración. Intuitivamente, en una tormenta, el minuto con mayor intensidad resulta con un valor mucho más alto que el valor promedio obtenido de la hora más intensa. Por otro lado, de expresarlo en términos de precipitación acumulada, el tirante del agua será menor mientras menor sea la duración (CONAGUA, 2011).

Tabla 3.20. Periodo de retorno en función de la zona a proteger (CONAGUA, 2011).

Zona/estructura	Periodo de retorno en años
Bordos	2 a 50
Zanja para drenaje	5 a 50
Drenaje de aguas pluviales	2 a 10
Drenaje en aeropuertos	5
Drenaje en carreteras	50
Parcelas agrícolas	5
Distritos de riego	25
Zona agrícola	50
Zona industrial	500
Zona densamente poblada	1000
Ciudad	1000



Para esta investigación, los periodos de retorno implementados son algunos de los establecidos por CONAGUA (2011), mismos que se seleccionan en función de algunas características, interviniendo en lo particular el criterio del diseñador: importancia de la obra a diseñar, costos de mantenimiento, costos de reparación y riesgo por pérdida de vidas humanas. Dichos periodos de retorno, así como la representación física que simbolizan, se presentan en la *Tabla 3.20*.

Con lo anterior, en este trabajo se presentan diseños para periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años.

3.3.5. Parámetros de tiempo

Por parámetros de tiempo, se refiere a los elementos temporales que se involucran para la modelación de flujo en el programa IBER. Para poder establecer el tiempo de análisis, se cuenta con la información de precipitación estipulada en el numeral anterior, por lo que se tienen cuatro días desde el momento en el que se inició el registro de la lluvia en la zona de estudio hasta que el huracán Willa llegó a Sinaloa y se convirtió en depresión tropical (DT). El programa IBER cuenta con tres apartados referentes a la determinación temporal de la modelación: instante inicial, tiempo máximo de simulación e intervalo de resultados, manejando el ingreso de la información, así como los resultados obtenidos en segundos.

3.3.5.1. Instante inicial

Se refiere al inicio de tiempo que se requiere evaluar. Como se cuenta con información de precipitación en un intervalo de 15 minutos, teniendo en cuenta que la lluvia fue únicamente durante la noche; se cuenta con una aproximación lo suficientemente detallada como para poder estimar el comportamiento del flujo superficial, el momento inicial de la modelación será el correspondiente a las 00:00 horas del día 22 de octubre de 2018 y se concluirá a las 05:00, hora para la cual ya había terminado de llover, precipitándose hasta antes del amanecer los 43.5 mm registrados por la EMC 16081. Dentro del programa,



se presenta desde un tiempo CERO, para que la modelación inicie desde el momento en el que se tiene el primer registro de dato ingresado.

3.3.5.2. Tiempo máximo de simulación

Es el tiempo límite con el que contará el programa para poder llevar a cabo la modelación partiendo desde el instante inicial. Para este caso, se llevará a cabo en base al último dato de precipitación que se cuenta y que tiene lugar tras haber pasado el huracán, una vez que la inundación y los encharcamientos se manifestaron en la superficie de la zona de estudio.

3.3.5.3. Intervalo de resultados

Son los tiempos bajo los cuales el programa IBER presenta las lecturas y se encuentran en función de la escala temporal que se tenga de los datos de precipitación. Sin embargo, el programa requiere de una gran cantidad de recursos del sistema operativo para poder llevar a cabo la modelación, por lo que también se involucran las capacidades del equipo en cuanto a su software y hardware para poder considerar intervalos más pequeños. Para este trabajo, el intervalo de resultados se consideró de 15 minutos, mismos que se pueden extraer a partir de la información de hietograma que se ingresa al programa.

Ya que el programa se encuentra en segundos, la información a ingresar se encuentra sintetizada a continuación:

Instante inicial: 0 segundos

Tiempo máximo de simulación: 25 200 segundos (los equivalentes a ocho horas de simulación de flujo, partiendo de las 22:00 del día 21 de octubre y finalizando a las 05:00 del 22 de octubre), donde 5 horas corresponden a la duración de la tormenta, mientras que las otras dos complementarias son para visualizar el comportamiento del flujo en la zona de estudio.

Intervalo de resultados: 900 segundos (equivalentes a los 15 minutos del intervalo deseado).



Datos

Parámetros de Tiempo | General | Resultados | Via Intenso Desagüe | Cubiertas | Turbulencia

Simulación Nueva ▼

Instante Inicial [s]

Tiempo máximo de simulación [s]

Intervalo de Resultados [s]

Aceptar Cerrar

Figura 3.40. Ventana del programa IBER en donde se ingresan los parámetros de tiempo.

3.3.6. Imagen satelital georreferenciada

Corresponde a una imagen satelital extraída de un SIG que permita ubicar los espacios más característicos de la zona de estudio, para posteriormente teniendo en cuenta la imagen, se puedan ingresar datos de Rugosidad de Manning. El programa IBER no cuenta con una extensión que permita capturar una imagen satelital de la zona de estudio o de la microcuenca del Río Chiquito de forma interna, por lo que se requirió obtener una imagen satelital a partir del SIG Google Earth y posteriormente georreferenciarla en ArcGIS para, una vez tratada en ambos, poder ingresarla en IBER.

Como la imagen satelital georreferenciada de la microcuenca del Río Chiquito no permite distinguir con gran detalle las áreas que son verdes respecto de las áreas que se encuentran urbanizadas, se prosiguió a ingresar dos imágenes satelitales, siendo una de ellas la correspondiente a la zona de estudio y otra la perteneciente a la microcuenca.



Figura 3.41. Imagen satelital de la microcuenca del Río Chiquito. Fuente: elaboración propia.

3.3.7. Rugosidad de Manning

El coeficiente de rugosidad de Manning es un índice el cual determina la resistencia de un flujo al discurrir sobre un canal o cauce. IBER permite asignar la rugosidad al modelo de dos formas distintas: manual y automática. La asignación manual puede hacerse sobre la geometría (superficies, líneas y puntos) o sobre la malla del modelo.



Si se realiza sobre los elementos de la geometría, es importante generar la malla después de la asignación, para transferir la información a los elementos de la malla (Lantero, 2021).

Por otra parte, la asignación automática del coeficiente de rugosidad es realizado a partir de un ráster previamente establecido en un SIG que pueda ser importado al programa IBER para que el mismo pueda leer la información previamente tratada y se pueda crear una capa con la información de la rugosidad; para esto, es importante que los datos a ingresar estén en formato ASCII para que el software pueda leerlos y, adicionalmente, se ingrese a los datos ASCII información acerca del coeficiente de escurrimiento que le pertenece a cada subárea de la microcuenca.

Para cualquiera de los dos casos, el programa IBER ya cuenta de forma predeterminada con una serie de valores establecidos sobre el coeficiente de rugosidad para diferentes usos de suelo, en base a los parámetros de asignación existentes y permisibles en España (país de donde es originario el programa).

Tabla 3.21. Valores predeterminados del coeficiente de rugosidad de Manning para diferentes usos de suelo.

Uso de suelo	Manning	Uso de suelo	Manning
Río	0.025	Zonas verdes urbanas	0.09
Suelo libre	0.023	Tierra labrada	0.04
Pradera	0.05	Viñedos	0.05
Bosque	0.12	Frutales y olivos	0.06
Arena/arcilla	0.023	Praderas	0.035
Arbustos	0.05	Cultivos con patrones complejos	0.045
Árboles	0.12	Zonas agroforestales	0.06
Vegetación urbana	0.032	Bosque de hoja ancha	0.07
Vegetación dispersa	0.08	Pastizal natural	0.035



Tabla 3.21b. Valores predeterminados del coeficiente de rugosidad de Manning para diferentes usos de suelo.

Uso de suelo	Manning	Uso de suelo	Manning
Vegetación densa	0.18	Páramos	0.065
Concreto	0.018	Arenales	0.025
No clasificada	0.032	Zonas quemadas	0.04
Infraestructura	0.020	Vegetación dispersa	0.025
Edificios aislados	0.00	Zonas de turba	0.04
Industrial	0.10	Cursos de agua	0.04
Residencial	0.15	Cuerpos de agua y estuarios	0.025
Urbano continuo	0.10	Campo de golf	0.035
Urbano discontinuo	0.09	Canteras	0.04
Infraestructuras de transporte	0.10	Áreas en construcción	0.04

El programa también incluye un módulo para agregar un uso de suelo diferente a los establecidos por defecto o, por otra parte, poder modificar el coeficiente de Manning preexistente.

Para este proyecto de investigación, el procedimiento de asignación de Manning se realizó de forma manual en base a la visualización que se presenta de las imágenes satelitales georreferenciadas (*Figuras 3.14 y 3.15*), pues los metadatos de uso de suelo y vegetación empleados, a pesar de que son suficientes para el área correspondiente a la zona de estudio, resultan inadecuados para el análisis de toda la microcuenca, puesto que únicamente se distinguen los suelos agrícola-pecuario-forestal, ecológico-florístico-fisionómico y urbano-complementario, pero no identifica las zonas industriales, residenciales, bosques, vegetaciones dispersas, cuerpos de agua. Aun teniendo la imagen satelital, resulta complicada una asignación exacta de los coeficientes de rugosidad dentro de la zona urbana por no poder distinguir adecuadamente áreas de construcción con carreteras, edificios aislados y parques



urbanos ecológicos, por lo que realizó una aproximación empírica asignando cada a cada espacio visible en la imagen satelital el coeficiente correspondiente.

Figura 3.42. Ventana de asignación de coeficiente de rugosidad de Manning para diferentes usos de suelo.

3.3.8. Análisis probabilístico de datos

Teniendo la información de precipitación anual de 75 años completos, se sabe que se tiene información completa a partir del año 1946 y hasta el año 2021. Con esos datos, se busca realizar un análisis estadístico que tenga como objetivo poder estimar las precipitaciones e intensidades para diferentes periodos de retorno mediante modelos probabilísticos.



3.3.8.1. Modelos de distribución

En la estadística, existen diversas funciones de distribución de probabilidad teóricas. Típicamente, en América Latina se cuenta con la utilización del programa Hidroesta, mismo que tiene en sus funciones la posibilidad de realizar las distribuciones probabilísticas mediante ocho funciones (MTC, 2008):

a) Distribución Normal

$$f(x) = \frac{1}{S\sqrt{(2\pi)}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{S}\right)^2}$$

Donde:

$f(x)$ = función densidad normal de la variable x .

x = variable independiente.

μ = parámetro de localización, igual a la media aritmética de x

S = parámetro de escala, igual a la desviación estándar de x .

b) Distribución Log-Normal 2 parámetros

$$P(x \leq x_i) = \frac{1}{S} \int_{-\infty}^{x_i} e^{\left[\frac{-(x-\bar{X})^2}{2S^2}\right]} dx$$

Donde:

\bar{X} y S = parámetros de distribución.

c) Distribución Log-Normal 3 parámetros

$$f(x) = \frac{1}{(x - x_0)\sqrt{(2\pi)Sy}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(x-x_0)-Uy}{Sy}\right)^2}$$

Donde:

x_0 = parámetro de posición (cumpliéndose que $x > x_0$).

Uy = parámetro de escala o media aritmética.



Sy^2 = parámetro de forma o varianza.

d) Distribución Gamma 2 parámetros

$$f(x) = \frac{x^{\gamma-1} e^{-\frac{x}{\beta}}}{\beta^{\gamma} \Gamma(\gamma)}$$

Cuyos valores son válidos para:

$$0 \leq x < \infty$$

$$0 < \gamma < \infty$$

$$0 < \beta < \infty$$

Donde:

γ = parámetro de forma.

β = parámetro de escala.

e) Distribución Gamma 3 parámetros

$$f(x) = \frac{(x - x_0)^{\gamma-1} e^{-\frac{(x-x_0)}{\beta}}}{\beta^{\gamma} \Gamma(\gamma)}$$

Cuyos valores son válidos para:

$$x_0 \leq x < \infty$$

$$-\infty < x_0 < \infty$$

$$0 < \beta < \infty$$

$$0 < \gamma < \infty$$

Donde:

x_0 = origen de la variable x , parámetro de posición.

γ = parámetro de forma.

β = parámetro de escala.



f) Distribución Log-Pearson Tipo III

$$f(x) = \frac{(\ln x - x_0)^{\gamma-1} e^{-\frac{(\ln x - x_0)}{\beta}}}{x\beta^\gamma \Gamma(\gamma)}$$

Cuyos valores son válidos para:

$$x_0 \leq x < \infty$$

$$-\infty < x_0 < \infty$$

$$0 < \beta < \infty$$

$$0 < \gamma < \infty$$

Donde:

x_0 = origen de la variable x , parámetro de posición.

γ = parámetro de forma.

β = parámetro de escala.

g) Distribución Gumbel

$$f(x) = e^{-e^{-a(x-\beta)}}$$

$$x = \bar{x} + k\sigma_x$$

Donde:

a = parámetro de concentración.

β = parámetro de localización.

x = valor con una probabilidad dada.

\bar{x} = media de la serie.

k = factor de frecuencia.

h) Distribución Log-Gumbel

$$g(y) = e^{-e^y}$$

$$y = \frac{\ln x - \mu}{\alpha}$$



Donde:

a = parámetro de concentración.

μ = parámetro de localización.

3.3.8.2. Prueba de bondad de ajuste

Para validar la hipótesis de que un conjunto de datos es independiente de la distribución elegida, se utilizan pruebas de bondad que permiten su evaluación. El propio programa de Hidroesta trabaja mediante la prueba Kolmogorov-Smirnov, método por el cual se comprueba la bondad de ajuste de las distribuciones, así como también definir la más representativa, lo cual implica seleccionar la que mejor se ajuste de las ocho y con la misma poder generar las tormentas de diseño.

La prueba Kolmogorov-Smirnov, según lo establecido por Aparicio (2003) consiste en comparar el máximo valor absoluto de la diferencia D entre la función de la distribución de probabilidad observada $F_0(x_m)$ y la estimada $F(x_m)$.

$$D = \max|F_0(x_m) - F(x_m)|$$

Esta prueba compara los datos con el modelo estadístico sin necesidad de agruparlos, siendo la función de distribución de probabilidad observada calculada como:

$$F_0(x_m) = 1 - \frac{m}{n + 1}$$

Donde m es el número de orden del dato x_m en una lista de mayor a menor y n es el número total de datos.

Para que el programa Hidroesta permita identificar la serie de datos adecuadamente, debe de ser ingresada como formato de libro de Excel 97-2007, puesto que el software trabaja únicamente bajo dichas características.



Figura 3.43. Ventana principal del software Hidroesta.

3.3.9. Intensidad de lluvia

El SMN (2022), recoge que la intensidad es la razón de incremento de la altura que alcanza la lluvia (mm) respecto al tiempo. La precipitación en meteorología se mide en base al incremento de un recipiente que tiene medidas tales que, si se le vacía un litro de agua el nivel sube un milímetro, es por esta razón que a la lluvia se le mide en milímetros, así un milímetro medido en un pluviómetro es lo equivalente a un litro por metro cuadrado, 10 mm es que ha precipitado una lluvia de 10 litros por metro cuadrado. Se clasifica en ligera, moderada, fuerte, respecto a la información presentada en la siguiente tabla:



Tabla 3.22. Clasificación de la intensidad de la lluvia (SMN, 2022)

Categoría	Intensidad de lluvia (mm/h)
Ligera	Menor a 5
Moderada	Entre 5.1 y 15
Fuerte	Entre 15.1 y 60
Torrencial	Mayor a 60

Las EMC no incluyen en sus variables analizadas el cálculo automático de la intensidad de lluvia, por lo que es un cálculo que es necesario realizarlo manualmente para posteriormente realizar un hietograma de precipitación. Como se ha mencionado anteriormente, es el incremento de lluvia respecto del tiempo (por lo regular el tiempo es en horas), por lo que la expresión adecuada para la determinación de la intensidad es la siguiente:

$$I = \frac{P}{\Delta t}$$

En donde...

I = Intensidad (mm/h)

P = Precipitación (mm)

Δt = Intervalo de tiempo transcurrido (h)

Se presenta la variable tiempo (t) puesto que no precisa de ser un parámetro establecido, ya que se realiza dependiendo de la escala temporal con la que se encuentren los datos de precipitación, por lo que, si los mismos se encuentran en minutos, será necesario recabar los 60 que corresponden a una hora y sumarlos para que representen la intensidad de una hora específica del día, entonces, si la escala temporal está en horas, no será necesario realizar operación alguna. Con esto, siempre es más conveniente tener información de precipitación con una menor escala temporal, pues significa también tener información con mayor libertad para poder analizar.



Para la determinación de la intensidad máxima de diseño que relaciona la curva intensidad – duración – frecuencia, Aparicio (2003), se define una ecuación particular cuya expresión es la siguiente:

$$I = \frac{kTr^m}{D^n}$$

Donde:

I = intensidad (mm/h)

Tr = periodo de retorno (años)

D = duración de la lluvia (min)

K, m, n = constantes determinadas en base a in análisis de correlación múltiple.

Para el cálculo de las constantes, se resuelven las siguientes expresiones:

$$Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2$$

$$Y = \log I; a_0 = \log K; a_1 = m; X_1 = \log T; a_2 = -n; X_2 = \log D$$

Donde:

$a_0, a_1, a_2, X_1, X_2, Y$ = incógnitas necesarias para determinar los parámetros K, m, n .

Por otra parte, para determinar a su vez las variables necesarias para las constantes de la ecuación de la intensidad, se realiza un ajuste de correlación lineal múltiple, resultando en un sistema de ecuaciones:

$$\begin{aligned} \sum y &= Na_0 + a_1 \sum x_1 + a_2 \sum x_2 \\ \sum (x_1 y) &= a_0 \sum x_1 + a_1 \sum (x_1)^2 + a_2 \sum (x_1 x_2) \\ \sum (x_2 y) &= a_0 \sum x_2 + a_1 \sum (x_1 x_2) + a_2 \sum (x_2)^2 \end{aligned}$$



Donde:

N = número de datos

El programa Hidroesta igualmente permite calcular la ecuación de intensidad para su implementación en la metodología del bloque alterno a partir de los valores de duración, periodo de retorno asignados y de intensidad obtenida a partir de la ecuación básica por medio de la metodología Dick-Peschke, permitiendo encontrar el valor de las constantes para poder ser evaluada en función de las condiciones de precipitación originales que se tengan.

3.3.10. Metodología Dick-Peschke

El método de estimación de tormenta de diseño Dick-Peschke es una de las que cuenta con aceptación internacional, así como una forma de resolución con apenas dos variables, mismas que se presentan en la expresión correspondiente, misma que relaciona la precipitación máxima en 24 horas con la duración de la tormenta (Gamarra, 2021):

$$P_d = P_{24} \left[\frac{d}{1440} \right]^{0.25}$$

Donde:

P_d = precipitación total (mm)

d = duración (min)

P_{24} = precipitación máxima en 24 horas (mm)

3.3.11. Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia

Las curvas intensidad – duración – frecuencia (IDF) son un elemento de diseño que relacionan la intensidad de la lluvia, la duración de la misma y la frecuencia con la que se puede presentar, es decir su probabilidad de ocurrencia o el periodo de retorno. Para



determinar estas curvas IDF se necesita contar con registros pluviográficos de lluvia en el lugar de interés y seleccionar la lluvia más intensa de diferentes duraciones en cada año, con el fin de realizar un estudio de frecuencia con cada una de las series así formadas. Es decir, se deben examinar los hietogramas de cada una de las tormentas ocurridas en un año y de estos hietogramas elegir la lluvia correspondiente a la hora más lluviosa, a las dos horas más lluviosas, a las tres horas y así sucesivamente. Con los valores seleccionados se forman series anuales para cada una de las duraciones elegidas. Estas series anuales están formadas eligiendo, en cada año del registro, el mayor valor observado correspondiente a cada duración, obteniéndose un valor para cada año y cada duración (MTC, 2008).

3.3.12. Hietograma

El hietograma es la gráfica en la que se presentan las intensidades de lluvia con respecto al tiempo. Esta representación se utiliza para identificar los picos más altos de la intensidad y el momento en el cual se manifestaron, ya que la lluvia no necesariamente se mantiene de forma constante durante el periodo que dura la tormenta. Para lo correspondiente a la provocada por el huracán Willa, ésta empezó ligeramente y continuó lloviendo a lo largo de la madrugada del 22 de octubre a una intensidad constante pero casi ininterrumpida. La escala temporal utilizada se selecciona en función de la cantidad de periodos que se requieran analizar y si hay uno en específico que se requiera conocer.

El hietograma es requerido para el funcionamiento del comportamiento del flujo en el programa IBER para que el mismo pueda leer la información de la precipitación y la hora a la que se presentó, de modo que, respecto al intervalo de tiempo seleccionado y a las variables de coeficiente de rugosidad de Manning y de escurrimiento se pueda modelar el flujo superficial del agua sobre el enmallado. En la siguiente gráfica se presenta el hietograma correspondiente a la lluvia acontecida, teniendo en cuenta los valores de la precipitación y de la determinación de la intensidad para cada dato establecido.

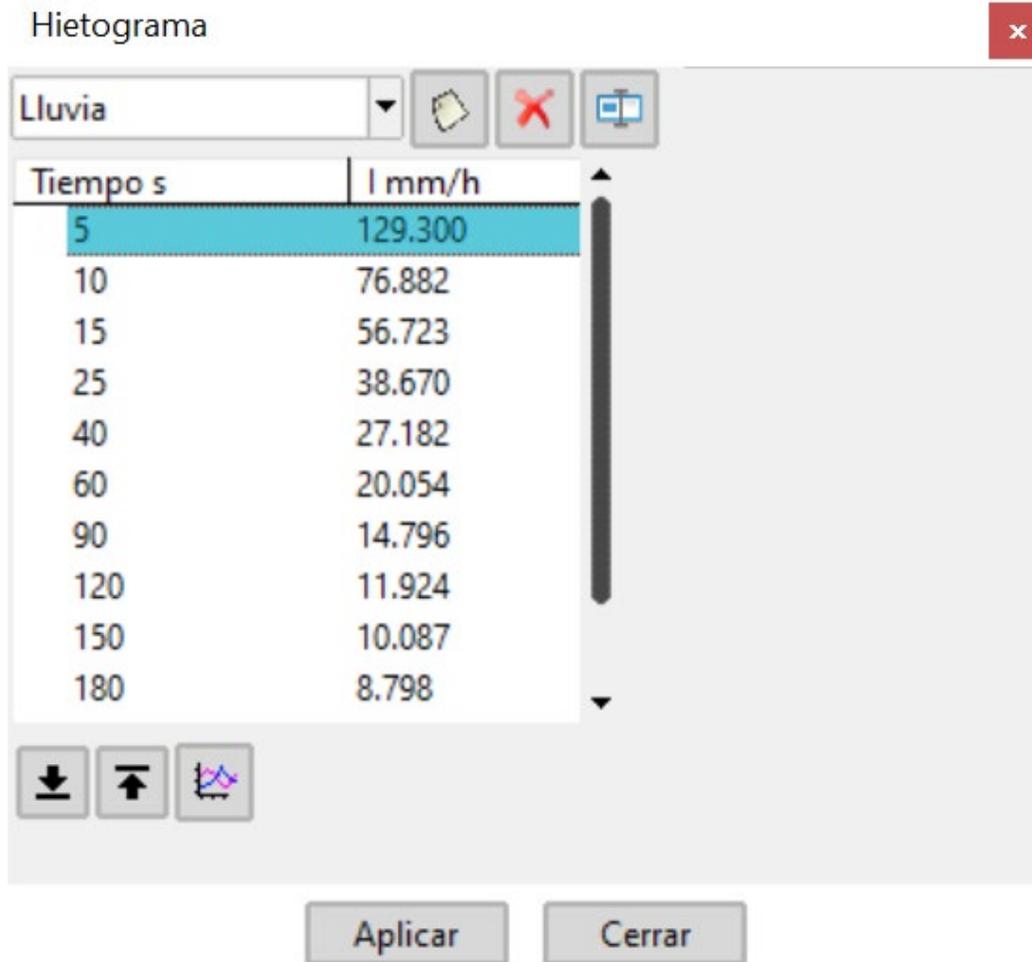


Figura 3.44. Ingreso de los valores del hietograma (intensidad en mm/h vs. tiempo en segundos) en el programa IBER.

Para ingresar los datos del hietograma para diferentes periodos de retorno al programa IBER una vez habiendo definido la ecuación de la intensidad, se proponen diferentes tiempos de duración de la tormenta que corresponden a los 300 minutos totales y se asignan las intensidades obtenidas a partir de la ecuación asignada. Es necesario que toda la malla cuente con información de lluvia aún cuando no se cuenta con información exacta, puesto que si alguna parte no tiene asignada una lluvia determinada el programa presentará errores en la modelación.



3.3.13. Método del Bloque Alterno

El método de bloque alterno es una forma simple para desarrollar un hietograma de diseño utilizando una curva IDF. El hietograma de diseño producido por este método especifica la profundidad de precipitación que ocurre en n intervalos de tiempo sucesivos de duración Δt sobre una duración total de tormenta. Después de seleccionar el periodo de retorno de diseño, la intensidad es leída en una curva IDF para cada una de las duraciones Δt , $2\Delta t$, $3\Delta t$,..., y la profundidad de precipitación correspondiente se encuentra al multiplicar la intensidad y la duración (Chow *et al.*, 1988).

Tomando diferencias entre valores sucesivos de profundidad de precipitación, se encuentra la cantidad de precipitación que debe añadirse por cada unidad adicional de tiempo Δt . Estos incrementos o bloques se reordenan en una secuencia temporal de modo que la intensidad máxima ocurra en el centro de la duración requerida y que los demás bloques queden en orden descendente alternativamente hacia la derecha y hacia la izquierda del bloque central para formar el hietograma de diseño (MTC, 2008; Paredes, 2015).

3.4. Procedimiento

Se entiende como procedimiento todo aquel elemento necesario para la correcta modelación del flujo que resulte operativo a partir del programa IBER, lo que significa que se indican los elementos y variables que el software realiza previamente antes de poder proyectar un resultado sin la necesidad previa de realizar algún cálculo y únicamente siendo necesario ingresar el elemento hidrológico o matemático solicitado.

Por otro lado, también se incluye la propia base del funcionamiento del programa que realiza una vez ingresadas las variables establecidas previamente, para poder expresar adecuadamente cómo es que opera y bajo qué condiciones. Naturalmente, el programa por sí solo requiere de una mayor cantidad de variables para poder extender un resultado más fidedigno, por lo que en este trabajo se presentan las que se consideraron para poder realizar la modelación.



3.4.1. Caracterización de la zona de estudio

Los procesos hidrológicos que se producen en la cuenca son el resultado de la interacción de varios factores climáticos, topográficos, ecológicos, además de aquellos que son producto de la intervención humana como ser el uso del suelo e infraestructura. Como punto de partida para la comprensión y análisis comparativo de estos procesos, es importante conocer las características físicas y morfométricas de la zona de estudio, las cuales influyen en la magnitud y variabilidad de dichos procesos (Brieva, 2018).

Para representar ordenadamente una secuencia lógica del presente trabajo, se realizó la caracterización de la zona de estudio se llevó a cabo en propiamente en el apartado de la *Zona de estudio*, pues además de la información referente a la parte ambiental, fisiográfica, geológica y sociopolítica se han presentado los elementos hidrológicos que típicamente corresponden a la caracterización de una cuenca hidrográfica.

Para poder identificar los aspectos hidrológicos que resulten relevantes para la conceptualización del trabajo, la información referente a la caracterización ha sido extraída en su mayoría de la biblioteca digital de mapas del INEGI y de los metadatos de acceso público del IMPLAN.

Por fines prácticos se ha presentado la caracterización particular del municipio de Morelia y la particular (la zona de estudio compuesta por las nueve colonias afectadas por la inundación) en lugar de considerar la microcuenca del Río Chiquito, puesto que permite conocer de una forma más característica los elementos geográficos de la zona de estudio sin abarcar una mayor región para, en base a la zona establecida, poder realizar el análisis forense. Sin embargo, para el caso de la modelación, como se considerará la obtención del comportamiento del flujo de forma general en la microcuenca, se presentan los elementos que caracterizan a la misma.



3.4.2. Redes Irregulares de Triángulos Rectángulos

Las Redes Irregulares de Triángulos Rectángulos (Right-Triangulated Irregular Networks, RTIN por sus siglas en inglés) es un enmallado propuesto por Evans *et al.* (2001), el cual consiste en una representación de la superficie en base a un MDE. La aproximación de los datos de superficie de un MDE de cuadrículas regulares suele adoptar una de las siguientes dos formas: o bien la aproximación es en sí misma un MDE cuadrículado regular, o bien es una Red Irregular Triangulada (TIN, por sus siglas en inglés) que es un subconjunto irregular de los datos originales. Es importante destacar que por aproximación se refiere al grado de exactitud con el cual el MDE o enmallado representa de una mejor precisión la composición fisiográfica del terreno natural para poder verse plasmado en un SIG.

Para poder realizar una aproximación adecuada de la superficie, es necesario saber para qué fin está pensada la aproximación, ya que crear y almacenar los datos para la crear una malla representativa puede llevar mucho tiempo y es a menudo poco práctica. No obstante, el programa IBER cuenta con la capacidad de poder crear una malla mediante la técnica RTIN a partir de un MDE convencional, a pesar de que el programa no cuenta con la capacidad para poder leer un formato MDE extraído directo de la base de datos del INEGI, aunque sí puede realizar la lectura de una TIN.

Las ventajas de la metodología RTIN se hacen más evidentes cuando se desea representar una jerarquía de aproximaciones de superficie un lugar de una única aproximación; en cierto sentido, esta representación de la partición está hecha para tener jerarquías, ya que, si se representa una partición a un nivel de detalle determinado, entonces contiene la representación de cada aproximación de forma más fina (Evans *et al.*, 2001).

La partición compuesta por dos triángulos formada por la división de un cuadrado es la partición más fina de la jerarquía representada en la *Figura 3.45*. A partir de una partición se puede generar otra más detallada dividiendo cualquiera de los triángulos. Evans *et al.* (2001) conjeturan en que la subdivisión de triángulos R (TIN) en triángulos T (RTIN) permite una mejor caracterización del MDE de la zona que se ha empleado.



Para que el programa pueda hacer efectiva la lectura de los datos ya existentes de un MDE, es preciso que el formato a ingresar con la información del terreno sea de tipo ASCII (American Standard Code for Information Interchange), mismo que se puede obtener a partir de un SIG como ArcGIS o mediante la descarga de los metadatos desde la biblioteca digital de mapas del INEGI, si es que no se requiere realizar un tratamiento posterior a la información del terreno.

En esta investigación tras la realización del recorte a partir del MDE de Michoacán para tener uno representativo de la microcuenca del Río Chiquito, se creó un formato ASCII de esa topografía y se ingresó para que IBER creara la RTIN. Se requiere de algoritmos matemáticos que realiza IBER leyendo el formato ASCII del MDE para poder llevar a cabo la creación del modelo a emplear.

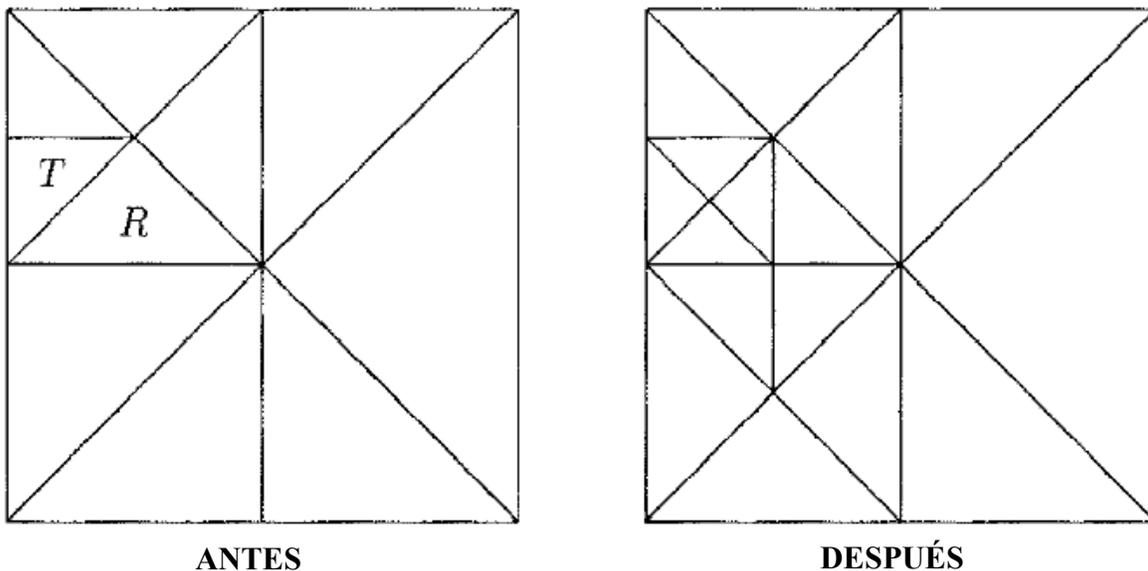


Figura 3.45. Representación de la división de triángulos R en triángulos T para la formulación de la metodología RTIN para MDE. Fuente: Evans et al., (2001).

Otra de las ventajas de la implementación de la metodología RTIN en lugar de emplear un MDE o una data TIN es que realiza un balance entre el error de la aproximación del lugar y la cantidad de memoria del sistema utilizado, haciendo que resulte más óptima



una malla en formato RTIN. Es importante destacar que también influye la resolución con la que se encuentre realizado el MDE base, puesto que mientras ésta sea menor el resultado de la RTIN será menos fino y aproximado; bajo ese esquema, el empleado en este proyecto es un MDE tipo superficie con 5 m de resolución derivado de datos de sensores remotos satelitales y aerotransportados (INEGI, 2022).

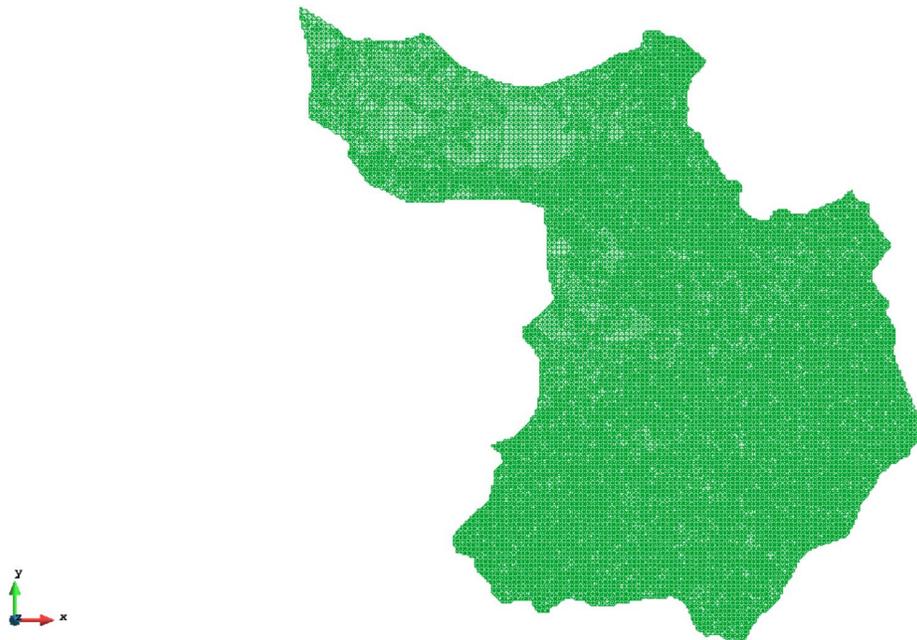


Figura 3.46. Enmallado de la microcuenca del Río Chiquito empleando la metodología RTIN. Se observan los triángulos que determinan el comportamiento del terreno, teniendo una menor composición de triángulos en donde el terreno es más homogéneo.

3.4.3. Condiciones hidrodinámicas iniciales

Para que no se presenten anomalías en la modelación del flujo una vez ejecutado el programa con las variables establecidas, es imperioso ingresar los elementos hidrodinámicos ya presentes en la microcuenca y, en particular, en la zona de estudio, para que su presencia no pueda afectar el resultado obtenido.

Por lo anterior, las condiciones hidrodinámicas iniciales consisten en la determinación de la ubicación en la malla correspondiente a la zona de estudio de ríos, lagos,



lagunas, estuarios, drenes, entre otros. Para poder llevar a cabo este proceso, se consideró la *Figura 3.8* (ríos y corrientes) para identificar los flujos de agua en cauces correspondientes a la región; bajo este sentido, exclusivamente se tiene presencia del Río Chiquito tanto en lo que se refiere a la zona de estudio como a toda la microcuenca, por lo que es el único elemento hidrológico de la cuenca aplicable.

Al considerar las condiciones hidrodinámicas de la zona de estudio, el programa IBER requiere de la información correspondiente al tirante del agua en el momento en el que se presentó la inundación en cada elemento seleccionable de la RTIN y en diferentes secciones del río. Sin embargo, conocer la altura del agua en diferentes secciones del río e, inclusive, en un punto en particular del mismo durante el día 22 de octubre de 2018 (previo al inicio de la lluvia) resulta complicado de determinar, ya que el Río Chiquito no presenta un comportamiento que permita identificar una forma de poder conocer la profundidad del agua que transcurre sobre él en un día en particular.

Para poder asignar el valor de la profundidad del agua en el río, se considera que, al no haber sido el río parte de la problemática presentada para la inundación acaecida en la zona de estudio porque no se registró un desbordamiento del mismo (únicamente Protección Civil manifestó que se encontraba en su máxima capacidad), el valor del tirante que se considere no puede influir en la modelación del comportamiento del flujo, al no haberse incrementado lo suficiente como para que se desbordara y parte del problema de la inundación fuera acreditado propiamente a las condiciones bajo las cuales se encontraba el río una vez que finalizó de llover tras el paso del huracán. En cuanto al valor del tirante a ingresar en el programa, Torres y Lucas (2014), recogen que su sección transversal es de forma trapezoidal irregular, tiene una profundidad de aproximadamente 4 m hasta el fondo del cauce, un ancho de 3 m con un tirante de 15 cm en temporada de estiaje el cual incrementa hasta 40 cm en temporada de lluvias. Por practicidad, el valor considerado para el enmallado RTIN fue de **40 cm** en toda la extensión del río dentro de la zona de estudio.

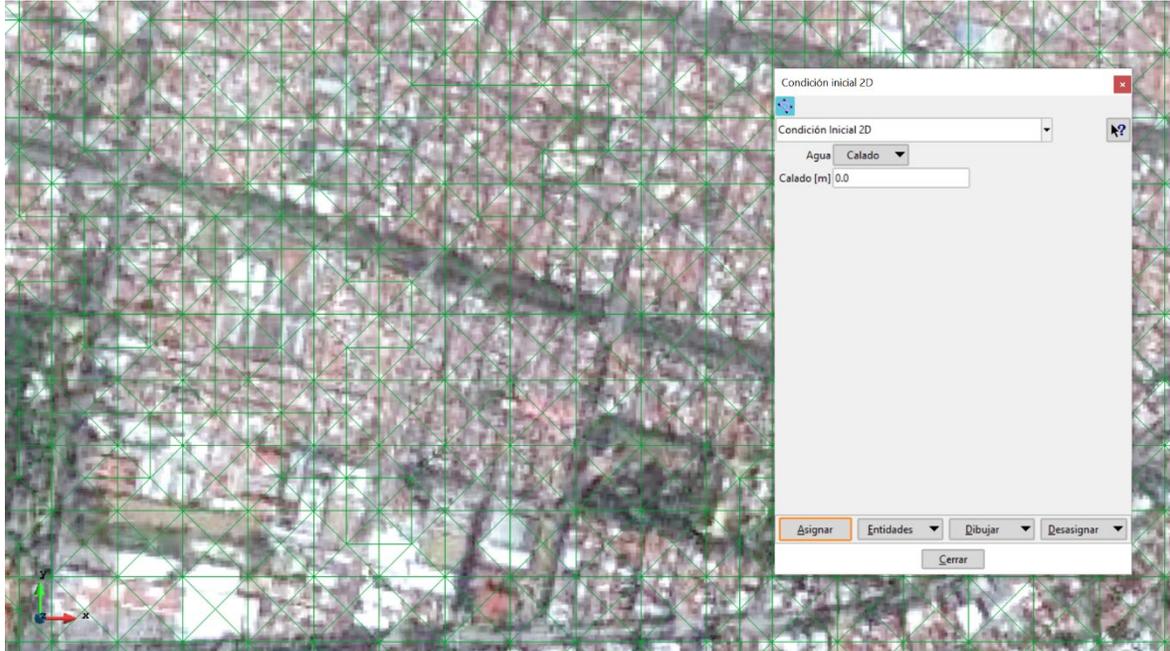


Figura 3.47. Comparación del tamaño de los elementos de la malla RTIN y el cauce del Río Chiquito; a la izquierda la ventana de asignación de las condiciones hidrodinámicas iniciales para cada elemento de la malla.

Otro inconveniente para ingresar las condiciones hidrométricas es propiamente la malla RTIN, ya que la misma por cuestiones de resolución y de afinidad de la capa utilizada no se permite tener una aproximación mayor de los triángulos que componen el enmallado, en especial al momento de asignar el nivel de profundidad en el Río Chiquito, por lo que el mismo únicamente fue asignado en los triángulos de la malla en donde únicamente se tuviera en cuenta el cauce del río.

3.4.4. Esguerrimiento superficial por el Servicio de Conservación de Suelos (SCS)

El esguerrimiento superficial es definido como el agua proveniente de la precipitación que se mueve sobre la superficie del suelo hasta llegar a los cauces de ríos dentro de la región, normalmente definidos por la letra S. De esta información, el programa IBER maneja el



cálculo de esta variable por tres modelos de análisis: el modelo de Green-Ampt, el modelo de Horton y el SCS.

El modelo de Green-Ampt es el más preciso de todos, pues suele resaltar de forma fidedigna el comportamiento del flujo bajo las condiciones dadas con el mismo, sin embargo, es el que también requiere el ingreso de más variables. El método seleccionado para esta investigación fue el del SCS.

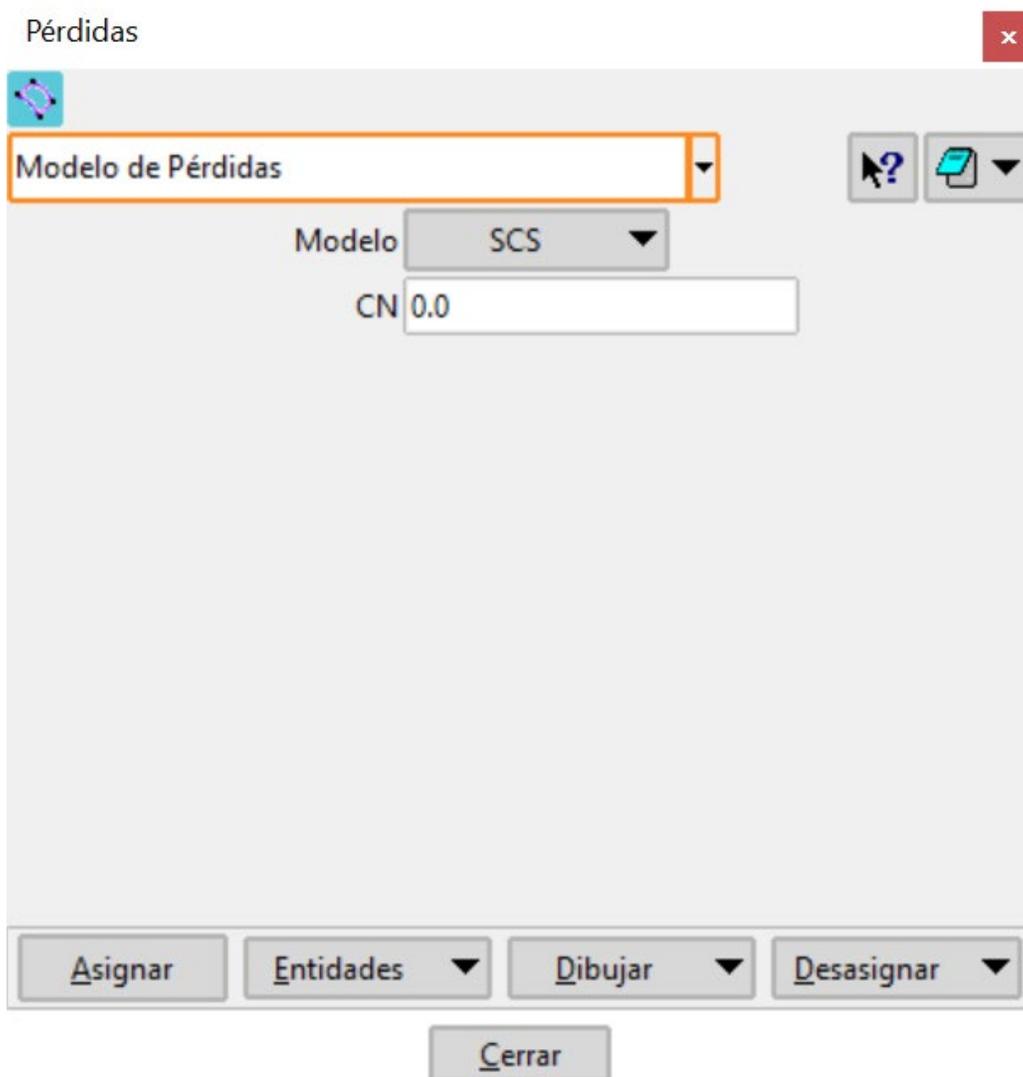


Figura 3.48. Ventana de asignación del escurrimiento superficial por el modelo del SCS.



3.4.4.1. Balance hídrico

Un balance hídrico es la determinación del comportamiento que tendrá la precipitación de un lugar en específico para estimar la cantidad que se quedará en la superficie, pues habrá infiltración, evapotranspiración evaporación y, dependiendo igualmente de la superficie donde escurra el agua, también una parte se quedará en la superficie. Es preciso identificar el término de balance hídrico, pues su conceptualización ayuda a identificar el comportamiento del agua que precipita en una región determinada y las variables que pueden ser estimadas en los modelos trabajados por el programa IBER.

3.4.4.2. Número de curva de escurrimiento

El modelo SCS es el más básico de los tres, pues únicamente requiere de conocer una variable previa para poder ser empleado, mientras que su utilización resulta sencilla, ya que se compone mediante la siguiente ecuación:

$$S = \frac{1000}{CN} - 10$$

En donde CN es el número de curva de escurrimiento, cuyo valor puede resultar empírico, ya que se encuentra en función del uso de suelo y cualquier otro factor que pueda afectar al escurrimiento y a la retención del agua precipitada. Dichos valores empíricos se indican en la *Tabla 3.23*. Para la modelación realizada en este proyecto, resulta complicado asignar los números de curva correspondientes a cada subregión de la microcuenca ya que se requiere de un mayor detalle y resolución de la malla y que cuente con una adecuada precisión en la imagen satelital georreferenciada; la asignación del número, por tanto, se llevó a cabo de forma empírica, tomando en cuenta la imagen satelital, los valores de la tabla correspondiente y el parteaguas de la microcuenca y el enmallado para poder delimitar adecuadamente la asignación del parámetro.



Tabla 3.23. Números de curva de escurrimiento para usos selectos de tierra agrícola, urbana y suburbana (Chow, et al., 1994)

Descripción del uso de la Tierra	Grupo hidrológico del suelo			
	A	B	C	D
Tierra cultivada	72	81	88	91
Sin tratamientos de conservación	62	71	78	81
Pastizales				
Condiciones pobres	68	79	86	89
Condiciones óptimas	39	61	74	80
Bosques				
Troncos delgados, cubierta pobre	45	66	77	83
Sin hierbas, cubierta buena	25	55	70	77
Áreas abiertas: césped, parques, campos de golf, cementerios, etc.				
Óptimas condiciones (cubierta de pasto +75%)	39	61	74	80
Aceptables condiciones (cubierta de pasto entre 50 y 75%)	49	69	79	84
Industrias/comercios				
Áreas comerciales de negocios (85% impermeables)	89	92	94	95
Distritos industriales (72% impermeables)	81	88	91	93
Residencial				
0.05 hectáreas o menos (65% impermeables)	77	85	90	92



Tabla 3.23b. *Números de curva de escurrimiento para usos selectos de tierra agrícola, urbana y suburbana (Chow, et al., 1994)*

Residencial				
Entre 0.05 y 0.10 hectáreas (38% impermeables)	61	75	83	87
Entre 0.10 y 0.133 hectáreas (30% impermeables)	57	72	81	86
Entre 0.133 y 0.25 hectáreas (25% impermeables)	54	70	80	85
Entre 0.25 y 0.40 hectáreas (20% impermeables)	51	68	79	84
Parqueaderos pavimentados, techos, accesos, etc.	98	98	98	98
Calles y carreteras				
Pavimentos con cuneras y alcantarillas	98	98	98	98
Grava	76	85	89	91
Tierra	72	82	87	89

El número de curva es un parámetro hidrológico que permite caracterizar el potencial de escorrentía en una cuenca hidrográfica y se determina a partir de algunas características físicas del territorio como el tipo, la densidad y el tratamiento de las coberturas, así como por el grupo hidrológico de suelo (NRCS, 2004; Díaz y Mercado, 2017).

3.4.4.3. Grupo hidrológico del suelo

Un grupo hidrológico de suelo (GHS) es un conjunto de suelos que tiene similar comportamiento frente a la generación de escorrentía y se clasifica en una de las siguientes categorías (NRCS, 2004; Díaz y Mercado, 2017).



- Grupo A: son suelos predominantemente arenosos, donde el agua se transmite libremente a través del perfil y por ende tienen un bajo potencial de escorrentía cuando están completamente húmedos.
- Grupo B: son suelos con texturas moderadamente finas a moderadamente gruesas que tienen un potencial de escorrentía bajo cuando están completamente húmedos.
- Grupo C: Son suelos con una capa que limita el movimiento vertical del agua y texturas de moderadamente finas a finas. El potencial de escorrentía es moderadamente alto cuando están húmedos.
- Grupo D: son suelos con alto potencial de escorrentía y tasas de infiltración muy bajas. Las texturas son arcillosas, el nivel freático es alto o son suelos poco profundos, asentados sobre material impermeable.

Incorporar tanto el GHS como el CN a subáreas pertenecientes a la microcuenca del Río Chiquito es complicado, pues se requiere conocer de información del suelo que permita entonces identificar los grupos de suelo y posteriormente a los mismos aplicar el número de curvatura. Para este trabajo de investigación, se decidió considerar las capas pertenecientes a la *Figura 3.9* (edafología), *Figura 3.14* (uso de suelo) y una imagen satelital georreferenciada de la zona de estudio para poder ubicar con mayor exactitud las áreas pertenecientes a uso agrícola, urbano y suburbano que no son aplicables en la *Figura 3.14* por considerarse zona urbana sin espacios para uso exclusivo de vegetación.

El programa IBER permite seleccionar áreas diferentes de la RTIN elaborado por el software y, por lo tanto, asignar diferentes CN, por lo que no es necesaria la realización de una ponderación de CN aplicable a toda la microcuenca o a toda la zona de estudio. Para asignar la subárea correspondiente de cada CN, se sobreponen las capas de la imagen satelital georreferenciada y de la RTIN.

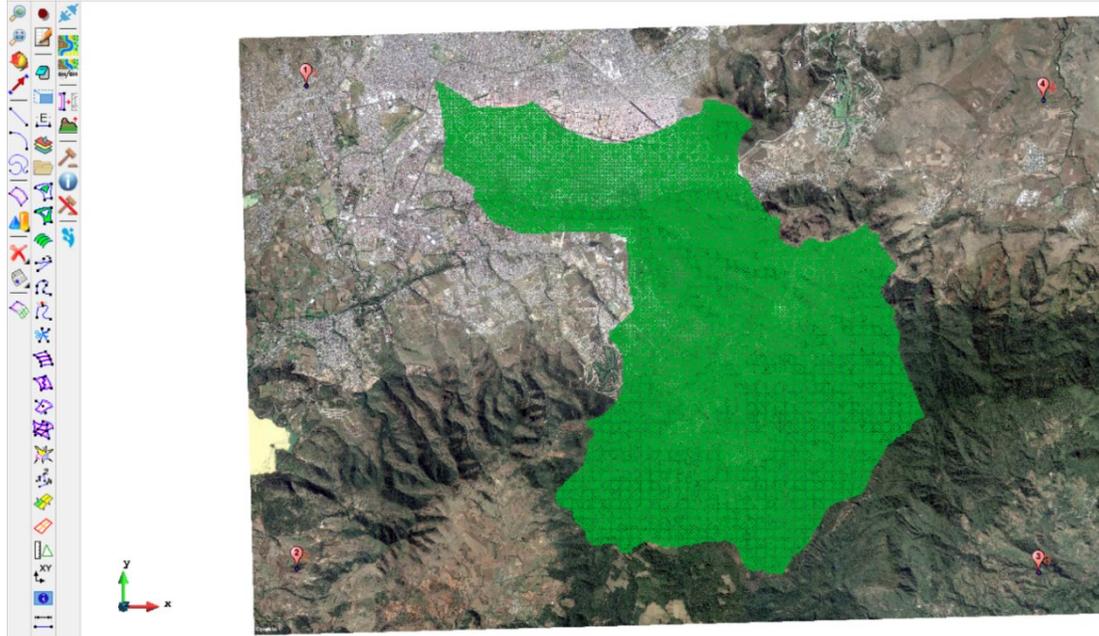


Figura 3.49. RTIN sobrepuesto sobre la imagen satelital georreferenciada para la asignación en IBER del CN.

3.4.5. Ecuaciones de Saint-Venant

Carrillo (2015), hace mención de que las ecuaciones de Saint-Venant son presentadas por primera vez por el Ingeniero y Matemático francés Adhémar Jean Claude Barre de Saint-Venant en su trabajo: *Theorie du moviment non permanent des eaux, avec application aux crues des rivieres et à l'introduction des mareés*, constan de un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales que modelan los cambios de caudal, nivel del líquido y de la velocidad de un fluido incompresible que recorre un canal de superficie libre.

El modelo matemático utilizado para la simulación está basado en las ecuaciones bidimensionales, las cuales describen el comportamiento de la superficie del fluido, permitiendo así calcular tres parámetros principales: la profundidad del fluido y los componentes de velocidad horizontal de forma bidireccional (Negrete, 2016). El software IBER tiene la capacidad de calcular dicho comportamiento mediante el sistema de ecuaciones diferenciales de Saint-Venant en dos dimensiones, contemplando, además de las variables mencionadas antes, los efectos de turbulencia, y rozamiento superficial por viento; las cuales



dependiendo de si se cuentan con las condiciones suficientes, se pueden calcular bajo dichas condiciones u omitir.

Bladé *et al.*, (2014), simplifican la representación de las ecuaciones de Saint-Venant, expresándolas de la siguiente forma y considerando todas las variables representadas:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hU_x}{\partial x} + \frac{\partial hU_y}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(hU_x) + \frac{\partial}{\partial x}\left(hU_x^2 + g\frac{h^2}{2}\right) + \frac{\partial}{\partial y}(hU_xU_y) = -gh\frac{\partial hZ_b}{\partial x} + \frac{\tau_{s,x}}{\rho} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x}\left(v_t h \frac{\partial U_x}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(v_t h \frac{\partial U_x}{\partial y}\right)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(hU_y) + \frac{\partial}{\partial x}(hU_xU_y) + \frac{\partial}{\partial y}\left(hU_y^2 + g\frac{h^2}{2}\right) = -gh\frac{\partial hZ_b}{\partial y} + \frac{\tau_{s,y}}{\rho} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x}\left(v_t h \frac{\partial U_y}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(v_t h \frac{\partial U_y}{\partial y}\right)$$

En donde:

h = tirante (m)

U_x, U_y = velocidades horizontales promediadas en profundidad (m/s)

g = gravedad (m/s²)

Z_b = cota del fondo (m)

τ_s = fricción en la superficie libre debida el rozamiento producido por el viento

τ_b = fricción debida al rozamiento del fondo

V_t = viscosidad turbulenta (m²/s)

ρ = densidad del agua (kg/m³)



La fricción de fondo se evalúa mediante la fórmula de Manning como:

$$\tau_{b,x} = \rho g h \frac{n^2 U_x |U|^2}{h^{\frac{4}{3}}} \quad \tau_{b,y} = \rho g h \frac{n^2 U_y |U|^2}{h^{\frac{4}{3}}}$$

La fuerza de rozamiento realizada por el viento sobre la superficie libre se calcula a partir de la velocidad del viento a 10 m de altura, utilizando para ello la ecuación de Van Dorn:

$$\tau_{s,x} = \rho C_{VD} |V_{10}| V_{x,10} \quad \tau_{s,y} = \rho C_{VD} |V_{10}| V_{y,10}$$

En donde:

$V_{x,10}, V_{y,10}$ = unidades de velocidad del viento a 10 metros de altura

$|V_{10}|$ = módulo de la velocidad del viento a 10 m de altura

C_{VD} = coeficiente de arrastre superficial que se calcula en función de la velocidad del viento.

El C_{VD} comprendido en la ecuación anterior, se determina en función de la siguiente expresión:

$$|V_{10}| < 5.6 \frac{m}{s} \rightarrow C_{VD} = 1.2 \cdot 10^{-6}$$

$$|V_{10}| > 5.6 \frac{m}{s} \rightarrow C_{VD} = 1.2 \cdot 10^{-6} + 2.25 \cdot 10^{-6} \left(1 - \frac{5.6}{|V_{10}|}\right)^2$$

Todas las funciones y parámetros que aparecen en las ecuaciones hidrodinámicas (incluyendo el coeficiente de Manning y la velocidad del viento) pueden imponerse de forma variable tanto espacial como temporalmente.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1. Introducción

En este capítulo se muestran los resultados de la modelación del comportamiento del flujo durante la madrugada del 22 de octubre del año 2018, así como el análisis forense realizado en base a la metodología propuesta en el capítulo anterior.

4.2. Análisis de datos: modelación hidrológica

La información perteneciente a este apartado identifica la información necesaria para poder llevar a cabo el análisis de la modelación de la inundación y el posterior análisis forense, estableciendo la información en base a elementos cualitativos y cuantitativos, dependiendo de la naturaleza del mismo y su propósito para la presente investigación.

4.2.1. Selección de función de distribución

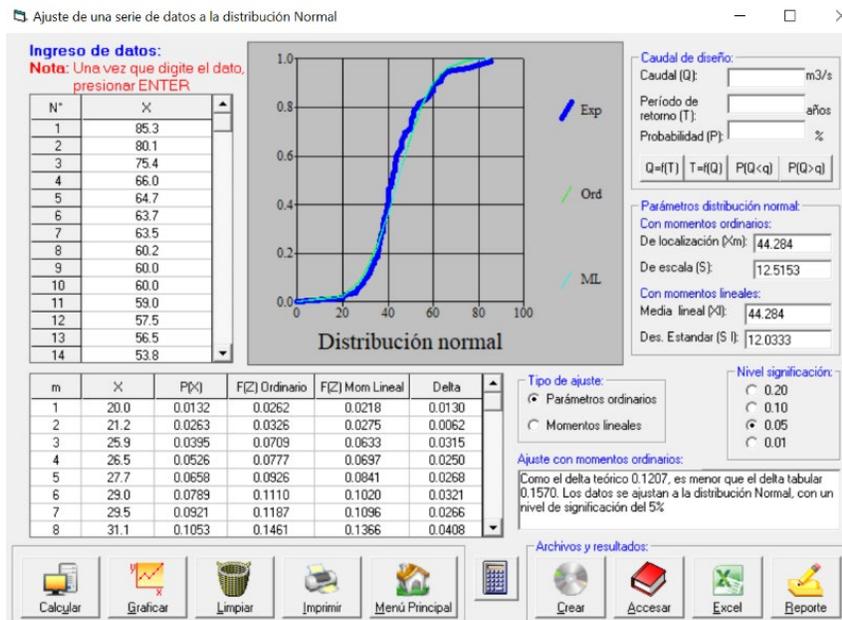


Figura 4.1. Ajuste de la serie de datos de precipitación máxima anual en el programa Hidroesta a una distribución Normal.

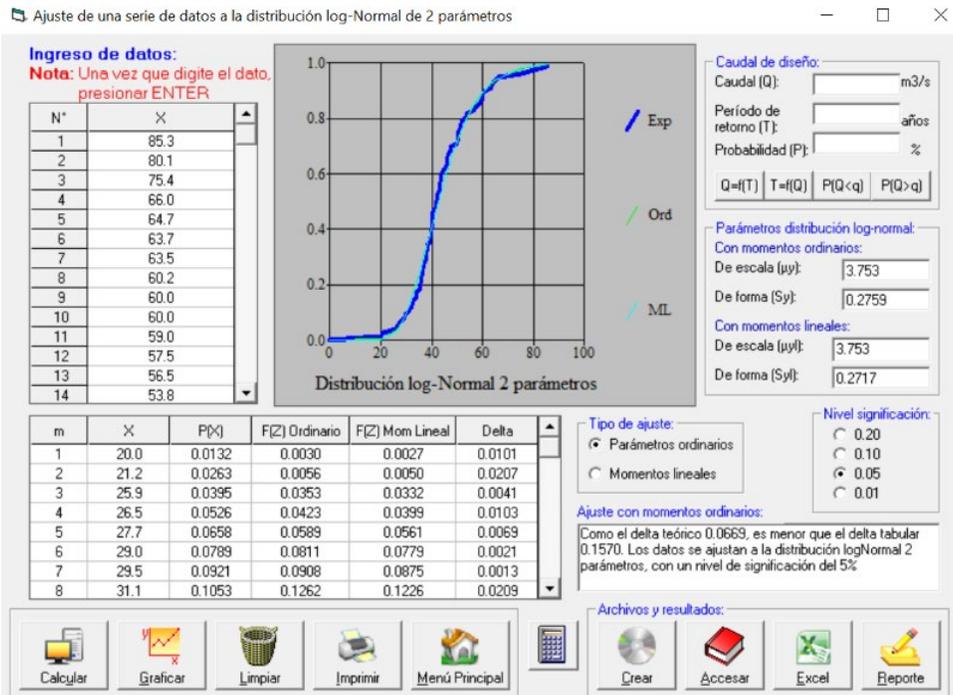


Figura 4.2. Ajuste de la serie de datos de precipitación máxima anual en el programa Hidroesta a una distribución Log-Normal de 2 parámetros.

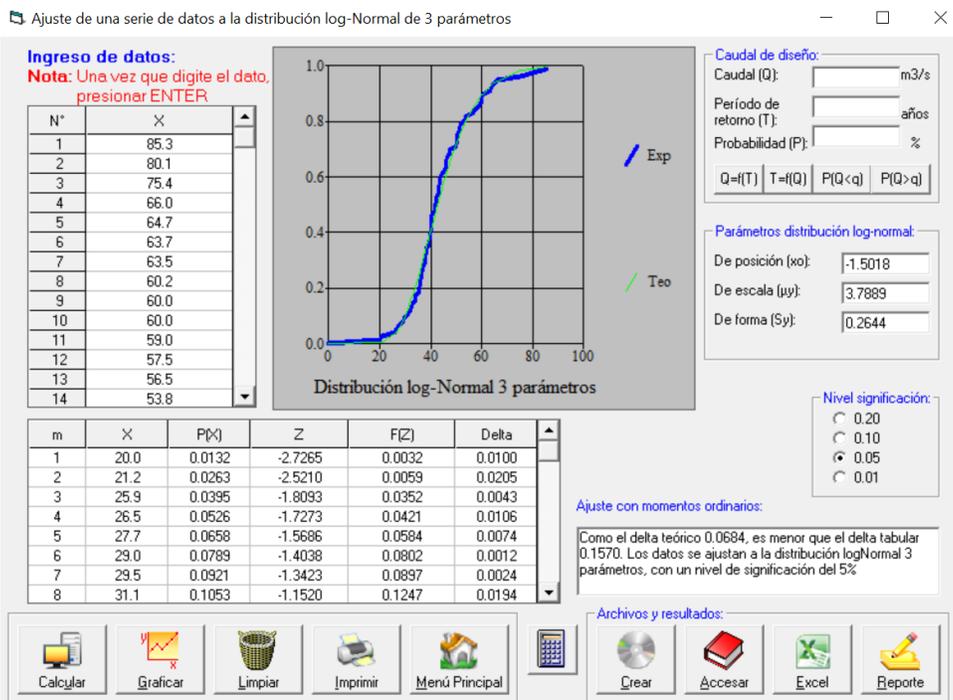


Figura 4.3. Ajuste de la serie de datos de precipitación máxima anual en el programa Hidroesta a una distribución Log-Normal de 3 parámetros.

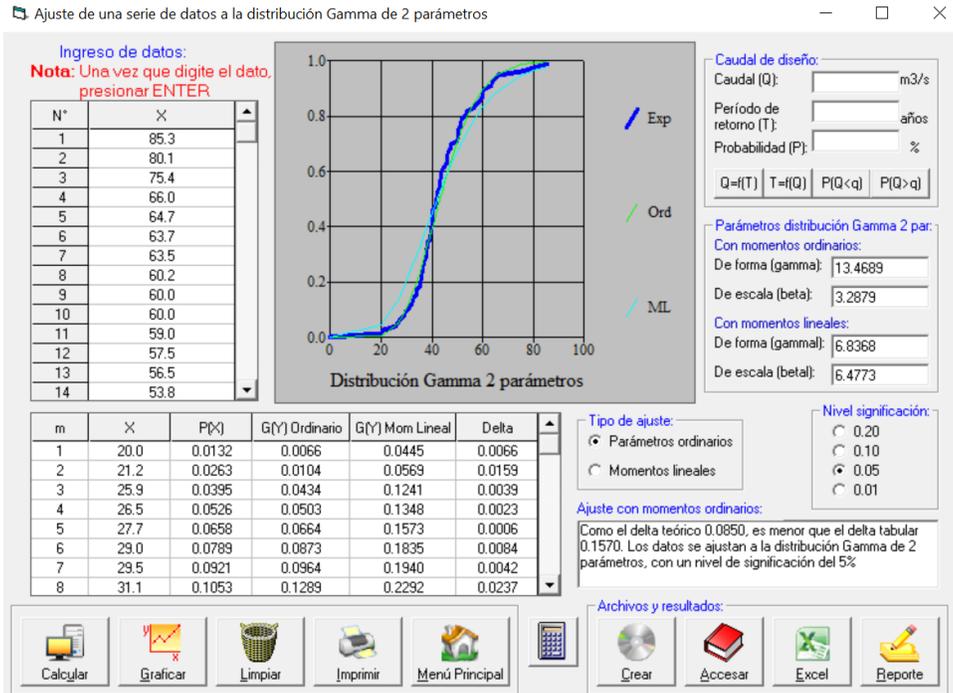


Figura 4.4. Ajuste de la serie de datos de precipitación máxima anual en el programa Hidroesta a una distribución Gamma de 2 parámetros.

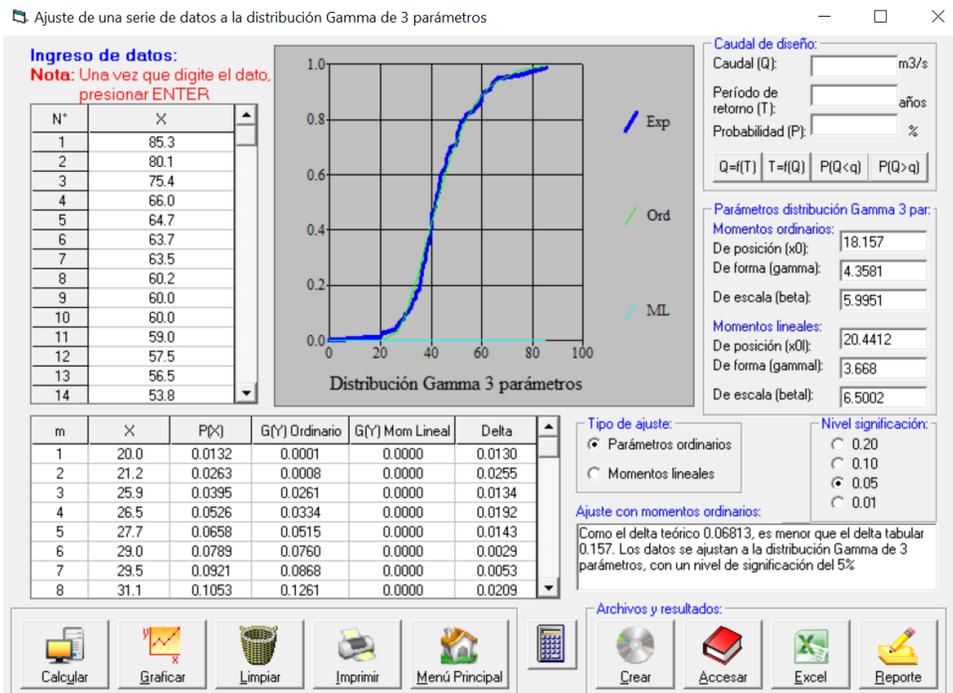


Figura 4.5. Ajuste de la serie de datos de precipitación máxima anual en el programa Hidroesta a una distribución Gamma de 3 parámetros.

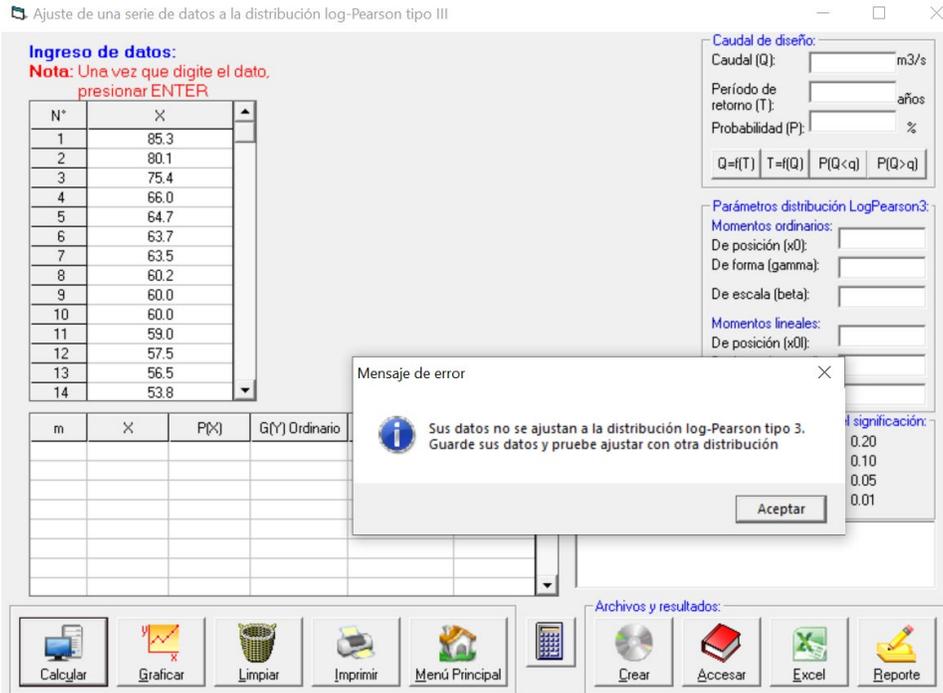


Figura 4.6. Ajuste de la serie de datos de precipitación máxima anual en el programa Hidroesta a una distribución Log-Pearson tipo III.

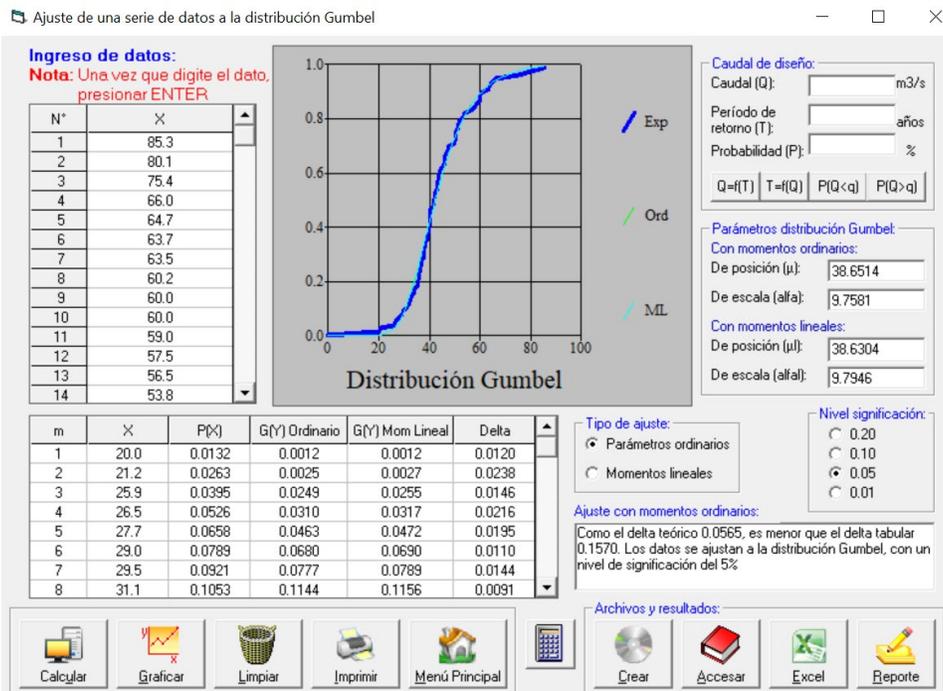


Figura 4.7. Ajuste de la serie de datos de precipitación máxima anual en el programa Hidroesta a una distribución Gumbel.

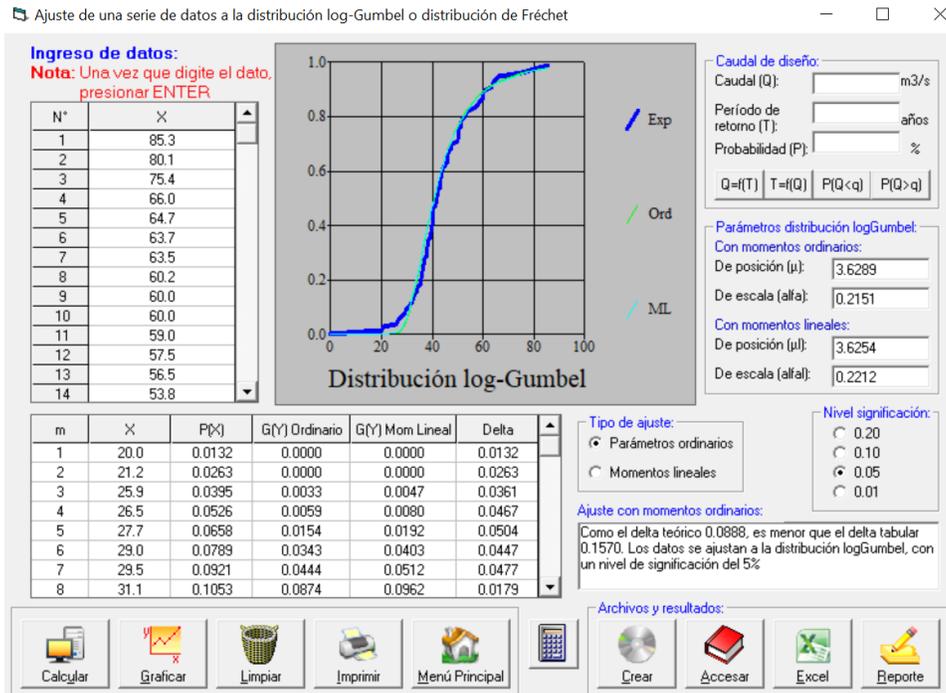


Figura 4.8. Ajuste de la serie de datos de precipitación máxima anual en el programa Hidroesta a una distribución Log-Gumbel.

En la Figura 4.6 se distingue que no se pudo llegar a un resultado de distribución Log-Pearson Tipo III ya que los datos ingresados no se ajustan a las condiciones bajo las cuales se manipula dicha distribución. En la siguiente tabla, se encuentran resumidos los resultados del valor de la prueba de bondad de ajuste por medio de Kolmogorov-Smirnov, donde se destaca la distribución con el menor delta teórico.

Tabla 4.1. Delta teórico (diferencia entre probabilidad observada y estimada) para cada una de las funciones de distribución de probabilidad usadas.

FDP	$ F_0(x_m) - F(x_m) $
Normal	0.1207
Log-Normal 2 parámetros	0.0669
Log-Normal 3 parámetros	0.0684
Gamma 2 parámetros	0.0850
Gamma 3 parámetros	0.06813
Pearson Tipo III	-
Gumbel	0.0565
Log-Gumbel	0.0888



Como la FDP Gumbel es en la que menor delta teórico se presentó, es con ella con la cual se obtienen las precipitaciones probables para diferentes periodos de retorno.

Tabla 4.2. Precipitaciones asignadas a diferentes periodos de retorno.

Periodo de retorno (años)	Precipitación (mm)
2	29.988
5	35.059
10	39.457
17.72	43.500
25	46.129
50	51.916
100	58.429

4.2.2. Curvas IDF para diferentes periodos de retorno

Aplicando el método de Dick Peschke para el cálculo de la precipitación una vez asignados los periodos de retorno, la precipitación para cada 24 horas y la duración de la tormenta, se muestra la tabla correspondiente a los resultados:

Tabla 4.3. Precipitaciones asignadas para cada duración de tormenta en función de la precipitación de 24 horas y el periodo de retorno.

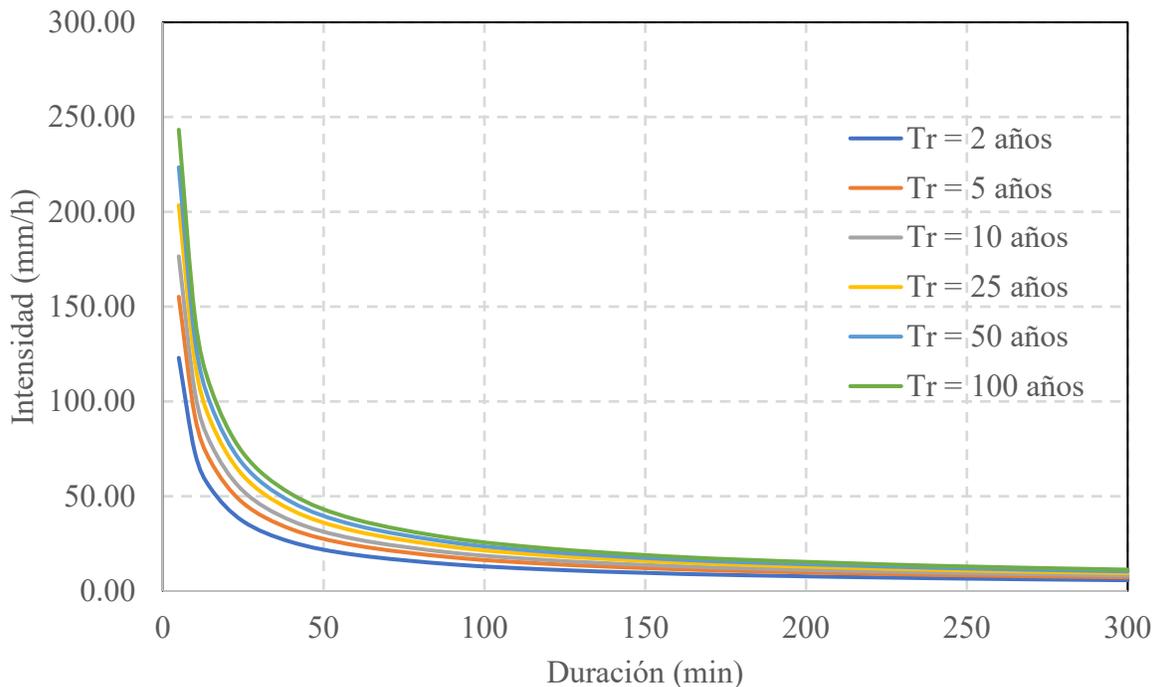
Precipitación 24 h (mm)	42.23	53.29	60.61	69.86	76.73	83.54
Duración	Precipitación (mm)					
5	10.25	12.94	14.71	16.96	18.63	20.28
10	12.19	15.38	17.50	20.17	22.15	24.12
15	13.49	17.02	19.36	22.32	24.51	26.69
25	15.33	19.34	22.00	25.36	27.85	30.32
40	17.24	21.76	24.74	28.52	31.32	34.11
60	19.08	24.08	27.38	31.56	34.67	37.74
90	21.12	26.65	30.31	34.93	38.37	41.77
120	22.69	28.63	32.56	37.53	41.23	44.88
150	23.99	30.27	34.43	39.69	43.59	47.46
180	25.11	31.69	36.04	41.54	45.62	49.67
240	26.98	34.05	38.73	44.64	49.03	53.38
300	28.53	36.00	40.95	47.20	51.84	56.44



Tabla 4.4. Intensidades asignadas para cada duración de tormenta en función de la precipitación de 24 horas y el periodo de retorno.

Periodo de retorno (años)	2	5	10	25	50	100
Duración	Intensidad (mm/h)					
5	123.01	155.23	176.55	203.50	223.51	243.35
10	73.14	92.30	104.98	121.00	132.90	144.70
15	53.97	68.10	77.45	89.27	98.05	106.75
25	36.79	46.42	52.80	60.86	66.85	72.78
40	25.86	32.63	37.12	42.78	46.99	51.16
60	19.08	24.08	27.38	31.56	34.67	37.74
90	14.08	17.76	20.20	23.29	25.58	27.85
120	11.34	14.32	16.28	18.77	20.61	22.44
150	9.60	12.11	13.77	15.88	17.44	18.98
180	8.37	10.56	12.01	13.85	15.21	16.56
240	6.75	8.51	9.68	11.16	12.26	13.34
300	5.71	7.20	8.19	9.44	10.37	11.29

Gráfica 4.1. Curva IDF para una duración de 5 horas de tormenta y diferentes periodos de retorno.



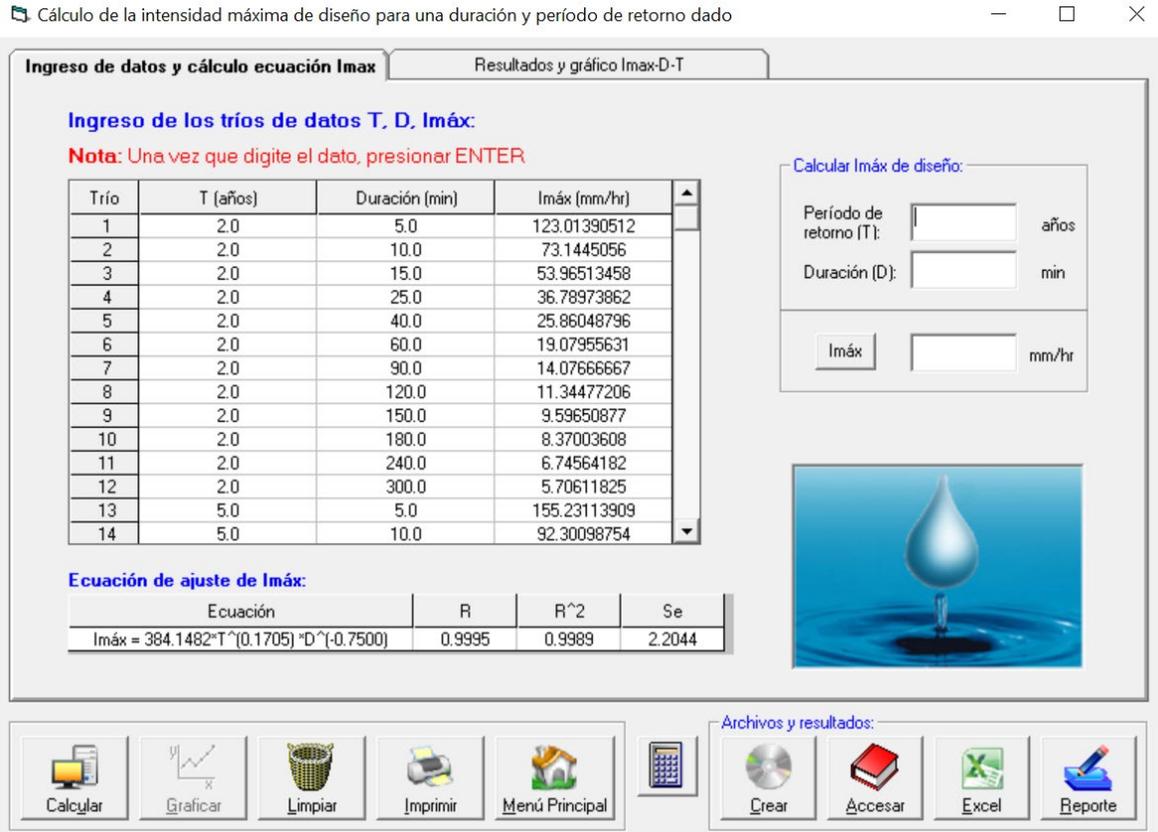


Figura 4.9. Cálculo de la ecuación intensidad máxima en Hidroesta.

4.2.3. Construcción de hietograma

Con lo presentado en la *Figura 4.9* se determina que las constantes de la ecuación de intensidad son las siguientes:

$$k = 384.1482$$

$$m = 0.1705$$

$$n = 0.7500$$

Por lo que la ecuación de la intensidad se encuentra compuesta de esta forma:

$$I = \frac{384.1482 T r^{0.1705}}{D^{0.7500}}$$

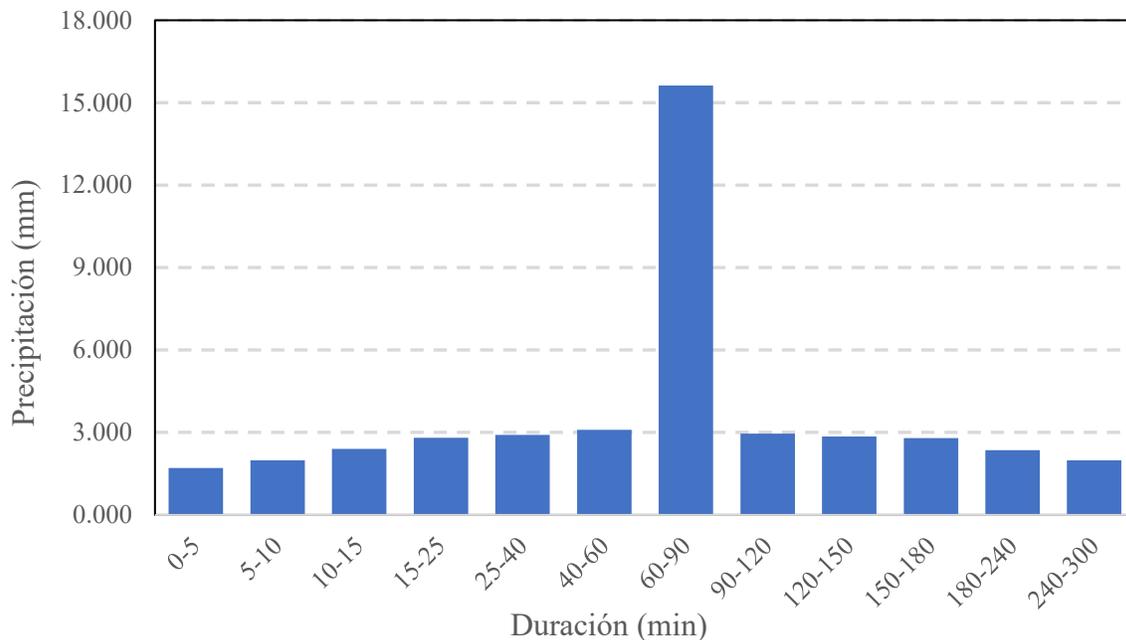


La cual, al ser evaluada para un periodo de retorno equivalente a la precipitación registrada el día 22 de octubre, resulta en la siguiente tabla y gráfica.

Tabla 4.5. Precipitaciones a partir de las curvas IDF para un $Tr = 17.72$ años.

Duración (min)	Intensidad (mm/hra)	Precipitación acumulada (mm)	Precipitación diferenciada (mm)	Precipitación ordenada (mm)
5	187.557	15.630	15.630	1.706
10	111.522	18.587	2.957	1.985
15	82.280	20.570	1.983	2.401
25	56.093	23.372	2.802	2.804
40	39.429	26.286	2.914	2.914
60	29.090	29.090	2.804	3.103
90	21.462	32.194	3.103	15.630
120	17.297	34.594	2.401	2.957
150	14.632	36.579	1.985	2.855
180	12.762	38.285	1.706	2.802
240	10.285	41.140	2.855	2.360
300	8.700	43.500	2.360	1.983
			43.500	

Gráfica 4.2. Hietograma para un $Tr = 17.72$ años.





4.2.4. Modelación hidrológica

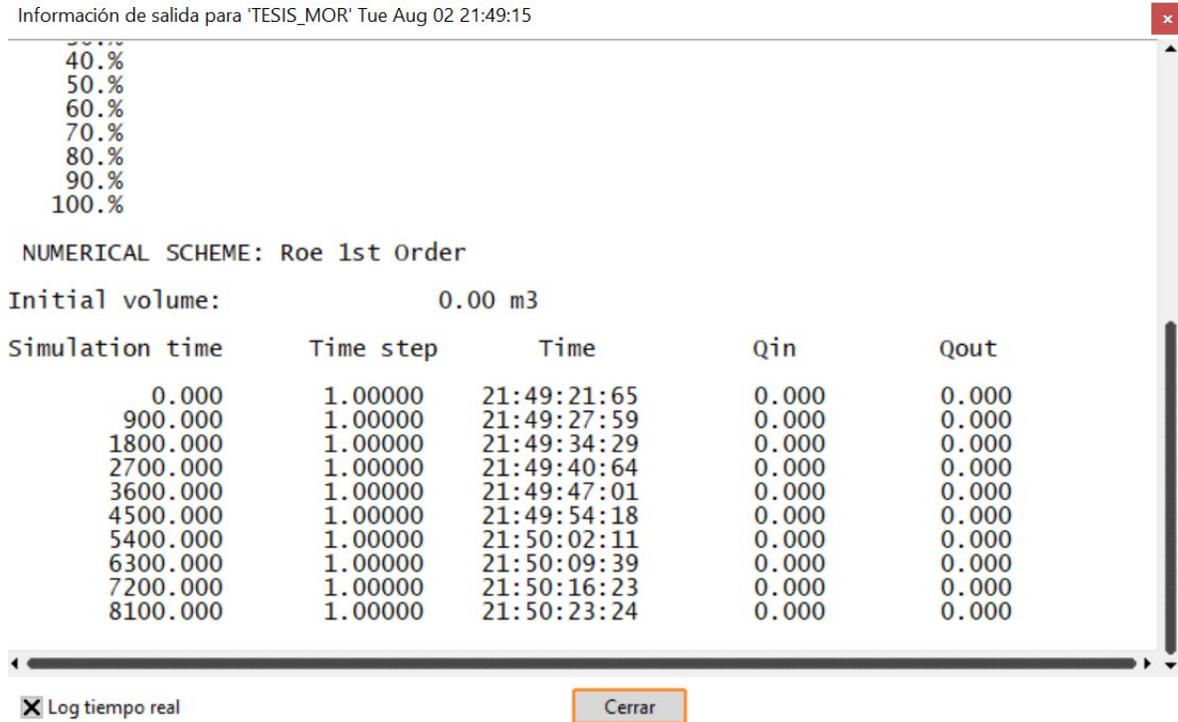


Figura 3.50. Figura 4.10. Ventana del procesamiento de datos para la modelación, donde ejecuta el comportamiento del flujo desde un tiempo de 0 segundos hasta uno de 18,000 segundos, equivalentes a las 5 horas de duración de la tormenta.

Para la modelación hidrológica, se incluyen en el apartado el comportamiento del nivel del agua estimado por el programa en cuatro de las avenidas más importantes de la zona de estudio: Camelinas, Ventura Puente, Solidaridad y Boulevard García de León en los puntos más conflictivos de las mismas. Los resultados presentados corresponden al periodo de retorno estimado equivalente a la precipitación acaecida el día 22 de octubre, que fue de 43.5 mm, siendo de 17.72 años. Por otra parte, las imágenes presentadas de la modelación extraídas del programa IBER corresponden a ocho tiempos de modelación; partiendo del hecho que se modelaron siete horas donde cinco de ellas forman parte de la duración de la tormenta mientras que las otras dos complementarias se tomaron para observar más detalladamente el comportamiento del flujo en la cuenca, siendo un total de ocho imágenes por periodo de retorno.

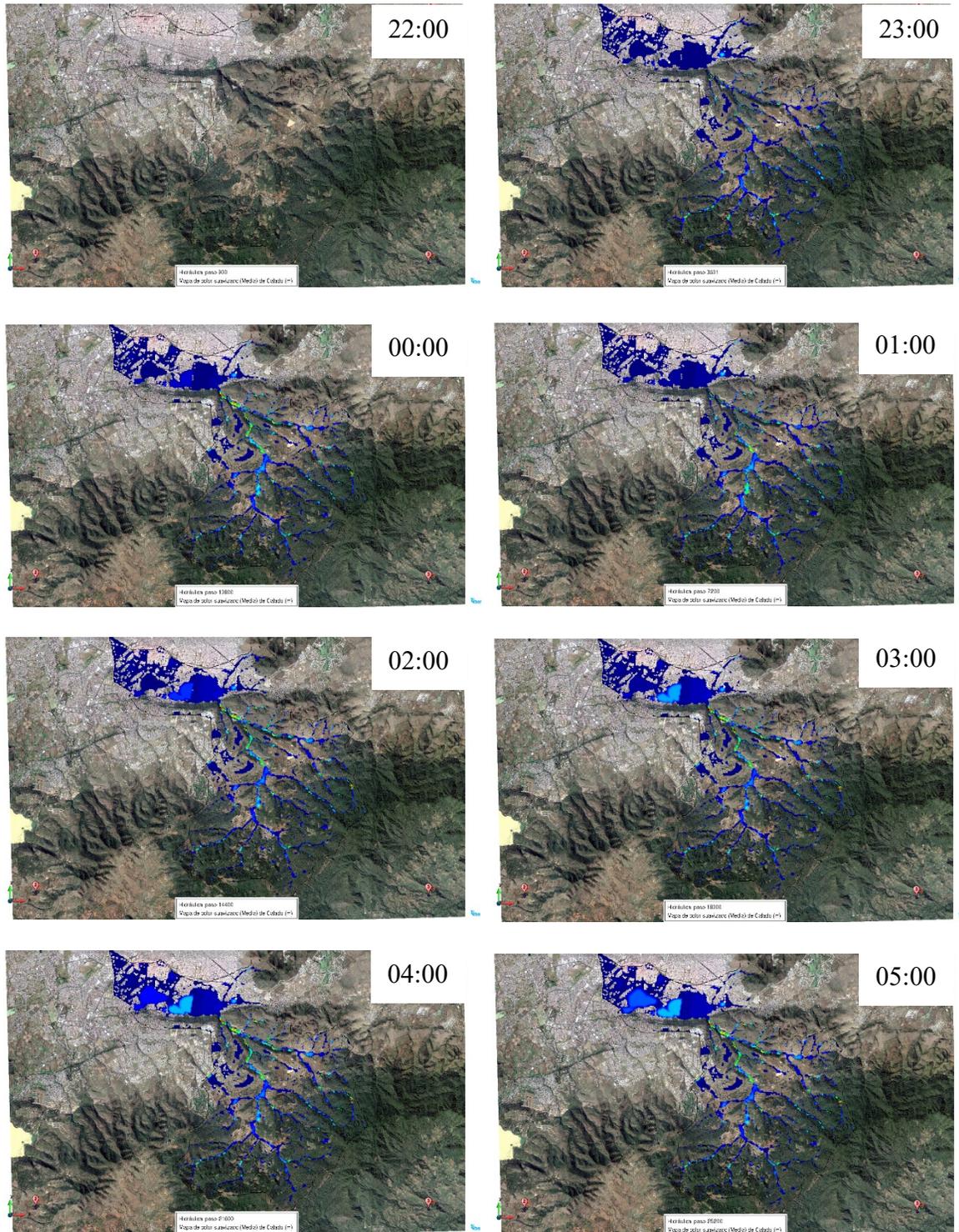


Figura 4.11. Modelación de la inundación para un $Tr = 17.72$ años en la microcuenca del Río Chiquito desde las 22:00 del 21 de octubre hasta las 05:00 del 22 de octubre.



Tabla 4.6. Flujo con el paso del tiempo con un $Tr = 17.72$ en Av. Ventura Puente.

Tiempo (s)	Tirante (m)						
900	0.0000	7200	0.1372	13500	0.2142	19800	0.2766
1800	0.0000	8101	0.1476	14400	0.2252	20700	0.2829
2700	0.0272	9000	0.1594	15300	0.2346	21600	0.2888
3600	0.0523	9900	0.1705	16200	0.2440	22500	0.2948
4500	0.0752	10800	0.1819	17100	0.2530	23400	0.3008
5400	0.0984	11700	0.1919	18000	0.2617	24300	0.3061
6300	0.1182	12600	0.2032	18900	0.2704	25200	0.3126

Tabla 4.7. Flujo con el paso del tiempo con un $Tr = 17.72$ en Blvd. García de León.

Tiempo (s)	Tirante (m)						
900	0.0000	7200	0.1059	13500	0.3047	19800	0.3037
1800	0.0000	8100	0.1165	14400	0.3162	20700	0.3004
2700	0.0149	9000	0.1177	15300	0.3152	21600	0.2953
3600	0.0204	9900	0.1168	16200	0.3174	22500	0.2959
4500	0.0261	10800	0.1147	17100	0.3123	23400	0.2968
5400	0.0390	11700	0.1360	18000	0.3085	24300	0.2915
6301	0.0723	12600	0.2577	18900	0.3107	25200	0.2915

Tabla 4.8. Flujo con el paso del tiempo con un $Tr = 17.72$ en Av. Camelinas.

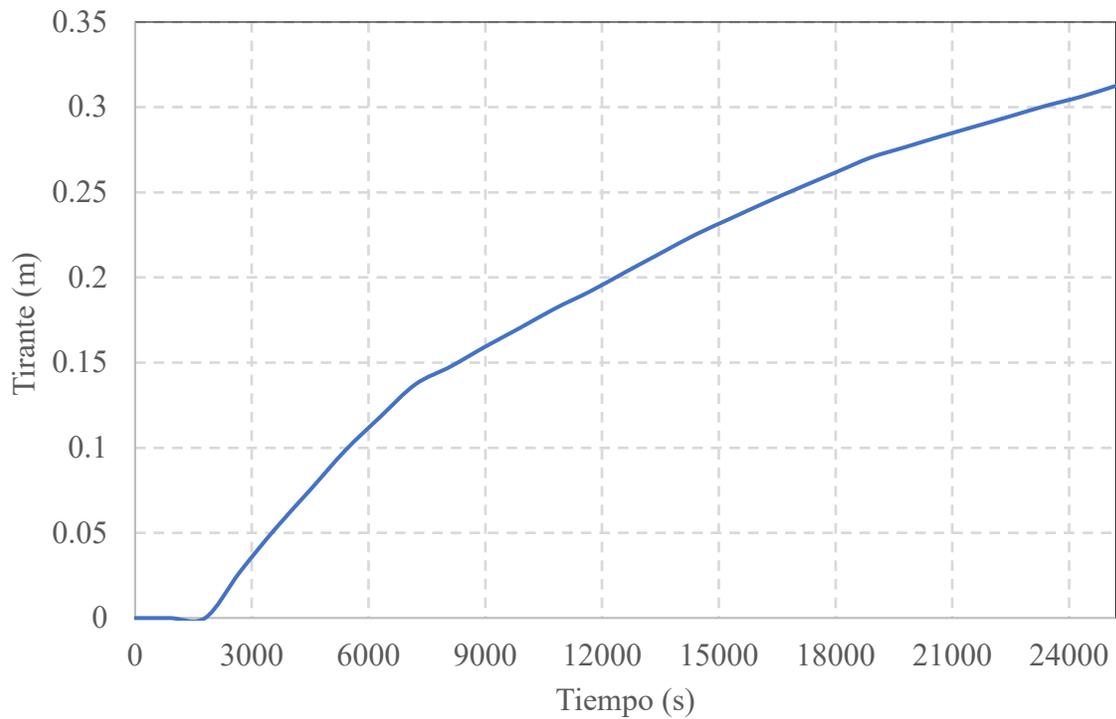
Tiempo (s)	Tirante (m)						
900	0.0000	7200	0.0971	13500	0.2803	19800	0.2847
1800	0.0000	8101	0.1061	14400	0.2921	20700	0.2812
2700	0.0510	9000	0.1088	15300	0.2907	21600	0.2760
3600	0.0524	9900	0.1074	16200	0.2926	22500	0.2783
4500	0.0503	10800	0.1038	17100	0.2926	23400	0.2780
5400	0.0602	11700	0.1451	18000	0.2906	24300	0.2764
6300	0.0802	12600	0.2383	18900	0.2901	25200	0.2745

Tabla 4.9. Flujo con el paso del tiempo con un $Tr = 17.72$ en Av. Solidaridad.

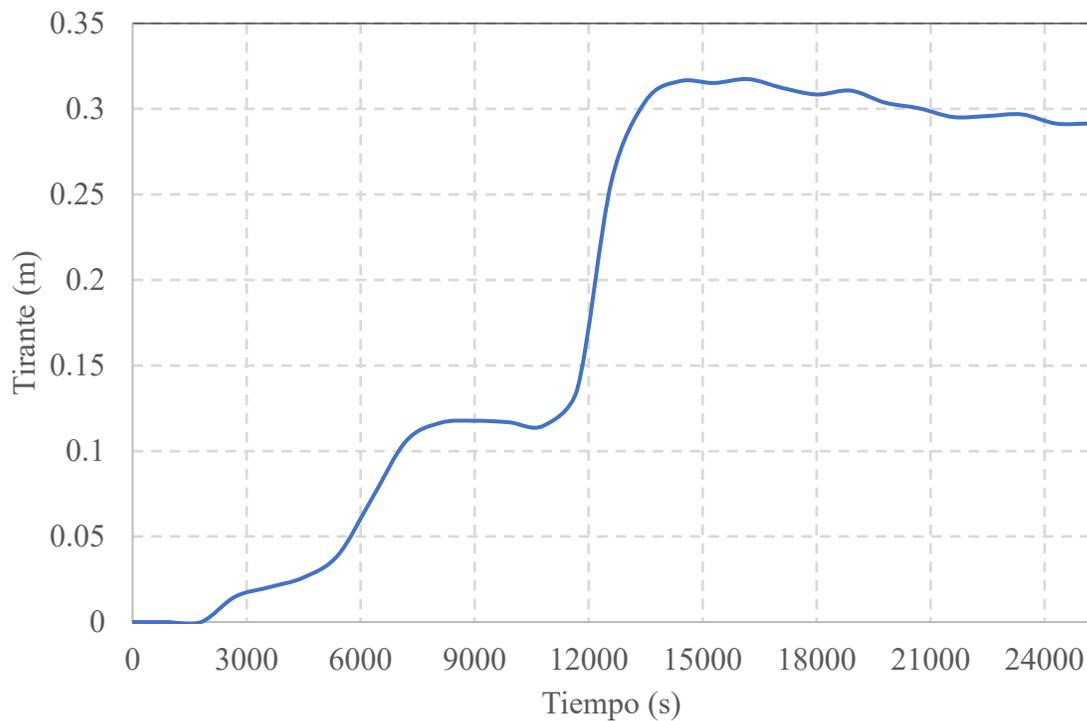
Tiempo (s)	Tirante (m)						
900	0.0000	7200	0.1176	13500	0.3274	19800	0.3215
1800	0.0000	8101	0.1274	14400	0.3357	20700	0.3184
2700	0.0156	9000	0.1288	15300	0.3358	21600	0.3124
3600	0.0324	9900	0.1277	16200	0.3351	22500	0.3148
4500	0.0426	10800	0.1246	17100	0.3311	23400	0.3141
5400	0.0567	11700	0.1657	18000	0.3262	24300	0.3116
6300	0.0913	12600	0.2796	18900	0.3284	25200	0.3099



Gráfica 4.3. Comportamiento del flujo con un $Tr = 17.72$ en Av. Ventura Puente.

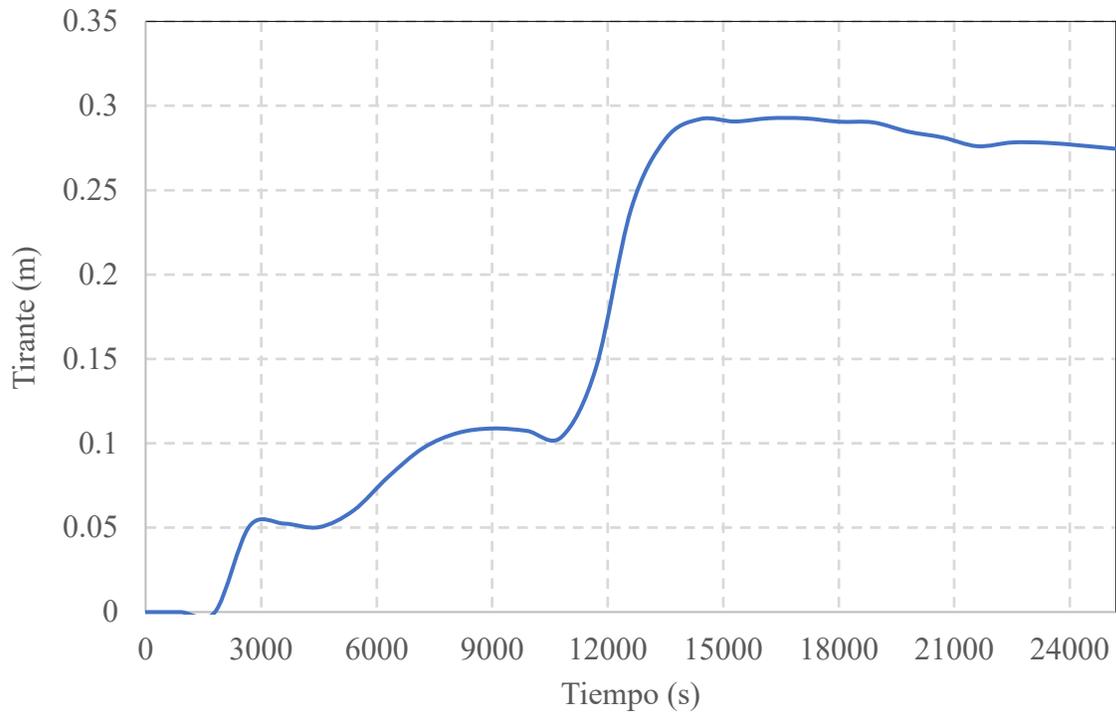


Gráfica 4.4. Comportamiento del flujo con un $Tr = 17.72$ en Blvd. García de León.

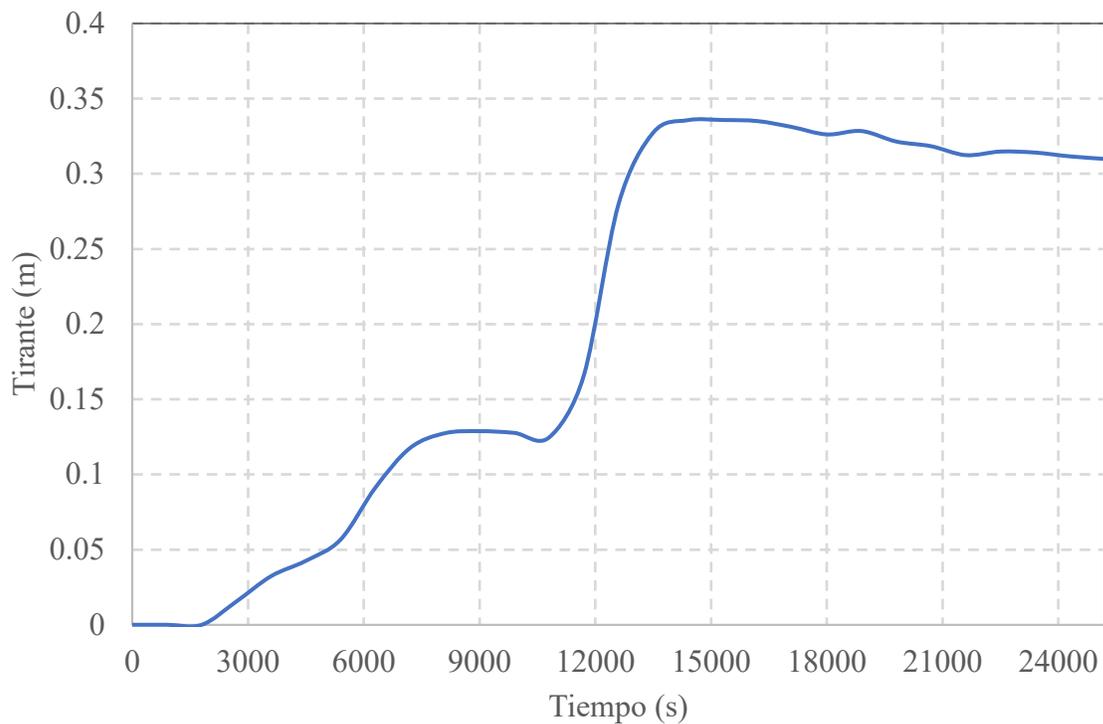




Gráfica 4.5. Comportamiento del flujo con un $Tr = 17.72$ en Av. Camelinas.



Gráfica 4.6. Comportamiento del flujo con un $Tr = 17.72$ en Av. Solidaridad.





4.3. Análisis forense

En el *Capítulo II*, se describe el procesamiento propuesto para poder llevar a cabo el análisis forense tras los acontecimientos generados por una inundación, mismo que se retoma en el presente apartado, mostrando los resultados propio análisis, abarcando la recopilación de la información previa al desastre y haciendo una evaluación en función de lo establecido oficialmente en medios de comunicación y en diagnósticos establecidos por instituciones públicas, así como también corroborando los resultados obtenidos en la modelación hidrológica, presentando el contexto general y los análisis hidrometeorológico, hidráulico, integrador y de los sectores sociales.

4.3.1. Crónica general del huracán Willa

En la *Metodología* se incluye el contexto tanto general como particular de la zona de estudio, por lo que, ya establecida la región afectada y analizada numéricamente, se presenta entonces la crónica del fenómeno establecida por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2018):

El día 20 de octubre de 2018 a la 4:00 horas se formó la Depresión Tropical (DT) No. 24 de la temporada 2018 de ciclones tropicales en el Océano Pacífico; se inició a 390 km al sur-suroeste de Punta San Telmo, Mich., y a 440 km al sur de Manzanillo, Col., con vientos máximos sostenidos de 55 km/h, rachas de 75 km/h y desplazamiento hacia el oeste a 15 km/h. (La DT 24-E se formó a partir de una Baja Presión con potencial para desarrollo ciclónico a la que se dio seguimiento del 16 al 20 de octubre). A las 10:00 horas del mismo día 20, cuando se encontraba a 490 km al sur-suroeste de Manzanillo, Col., la DT 24-E se desarrolló a tormenta tropical con el nombre de “WILLA”, momento en el que presentó vientos máximos sostenidos de 65 km/h con rachas de 85 km/h.

La Tormenta Tropical “WILLA” siguió fortaleciéndose sobre las aguas del Océano Pacífico mientras modificaba el rumbo de desplazamiento hacia el noroeste por lo que el 21 de octubre a las 04:00 horas se intensificó a huracán con vientos de 140 km/h y rachas de



165 km/h, a una distancia de 390 km al suroeste de Manzanillo, Col. Al encontrar condiciones favorables el Huracán “WILLA” aumentó su fuerza por lo que seis horas después se intensificó a huracán de categoría 2 en la escala Saffir-Simpson con vientos de 155 km/h y rachas de 195 km/h a 365 km al sur-suroeste de Playa Perula, Jal., fuerza que siguió aumentando pues a las 16:00 horas, cuando se encontraba a 345 km al suroeste de Playa Perula, Jal., se intensificó a huracán de categoría 3 con vientos máximos sostenidos de 185 km/h y rachas de 220 km/h. En este rápido proceso de intensificación, el día 21 a las 19:00 horas “WILLA” se ubicó a 315 km al suroeste de Playa Perula, Jal., donde alcanzó categoría 4, con vientos de 220 km/h y rachas de 250 km/h.

Sobre el Océano Pacífico, en aguas con temperatura del mar favorable de 29° y 30°C, con vorticidad negativa y cizalladura menor a 35 km/h, al occidente de Jalisco, el día 22 de octubre a las 10:00 horas “WILLA” pudo alcanzar intensidad de huracán categoría 5 en la escala Saffir-Simpson con vientos máximos sostenidos de 260 km/h y rachas de 315 km/h, sin embargo, al enfilar hacia el noreste y entrar en un medio ambiente de condiciones atmosféricas menos favorables, (si bien la temperatura del mar se mantenía en los 29°C, la fuerte cizalladura de 35 a 60 km/h que dominaba la región en el suroeste de las Islas Marías, lo empezaron a afectar y así, a las 16:00 horas del día 22 de octubre, se degradó a categoría 4 con vientos máximos sostenidos de 250 km/h y rachas de 305 km/h.

Durante la noche, “WILLA” siguió perdiendo fuerza por lo que a las 10:00 horas del día 23, cuando se encontraba a 55 km al oeste-suroeste de las Islas Marías, se degradó a huracán de categoría 3 con vientos máximos sostenidos de 205 km/h y rachas de 250 km/h. A las 13:00 horas, el ojo del huracán se ubicó sobre la Isla San Juanito (en el norte de las Islas Marías), con vientos máximos sostenidos de 195 km/h y rachas de 240 km/h, fuerza con la que se mantuvo durante la tarde y hasta su llegada a la costa sur de Sinaloa.

Después de tocar tierra como huracán de categoría 3, “WILLA” siguió hacia el noreste guiado por la circulación occidental del sistema de alta presión que dominaba el centro del país y avanzó sobre la escarpada Sierra Madre Occidental lo que debilitó la circulación de bajo nivel y junto con la fuerte cizalladura en niveles medios, favoreció su



rápida degradación por lo que a las 01:00 horas del día 24, se encontraba a 20 km al sureste de la Ciudad de Durango, Dgo., como tormenta tropical con vientos máximos sostenidos de 70 km/h y rachas de 90 km/h. Tres horas después, se encontraba en el oriente del estado, donde se debilitó a depresión tropical con vientos de 55 km/h y rachas de 75 km/h a 120 km al este-noreste de la ciudad de Durango, Dgo. Por último, a las 10:00 horas del día 24, “WILLA” se encontraba a 50 km al oeste de Saltillo, Coah., como depresión tropical en proceso de disipación con vientos máximos sostenidos de 35 km/h y rachas de 55 km/h, por lo que se dio por terminado su seguimiento.

4.3.2. Análisis hidrometeorológico

Los ciclones tropicales son los únicos desastres naturales a los cuales se les asigna un nombre, estos nombres se conocen mucho antes de que ocurran estos eventos y se conozcan sus posibles efectos; los que no sólo serán daños y pérdidas, ya también pueden ser benéficos para el ecosistema pues las lluvias que llevan consigo ayuda en zonas de sequía y los vientos a la renovación de zonas naturales, al derribar árboles enfermos y débiles, así como restaurar áreas obstruidas para el flujo de agua. Todas las costas de México están sujetas a huracanes o tormentas tropicales, las que inicia en mayo en el océano Pacífico, y en junio en el océano Atlántico. En ambos océanos la actividad concluye a finales de noviembre. En los últimos 30 años, se ha incrementado la aparición e intensidad de los ciclones (SEDERMA, 2018).

Es importante establecer un análisis hidrometeorológico y/o hidrológico que permita conocer más el génesis de la tormenta. La siguiente información general se encuentra establecida por el Centro Nacional de Huracanes de Estados Unidos (NHC por sus siglas en inglés) referente al estudio del huracán (Brennan, 2019).



4.3.2.1. Génesis de la tormenta

La onda tropical que posteriormente dio lugar al huracán Willa se desplazó frente a la costa occidental de África el 02 de octubre del año 2018 a una latitud 5°N, siendo esta considerada una ligeramente baja. Inicialmente, la onda tropical mostró algunos signos de organización, mismos que disminuyeron considerablemente al día siguiente. Algunas ráfagas intermitentes de convección se desarrollaron cerca de un centro de circulación bien definido entre los días 04 y 06 de octubre, pero toda la convección fue suprimida por la fuente de cizalladura vertical de la capa profunda del suroeste y del oeste para el 08 de octubre.

La onda se movió rápidamente hacia el oeste a velocidades de avance que oscilaban los 15-20 kt (nudos) durante los siguientes días hasta llegar a Centroamérica el día 15 de octubre, cruzando hacia el lado del Pacífico Norte el 16 de octubre con un aumento significativo de la convección profunda a lo largo del eje de la onda el 17 de octubre, cuando la perturbación se ubicó alrededor del sur del Golfo de Tehuantepec. La intensa actividad de las tormentas eléctricas contribuyó a la formación de un amplio sistema de baja presión en las primeras horas del 18 de octubre, a aproximadamente 250 millas náuticas al sureste de la ciudad de Acapulco, en el estado de Guerrero. Durante las siguientes 36 horas, la baja continuó su movimiento hacia el oeste hasta que empezó a definirse cada vez más, hasta que siendo entre medianoche y las 04:00 de la mañana del día 20 de octubre que se habría formado y organizado lo suficiente como para que la perturbación fuera denominada oficialmente como depresión tropical, ya cuando se encontraba a unas 230 millas náuticas al sur de Manzanillo, Colima.

4.3.2.2. Vientos y presión

La intensidad máxima del huracán Willa de 140 kt a las 01:00 del día 22 de octubre se basa en las estimaciones de intensidad del UW-CUMSS SATCON y las estimaciones de intensidad de los satélites ADT de T7.0/140 kt, que coincidió con un diámetro de ojo



relativamente pequeño, siendo éste de entre 5 y 10 millas náuticas. La presión mínima de 925 mb se basa en la relación presión-viento del KZC.

Un avión de reconocimiento de la Reserva de la Fuerza Aérea de Estados Unidos realizó una misión en el ojo del huracán Willa entre las 18:00 y las 20:00 del día 23 de octubre indicó una presión central de 963 mb y velocidades de viento de superficie de aproximadamente 100 kt, manteniéndose esa intensidad hasta la llegada a tierra.

Se recoge también que el día anterior al diagnóstico de la presión y la velocidad del viento provocada por el huracán, se planteó el viaje de reconocimiento se programó dicha misión, misma que fue abortada después de que la aeronave recibió el impacto de un rayo, inutilizando el radar de navegación a través de la intensa región del núcleo interno del huracán, momento en el cual el huracán era categoría 4.

El ojo del huracán se desplazó por las dos islas más occidentales del archipiélago de las Islas Marías, con la pared ocular oriental pasando por encima de una EMA perteneciente a la Marina Mexicana en la Isla María Madre, pertenecientes al estado de Nayarit en las coordenadas 21.63°N, 106.54°W a una elevación de 37 metros a las 21:45 del día 23 de octubre. En ese momento se determinó una velocidad media de 15 minutos de 77 kt, así como una ráfaga de 97 kt, lo que permitió obtener una lectura de velocidad del viento equivalente de un minuto de aproximadamente 85 kt a una altura de 10 msnm. Las observaciones del aeropuerto de la Isla María Madre y el reconocimiento aéreo indican que Willa produjo al menos vientos sostenidos de categoría 2 en esas dos islas, siendo probable que se hayan producido vientos sostenidos de categoría 1 en el resto del archipiélago.

No se cuenta con las velocidades del viento con un mayor índice de proximidad en la zona de estudio ni en la ciudad de Morelia, ya que las EMC con las que se cuenta no son capaces de determinar esta variable.

Posiblemente el contacto con aguas frías, provocó su debilitamiento, así como su cambio de dirección hacia el noreste, dirigiéndose hacia la Isla San Juanito, en el archipiélago de las Islas Marías; tocando tierra, como un huracán de categoría 3, la noche del 23 de

octubre, en Isla del Bosque, a 15 km al sur de Escuinapa, Sinaloa, con vientos máximos sostenidos de 195 kilómetros por hora (km/h) y rachas de 240 km/h; disipándose el 24 de octubre, aproximadamente a 50 km al oeste de Saltillo, Coahuila, sus remanentes alcanzaron el sureste Estados Unidos (SEDERMA, 2018).

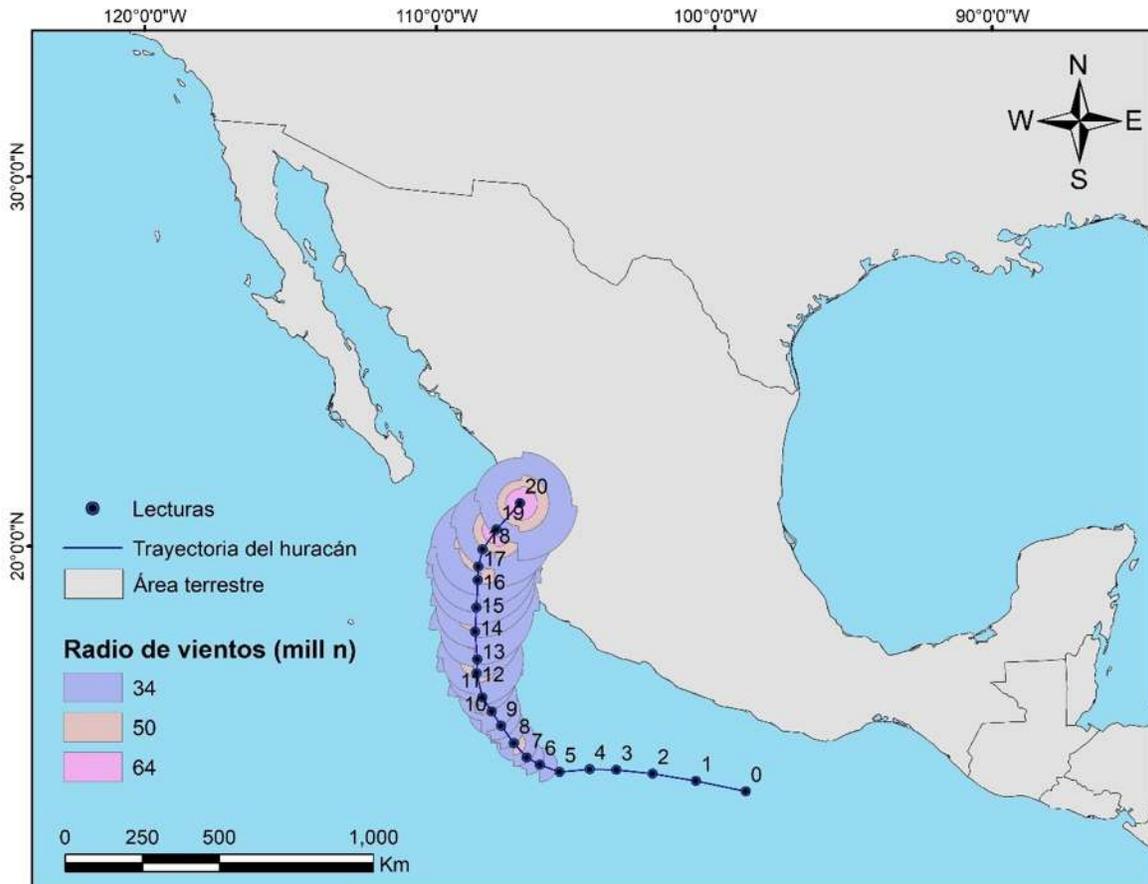


Figura 4.12. Representación del comportamiento del huracán Willa. Fuente: elaboración propia con datos del NHC.

4.3.2.3. Mareas

Como la ciudad de Morelia no es costera, la variable de las mareas no influye en el análisis forense, no obstante, de manera general tampoco se dispone de alturas oficiales de mareas de tempestad y los únicos reportes que se tienen fueron los establecidos por la CONAGUA y el SMN, mismos que fueron preliminares y no presentaron afectaciones en



zonas urbanas dentro de los registros oficiales. El equipo de tormentas de Estados Unidos denominado *iCyclone*, así como medios de comunicación nacionales e internacionales indicaron que una marea significativa junto con grandes olas en la región de la Isla del Bosque y Teacapán, en Sonora, rompieron el malecón de 2.50 metros.

4.3.2.4. Lluvia

Además de la información de la lluvia registrada durante el periodo de mayor intensidad de la tormenta y que sirvió para la realización de la modelación del flujo en la zona de estudio (*Apartado 3.2.3*), de forma, el reporte generalizado de la lluvia dio como reconocimiento una intensidad que causó importantes inundaciones fluviales en los estados mexicanos de Colima, Durango, Jalisco, Michoacán, Nayarit y Sinaloa.

En la *Figura 4.12*, se muestra la representación de la trayectoria del huracán Willa, indicando las lecturas establecidas por la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés), que es una institución estadounidense que administra también la NHC. Dichas lecturas se encuentran resumidas en la *Tabla 4.1*. Por otra parte, también se incluye el radio registrado de la velocidad del viento, en millas náuticas.

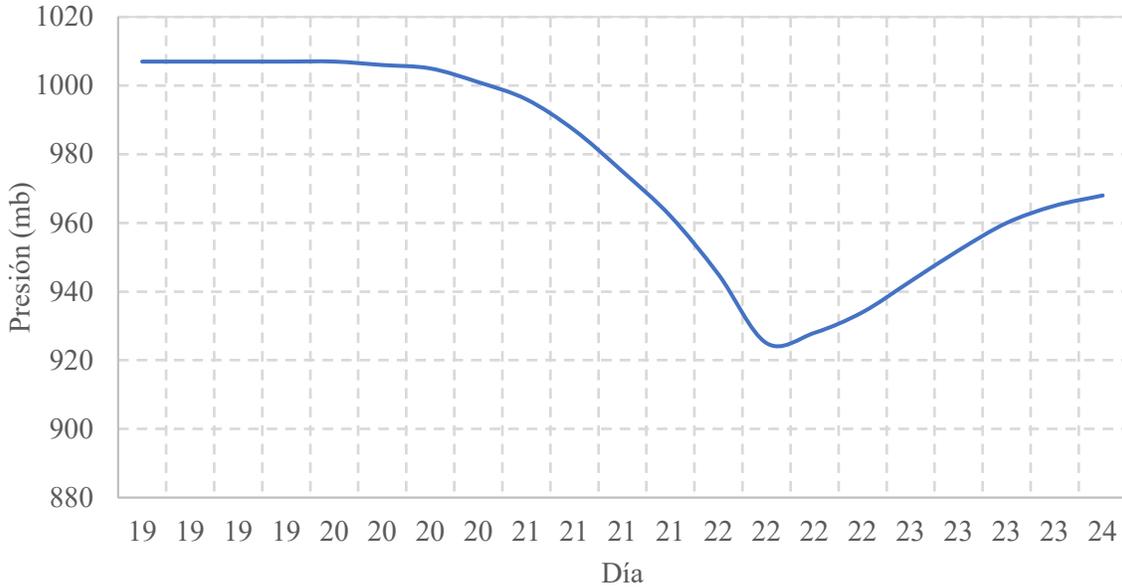


Tabla 4.10. Tabla resumen del análisis hidrometeorológico, simplificando las características generales del huracán Willa antes de llegar a las costas de Sinaloa.

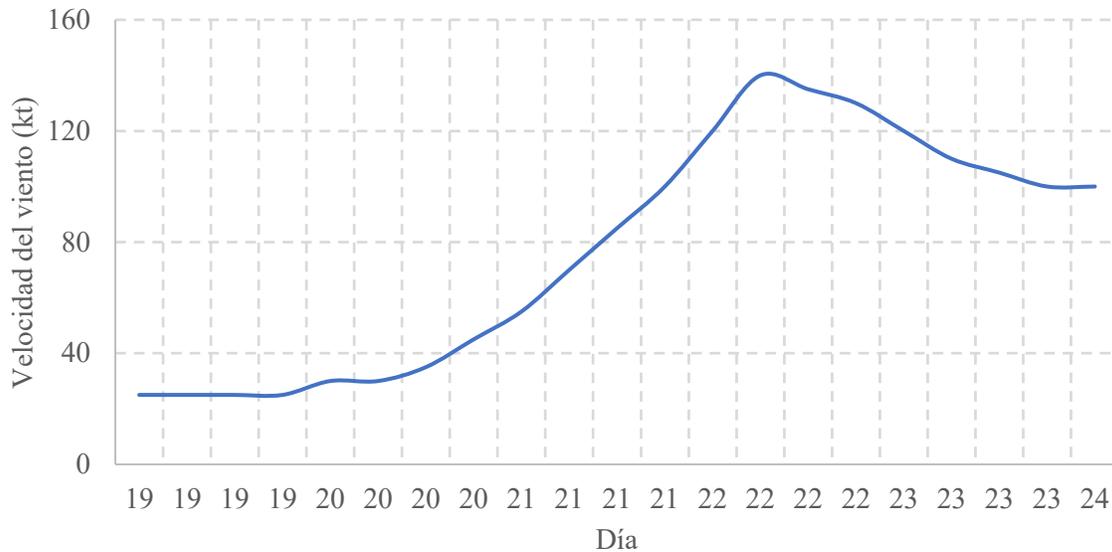
Dato	Nombre	Día	Hora (UTC)	Presión media (mb)	Tipo de tormenta	Velocidad del viento (kt)	Categoría	Latitud	Longitud
0	Invest	19	0	1007	Baja temperatura	25	0	14.2	-98.9
1	Invest	19	600	1007	Baja temperatura	25	0	14.5	-100.4
2	Invest	19	1200	1007	Baja temperatura	25	0	14.7	-101.7
3	Invest	19	1800	1007	Baja temperatura	25	0	14.8	-102.8
4	DT-24	20	0	1007	Depresión tropical	30	0	14.8	-103.6
5	DT-24	20	600	1006	Depresión tropical	30	0	14.7	-104.5
6	DT-24	20	1200	1005	Tormenta tropical	35	0	14.9	-105.1
7	Willa	20	1800	1001	Tormenta tropical	45	0	15.1	-105.5
8	Willa	21	0	996	Tormenta tropical	55	0	15.5	-105.9
9	Willa	21	600	987	Huracán	70	1	16	-106.3
10	Willa	21	1200	975	Huracán	85	2	16.4	-106.6
11	Willa	21	1800	962	Huracán	100	3	16.8	-106.9
12	Willa	22	0	945	Huracán	120	4	17.5	-107.1
13	Willa	22	600	925	Huracán	140	5	17.9	-107.1
14	Willa	22	1200	928	Huracán	135	4	18.7	-107.2
15	Willa	22	1800	934	Huracán	130	4	19.4	-107.2
16	Willa	23	0	943	Huracán	120	4	20.2	-107.2
17	Willa	23	600	952	Huracán	110	3	20.6	-107.2
18	Willa	23	1200	960	Huracán	105	3	21.1	-107.1



Dato	Nombre	Día	Hora (UTC)	Presión media (mb)	Tipo de tormenta	Velocidad del viento (kt)	Categoría	Latitud	Longitud
19	Willa	23	1800	965	Huracán	100	3	21.7	-106.7
20	Willa	24	0	968	Huracán	100	3	22.5	-106



Gráfica 4.7. La presión registrada por la EMA de Isla María Madre durante el paso de Willa.



Gráfica 4.8. Velocidad del viento registrada por la EMA de Isla María Madre durante el paso de Willa.



Como se puede apreciar, la lectura 13 es la que registró una mayor intensidad, ya que fue el punto en el que el huracán alcanzó la categoría 5, momento en el cual se ubicaba entre las costas de Jalisco, Colima y Michoacán.

4.3.3. Análisis hidráulico

De forma general, el huracán Willa presentó afectaciones en varios de los estados que conforman el Pacífico Mexicano, lo que provocó que en los estados de Michoacán, Colima, Jalisco, Nayarit y Sinaloa se registraran embalses, lagos, presas y ríos a su máxima capacidad, mientras que algunos de ellos registraron desbordamientos provocados por las intensas lluvias acaecidas durante los días 22 y 23 de octubre. Diversos medios de comunicación hicieron mención en su momento de las afectaciones que generaron en la parte hidráulica las fuertes lluvias. Tanto la CONAGUA como la Comisión Federal de Electricidad (CFE), así como los organismos municipales de cada región se encargaron de presentar informes de la situación en la que se encontraban las aguas nacionales.

Si bien a nivel nacional se registraron mayores afectaciones que las que se presentaron en la ciudad de Morelia y, más en específico, en la zona de estudio, la capital michoacana también manifestó afectaciones de diversas consideraciones provocadas precisamente por la presencia de los ríos importantes de la ciudad: Río Grande y Río Chiquito.

Protección Civil de Michoacán estableció que ambos ríos estaban al 100% de su capacidad, con el Río Grande de la ciudad desbordándose y generando inundación en toda la zona baja de las colonias Molino de Parras, Tres Puentes, Prados Verdes, Carlos Salazar, etc. Por otra parte, el Río Chiquito, a diferencia del anterior, no llegó a desbordarse a pesar de encontrarse saturado, por lo que la presencia del Río y sus condiciones hidráulicas no fueron las que provocaron la inundación en la zona de estudio. Por otro lado, la presa Cointzio registró un 98% de saturación.



4.3.4. Análisis integrador

Para llevar a cabo el manejo de la emergencia se deben considerar los siguientes grupos de trabajo:

- i) Las acciones de respuesta municipal como primera respuesta.
- ii) Las acciones de respuesta estatal, se canaliza a través de once funciones de auxilio: Alertamiento; Unidad de Comunicación Social de la Emergencia de la Secretaría de Gobierno del Estado de Michoacán, Coordinación de la Emergencia, Planes de Emergencia; Evacuación, Búsqueda y Rescate; Seguridad Pública, Asistencia Social y Albergues (DIF), Servicios Estratégicos, Equipamiento y Bienes, Salud Pública, Aprovisionamiento, Evaluación de Daños.

Los programas y planes de acción que se llevaron a cabo en cualquier etapa de la presencia del huracán Willa se encuentran listados a continuación:

- Protección Civil

Se presenta un Sistema de Alerta Temprana (SIAT) por parte de las autoridades encargadas de salvaguardar la integridad de la población desde el punto de vista social (Protección Civil, 2021; IMSS, 2019). El SIAT es típicamente aplicable en todo el territorio nacional y se encuentra a disposición de la población en general. Dicho SIAT se encuentra dividido en colores en función del peligro que representa el ciclón tropical y a su vez se dividen en dos fases: cuando el ciclón se acerca y cuando se aleja. Para ambas fases se utiliza la misma gama de colores.

En el momento en el que la CONAGUA en conjunto con el SMN advirtieron sobre la llegada del huracán Willa, el SIAT estableció un sistema de alerta roja, que representa el peligro máximo bajo el cual se encuentra expuesta la población, especialmente la que se encuentra más marginada y la que tiene dificultades para moverse. Dicho SIAT en su fase



roja expresa las siguientes indicaciones, tanto para la fase de acercamiento como la de alejamiento:

Acercamiento: La alerta roja se establece cuando la línea de vientos impacta un área afectable, o bien, que pueda afectar en un tiempo igual o menor a 18 h, dependiendo de la intensidad del ciclón. Se considera un máximo peligro, se emitirán boletines con una frecuencia de por lo menos cada 3 h.

Adicionalmente a las medidas implementadas en fases anteriores, el Sistema Nacional de Protección Civil debe implementar las siguientes acciones:

- Notificación a los integrantes del Sistema Nacional de Protección Civil en los ámbitos Federal, Estatal y Municipal.
- Resguardo total de autoridades e integrantes del Sistema Nacional de Protección Civil (SINAPROC)
- Sesión permanente de los Consejos Estatales y Municipales de Protección Civil, así como de las instancias de coordinación y comunicación.
- Información por conducto de los medios de comunicación masiva sobre el impacto del fenómeno y la necesidad de permanecer bajo resguardo. Continuidad de las comunicaciones entre las instancias de los ámbitos Federal, Estatal y Municipal.

Asimismo, se espera de la población las siguientes acciones.

- Resguardo total de la población.
- Atender las instrucciones de las autoridades

Alejamiento: La alerta roja de alejamiento se establece cuando después del impacto de un ciclón tropical continua, afectando el área de manera directa, o se comienza a alejar de la misma hasta una distancia máxima de 250 km, se continúan percibiendo los efectos del ciclón. Se considera de máximo peligro. Se emitirán boletines con una frecuencia de por lo menos cada 3 horas. El SINAPROC debe implementar las siguientes acciones:



- Notificación a los integrantes del Sistema Nacional de Protección Civil, en los ámbitos Federal, Estatal y Municipal.
- Mantener el resguardo de la población y autoridades.
- Sesión permanente de los Consejos Estatales y Municipales de Protección Civil, así como las instancias de coordinación y comunicación.
- Información por conducto de los medios de comunicación masiva sobre la continuación de los efectos del fenómeno y la necesidad de permanecer bajo resguardo.
- Continuidad de las comunicaciones entre las instancias de los ámbitos Federal, Estatal y Municipal.

Asimismo, se espera de la población las siguientes acciones:

- Resguardo total de la población.
- Atender las instrucciones de las autoridades.

A pesar de que el Plan Huracán del IMSS fue consolidado en el año 2019 (un año después de las afectaciones), se observó por medio de las fuentes periodísticas que estuvieron presentes en las zonas más afectadas, incluyendo la zona de estudio, que los estatutos pertenecientes a la fase de alejamiento se llevaron a cabo adecuadamente, ya que se observó el cumplimiento de todos los puntos expresados con anterioridad. No obstante, en lo referente a la fase de acercamiento no se tuvo en cuenta la aplicación de la metodología de forma homogénea y lo que se tuvo en cuenta se hizo a destiempo, probablemente más debido a que el huracán incrementó en su categoría en muy poco tiempo y las autoridades en un primer momento no establecieron el huracán como peligroso hasta que en la madrugada del 22 de octubre se presentó la intermitente lluvia.

- Secretaría de la Defensa Nacional (SEDENA)

Se dio a conocer por parte de los medios (Piña, 2018; SSP, 2018), que el Ejército Mexicano activo el Plan DN-III-E para la mañana del día 22 de octubre, el cual es un instrumento operativo militar que establece los lineamientos generales a los organismos del Ejército y Fuerza Aérea Mexicanos, para realizar actividades de auxilio a la población



afectada por desastres de origen natural o humano, optimizando el empleo de los recursos humanos y materiales para su atención oportuna, eficaz y eficiente; apoyando además, en la preservación de sus bienes y entorno. El plan surge teniendo en cuenta que México se localiza en una región geográfica vulnerable a diversos fenómenos perturbadores con alto potencial destructivo, principalmente los geológicos a consecuencia del Eje Neovolcánico y el Cinturón de Fuego e hidrometeorológicos por ser un país bioceánico; citados fenómenos, año con año afectan el territorio nacional, siendo una preocupación del Gobierno Federal, aminorar o limitar sus efectos en la población, que son de diversas magnitudes (SEDENA, 2019).

Por lo anterior y derivado de un mandato presidencial, en 1965, se elaboró e incluyó en la planeación estratégico-militar, el “Plan de auxilio a la población civil” recibiendo la denominación de “Plan DN-III-E” al integrarse como anexo “E” de la Tercera Edición del Plan Director de Defensa Nacional (DN-III) entonces vigente. Con motivo del impacto del huracán Inés en octubre de 1966, que provocó el desbordamiento del Río Pánuco afectando la porción sur de Tamaulipas y norte de Veracruz, se pone en ejecución por primera vez citado plan, con resultados positivos, propiciando una recuperación rápida de la zona de desastre. El plan DN-III-E, se aplicó con éxito tras el sismo de 1985, siendo un precedente para la creación del Sistema Nacional de Protección Civil (SINAPROC), tomando como experiencia que el auxilio a la población requiere, además, la participación de todos los organismos de la Administración Pública Federal, así como, de los sectores privado y social (SEDENA, 2019).

Con la llegada del huracán Willa, el plan DN-III fue establecido por las autoridades para efectuar labores de rescate, evitando lo que pudieron haber sido mayores afectaciones y mejorando la resiliencia ante inundaciones provocadas por fenómenos hidrometeorológicos. A pesar de que el Ejército Mexicano no realizó labores de rescate en la zona de estudio por no haber presentado problemas de crecidas de agua en las calles mayor a otras zonas de la ciudad, sí fue aplicable para instruir a la población a seguir las recomendaciones y boletines que siguiera estableciendo la SEDENA con el paso de los días.



Más allá de los planes programados por la SEDENA y Protección Civil para la zona de estudio, no se cuenta con algún otro programa que haya sido aplicado antes, durante o después del acontecimiento. Sin embargo, a nivel municipal en otras partes de la mancha urbana se registró el apoyo por parte de la CONAGUA, Policía Federal, SEGOB (Secretaría de Gobernación), Secretaría General de Gobierno, Secretaría de Salud, Seguridad Pública del Estado, CFE, SEDESOL (Secretaría de Desarrollo Social), Pesca y Acuacultura, Cruz Roja Mexicana y Bomberos. De forma nacional, otros organismos como la SEMAR (Secretaría de Marina) también se vieron involucrados en el mejoramiento de las condiciones tras el paso del huracán.

4.3.5. Análisis de sectores socioeconómicos

En el *Capítulo III* ya se abundaron los aspectos socioeconómicos correspondientes a la zona de estudio y que se pudieron haber visto afectados o que directamente lo hicieron al momento de la llegada de la intensa lluvia proveniente del huracán.

4.3.5.1. Sector social

La auto protección es la base fundamental para disminuir los desastres ocasionados por los diferentes fenómenos meteorológicos. En este sentido, previo y durante la temporada de ciclones tropicales, se difunden por radio, televisión, redes sociales y pagina web las recomendaciones concretas de que hacer y cómo actuar ante la presencia de algún riesgo ,así mismo a través de los delegados regionales estatales se retransmiten boletines de alertamiento de corto plazo (3 horas) boletines a largo plazo (96 horas) a las Coordinaciones Municipales donde presentan las recomendaciones en general para su debido conocimiento y mitigar alguna situación de riesgo (Protección Civil, 2021).

Diversos fueron los organismos (tanto públicos como privados) que formaron parte del factor socioeconómico acaecido por la presencia del huracán. Prácticamente, todos los



actores involucrados tuvieron también presencia en la zona de estudio y, a pesar de que la misma no fue la que registró una mayor inundación a diferencia de otras zonas donde se desbordó el Río Grande, sí se permitió identificar a varios actores presentes antes, durante y después de los días donde se presentaron las afectaciones estudiadas en esta investigación. De la metodología propuesta para el análisis del sector social, se cuentan con los siguientes resultados:

- Vivienda

No se cuenta con un número estimado de viviendas que fueron afectadas tras el paso del huracán Willa y por las inundaciones acontecidas dentro de la zona de estudio, ya que los medios de comunicación y autoridades presentaron el diagnóstico de las consecuencias presenciadas tras el aluvión provocado por el desbordamiento del Río Grande, dejando como segunda prioridad los encharcamientos y la crecida de aguas en la zona sur-oriente, correspondiente a la zona de estudio. Aún con lo anterior, tampoco se cuenta con un total de viviendas que fueron dañadas, teniendo el estimado Piña (2018), de donde se detectaron que, al menos 564 casas sufrieron daños estructurales en bardas, pisos y techos, además de que en mil 200 sufrieron pérdidas patrimoniales. Esas cifras no hacen una diferenciación respecto a la ubicación de las viviendas damnificadas, por lo que no es preciso establecer un resultado exacto del número de viviendas que pertenecen a la zona de estudio, por lo que, realizando estimaciones en función del comportamiento del flujo y de la información proporcionada por autoridades, es posible que de esas 564 casas dañadas sean alrededor de 100 las que correspondan a la zona de estudio, mientras que 350 son las que pudieron presentar daños patrimoniales. Aun así, sin un informe oficial por parte de Protección Civil, no es posible establecer igualmente la ubicación de las viviendas que sufrieron de afectaciones, por lo que es especulativo que hayan resultado en donde se haya analizado un tirante mayor al del nivel de la banquetta.



- Educación

Cuando se presentan daños provocados por desastres geológicos o hidrometeorológicos, la Secretaría de Educación Pública (SEP), en conjunto con los órdenes de gobierno deciden si resulta procedente la suspensión de clases en función de los daños provocados al inmueble, las pérdidas de material o equipo y la dificultad que pueda ser acceder a la institución educativa en el caso en el que sea procedente realizar la suspensión de forma oficial y en conjunto con las autoridades. Durante el paso del huracán Willa, en la zona de estudio, no se realizó algún comunicado o boletín oficial estableciendo una suspensión temporal de actividades educativas; no obstante, en algunas de las escuelas sí se suspendieron clases durante el día 22 de octubre, con algunas prolongando la suspensión por varios días más e inclusive durante toda la semana correspondiente al día 22, de las escuelas mostradas en los aspectos socioeconómicos del *Capítulo III*, no se cuenta con un número aproximado de escuelas que hayan optado por la suspensión de clases y la Secretaría de Educación del Estado (SEE), institución encargada este rubro en lo particular en Michoacán, no estableció una suspensión temporal ni hizo una confirmación oficial de escuelas que hayan optado por la suspensión, por lo que las que optaron por la cancelación de clases fueron las que recibieron afectaciones particulares en los mismos planteles, en donde el nivel de agua haya sido lo suficientemente considerable para no justificar la seguridad de los trabajadores académicos, administrativos ni estudiantes.

- Salud

En cuanto al análisis de los daños provocados por la tormenta y por la inundación, no se presentaron daños en los hospitales presentes en la zona de estudio y tampoco se realizó un comunicado por parte del IMSS o de hospitales privados sobre de dificultades operativas. Las personas con dificultad de movimiento que habitaban en la zona no requirieron de cuidados especiales tras la inundación y los hospitales recibieron pacientes que no necesariamente tenían que ver con el desastre hidrometeorológico sin presentar contratiempos.



- Gobierno local y comunidad

El apoyo solidario de la sociedad civil no se hizo esperar, inmediatamente después del impacto de Willa, empezaron a arribar a las zonas afectadas voluntarios entregando víveres, productos de limpieza y enseres domésticos (SEDERMA, 2018).

Infraestructura perteneciente a los tres órdenes de gobierno (*Figura 3.34*), no resultó dañada, a pesar de que las calles que se encontraban frente a las instalaciones tuvieron estancamiento del agua pluvial caída sobre la ciudad durante la madrugada del día 22 de octubre.

- Agua y saneamiento

Las colonias Chapultepec Oriente, Chapultepec Sur y Bosque Camelinas, al ser las más afectadas por las avenidas, llegaron a mostrar obstrucciones en banquetas y en la zona más baja el alcantarillado llegó a su máxima capacidad, impidiendo la evacuación del agua y permitiendo que ésta se acumulara ligeramente sobre las calles, en algunos puntos pudiendo sobrepasar el nivel de banqueta y entrando por escasos centímetros a hogares y locales minoristas. El Organismo Operador de Agua Potable Alcantarillado y Saneamiento de Morelia (OOAPAS) confirmó la saturación de los drenes y colaboró con la recuperación de los sitios afectados en las colonias Chapultepec Sur y Félix Ireta. En otras zonas no correspondientes a la estudiada en este trabajo, el OOAPAS, en conjunto con elementos de la SEDENA, se encargaron de la remoción de elementos sólidos que impidieran el paso del agua y lanzaron comunicados a la población para que evitaran pasar por los lugares encharcados para evitar caer hacia un pozo de visita abierto.

- Recursos culturales

Se reconocieron únicamente tres establecimientos culturales dentro de la zona de estudio, en la *Figura 3.34* se muestran los teatros y monumentos que se encuentran presentes en la región, siendo estos el Orquidiario de la ciudad, el Teatro Morelos y el



Centro de Convenciones y Exposiciones (CECONEXPO). Ninguno de los tres sufrió afectaciones con el paso de las lluvias y únicamente se presentaron encharcamientos cercanos que inhibieron el paso al Teatro Morelos y al CECONEXPO. Para los días 22 y 23 de octubre no se iba a hacer uso de esos espacios públicos, por lo que tampoco se registraron eventualidades referentes a cancelaciones o postergaciones de eventos.

4.3.5.2. Sector infraestructura

Como consecuencia de los daños ocasionados en Sinaloa, Nayarit, Jalisco, Durango, Colima y Michoacán por el huracán Willa, se instaló en el CENAPRED el Comité Nacional de Emergencias, que sesionó el tiempo que duró la emergencia, se apoyó en expertos y sistemas de información para realizar análisis y diagnósticos de riesgos, lo que generó información útil para manejar la emergencia y la reconstrucción (CENAPRED, 2018). A nivel internacional, el CENAPRED indicó que la mayoría de los daños provocados por las lluvias fueron hacia los estados de Nayarit y Sinaloa, por lo que la mayoría de la ayuda recibida para el mejoramiento de las condiciones a nivel infraestructura tuvo como destino las zonas más vulnerables entre ambos estados.

Dentro de la zona de estudio, no se observaron incidencias en el transporte, infraestructura pública, servicios públicos ni en los servicios de comunicación. Como se ha comprobado en el análisis de los datos correspondiente a este capítulo, el comportamiento del flujo en la zona de estudio presentó ligeras inundaciones y encharcamientos en algunas de las zonas más bajas de la zona de estudio, sin embargo, no se vieron afectados ninguno de los elementos que componen el sector infraestructura mencionados previamente. Se describe particularmente la apreciación hacia cada una de los rubros a continuación:

- Transporte

La Comisión Coordinadora del Transporte Público de Michoacán (COCOTRA) es la encargada de regular todo lo referente al transporte público del estado, comisión que no señaló incidencias sobre el transporte y las posibles afectaciones que podía tener que



algunas calles estuvieran inundadas. No obstante, algunas líneas del transporte público tuvieron que cambiar sus rutas temporalmente mientras las calles que resultaron afectadas por las lluvias y la posterior inundación se recuperaban y permitían nuevamente el paso vehicular por la zona. La zona poniente de la ciudad fue la más afectada por la inundación, sin embargo, ésta ya no pertenece a la zona de estudio tratada en este trabajo, por lo que se menciona únicamente que algunos vehículos que se encontraban en domicilios particulares, establecimientos y pequeños locales, así como aparcados en el exterior, resultaron dañados por la seria inundación que se manifestó en algunos puntos cercanos al Río Grande de la ciudad; las oficinas de la COCOTRA también formaron parte de la zona que resultó damnificada aunque no se dieron a conocer detalles sobre los daños acaecidos sobre los vehículos pertenecientes al transporte público, mientras que Protección Civil tampoco dio a conocer lo propio ante los vehículos particulares.

- Infraestructura Pública

Elementos como postes de luz, banquetas o espacios públicos recibieron la influencia directa de la acumulación de agua en la superficie, empero, no sufrieron afectaciones que hayan dañado su funcionamiento a largo plazo dentro de la zona de estudio y, una vez pasada la inundación, pudieron volver a ser empleados con normalidad.

- Servicios públicos

No se presentaron cambios en los servicios públicos (electricidad, gas, gestión de residuos, servicio postal, seguridad) dentro de la zona de estudio, ya que, como se ha comprobado, el tirante del agua no fue lo suficientemente preocupante como para suspender temporalmente los servicios de electricidad, gestión de residuos o sanidad, por lo que las autoridades optaron por no realizar modificaciones respectivas. En las colonias afectadas por el desbordamiento del Río Grande, sin embargo, sí se realizó una suspensión del servicio eléctrico para evitar accidentes que pudiesen ser derivados del servicio de electricidad, siendo establecido de esta forma por la CFE.



En lo referente a los servicios de comunicación, no se observaron obstrucciones en los sistemas de cable, televisión o periódico y las oficinas correspondientes a la difusión de estos medios de comunicación no registraron percances en transmisiones en algunos puntos de la ciudad ni sus instalaciones fueron dañadas por las lluvias o por la inundación presentada en algunos puntos.

4.3.5.3. Sector económico

A nivel nacional, CENAPRED (2021), recoge que los fenómenos de origen hidrometeorológico fueron los que tuvieron mayor relevancia en 2018. El ciclón tropical Willa, fue el que se destacó al generar daños por poco más de 3627.4 millones de pesos y nueve personas fallecidas a nivel nacional. De igual forma, la depresión tropical 19 contribuyó de manera significativa al ser la causa de cuatro defunciones y estragos por un valor cercano a los 3 183.7 millones de pesos. En Michoacán, las inundaciones del 23 de octubre provocaron el fallecimiento de 8 personas, de un total de 117 defunciones nacionales provocadas por desastres hidrometeorológicos.

Piña (2018), recoge que se solicitaron 35 millones de pesos en Morelia para reponer y rehabilitar los daños que dejó a su paso el Huracán “Willa”, de las 564 casas estimadas que sufrieron daños y de las 1200 que presentaron daños patrimoniales según información preliminar, se desembocó en un recuento de mil 58 colchones, 906 camas, 412 estufas, 354 salas, dos mil 354 sillas, mil 163 sillones y 150 comedores, lo que arroja una estimación de 26 millones de pesos. Para la recaudación de los recursos económicos, se abrió una cuenta bancaria para que, en coordinación con el Gobierno del Estado, organizaciones civiles, grupos religiosos e iniciativa privada, se puedan hacer depósitos (sin dar a conocer las dinámicas todavía) para la reposición de los bienes perdidos en las inundaciones.

A consecuencia del huracán Willa, la ciudad de Morelia sufrió intensas lluvias lo que provocó inundaciones afectando a cientos de viviendas, escuelas e infraestructura pública,



además de presentarse árboles caídos, vehículos varados, e incluso personas atrapadas. El número de colonias afectadas por la tromba que azotó Morelia en la madrugada del lunes 22 de octubre, fue de 42 por lo que las autoridades estatales y municipales solicitaron a la federación la declaratoria de emergencia para la capital Michoacana y que se declare zona de desastre. El agua alcanzó niveles de 60 centímetros hasta un metro de altura en algunas partes, derivado de que los ríos y los drenajes se encontraban al 100 por ciento de su capacidad y se desbordaron en algunos puntos críticos. El Ejército implementó el Plan DN-III y la Secretaría de Seguridad Pública del Estado informó que 250 elementos brindaron auxilio en las labores de rescate, limpieza, primeros auxilios y desazolve, entre otros (SSP, 2018).

En cuanto a los elementos que componen la metodología establecida en el *Capítulo II*, al no haber espacios que correspondan a actividad agrícola, pecuaria o de la presencia de fábricas dentro de la zona de estudio, no se realizó un análisis e investigación respectiva a estos elementos de forma cualitativa.

4.3.6. Diagnóstico final

A través de los resultados mostrados tras la modelación del flujo y del análisis forense realizado para poder establecer la relevancia que tuvo el evento hidrometeorológico que desencadenó a su vez la inundación en algunos puntos de la zona de estudio, es permisible establecer un diagnóstico final que resulte de la integración de todas las características referentes a lo acontecido durante los días en los cuales se presentó la problemática tanto cualitativos como cuantitativos, pudiendo entonces realizar un contraste con eventos históricos acaecidos y resumiendo de forma general las causas y efectos del acontecimiento, para posteriormente retomarlos en el *Capítulo V*.

4.3.6.1. Contraste con eventos históricos

Históricamente, las inundaciones en la zona de estudio se presentaron en el antiguo cauce del Río Chiquito, evento promovido por el crecimiento que tuvo la ciudad a principios



del siglo XX en regiones susceptibles a presentar eventualidades que terminaran por afectar a la población tras la llegada de fuertes lluvias que terminaran por desbordar el río.

Oseguera (2014), recoge que la situación se puede constatar en un expediente del año 1944 localizado en el Archivo Histórico del Agua, en donde se mencionan las quejas de la población de ese entonces de las constantes inundaciones que perjudicaban las casas construidas de adobe de los habitantes de las colonias pertenecientes a la zona oriente de la actual mancha urbana, donde inicia el Río Chiquito.

De la situación presenciada en octubre de 2018 en la zona de estudio y las colonias afectadas no hay diferencia, pues en el periódico *La Voz de Michoacán* presentó varias notas recuperadas por Oseguera (2014):

- En donde se resume una inundación presentada en 1955 en las colonias Ventura Puente y Félix Ireta, donde inclusive el drenaje que había en ese entonces resultó no ser suficiente y provocó que sucumbieran ante la cantidad de agua, presentando problemas inclusive en el interior de las casas.
- Las que se presentaron en 1958 durante la temporada de lluvias en la colonia Ventura Puente, donde se mencionan como causas el desbordamiento del Río Chiquito y la obstrucción del sistema de alcantarillado. En aquel entonces, las pérdidas resultaron más cuantiosas que en la actualidad, pues las casas, al ser construidas a base de adobe, no soportaron las lluvias acontecidas ni las inundaciones, por lo que muchas de ellas resultaron parcial o totalmente destruidas por causa de la infiltración del agua hacia los hogares.
- Para el año 1974 los percances de las inundaciones siguieron manifestándose en la parte baja de la microcuenca del Río Chiquito, colonias como Las Flores y Ventura Puente presentaron inundaciones que, según el registro, en algunos puntos alcanzó los 50 cm de altura, presentándose en esa ocasión problemas que también llegaron a la circulación vial, impidiéndola durante varios días.
- El huracán Madeline, ocurrido en 1976, provocó la subida del agua en las colonias Nueva Chapultepec, del Empleado, Felicitas del Río, Industrial, Ventura Puente,



entre otras. Tras el paso del huracán, que también afectó otras partes del país en mayor o menor medida, provocó que algunas zonas próximas al río presentaran inundaciones extremas que en algunos casos llegó a sobrepasar 1.50 metros sobre el nivel del pavimento, canalizando a la población afectada a albergues dentro de la ciudad gestionados por Ciudad Universitaria, Palacio Clavijero, Palacio Municipal y de la Cruz Roja.

Recientemente y en vista de lo acontecido también por causa del huracán Willa, se observa que las colonias que presentan afectaciones son las mismas que lo han hecho en años anteriores, acentuándose la problemática hacia las colonias Chapultepec Sur, Chapultepec Oriente y Camelinas.

4.3.6.2. Resumen de causas y efectos

En este numeral, se presentan enlistadas las causas y efectos que tuvo la inundación en la zona de estudio, retomando la información presentada en las *Conclusiones* y en la proposición de *Recomendaciones*:

- Causas
 - El cambio de suelo en la loma por modificación de la zona protegida de la Loma de Santa María tuvo que ver con la inundación por el comportamiento que tuvo la misma.
 - El sistema de alcantarillado no es suficiente y el agua quedó estancada en la superficie.
 - En algunos puntos de la zona de estudio, hay partes bajas a nivel del pavimento donde no se cuenta con sistema de alcantarillado por donde se pudiera evacuar el agua, acumulándose en esquinas y en bordes.
 - El Río Chiquito no se desbordó, pero sí presentó un nivel de ocupación del 100%.
 - No se cuenta con un sistema de control de avenidas.
- Efectos
 - No se registraron decesos durante o después de la inundación.



- Las autoridades accionaron tarde, pero después se tuvo un control adecuado.
- En la zona de estudio no se observaron daños significativos en la infraestructura característica (*Capítulo III*).
- La zona de estudio no es una región marginada como lo era durante la primera mitad del siglo XX, por lo que no resultó difícil para las autoridades poder llevar a cabo el plan de acción frene a desastres provocados por fenómenos hidrometeorológicos.
- El tirante registrado en la modelación del flujo resultó menor que el establecido por las autoridades, esto debido a que la zona en la que se presentaron inundaciones superiores a un metro fue en donde sí se presentaron problemas de desbordamiento del Río Grande, en la zona poniente de la ciudad.
- No fue necesaria la evacuación de la población con limitaciones de movimiento, pero sí se les instruyó a estar alerta y a seguir las indicaciones de Protección Civil.
- No se cuenta con Mapas de Riesgo por Inundación en la ciudad de Morelia ni con una cultura para reaccionar ante las inundaciones.
- No se cuenta con Atlas Municipal de Riesgos. En Morelia, no se cuenta con un atlas que permita identificar las zonas de mayor vulnerabilidad de inundaciones. Bajo este esquema, Franco (2021) recoge que el gobierno del estado reconoció la pésima radiografía de riesgos con la que cuenta Michoacán, dado que el Atlas de Riesgos Estatal es obsoleto, y únicamente 6% de los municipios del estado tienen actualizados sus atlas locales. Para hacer un atlas se debe estudiar la región desde diferentes ópticas, la geológica, la hidrometeorológica, la química, la física y también la social, de acuerdo a los parámetros establecidos por la Secretaría de Gobernación federal. A nivel nacional el rezago en la elaboración de este documento es una realidad, ya que de acuerdo al Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), el 85 por ciento de los 2 mil 456 municipios que hay en el país no lo tienen actualizado. De acuerdo al Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra (INICIT) de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), no contar con estas herramientas representa un atraso en materia de prevención ante cualquier desastre natural.



- No se escogió como zona de estudio en donde las autoridades establecieron una mayor cantidad de daños porque no es una región propiamente relevante desde el punto de vista socioeconómico, mismo enfoque que se le da a esta investigación, aunque sí lo sea más desde el punto de vista social al ser una región más marginada que la zona de estudio.



Fotografía 1. Cauce del Río Chiquito en la colonia Félix Ireta.



Fotografía 2. Puente vehicular del Río Chiquito, no se suele ver afectada la circulación en el mismo tras problemas de lluvias extremas.



Fotografía 3. Precipitación acumulada en los bordes del Río Chiquito por una fuerte lluvia ocurrida en 2021.



Fotografía 4. Cruce de calles en colonia Félix Ireta tras lluvia, cerca no hay sistema de drenaje para poder evacuar el agua de la superficie.



Fotografía 5. Escuela de nivel preescolar ubicada en colonia Electricistas.



Fotografía 6. Desnivel ubicado en Avenida Ventura Puente, donde tras el paso de lluvias intermitentes se suele inundar.



Fotografía 7. Centros comerciales en la colonia Electricistas, en la cota más baja de la microcuenca del Río Chiquito, debajo de la Loma de Santa María.



Fotografía 8. Con el paso del tiempo, se han venido incrementando las edificaciones en la Loma de Santa María, provocando un cambio de uso de suelo e impidiendo la infiltración de la precipitación.



Fotografía 9. El escurrimiento superficial proveniente de la Loma de Santa María se suele estancar en la Avenida Camelinas al presentar inclusive lluvias de baja intensidad.



Fotografía 10. Avenida Camelinas (entre colonias Bosque Camelinas y Electricistas) presentó encharcamientos y en algunos puntos inundaciones tras el paso del huracán Willa en 2018.



Fotografía 11. En la Avenida Camelinas se concentran varios centros financieros cerca de las zonas más propensas a inundarse de la región sur.



Fotografía 12. El Boulevard García de León se encuentra entre las colonias Chapultepec Sur, Nueva Chapultepec y Chapultepec Oriente y desde que se tiene el registro histórico ha manifestado inundaciones tras el paso de tormentas moderadas y fuertes.



CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Retomando la información identificada en el *Apartado 4.3.6.2* sobre las causas y efectos presentados en la inundación y en base a los resultados obtenidos en la modelación hidrológica, así como en la hipótesis y los objetivos general y particulares establecidos, se mencionan las siguientes conclusiones y recomendaciones:

5.1. Conclusiones

El análisis forense realizado en sus etapas de recopilación de eventos históricos y en la revisión de los programas de desarrollo, muestran que, en efecto, el crecimiento de la población en zonas propensas a inundarse ha provocado que la problemática al día de hoy se siga conservando y, con el crecimiento de la ciudad en regiones igualmente vulnerables puede verse un empeoramiento de la situación. Si bien antes el mayor inconveniente era visto por el material con el que se encontraban construidas las viviendas a principios y mitad del siglo pasado, la realidad es que la ocupación para el desarrollo de infraestructura en sitios aledaños a los ríos Grande y Chiquito ha incentivado que el comportamiento del agua precipitada influya directamente en las construcciones, regiones propiamente establecidas para cultivos.

En la modelación hidrológica se distingue un comportamiento en el flujo que tiende a descender a la zona baja de la microcuenca del Río Chiquito, justamente hacia la zona de estudio establecida en este trabajo, lo cual confirma que las condiciones topográficas de la ciudad también han incentivado en que se presenten inundaciones en avenidas importantes de la ciudad que corresponden a un alto índice participativo en lo competente al comercio y a zonas donde se concentra una alta cantidad de personas con dificultades de movimiento y, a su vez, presencia de hospitales, clínicas y centros médicos en general. Aunque en lo establecido en el análisis forense y en función de lo reportado por las autoridades el Río Chiquito no se desbordó durante el paso del huracán Willa, lo cual no impidió que las calles aledañas al mismo resultaran damnificadas por la misma topografía de la región. Esta



problemática registró sus principales afectaciones en las colonias aledañas a Lomas de Santa María.

Los planes y programas de acción, así como los atlas de riesgo vigentes consultados tanto del ámbito estatal como del municipal hacen mención de un sistema de alcantarillado deficiente, lo cual provoca que el funcionamiento del mismo no resulte completamente óptimo y, por lo tanto, ya no se pueda permitir el paso del agua hacia el mismo. La red de drenaje, a diferencia de la presencia del Río Chiquito, sí resultó ser un problema durante el paso del huracán Willa puesto que en el análisis forense se recoge que efectivamente el mismo se mostró en su máxima capacidad y permitió que el agua precipitada y proveniente de las zonas altas de la microcuenca quedara estancada en algunas partes de la zona de estudio, en particular en las correspondientes a una topografía uniforme. El problema, aparte de la deficiente infraestructura con la que se cuenta al respecto, se debe también a la cultura que se cuenta con la gestión de los residuos sólidos.

Se recogió en las zonas protegidas que la zona protegida de la Loma de Santa María estuvo en su momento protegida bajo los estatutos de ANP hasta que el mismo fue revocado y se cambió a simplemente una zona protegida, la cual, a diferencia de la anterior, sí permite limitadamente la construcción de nuevos edificios con fines departamentales, lo que ha provocado que el cambio de uso de suelo de la región intensifique las inundaciones al verse diezmada la posibilidad de que el agua precipitada en la loma se infiltre y a su vez la misma a través de las calles se dirija hacia las colonias Electricistas, Camelinas y Chapultepec Sur, evento que si bien no puede ser comprobado con la modelación hidrológica dadas las limitaciones de la malla utilizada, sí se pudieron comprobar con el comportamiento de lluvias acaecidas en lo posterior, detalle presentada en la *Fotografía 9*.

En cuando a la modelación hidrológica, la misma mostró que para una intensidad equivalente a la precipitación acaecida durante el día 22 de octubre del año 2018 las avenidas más importantes de la zona de estudio y, a su vez, de la misma ciudad en algunos puntos conflictivos se presentaron tirantes que rondaron los 10 y los 40 centímetros, pudiendo variar el resultado con el comportamiento real dados los coeficientes de uso de suelo y la situación



de la red de drenaje, ya que no es posible conocer su estado real durante la tormenta, por lo que el tirante registrado en la modelación es posible que sea mayor al que se obtuvo realmente. Por otra parte, y dadas las limitaciones del enmallado utilizado, no se contó con una capa de RTIN que fuera capaz de contar con información perteneciente a la infraestructura a nivel de banquetas, ni mucho menos el detallado de las calles por lo que se muestran regiones inundadas pertenecientes a comercios, viviendas, centros de envíos, oficinas gubernamentales y demás.

5.2. Recomendaciones

Partiendo desde lo observado en la parte de la modelación y el análisis forense, se formulan a continuación las siguientes recomendaciones a poder aplicar en el entorno para mejorar la resiliencia en torno a las inundaciones provocadas en la zona sur de Morelia:

- Como se mencionó a lo largo del trabajo, la ciudad no cuenta con un Atlas Municipal de Riesgos actualizado y, a pesar de que, en el anterior, así como en investigaciones relacionadas con la problemática ha intervenido el análisis bajo diferentes esquemas en la esa zona de la ciudad. Es posible que dentro de las prioridades del IMPLAN no se encuentre una actualización del atlas de riesgos pues es de conocimiento general en la ciudad que algunos sectores terminen inundados tras pasos de lluvias que en su mayoría no llegan a ser tan drásticas, por lo que se recomienda entonces
- Mejorar las condiciones bajo las cuales lleva a cabo el desarrollo de infraestructura en la región, pues se ha demostrado que con un periodo de retorno de 18 años correspondiente a una lluvia de 43.5 mm la ciudad es un caos y se presentan encharcamientos que imposibilitan el flujo vehicular, así como el desalojo de la población que vive en zonas de alto riesgo.
- Mejorar las políticas públicas bajo las cuales se conceden autorizaciones para el cambio de uso de suelo en la Loma de Santa María, puesto que desde que se derogó el calificativo de ANP para la misma, diversos personajes del sector privado han



construido edificaciones que han impedido la infiltración del agua y ha aumentado el riesgo de inundaciones en la parte baja de la región.

- Implementar un sistema de alerta temprana ante inundaciones, el cual permita identificar en tiempo real condiciones climatológicas desfavorables como la presencia de un huracán que pueda contar con acceso a la población mediante una página web o aplicación móvil y se permita monitorear el comportamiento del fenómeno y establecer anticipadamente las pautas necesarias para prevenir riesgos de inundación en las zonas más vulnerables. Este sistema podría ser empleado en cualquier región de la ciudad de Morelia abarcando regiones de las microcuencas del Río Chiquito y Río Grande, de tal modo que también se permita la implementación en zonas con mayor riesgo y que presentaron mayores problemas durante el paso del huracán Willa.
- Proponer la colocación de una presa rompe-picos en alguna región de la zona alta de la microcuenca del Río Chiquito. Como se puede apreciar en la modelación, parte de la inundación es provocada por el escurrimiento proveniente de las zonas altas de la cuenca; a pesar de que la modelación muestra que la llegada del escurrimiento parte de la colonia Ocolusen (a un costado de la colonia Bosque Camelinas) no necesariamente se comporta de la forma mostrada, pues el MDE está en función de la topografía y no toma en cuenta algunas de las construcciones ya establecidas en las zonas altas que aún no están protegidas. La ventaja de la utilización de presas rompe-picos son su economía y su factibilidad de construcción.
- Proteger las zonas aún no contempladas en el DOF como ANP. El Código de Desarrollo Urbano del municipio



REFERENCIAS

- Adeel, Z., Alarcón, A. M., Bakkensen, L., Franco, E., Garfín, G. M., McPherson, R. A., Méndez, K., Roudaut, M. B., Saffari, H., & Wen, X. (2020). Developing a comprehensive methodology for evaluating economic impacts of floods in Canada, Mexico and the United States. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 50, 101861. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2020.101861>
- Aparicio Mijares, F. J. (2003). *Fundamentos de hidrología de superficie*. Limusa Noriega Ed. México.
- Arreygue, E., Garduño, V., Canuti, P., Casagli, N. & Iotti, A. (2005). *Riesgos Geomorfológicos e hidrológicos en la ciudad de Morelia, Michoacán, México*. Depto. De Geología y Mineralogía IMM, UMSNH, Morelia. México.
- Arreygue-Rocha, E. (2007). *Evaluación de las constantes inundaciones en la ciudad de Morelia, Michoacán, México*. Instituto de Investigaciones Metalúrgicas, UMSNH, Morelia, Michoacán, México.
- Bates, R. U. y J. A. Jackson (1980), *Glossary of Geology*, American Geological institute. Virginia, EE.UU.
- Belkhiri, L., Tiri, A., & Mouni, L. (2020). Spatial distribution of the groundwater quality using kriging and Co-kriging interpolations. *Groundwater for Sustainable Development*, 11, 100473. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100473>
- Bernal Trejo, E.G. (2013). *La gestión urbano resiliente en la ciudad de Morelia, Michoacán*. División de Estudios de Posgrado, Facultad de Derecho y Ciencias Administrativas, UMSNH. Morelia, México.
- Bernal Trejo, G. (2018). *La Gestión de Riesgos de Inundaciones en la Ciudad de Morelia, Michoacán 2016-2017*. Instituto de Investigaciones Económicas y Empresariales. Disponible en http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/handle/DGB_UMICH/328.



- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J., & Coll, A. (2014). Iber: Herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 30(1), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004>
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J., & Coll, A. (2014). Iber: Herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 30(1), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004>
- Bladé, E., Sanz-Ramos, M., Dolz, J., Expósito-Pérez, J. M., & Sánchez-Juny, M. (2019). Modelling flood propagation in the service galleries of a nuclear power plant. *Nuclear Engineering and Design*, 352, 110180. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2019.110180>
- Brennan, Michael J. (2019) Hurricane Willa (EP242018). National Hurricane Center, Tropical Cyclone Report. National Oceanic and Atmospheric Administration.
- Brieva, C. (2018). Caracterización de cuencas. Programa Nacional Agua (PNAGUA). Argentina.
- Bronstert, A., Agarwal, A., Boessenkool, B., Crisologo, I., Fischer, M., Heistermann, M., Köhn-Reich, L., López-Tarazón, J. A., Moran, T., Ozturk, U., Reinhardt-Imjela, C., & Wendi, D. (2018). Forensic hydro-meteorological analysis of an extreme flash flood: The 2016-05-29 event in Braunsbach, SW Germany. *Science of The Total Environment*, 630, 977-991. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.241>
- Carrillo Serrano, H.A. (2015). Estabilización y Solución de las Ecuaciones Saint-Venant Utilizando Cálculo de Incrementos Finitos. Centro de Investigación en Matemática. Guanajuato, México.
- Carter, Nicole T. (2005), 'Flood Risk Management: Federal Role in Infrastructure', CRS Report for Congress.



- Cea Gómez, L., Bladé i Castellet, E., Sanz-Ramos, M., Fraga Cadórniga, I., Sañudo Costoya, E., García-Feal, O., Gómez-Gesteira, M., & González-Cao, J. (2010). Benchmarking of the Iber capabilities for 2D free surface flow modelling (1.^a ed.). Universidade da Coruña. Servizo de Publicacións. <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497497640>
- CENAPRED (2006). Guía básica para elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos: Conceptos básicos sobre peligros, riesgos y su representación geográfica. Secretaría de Gobernación : Centro Nacional de Prevención de Desastres.
- CENAPRED (2018). Informe de Actividades 2018. Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana. Centro Nacional de Desastres, México.
- CENAPRED (2021). Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres. Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana. Centro Nacional de Desastres, México.
- CENAPRED, Centro Nacional de Prevención de Desastres. (2016) Atlas Nacional de Riesgos, Cobertura de atlas municipales. Disponible en <http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/archivo/cob-atlas-municipales.html>.
- Chakraborty, J., Tobin, G. A., and Montz, B. E. (2005), 'Population Evacuation: Assessing Spatial Variability in Geophysical Risk and Social Vulnerability to Natural Hazards', Natural Hazards Review, ASCE, 6(1), 23-33.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). Applied hydrology. McGraw-Hill.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2010). Los Recursos Hídricos en las Cuencas Lerma-Santiago. Organismo de Cuenca Lerma Santiago. México.
- CONAGUA (2011). Manual para el control de inundaciones. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.
- CONAGUA (2018). Ciclones Tropicales 2018. Gerencia de Meteorología y Climatología. Subgerencia de Pronóstico Meteorológico. Centro Nacional de Previsión del Tiempo. México.



- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2010). Proyecto de modernización del servicio meteorológico nacional de México: diagnóstico institucional y propuesta de plan estratégico 2010- 2019. 67 p.
- Cressie. N. (1989). The Origins of Kriging. Department of Statistics, Iowa State University, Ames, Iowa.
- Diario Oficial de la Federación (DOF) (2020). Ley General de Protección Civil. Secretaría de Servicios Parlamentarios, Gobierno Federal. México.
- Díaz Carvajal, Á.; Mercado Fernández, T. (2017) Determinación del número de curva en la subcuenca de Betancí (Córdoba, Colombia) mediante teledetección y SIG Ingeniería y Desarrollo. Universidad del Norte Barranquilla vol. 35, núm. 2, pp. 452-470, Colombia.
- Evans, W., Kirkpatrick, D., & Townsend, G. (2001). Right-Triangulated Irregular Networks. *Algorithmica*, 30(2), 264-286. <https://doi.org/10.1007/s00453-001-0006-x>
- Flax, Lisa K., Jackson, Russell W., and Stein, David N. (2002), ‘Community Vulnerability Assessment Tool Methodology’, *Natural Hazards Review*, ASCE, 3(4), 163-176.
- Franco, P. (2021). La mayoría de los municipios en Michoacán no tienen atlas de riesgo. Recuperado el 14 de abril de 2022, de <https://www.elsoldemorelia.com.mx/local/con-atlas-de-riesgo-6-de-municipios-en-michoacan-7296962.html>.
- French, R. H. (1985). *Open-channel hydraulics*. McGraw-Hill.
- Fundación Española para la Ciencia de la Ciencia y la Tecnología (FECYT) (2004). Meteorología y climatología: Unidad didáctica: Semana de la Ciencia y la Tecnología 2004. Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología.
- Gamarra Mendoza, M.C. (2021). Metodología para la estimación de parámetros de cálculo de tormentas de diseño con datos pluviométricos en Bolivia. Departamento de Investigación, Ciencia y Tecnología. Universidad Autónoma Juan Misael Saracho. Bolivia.



- Gandin, L.S. (1965). Objective analysis of meteorological fields. By. Translated from the Russian. Jerusalem (Israel Program for Scientific Translations), Pp. vi, 242: 53 Figures; 28 Tables. £4 1s. 0d. (1966). Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 92(393), 447-447. <https://doi.org/10.1002/qj.49709239320>
- González-Cao, J., Fernández-Nóvoa, D., García-Feal, O., Figueira, J. R., Vaquero, J. M., Trigo, R. M., & Gómez-Gesteira, M. (2021). Numerical reconstruction of historical extreme floods: The Guadiana event of 1876. Journal of Hydrology, 599, 126292. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126292>
- Goovaerts, P., 1997. Geostatistics for Natural Resources Evaluation. Oxford University Press, New York.
- Hernández, J. y Vieyra, A. (2014). *Precareidad habitacional en el peri-urbano de la ciudad de morelia, una ciudad media mexicana: ¿El desastre nace o se hace?* Revista de Geografía Norte Grande (47). 45-60. Disponible en https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S071834022010000300003&script=sci_arttext.
- Holling, C.S. (1973). Resilience and stability of ecological systems. Annu. Rev. Ecol. Syst.
- Hosseini, S., Barker, K., & Ramirez-Marquez, J. E. (2016). A review of definitions and measures of system resilience. Reliability Engineering & System Safety, 145, 47-61. <https://doi.org/10.1016/j.res.2015.08.006>
- Hurst R. An overview of forensic hydrology. Southwest Hydrology. 2007;6(4); 16/17.
- IMPLAN (2015). Caracterización de la Microcuenca del Río Chiquito. Instituto Municipal de Planeación. Morelia, México.
- IMSS (2019). Plan Institucional de Preparación y Respuesta Frente a Huracanes (Plan Huracán IMSS). División de Proyectos Especiales en Salud, Centro Virtual de Operaciones en Emergencias y Desastres. Instituto Mexicano del Seguro Social. México.



- INEGI (2022). Biblioteca Digital de Mapas. Recuperado el 16 de abril del 2022.
<https://www.inegi.org.mx/app/mapas/?ag=16>.
- INEGI. (1992). Síntesis geográfica del estado de Hidalgo. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.
- Instituto Mexicano para la Competitividad (IMCO) (2014). Índice de competitividad urbana. México : Instituto Mexicano para la Competitividad A.C, Anexo estadístico. México.
- Instituto Municipal de Planeación de Morelia (IMPLAN) (2015). Programa Parcial de Desarrollo Urbano de la Zona Sur de la Ciudad de Morelia, Mich. Comisión Municipal de Desarrollo Urbano y Ordenamiento Territorial. Morelia, México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2011). Guía para la Interpretación de Cartografía: Edafología: escala 1:250,000. Serie II. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. ISBN: 978-607-494-162-3
- Keating, A., Venkateswaran, K., Szoenyi, M., MacClune, K., & Mechler, R. (2016). From event analysis to global lessons: Disaster forensics for building resilience. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(7), 1603-1616. <https://doi.org/10.5194/nhess-16-1603-2016>
- Kuang, D., & Liao, K.-H. (2020). Learning from Floods: Linking flood experience and flood resilience. *Journal of Environmental Management*, 271, 111025. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111025>
- Lugo Hubp, J., & Córdova, C. (1992). Regionalización geomorfológica de la República Mexicana. *Investigaciones Geográficas*, 1(25). <https://doi.org/10.14350/ig.59012>
- M. Bruneau, S.E. Chang, R.T.E.G.C. Lee, T.D. O'Rourke, A.M. Reinhorn, M. Shinozuka, K. Tierney, W.A. Wallace, D.V. Winterfeldt. (2003). A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities, *Earthq. Spectra* 19 (4) 733–752.



- Martínez Méndez, Y. (2016). La Percepción Social del Riesgo de Inundaciones y las Implicaciones para su Manejo. El caso de la Ciudad de Morelia. Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad Morelia. Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Morelia. Morelia, México.
- Matheron, G. (1962). *Traité de Géostatistique Appliquée*. Editions Technip, Paris.
- Matos, J. P., Cohen Liechti, T., Portela, M. M., & Schleiss, A. J. (2014). Pattern-oriented memory interpolation of sparse historical rainfall records. *Journal of Hydrology*, 510, 493-503. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.01.003>
- Melo Martínez, C.A. (2012). Análisis geoestadístico espacio tiempo basado en distancias y splines con aplicaciones. Departamento de Estadística, Universidad de Barcelona, Barcelona, España.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) (2008). *Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje*. Gobierno del Perú. Perú.
- National Infrastructure Advisory Council (NIAC), *Critical Infrastructure Resilience: Final Report and Recommendations*, 2009.
- Néelz, S., Pender, G., Great Britain, Environment Agency, Great Britain, & Department for Environment, F. & R. A. (2009). *Desktop review of 2D hydraulic modelling packages*. Environment Agency.
- Negrete Correa, D.U. (2016). *Desarrollo de un Modelo Numérico para la Simulación de Procesos Hidráulicos*. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica. Posgrado en Geociencias Aplicadas. San Luis Potosí, México.
- NRCS (2004). "Hydrologic soil-cover complexes", in *Part 630 Hydrology National Engineering Handbook*, Natural Resources Conservation Service, Ed. USA: USDA, cap. 9, pp. 1-3. USA.
- OECD. (2016). *Financial management of food risk*. Disponible en <https://www.oecd.org/finance/financial-management-of-flood-risk.htm>.



- Oliver, M. A., & Webster, R. (2014). A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging. *CATENA*, 113, 56-69.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.09.006>
- Organización Meteorológica Mundial, (1996). Guía de instrumentos y métodos de observación meteorológicos (OMM N° 8) .Secretaría de la organización meteorológica mundial, OMM, Ginebra Suiza.
- Organización Meteorológica Mundial, OMM. (2010). Guía de instrumentos y métodos de observación meteorológicos (ACTUALIZACIÓN). (OMM N° 8) . Secretaría de la organización meteorológica mundial, OMM, Ginebra Suiza.
- Oseguera Medina, M. (2014). Las inundaciones en la ciudad de Morelia (1868-1990). Instituto de Investigaciones Históricas, UMSNH, Morelia, México.
- Pablo Feliciano, G. (2012). Inundaciones en Zonas Urbanas. Facultad de Estudios Aragón. Superiores, Universidad Nacional Autónoma de México. San Juan de Aragón, México.
- Pardo-García, A., & Castellanos-González, L. (2017). Automatización de ambientes en invernaderos simulando escenarios futuros. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 1 (29).
- Paredes Pinto, R.E. (2015). Generación de Intensidades de Precipitación Máxima en Estaciones sin Información Pluviográfica (Cuenca del Río Illpa-Puno). Facultad de Ingeniería Agrícola. Universidad Nacional del Altiplano. Puno, Perú.
- Peck, Angela; Karmakar, Subhankar y Simonovic, Slobodan (2007), Physical, economical, infrastructural and social flood risk – vulnerability analyses in GIS, Ontario, Canadá, The University of Western Ontario.
- Piña, I. (2018). Necesarios 35 mdp para solventar daños por “Willa”. Recuperado el 13 de abril de 2022, de <https://www.contramuro.com/necesarios-35-mdp-para-solventar-danos-por-willa/>.



- Pinos, J., & Timbe, L. (2019). Performance assessment of two-dimensional hydraulic models for generation of flood inundation maps in mountain river basins. *Water Science and Engineering*, 12(1), 11-18. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2019.03.001>
- Programa Sectorial del Medio Ambiente (PSMA) (2015). Programa Sectorial del Medio Ambiente del Estado de Michoacán de Ocampo 2015-2021. Gobierno del Estado de Michoacán de Ocampo. México.
- Protección Civil (2021). Programa Especial Temporada de Lluvias y Ciclones Tropicales. Coordinación Estatal de Protección Civil Michoacán (CEPCM), Gobierno del Estado. Morelia, México.
- Quezada Lucio, N. (2010). *Estadística para ingenieros*. Empresa Editora Macro E.I.R.L.
- Rahmawati, N. (2020). Space-time variogram for daily rainfall estimates using rain gauges and satellite data in mountainous tropical Island of Bali, Indonesia (Preliminary Study). *Journal of Hydrology*, 590, 125177. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125177>
- Ramirez, A. I., & Herrera, A. (2016). Forensic Hydrology. En B. S. K. Shetty & P. P. J. Rao (Eds.), *Forensic Analysis—From Death to Justice*. InTech. <https://doi.org/10.5772/64616>
- Ramírez, A. I., & Herrera-Lozano, L. A. (enero-febrero, 2015). Análisis forense de inundaciones: una guía metodológica. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6(1), 25-48.
- Sánchez, H.U. y Urquiza, P.S. (2020). El Cambio Geográfico a Través del Tiempo y sus Efectos en los Cuerpos de Agua: El caso de la Cuenca del Río Chiquito. *Los Ríos de Morelia, Ejes Articuladores de la Ciudad*. UNAM, CIGA-CONACYT. México. ISBN: 978-607-30-3748-8.
- Secretaría de Servicios Parlamentarios (SSP) (2018). Gaceta Parlamentaria Número 5143-III Secretaría General. Secretaría de Servicios Parlamentarios. Gaceta Parlamentaria de la Cámara de Diputados.



- SEDENA (2019). Qué es Plan DNIIE. Recuperado el 14 de abril de 2022, de <https://www.gob.mx/sedena/acciones-y-programas/que-es-el-plan-dn-iii-e>.
- SEDERMA (2018). Gaceta Ambiental, Revista publicación trimestral Año: 13 Número: 01/ enero-marzo 2019. Secretaría de Desarrollo Rural y Medio Ambiente. Subsecretaría de Medio Ambiente.
- SMN (2022). Glosario Técnico. Recuperado el 16 de abril del 2022. <https://smn.conagua.gob.mx/es/smn/glosario>.
- Suárez Díaz, J. (1998). Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. Instituto de Investigaciones sobre erosión y deslizamientos, Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia.
- Te Chow, V., & Saldarriaga, J. G. (1994). Hidráulica de canales abiertos. McGraw-Hill. <https://books.google.com.mx/books?id=XnvUAAAACAAJ>
- Torres Martínez, J.A., Lucas Urbina, L. (2014). Evaluación de la Rectificación del Río Chiquito de Morelia en Modelo Físico para un Proyecto Sustentable. Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México.
- UNESCO World Water Assessment Programme. (2012). *United Nations world water development report 4: Managing water under uncertainty and risk*. Disponible en <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000215644>.
- UNESCO, 2006. Evaluación de los Recursos Hídricos. Elaboración del balance hídrico integral por cuencas hidrográficas. Documentos Técnicos del PHI-LAC (Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO para América Latina y el Caribe), N°4
- Ureña Elizondo, F. (2011). Utilización de estaciones meteorológicas automáticas como nueva alternativa para el registro y transmisión de datos. Sistema de Estudios de Posgrado, Universidad Estatal a Distancia, Costa Rica.
- Vázquez Correa Lorena; Palazuelos Covarrubias Israel, “Principales retos y pendientes ante las inundaciones en México”, Mirada Legislativa, No. 138, Ciudad de México, Instituto



- Belisario Domínguez, Senado de la República, 21p. Disponible en <http://bibliodigitalibd.senado.gob.mx/handle/123456789/3791>.
- Verworn, A., & Haberlandt, U. (2011). Spatial interpolation of hourly rainfall – effect of additional information, variogram inference and storm properties. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(2), 569-584. <https://doi.org/10.5194/hess-15-569-2011>
- Wang, Y., Li, Z., Tang, Z., & Zeng, G. (2011). A GIS-Based Spatial Multi-Criteria Approach for Flood Risk Assessment in the Dongting Lake Region, Hunan, Central China. *Water Resources Management*, 25(13), 3465-3484. <https://doi.org/10.1007/s11269-011-9866-2>
- Webster, R., Oliver, M.A., 2007. *Geostatistics for Environmental Scientists*, second edition. John Wiley & Sons, Chichester.
- WMO/UNESCO, (2013), *International Glossary of Hydrology*. Secretaría de la Organización Meteorológica Mundial, Suiza.
- Zhang, H., Yang, J., Li, L., Shen, D., Wei, G., Khan, H. ur R., & Dong, S. (2021). Measuring the resilience to floods: A comparative analysis of key flood control cities in China. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 59, 102248. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2021.102248>



ANEXOS

Anexo 1. Tablas de precipitaciones y hietogramas asignados para diferentes periodos de retorno.

Tabla A1.1. Precipitaciones a partir de las curvas IDF para un $Tr = 2$ años.

Duración (min)	Intensidad (mm/hra)	Precipitación acumulada (mm)	Precipitación diferenciada (mm)	Precipitación ordenada (mm)
5	129.300	10.775	10.775	1.176
10	76.882	12.814	2.039	1.368
15	56.723	14.181	1.367	1.655
25	38.670	16.112	1.932	1.933
40	27.182	18.121	2.009	2.009
60	20.054	20.054	1.933	2.139
90	14.796	22.194	2.139	10.775
120	11.924	23.849	1.655	2.039
150	10.087	25.217	1.368	1.968
180	8.798	26.393	1.176	1.932
240	7.090	28.361	1.968	1.627
300	5.998	29.988	1.627	1.367
			29.988	

Gráfica A1.1. Hietograma para un $Tr = 2$ años.

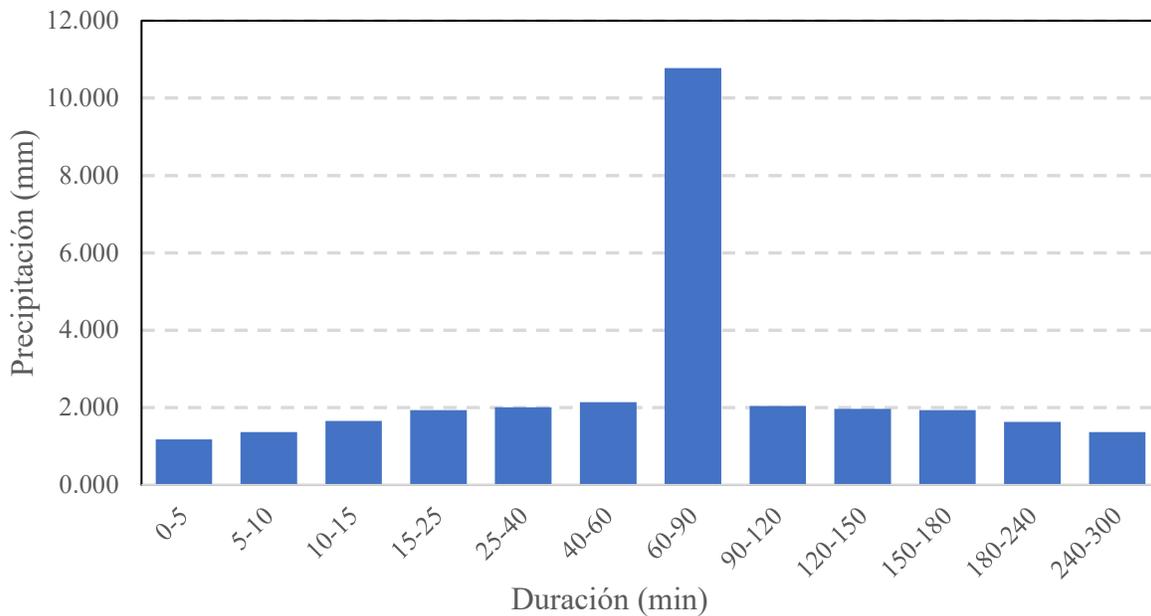




Tabla A1.2. Precipitaciones a partir de las curvas IDF para un $Tr = 5$ años.

Duración (min)	Intensidad (mm/hora)	Precipitación acumulada (mm)	Precipitación diferenciada (mm)	Precipitación ordenada (mm)
5	151.163	12.597	12.597	1.375
10	89.882	14.980	2.383	1.600
15	66.314	16.578	1.598	1.935
25	45.208	18.837	2.258	2.260
40	31.778	21.185	2.349	2.349
60	23.446	23.446	2.260	2.501
90	17.298	25.947	2.501	12.597
120	13.941	27.882	1.935	2.383
150	11.792	29.481	1.600	2.301
180	10.285	30.856	1.375	2.258
240	8.289	33.157	2.301	1.902
300	7.012	35.059	1.902	1.598
		35.059		

Gráfica A1.2. Hietograma para un $Tr = 5$ años.

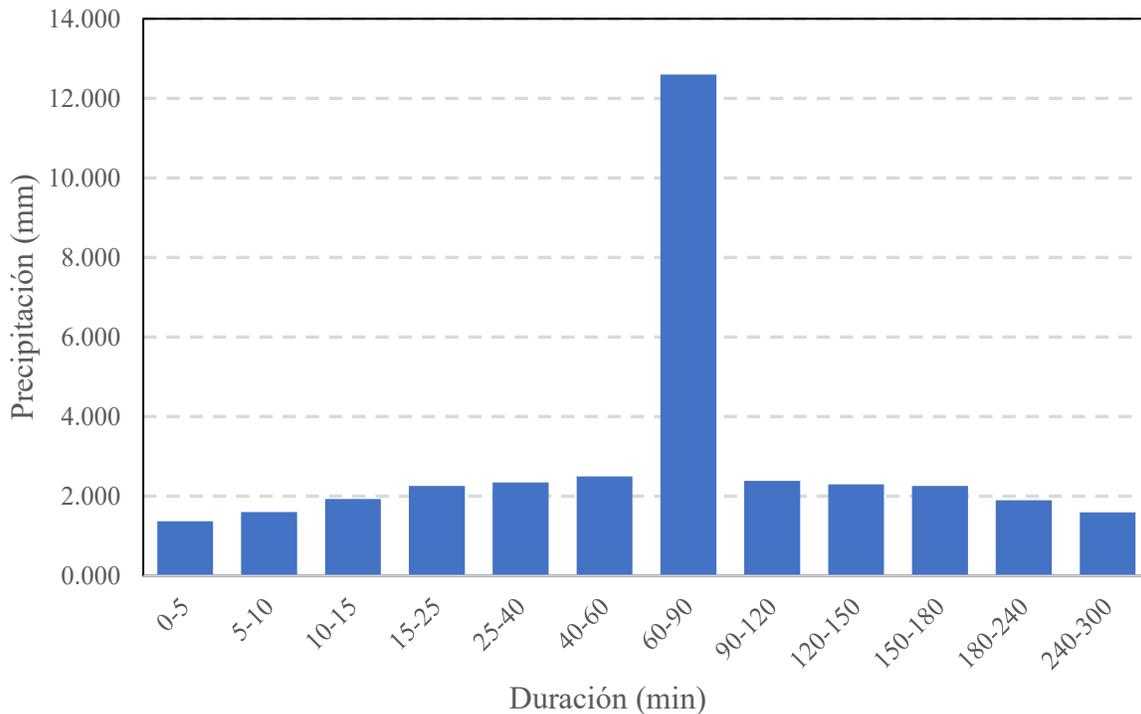




Tabla A1.3. Precipitaciones a partir de las curvas IDF para un $Tr = 10$ años.

Duración (min)	Intensidad (mm/hra)	Precipitación acumulada (mm)	Precipitación diferenciada (mm)	Precipitación ordenada (mm)
5	170.126	14.177	14.177	1.547
10	101.158	16.860	2.682	1.800
15	74.633	18.658	1.799	2.178
25	50.880	21.200	2.542	2.544
40	35.765	23.843	2.643	2.643
60	26.387	26.387	2.544	2.815
90	19.468	29.202	2.815	14.177
120	15.690	31.379	2.178	2.682
150	13.272	33.180	1.800	2.590
180	11.576	34.727	1.547	2.542
240	9.329	37.316	2.590	2.141
300	7.891	39.457	2.141	1.799

39.457

Gráfica A1.3. Hietograma para un $Tr = 10$ años.

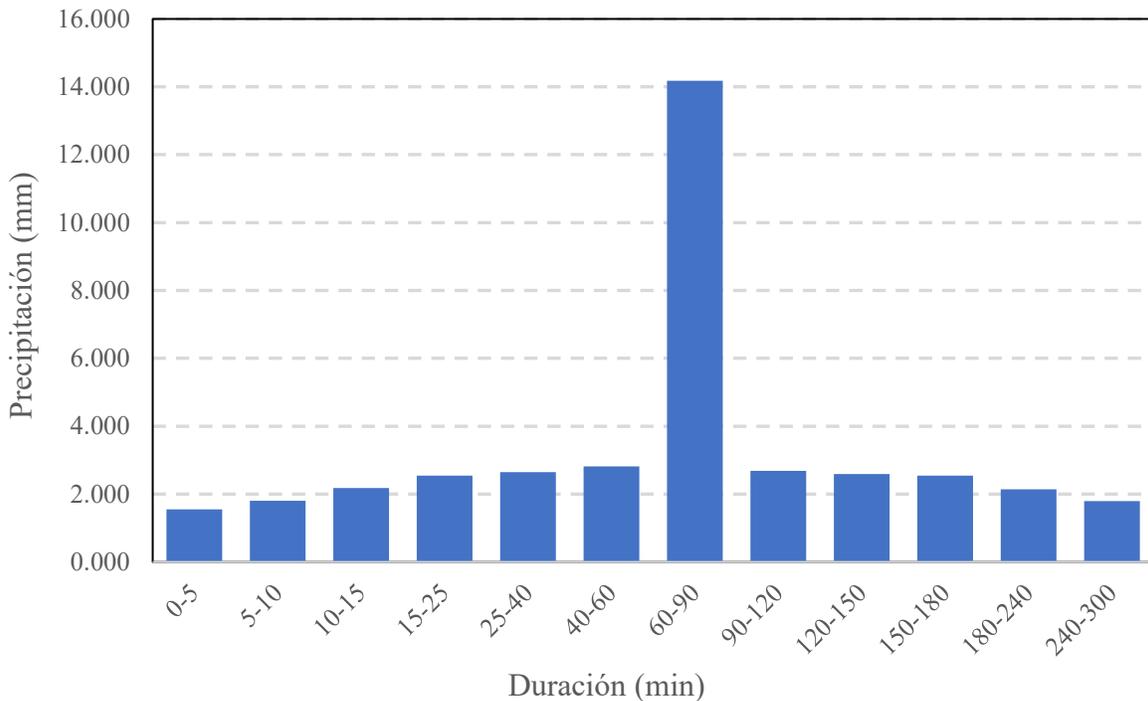




Tabla A1.4. Precipitaciones a partir de las curvas IDF para un $Tr = 25$ años.

Duración (min)	Intensidad (mm/hra)	Precipitación acumulada (mm)	Precipitación diferenciada (mm)	Precipitación ordenada (mm)
5	198.893	16.574	16.574	1.809
10	118.263	19.710	3.136	2.105
15	87.253	21.813	2.103	2.546
25	59.483	24.785	2.971	2.974
40	41.812	27.875	3.090	3.090
60	30.849	30.849	2.974	3.291
90	22.760	34.139	3.291	16.574
120	18.343	36.685	2.546	3.136
150	15.516	38.790	2.105	3.027
180	13.533	40.599	1.809	2.971
240	10.907	43.626	3.027	2.503
300	9.226	46.129	2.503	2.103

46.129

Gráfica A1.4. Hietograma para un $Tr = 25$ años.

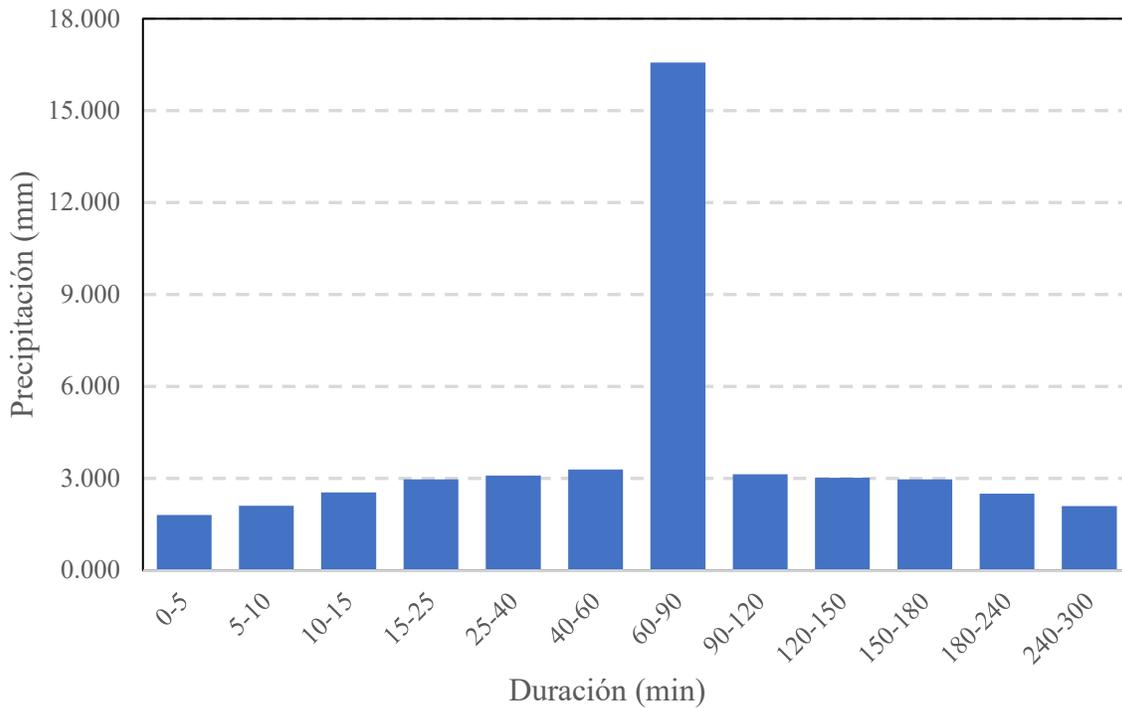




Tabla A1.5. Precipitaciones a partir de las curvas IDF para un $Tr = 50$ años.

Duración (min)	Intensidad (mm/hra)	Precipitación acumulada (mm)	Precipitación diferenciada (mm)	Precipitación ordenada (mm)
5	223.844	18.654	18.654	2.036
10	133.099	22.183	3.529	2.369
15	98.198	24.550	2.367	2.865
25	66.945	27.894	3.344	3.347
40	47.057	31.372	3.478	3.478
60	34.718	34.718	3.347	3.704
90	25.615	38.422	3.704	18.654
120	20.644	41.287	2.865	3.529
150	17.462	43.656	2.369	3.407
180	15.231	45.692	2.036	3.344
240	12.275	49.099	3.407	2.817
300	10.383	51.916	2.817	2.367
			51.916	

Gráfica A1.7. Hietograma para un $Tr = 50$ años.

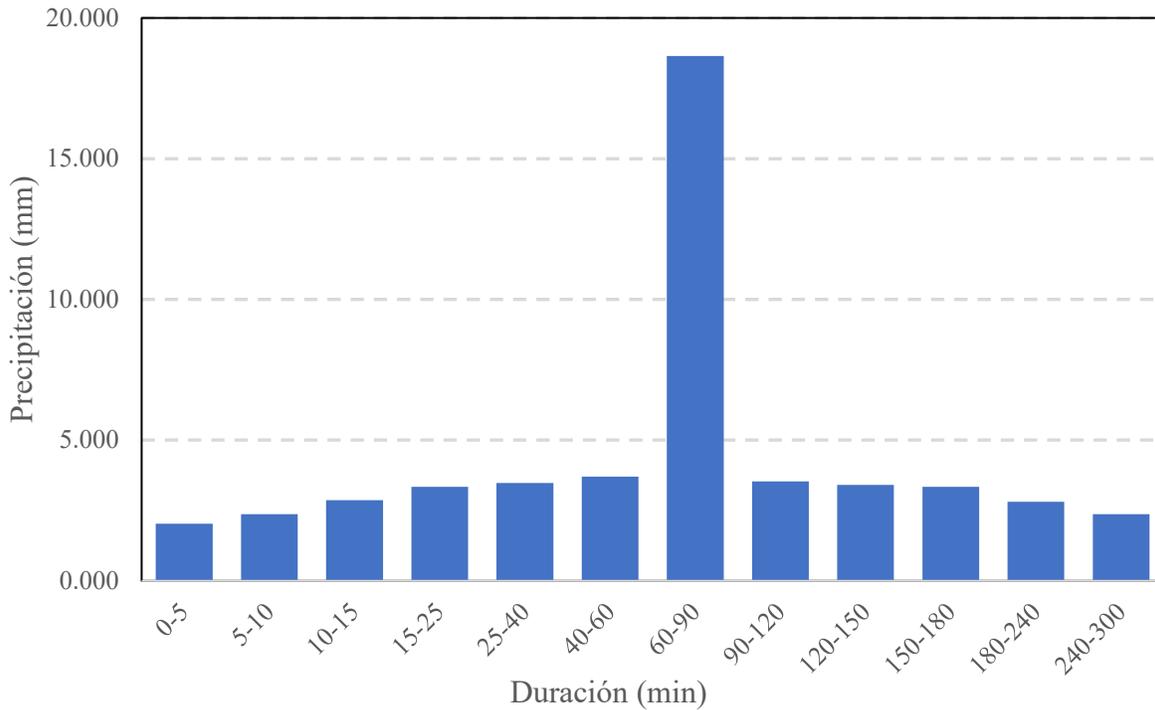
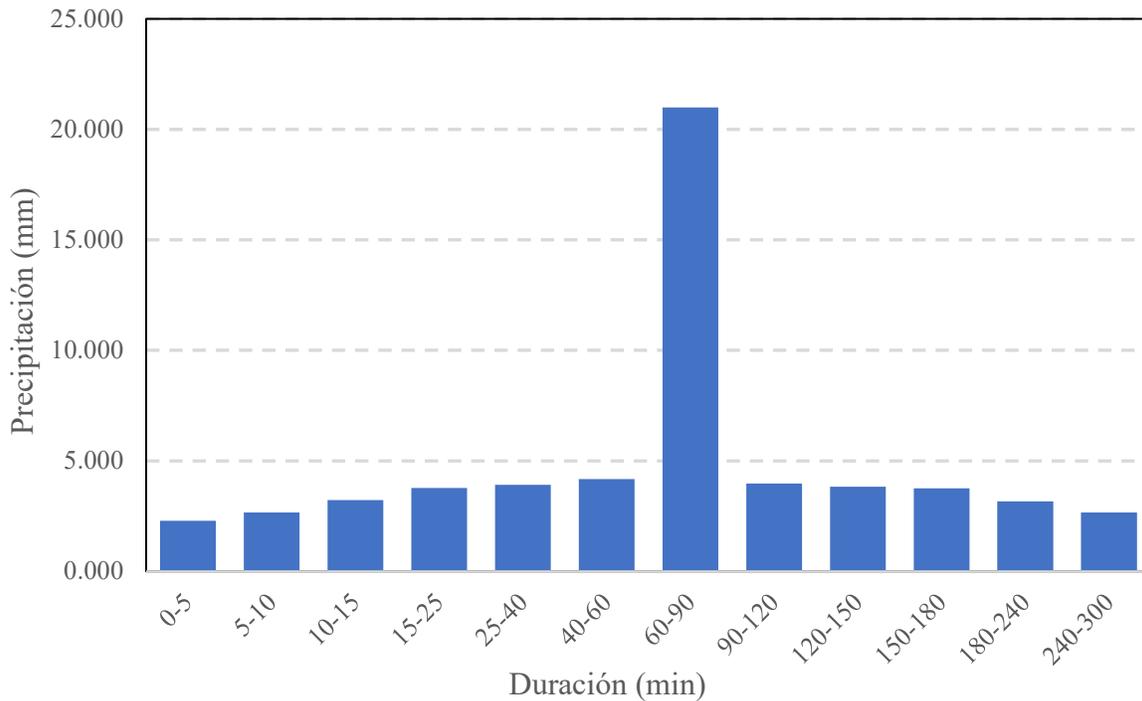




Tabla A1.6. Precipitaciones a partir de las curvas IDF para un $Tr = 100$ años.

Duración (min)	Intensidad (mm/hra)	Precipitación acumulada (mm)	Precipitación diferenciada (mm)	Precipitación ordenada (mm)
5	251.925	20.994	20.994	2.291
10	149.796	24.966	3.972	2.666
15	110.517	27.629	2.663	3.225
25	75.343	31.393	3.764	3.767
40	52.961	35.307	3.914	3.914
60	39.074	39.074	3.767	4.168
90	28.828	43.242	4.168	20.994
120	23.233	46.467	3.225	3.972
150	19.653	49.133	2.666	3.835
180	17.141	51.424	2.291	3.764
240	13.815	55.259	3.835	3.170
300	11.686	58.429	3.170	2.663
			58.429	

Gráfica A1.7. Hietograma para un $Tr = 100$ años.



Anexo 2. Modelaciones del comportamiento del flujo para diferentes periodos de retorno a cada hora y en las cuatro avenidas más importantes.

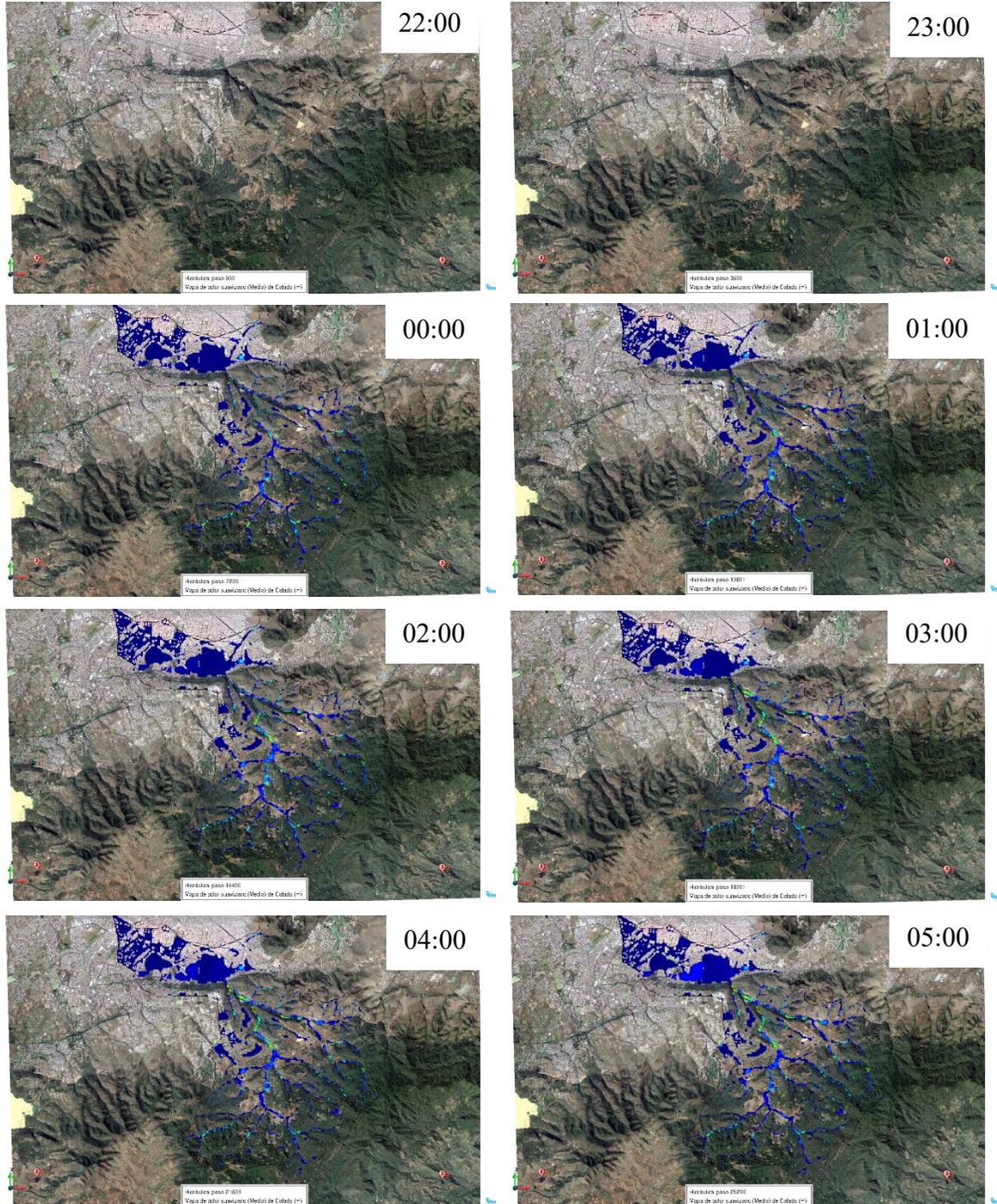


Figura A2.1. Modelación de la inundación para un $Tr = 2$ años en la microcuenca del Río Chiquito desde las 22:00 del 21 de octubre hasta las 05:00 del 22 de octubre.



Tabla A2.1. Flujo con el paso del tiempo con un $Tr = 2$ en Av. Ventura Puente.

Tiempo (s)	Tirante (m)						
900	0.0000	7200	0.0391	13500	0.0828	19800	0.1161
1800	0.0000	8101	0.0478	14400	0.0893	20700	0.1195
2700	0.0000	9000	0.0545	15300	0.0941	21600	0.1232
3600	0.0000	9900	0.0612	16200	0.0989	22500	0.1283
4500	0.0105	10800	0.0674	17100	0.1034	23400	0.1328
5400	0.0226	11700	0.0734	18000	0.1085	24300	0.1366
6300	0.0313	12600	0.0784	18900	0.1126	25200	0.1405

Tabla A2.2. Flujo con el paso del tiempo con un $Tr = 2$ en Blvd. García de León.

Tiempo (s)	Tirante (m)						
900	0.0000	7200	0.0195	13500	0.0879	19800	0.0861
1800	0.0000	8100	0.0262	14400	0.0909	20700	0.0839
2700	0.0000	9000	0.0360	15300	0.0912	21600	0.1131
3600	0.0000	9900	0.0453	16200	0.0918	22500	0.1666
4500	0.0105	10800	0.0557	17100	0.0916	23400	0.1977
5400	0.0129	11700	0.0689	18000	0.0899	24300	0.2086
6300	0.0155	12600	0.0815	18900	0.0877	25200	0.2138

Tabla A2.3. Flujo con el paso del tiempo con un $Tr = 2$ en Av. Camelinas.

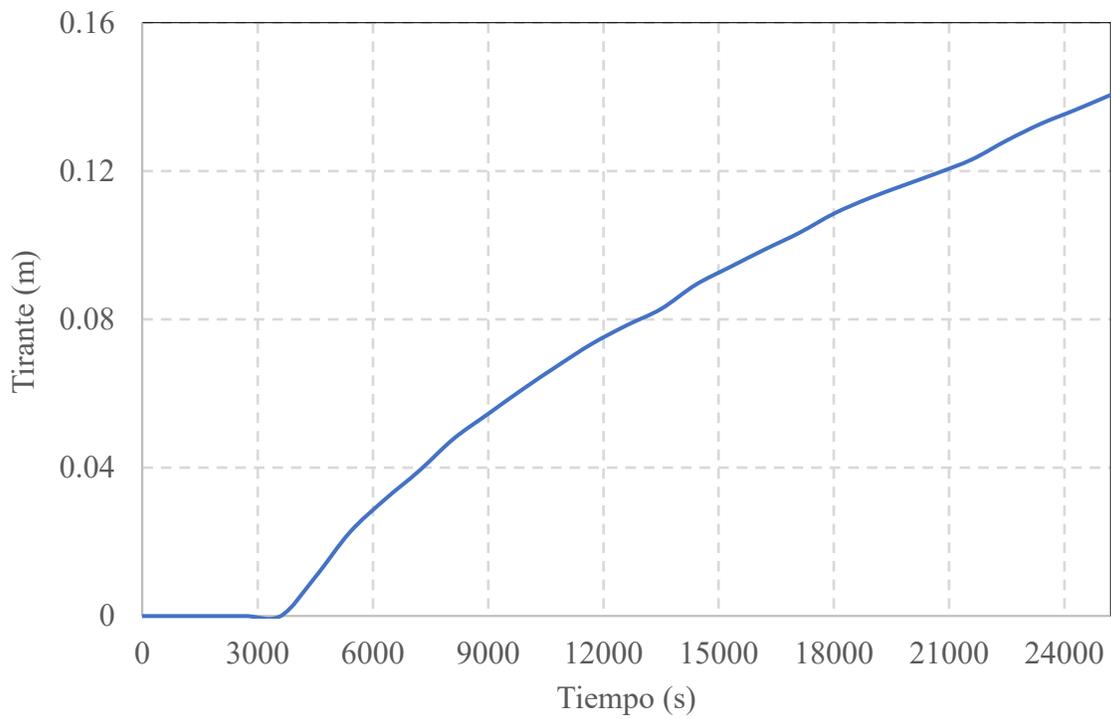
Tiempo (s)	Tirante (m)						
900	0.0000	7200	0.0454	13500	0.0756	19800	0.0713
1800	0.0000	8101	0.0436	14400	0.0765	20700	0.0712
2700	0.0000	9000	0.0471	15300	0.0761	21600	0.1086
3600	0.0000	9900	0.0487	16200	0.0754	22500	0.1493
4500	0.0105	10800	0.0509	17100	0.0751	23400	0.1740
5400	0.0415	11700	0.0571	18000	0.0751	24300	0.1822
6300	0.0443	12600	0.0679	18900	0.0740	25200	0.1871

Tabla A2.4. Flujo con el paso del tiempo con un $Tr = 2$ en Av. Solidaridad.

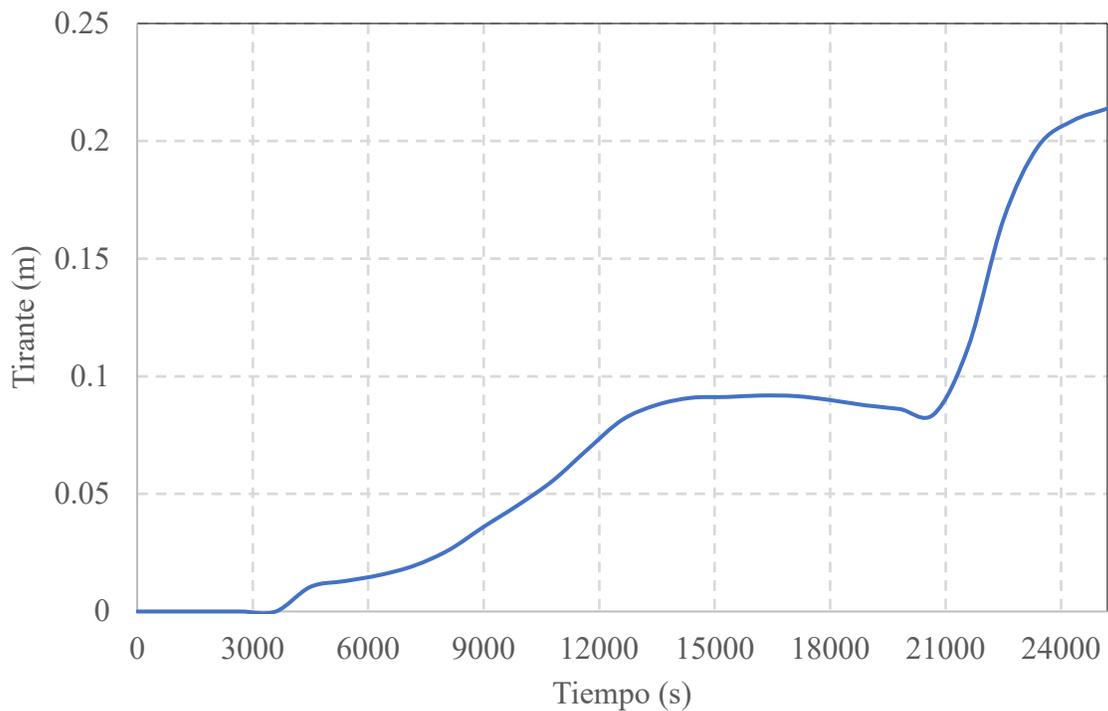
Tiempo (s)	Tirante (m)						
900	0.0000	7200	0.0310	13500	0.0792	19800	0.0775
1800	0.0000	8101	0.0371	14400	0.0822	20700	0.0765
2700	0.0000	9000	0.0403	15300	0.0822	21600	0.1098
3600	0.0000	9900	0.0463	16200	0.0822	22500	0.1558
4500	0.0105	10800	0.0527	17100	0.0821	23400	0.1830
5400	0.0146	11700	0.0619	18000	0.0810	24300	0.1918
6300	0.0251	12600	0.0733	18900	0.0791	25200	0.1966



Gráfica A2.1. Comportamiento del flujo con un $Tr = 2$ en Av. Ventura Punte.

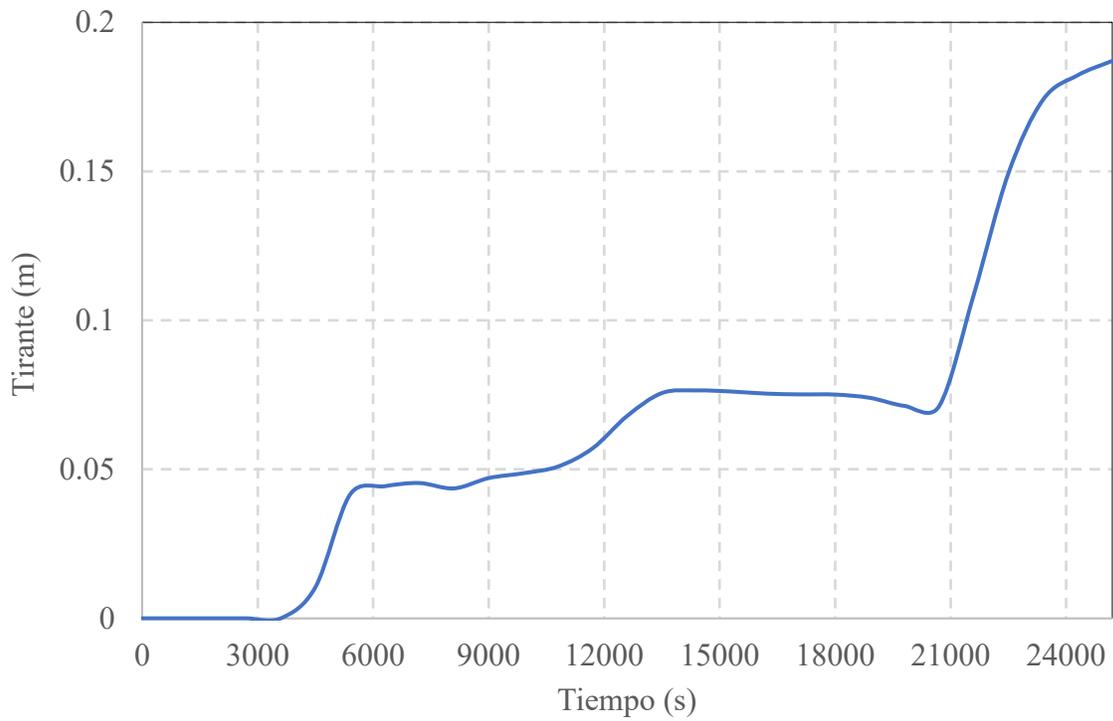


Gráfica A2.2. Comportamiento del flujo con un $Tr = 2$ en Blvd. García de León.

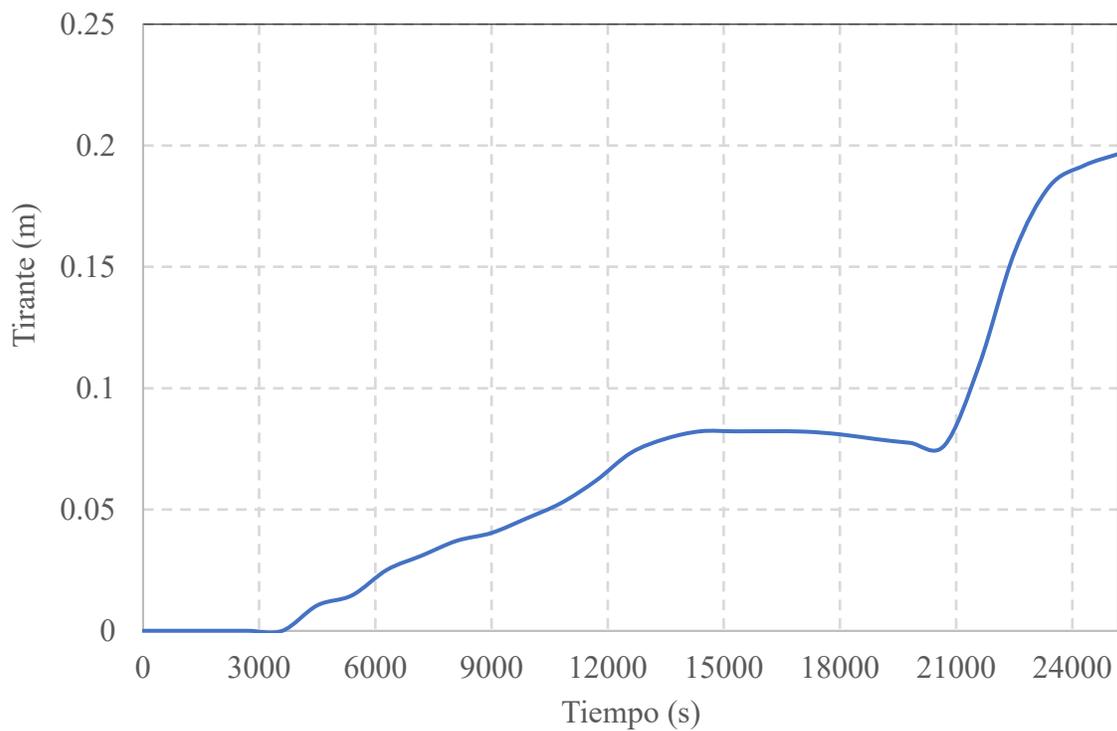




Gráfica A2.3. Comportamiento del flujo con un $Tr = 2$ en Av. Camelinas.



Gráfica 2.4. Comportamiento del flujo con un $Tr = 2$ en Av. Solidaridad.



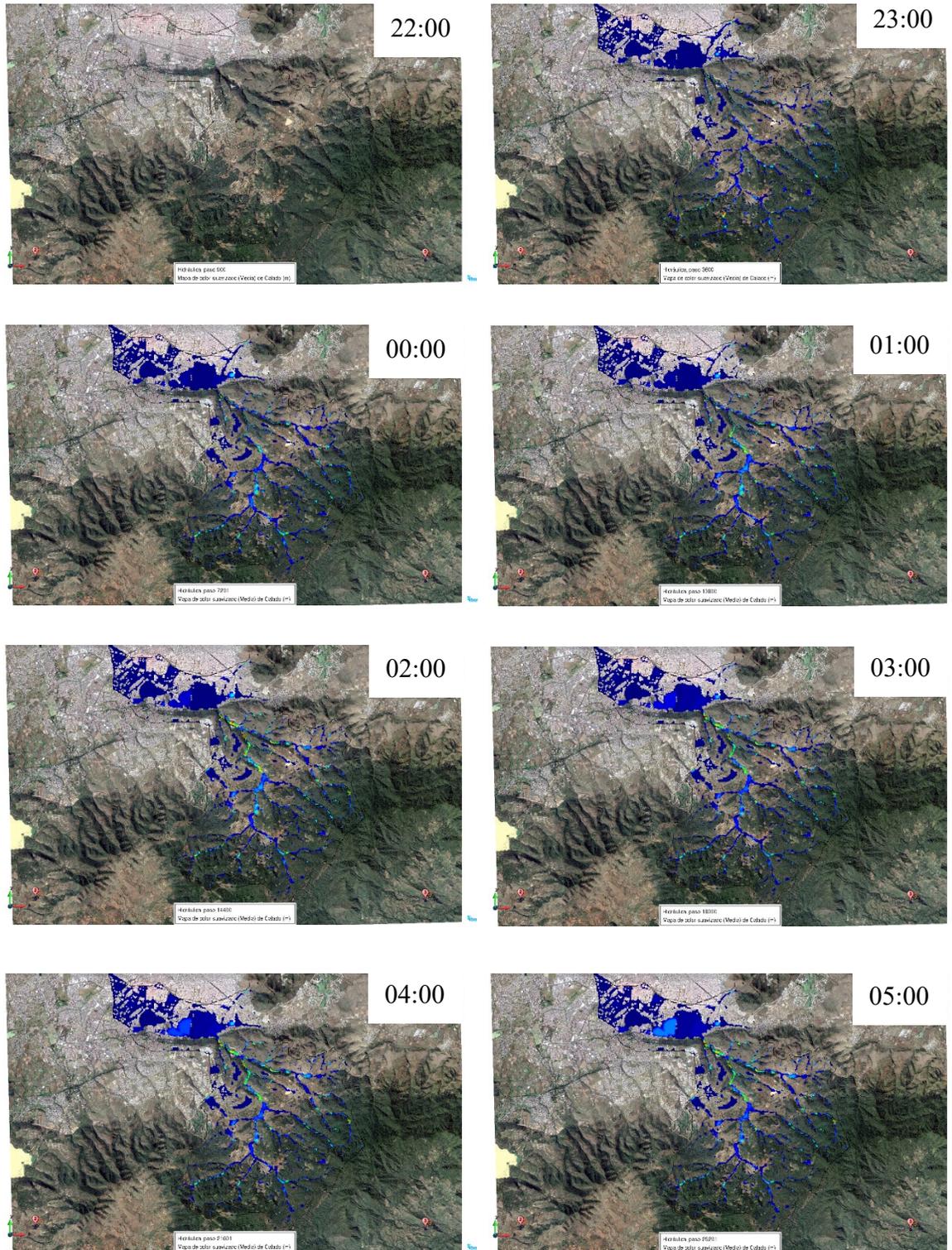


Figura A2.2. Modelación de la inundación para un $Tr = 5$ años en la microcuenca del Río Chiquito desde las 22:00 del 21 de octubre hasta las 05:00 del 22 de octubre.



Tabla A2.5. Flujo con el paso del tiempo con un $Tr = 5$ en Av. Ventura Puente.

Tiempo (s)	Tirante (m)						
900	0.0000	7200	0.0914	13500	0.1564	19800	0.2106
1800	0.0000	8101	0.0958	14400	0.1627	20700	0.2149
2700	0.0000	9000	0.1101	15300	0.1690	21600	0.2180
3600	0.0307	9900	0.1197	16200	0.1800	22500	0.2273
4500	0.0467	10800	0.1337	17100	0.1850	23400	0.2319
5400	0.0596	11700	0.1435	18000	0.1914	24300	0.2355
6300	0.0795	12600	0.1482	18900	0.1974	25200	0.2417

Tabla A2.6. Flujo con el paso del tiempo con un $Tr = 5$ en Blvd. García de León.

Tiempo (s)	Tirante (m)						
900	0.0000	7200	0.0400	13500	0.0988	19800	0.2433
1800	0.0000	8100	0.0580	14400	0.0953	20700	0.2394
2700	0.0000	9000	0.0819	15300	0.0914	21600	0.2371
3600	0.0124	9900	0.0942	16200	0.0958	22500	0.2360
4500	0.0153	10800	0.0994	17100	0.1746	23400	0.2404
5400	0.0196	11700	0.1021	18000	0.2232	24300	0.2436
6300	0.0265	12600	0.1016	18900	0.2390	25200	0.2520

Tabla A2.7. Flujo con el paso del tiempo con un $Tr = 5$ en Av. Camelinas.

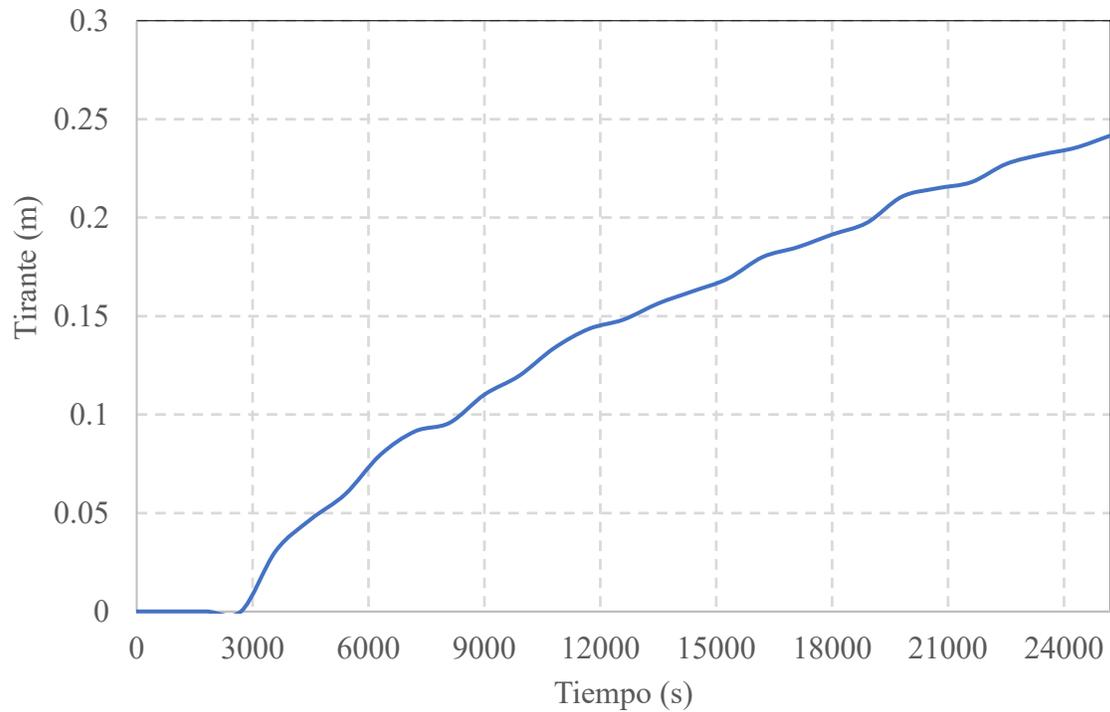
Tiempo (s)	Tirante (m)						
900	0.0000	7200	0.0630	13500	0.0991	19800	0.2478
1800	0.0000	8101	0.0721	14400	0.0965	20700	0.2431
2700	0.0000	9000	0.0927	15300	0.0972	21600	0.2491
3600	0.0744	9900	0.0986	16200	0.1163	22500	0.2402
4500	0.0640	10800	0.1034	17100	0.1950	23400	0.2443
5400	0.0616	11700	0.1022	18000	0.2324	24300	0.2511
6300	0.0659	12600	0.1027	18900	0.2442	25200	0.2566

Tabla A2.8. Flujo con el paso del tiempo con un $Tr = 5$ en Av. Solidaridad.

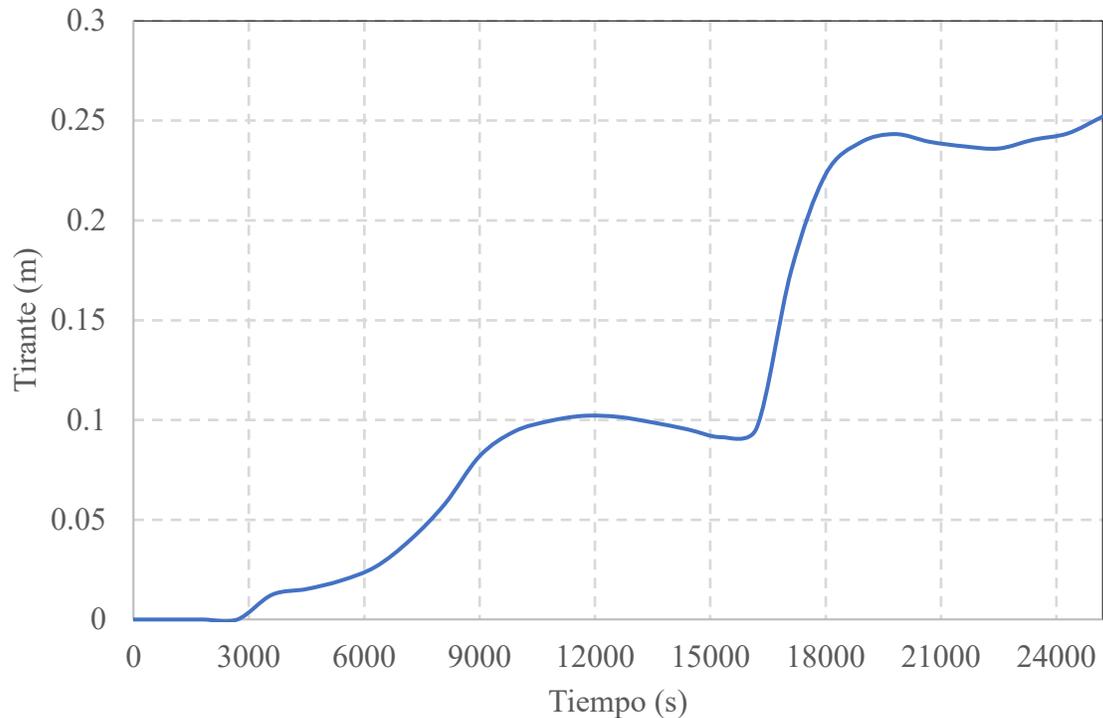
Tiempo (s)	Tirante (m)						
900	0.0000	7200	0.0731	13500	0.1499	19800	0.2560
1800	0.0000	8101	0.1035	14400	0.1448	20700	0.2600
2700	0.0000	9000	0.1292	15300	0.1495	21600	0.2666
3600	0.0129	9900	0.1391	16200	0.1584	22500	0.2668
4500	0.0186	10800	0.1447	17100	0.1967	23400	0.2721
5400	0.0285	11700	0.1468	18000	0.2461	24300	0.2784
6300	0.0495	12600	0.1444	18900	0.2505	25200	0.2778



Gráfica A2.5. Comportamiento del flujo con un $Tr = 5$ en Av. Ventura Puente.

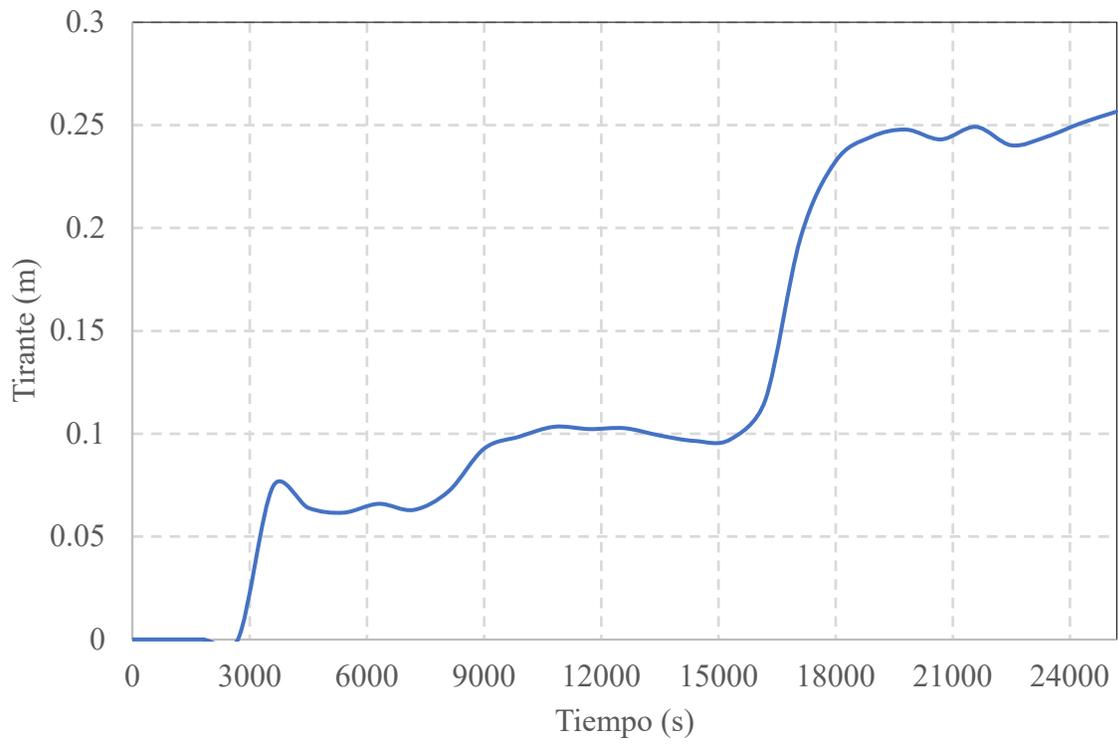


Gráfica A2.6. Comportamiento del flujo con un $Tr = 5$ en Blvd. García de León.

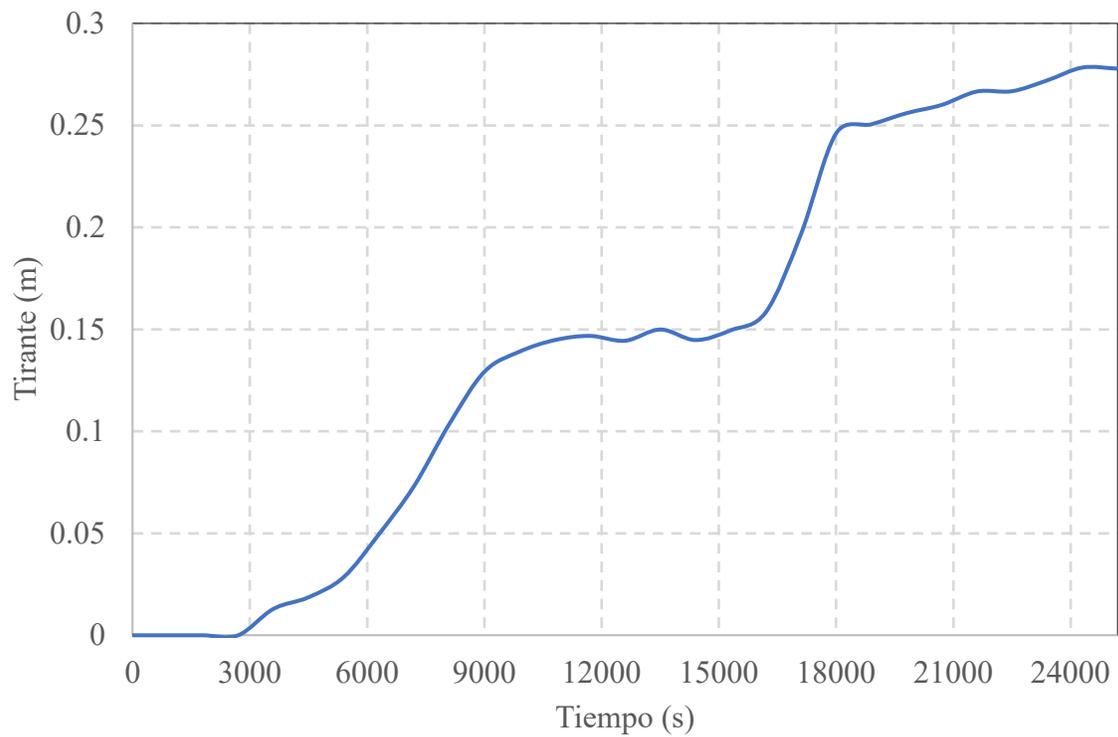




Gráfica A2.7. Comportamiento del flujo con un $Tr = 5$ en Av. Camelinas.



Gráfica A2.8. Comportamiento del flujo con un $Tr = 5$ en Av. Solidaridad.



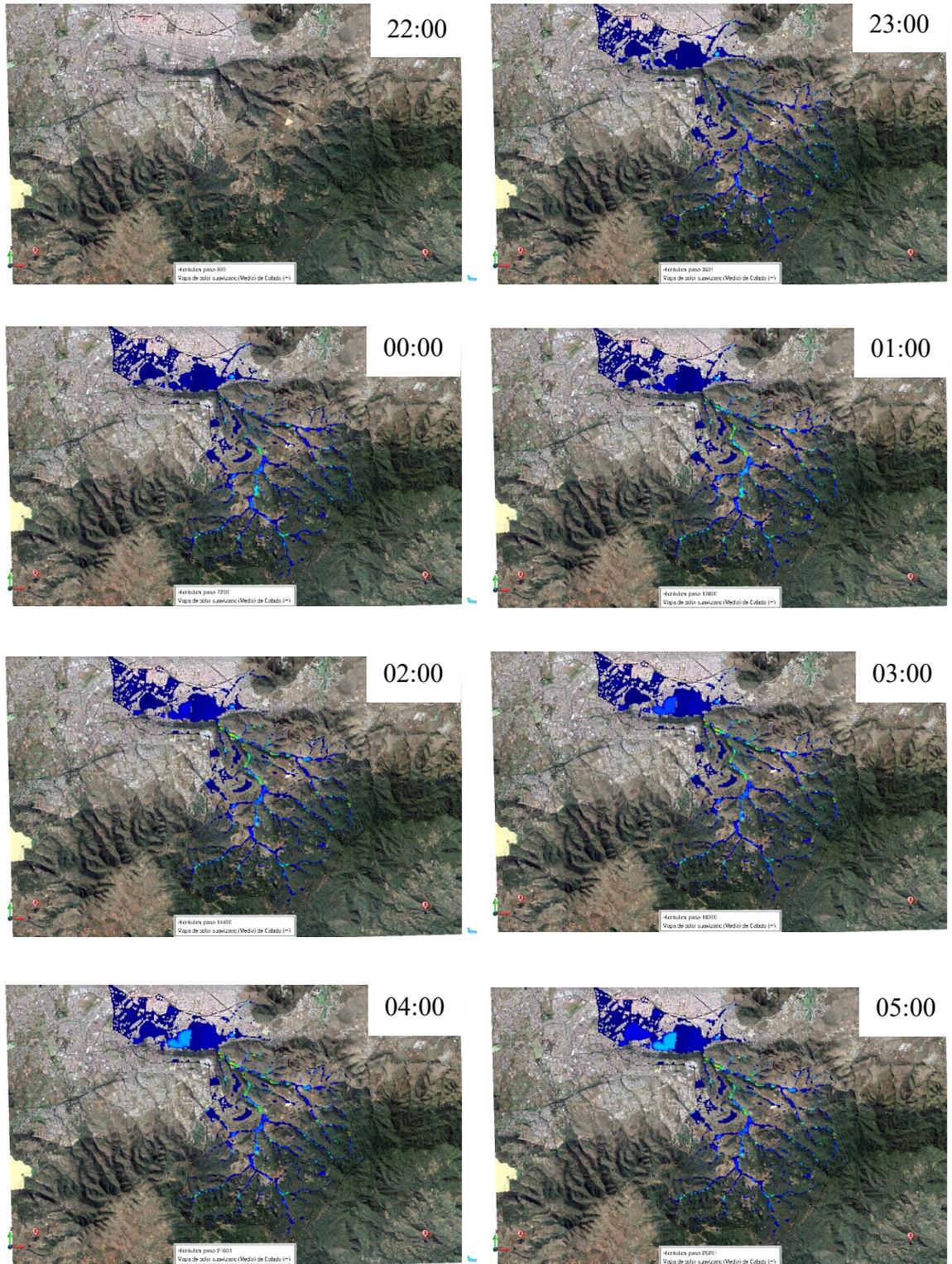


Figura A2.3. Modelación de la inundación para un $Tr = 10$ años en la microcuenca del Río Chiquito desde las 22:00 del 21 de octubre hasta las 05:00 del 22 de octubre.



Tabla A2.9. Flujo con el paso del tiempo con un $Tr = 10$ años en Av. Ventura Puente.

Tiempo (s)	Tirante (m)						
900	0.0000	7200	0.1257	13500	0.1917	19800	0.2522
1800	0.0000	8101	0.1428	14400	0.1999	20700	0.2537
2700	0.0000	9000	0.1483	15300	0.2056	21600	0.2565
3600	0.0154	9900	0.1644	16200	0.2156	22500	0.2689
4500	0.0537	10800	0.1691	17100	0.2224	23400	0.2741
5400	0.0896	11700	0.1805	18000	0.2305	24300	0.2773
6300	0.1057	12600	0.1866	18900	0.2343	25200	0.2830

Tabla A2.10. Flujo con el paso del tiempo con un $Tr = 10$ años en Blvd. García de León.

Tiempo (s)	Tirante (m)						
900	0.0000	7200	0.0709	13500	0.1113	19800	0.2658
1800	0.0000	8100	0.0946	14400	0.2075	20700	0.2691
2700	0.0119	9000	0.1041	15300	0.2479	21600	0.2751
3600	0.0158	9900	0.1046	16200	0.2553	22500	0.2748
4500	0.0199	10800	0.1036	17100	0.2554	23400	0.2716
5400	0.0271	11700	0.1015	18000	0.2556	24300	0.2704
6300	0.0414	12600	0.0987	18900	0.2611	25200	0.2660

Tabla A2.11. Flujo con el paso del tiempo con un $Tr = 10$ años en Av. Camelinas.

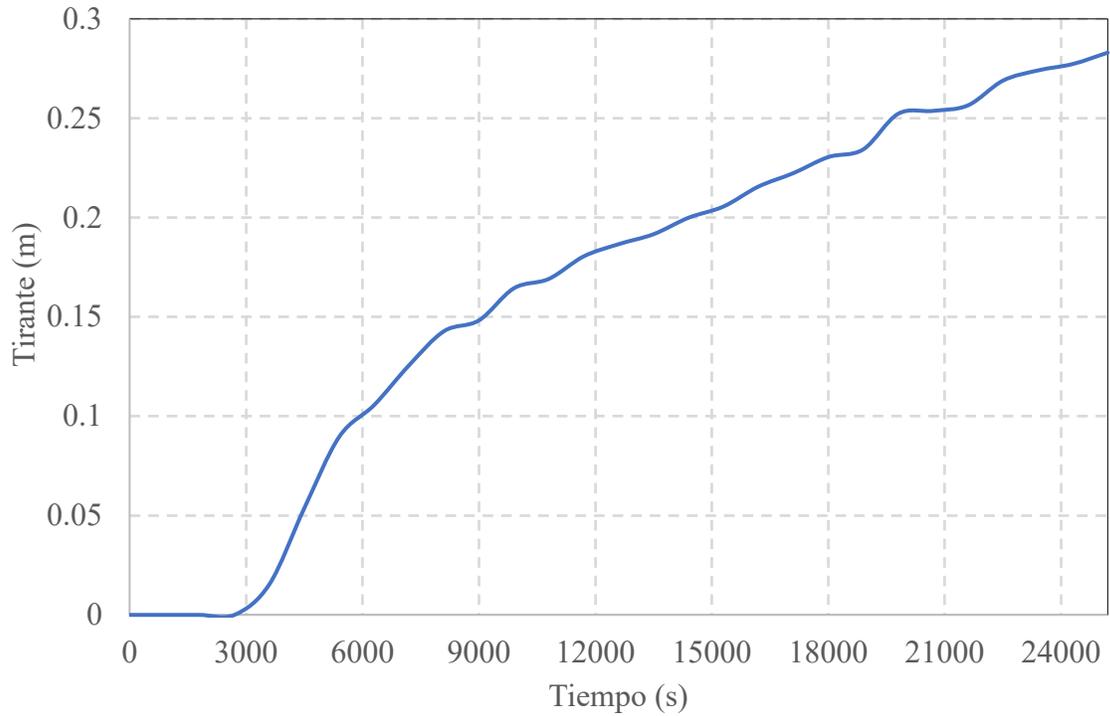
Tiempo (s)	Tirante (m)						
900	0.0000	7200	0.0933	13500	0.1431	19800	0.2845
1800	0.0000	8101	0.1072	14400	0.2322	20700	0.2872
2700	0.0707	9000	0.1124	15300	0.2634	21600	0.2931
3600	0.0732	9900	0.1123	16200	0.2704	22500	0.2957
4500	0.0597	10800	0.1096	17100	0.2697	23400	0.2894
5400	0.0633	11700	0.1076	18000	0.2687	24300	0.2913
6300	0.0730	12600	0.1060	18900	0.2792	25200	0.2849

Tabla A2.12. Flujo con el paso del tiempo con un $Tr = 10$ años en Av. Solidaridad.

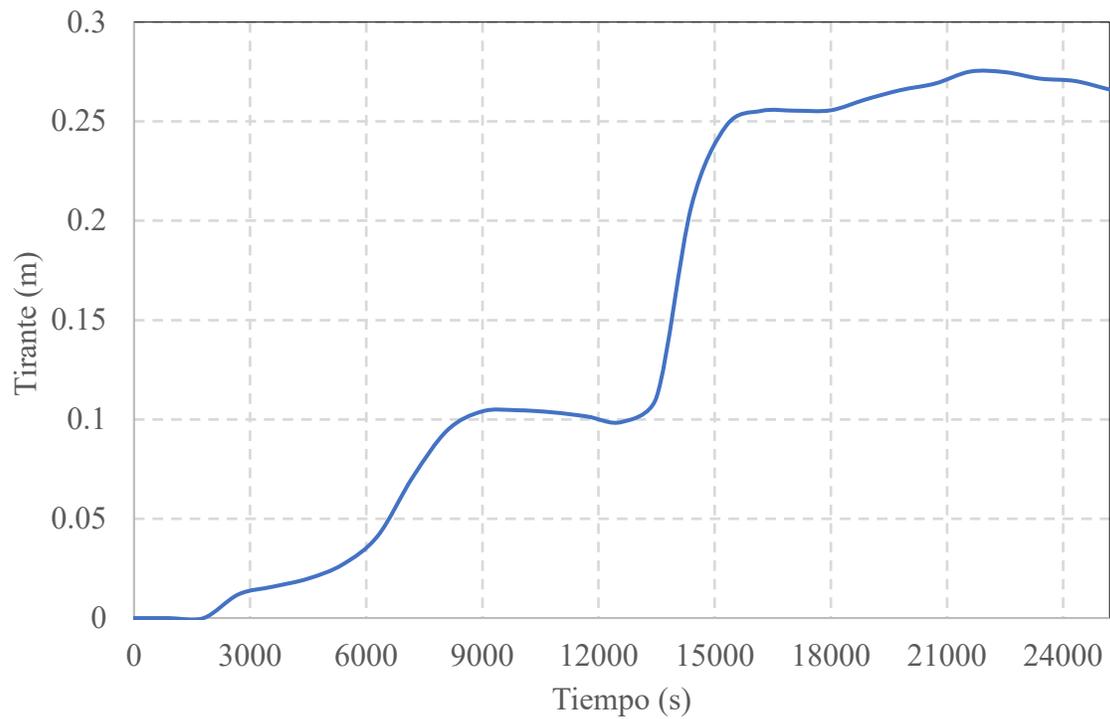
Tiempo (s)	Tirante (m)						
900	0.0000	7200	0.1159	13500	0.1882	19800	0.3551
1800	0.0000	8101	0.1388	14400	0.2977	20700	0.3613
2700	0.0123	9000	0.1477	15300	0.3362	21600	0.3662
3600	0.0202	9900	0.1467	16200	0.3436	22500	0.3659
4500	0.0370	10800	0.1450	17100	0.3441	23400	0.3613
5400	0.0533	11700	0.1420	18000	0.3434	24300	0.3609
6300	0.0789	12600	0.1380	18900	0.3509	25200	0.3542



Gráfica A2.9. Comportamiento del flujo con un $Tr = 10$ en Av. Ventura Puente.

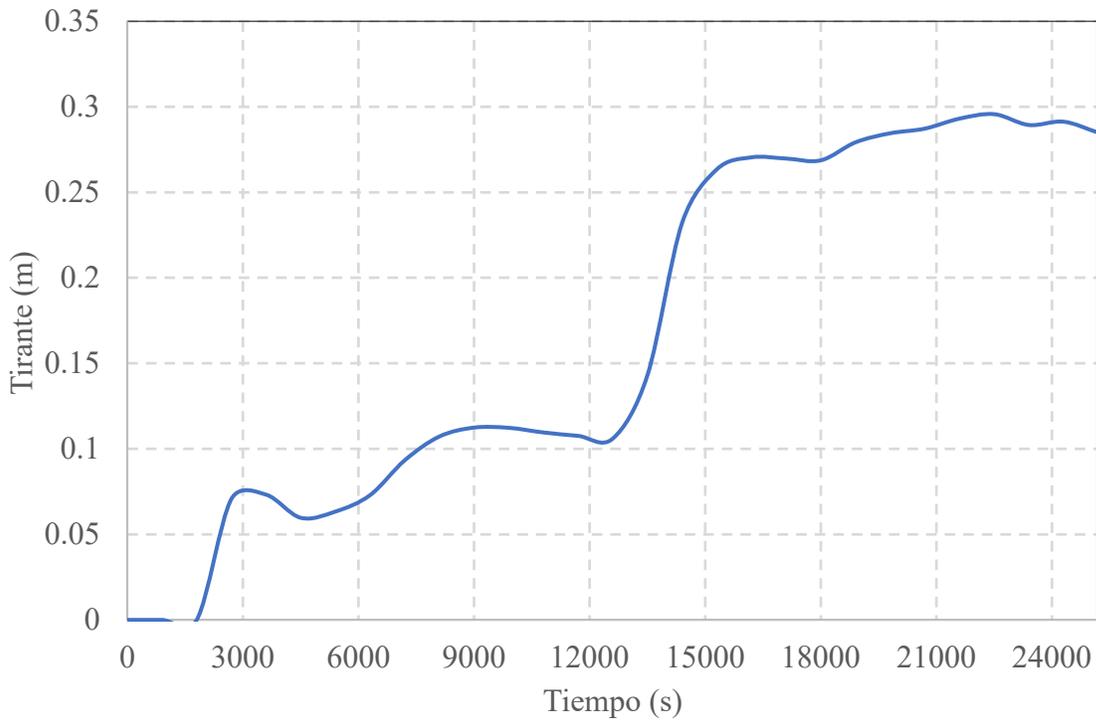


Gráfica A2.10. Comportamiento del flujo con un $Tr = 10$ en Blvd. García de León.

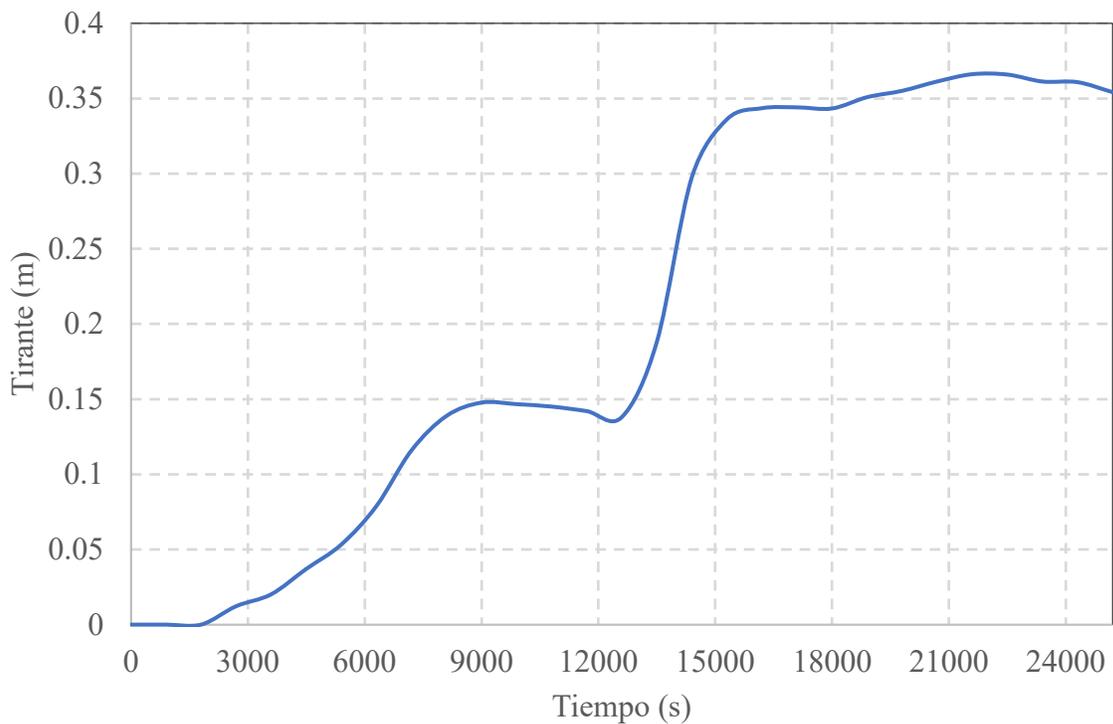




Gráfica A2.11. Comportamiento del flujo con un $Tr = 10$ en Av. Camelinas



Gráfica A2.12. Comportamiento del flujo con un $Tr = 10$ en Av. Solidaridad.



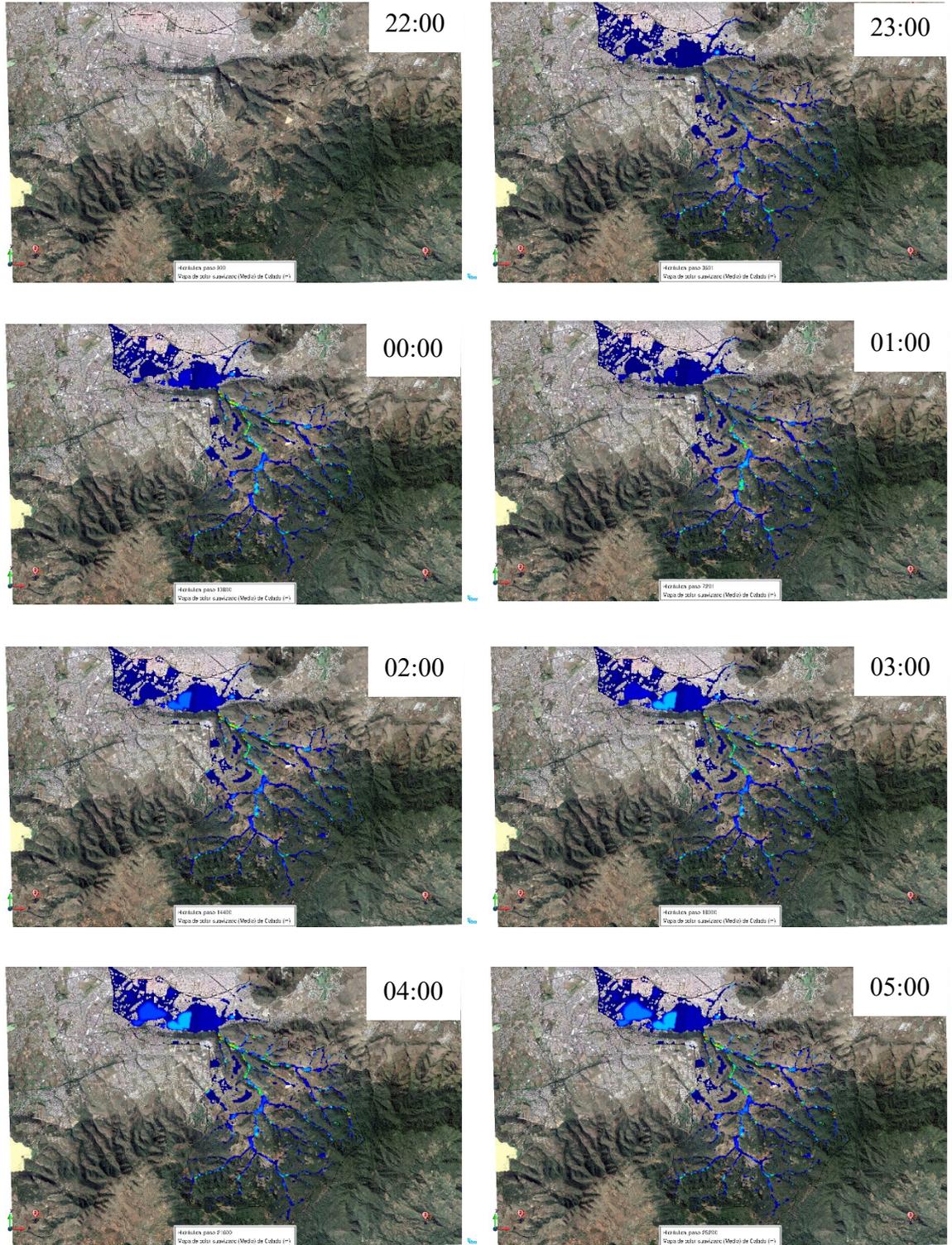


Figura A2.4. Modelación de la inundación para un $Tr = 25$ años en la microcuenca del Río Chiquito desde las 22:00 del 21 de octubre hasta las 05:00 del 22 de octubre.



Tabla A2.13. Flujo con el paso del tiempo con un $Tr = 25$ en Av. Ventura Puente.

Tiempo (s)	Tirante (m)						
900	0.0000	7200	0.2068	13500	0.2729	19800	0.3212
1800	0.0251	8101	0.2194	14400	0.2778	20700	0.3253
2700	0.0941	9000	0.2334	15300	0.2836	21600	0.3296
3600	0.1295	9900	0.2423	16200	0.2929	22500	0.3313
4500	0.1545	10800	0.2460	17100	0.3003	23400	0.3409
5400	0.1720	11700	0.2571	18000	0.3088	24300	0.3474
6300	0.1954	12600	0.2665	18900	0.3172	25200	0.3508

Tabla A2.14. Flujo con el paso del tiempo con un $Tr = 25$ en Blvd. García de León.

Tiempo (s)	Tirante (m)						
900	0.0000	7200	0.1481	13500	0.3428	19800	0.3491
1800	0.0089	8100	0.1504	14400	0.3499	20700	0.3485
2700	0.0161	9000	0.1491	15300	0.3577	21600	0.3489
3600	0.0267	9900	0.1450	16200	0.3567	22500	0.3479
4500	0.0463	10800	0.1794	17100	0.3657	23400	0.3496
5400	0.0917	11700	0.3366	18000	0.3575	24300	0.3402
6300	0.1329	12600	0.3394	18900	0.3541	25200	0.3325

Tabla A2.15. Flujo con el paso del tiempo con un $Tr = 25$ en Av. Camelinas.

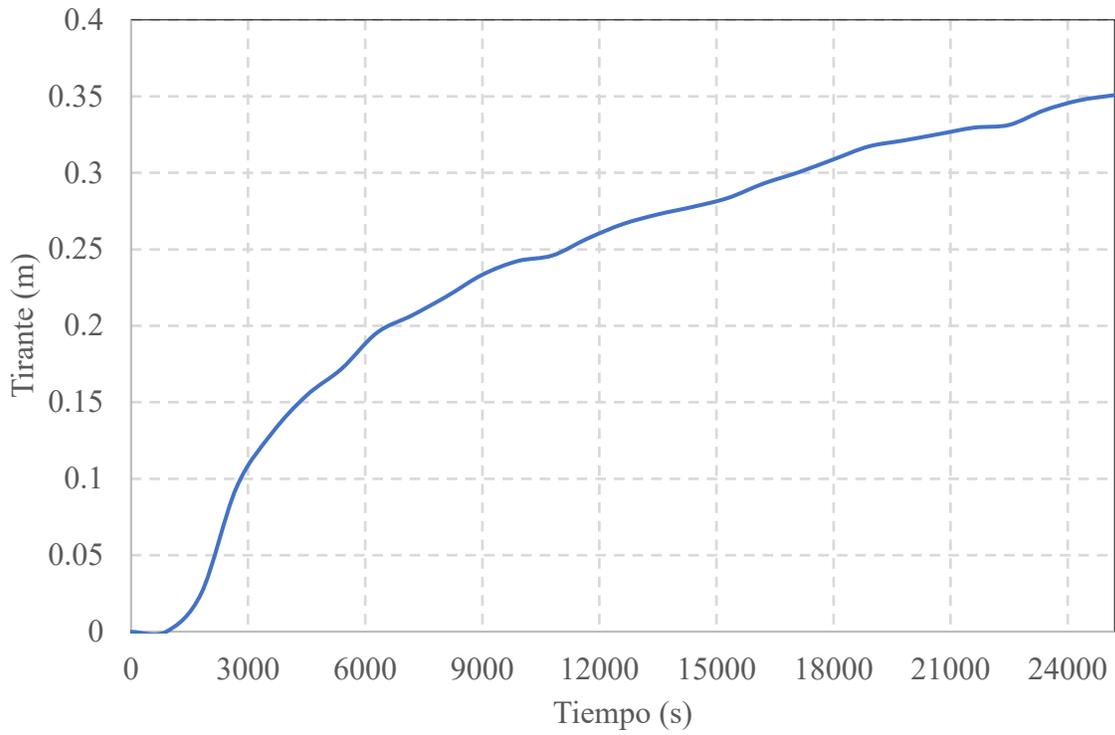
Tiempo (s)	Tirante (m)						
900	0.0000	7200	0.1437	13500	0.3571	19800	0.3483
1800	0.0619	8101	0.1546	14400	0.3566	20700	0.3461
2700	0.0848	9000	0.1435	15300	0.3579	21600	0.3463
3600	0.0795	9900	0.1379	16200	0.3526	22500	0.3458
4500	0.0740	10800	0.1849	17100	0.3553	23400	0.3474
5400	0.1120	11700	0.3191	18000	0.3525	24300	0.3423
6300	0.1350	12600	0.3454	18900	0.3535	25200	0.3318

Tabla A2.16. Flujo con el paso del tiempo con un $Tr = 25$ en Av. Solidaridad.

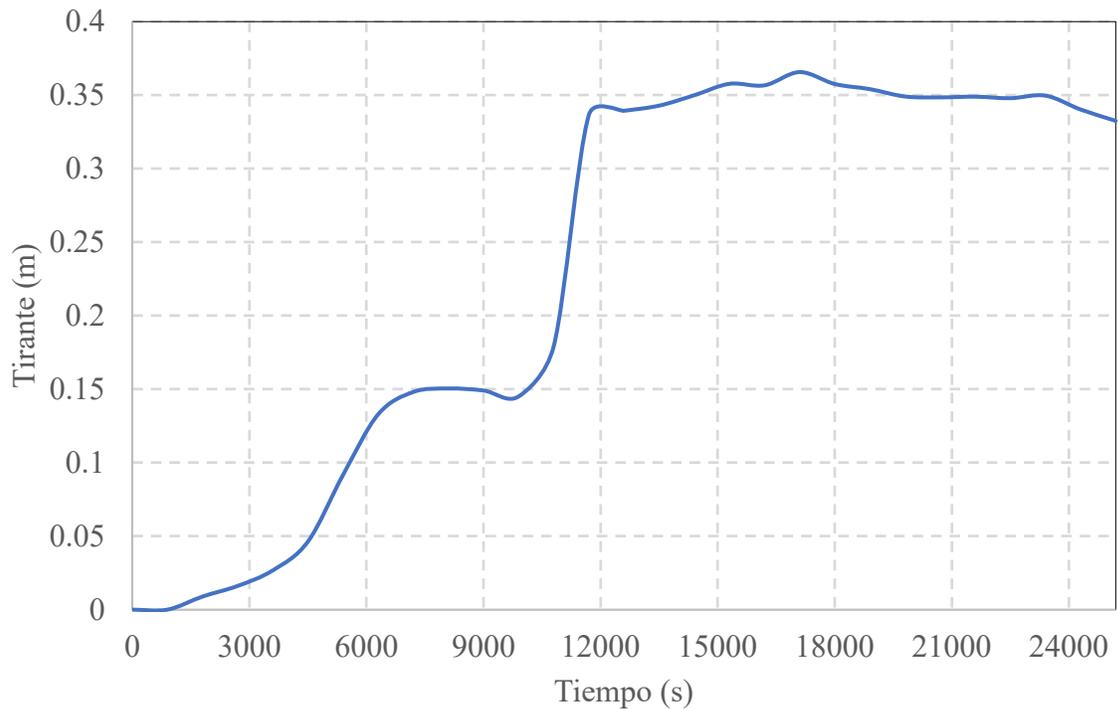
Tiempo (s)	Tirante (m)						
900	0.0000	7200	0.1767	13500	0.4014	19800	0.4198
1800	0.0111	8101	0.1796	14400	0.4105	20700	0.4192
2700	0.0247	9000	0.1795	15300	0.4267	21600	0.4188
3600	0.0493	9900	0.1726	16200	0.4204	22500	0.4173
4500	0.0691	10800	0.2262	17100	0.4293	23400	0.4203
5400	0.1109	11700	0.3323	18000	0.4344	24300	0.4106
6300	0.1618	12600	0.3955	18900	0.4267	25200	0.4015



Gráfica A2.13. Comportamiento del flujo con un $Tr = 25$ en Av. Ventura Puente

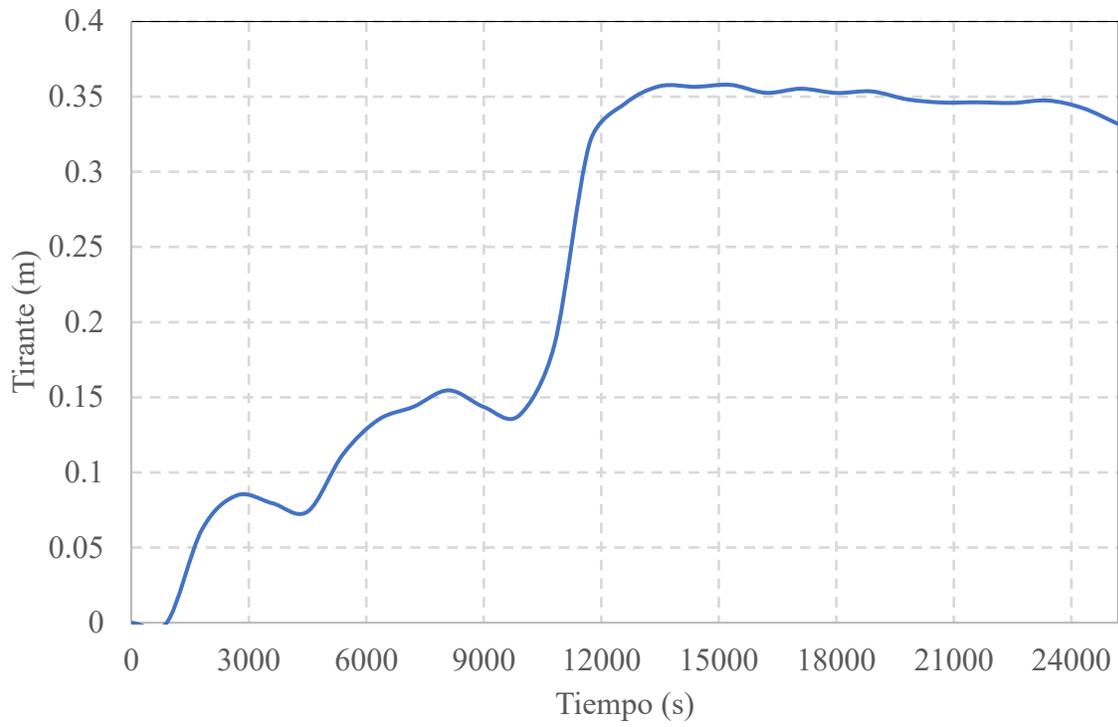


Gráfica A2.14. Comportamiento del flujo con un $Tr = 25$ en Blvd. García de León.

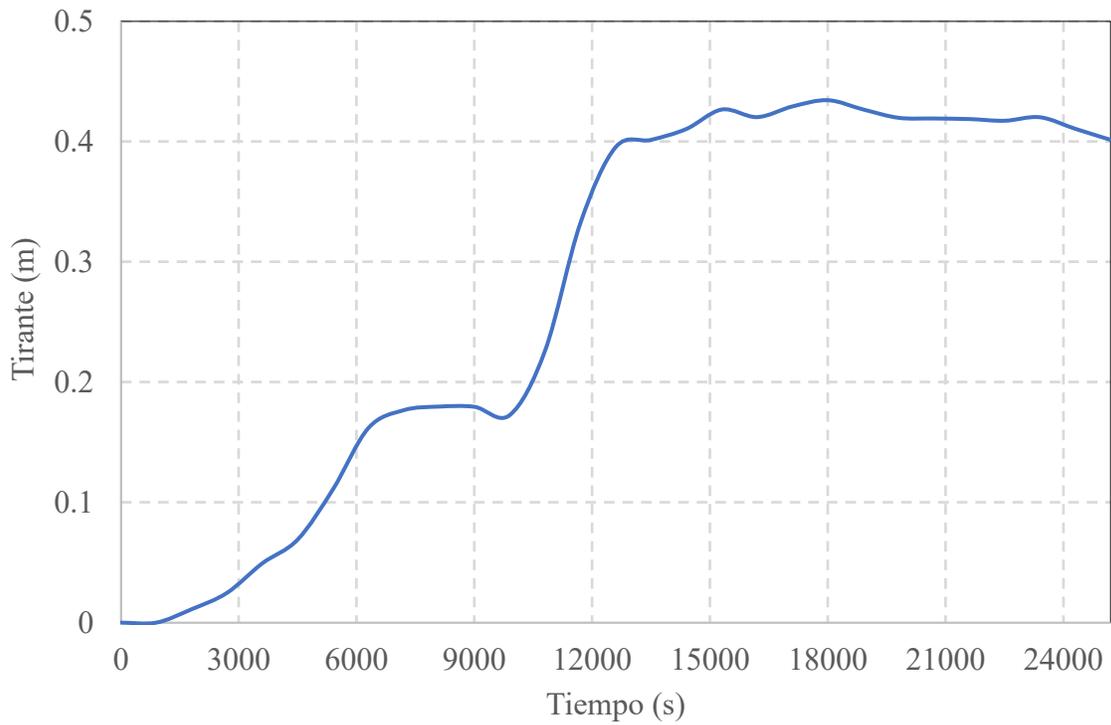




Gráfica A2.15. Comportamiento del flujo con un $Tr = 25$ en Av. Camelinas.



Gráfica A2.16. Comportamiento del flujo con un $Tr = 25$ en Av. Solidaridad.



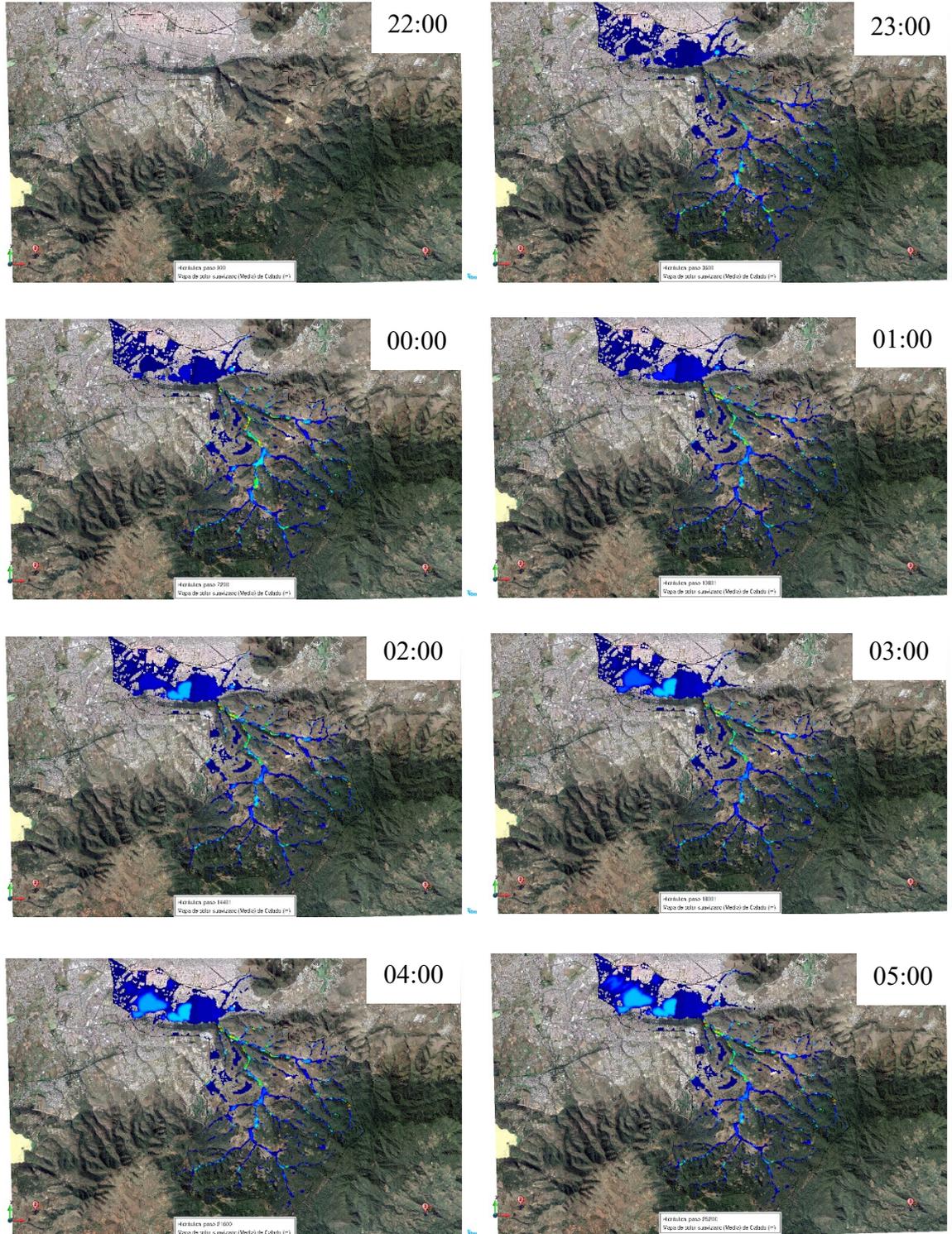


Figura A2.5. Modelación de la inundación para un $Tr = 50$ años en la microcuenca del Río Chiquito desde las 22:00 del 21 de octubre hasta las 05:00 del 22 de octubre.



Tabla A2.17. Flujo con el paso del tiempo con un $Tr = 50$ en Av. Ventura Puente.

Tiempo (s)	Tirante (m)						
900	0.0000	7200	0.1932	13500	0.2952	19800	0.3551
1800	0.0301	8101	0.2106	14400	0.3053	20700	0.3614
2700	0.0782	9000	0.2300	15300	0.3152	21600	0.3689
3600	0.1018	9900	0.2454	16200	0.3233	22500	0.3759
4500	0.1269	10800	0.2608	17100	0.3308	23400	0.3848
5400	0.1526	11700	0.2740	18000	0.3394	24300	0.4054
6300	0.1737	12600	0.2847	18900	0.3467	25200	0.4343

Tabla A2.18. Flujo con el paso del tiempo con un $Tr = 50$ en Blvd. García de León.

Tiempo (s)	Tirante (m)						
900	0.0000	7200	0.1477	13500	0.4160	19800	0.3610
1800	0.0144	8100	0.1479	14400	0.4111	20700	0.3501
2700	0.0226	9000	0.1420	15300	0.4010	21600	0.3487
3600	0.0317	9900	0.2979	16200	0.3937	22500	0.3440
4500	0.0521	10800	0.4129	17100	0.3815	23400	0.3358
5400	0.1117	11700	0.4275	18000	0.3749	24300	0.3317
6301	0.1393	12600	0.4253	18900	0.3679	25200	0.3309

Tabla A2.19. Flujo con el paso del tiempo con un $Tr = 50$ en Av. Camelinas.

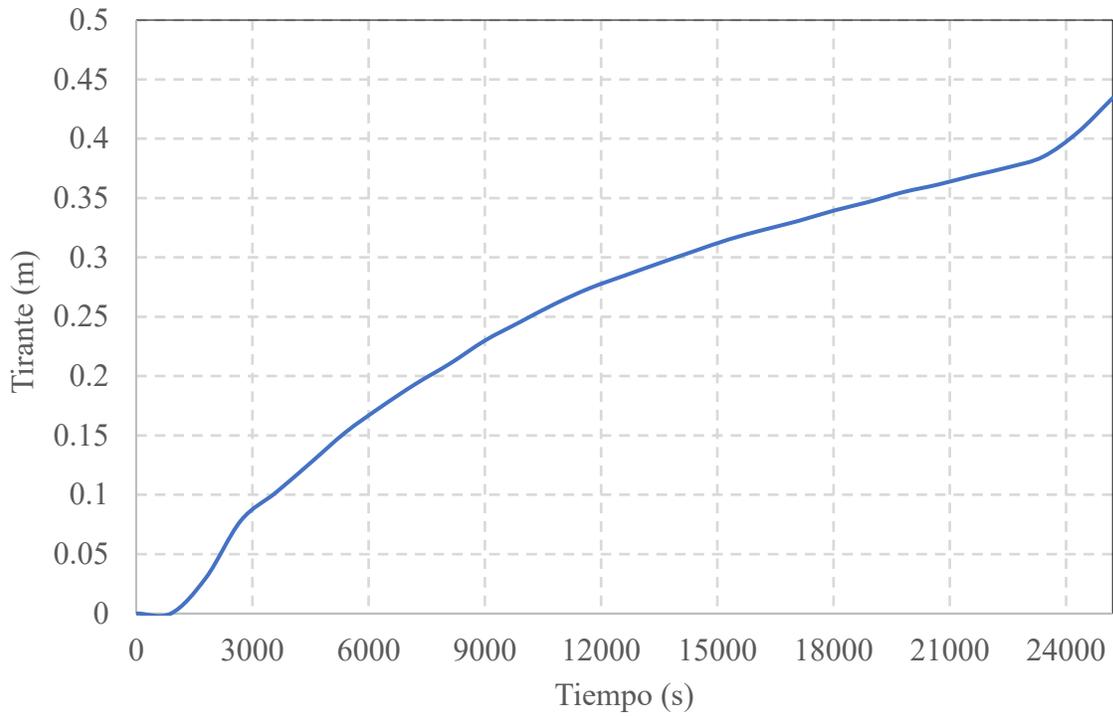
Tiempo (s)	Tirante (m)						
900	0.0000	7200	0.1730	13500	0.3672	19800	0.3804
1800	0.0905	8101	0.1563	14400	0.3781	20700	0.3762
2700	0.0789	9000	0.1542	15300	0.3805	21600	0.3781
3600	0.0887	9900	0.3307	16200	0.3924	22500	0.3718
4500	0.0873	10800	0.3471	17100	0.3925	23400	0.3736
5400	0.1361	11700	0.3557	18000	0.3952	24300	0.3630
6300	0.1558	12600	0.3528	18900	0.3876	25200	0.3606

Tabla A2.20. Flujo con el paso del tiempo con un $Tr = 50$ en Av. Solidaridad.

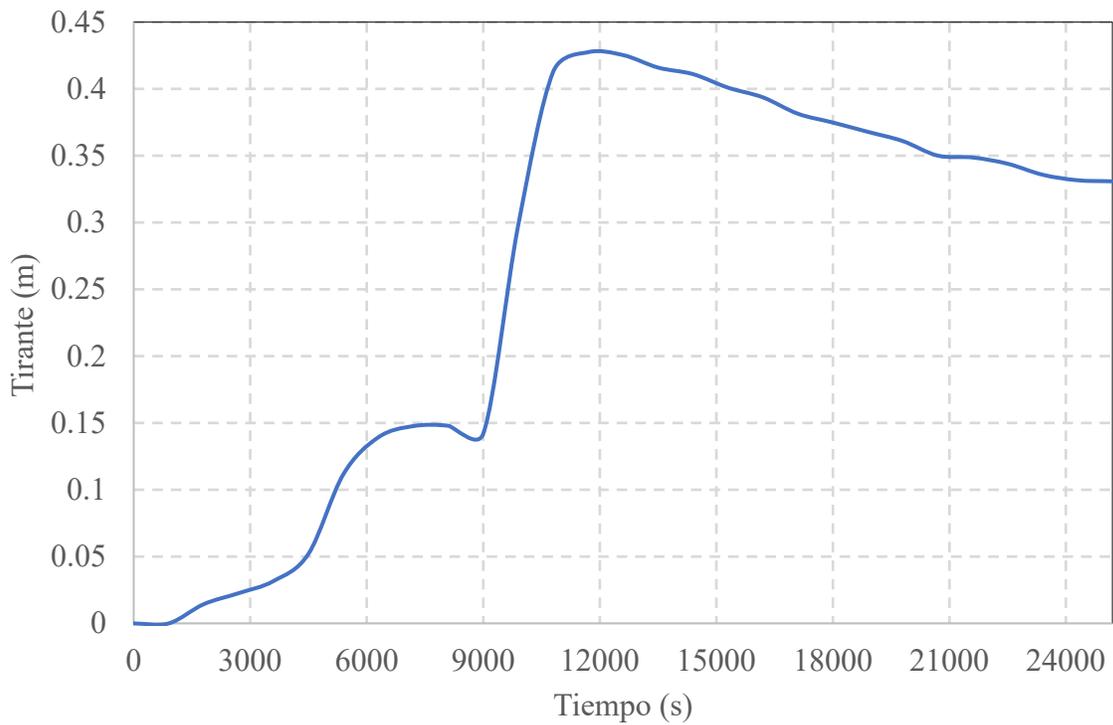
Tiempo (s)	Tirante (m)						
900	0.0000	7200	0.1614	13500	0.4330	19800	0.3795
1800	0.0146	8101	0.1605	14400	0.4275	20700	0.3679
2700	0.0338	9000	0.1562	15300	0.4192	21600	0.3666
3600	0.0487	9900	0.3251	16200	0.4103	22500	0.3640
4500	0.0731	10800	0.4267	17100	0.3994	23400	0.3544
5400	0.1318	11700	0.4429	18000	0.3928	24300	0.3498
6300	0.1546	12600	0.4417	18900	0.3862	25200	0.3493



Gráfica A2.17. Comportamiento del flujo con un $Tr = 50$ en Av. Ventura Puente.

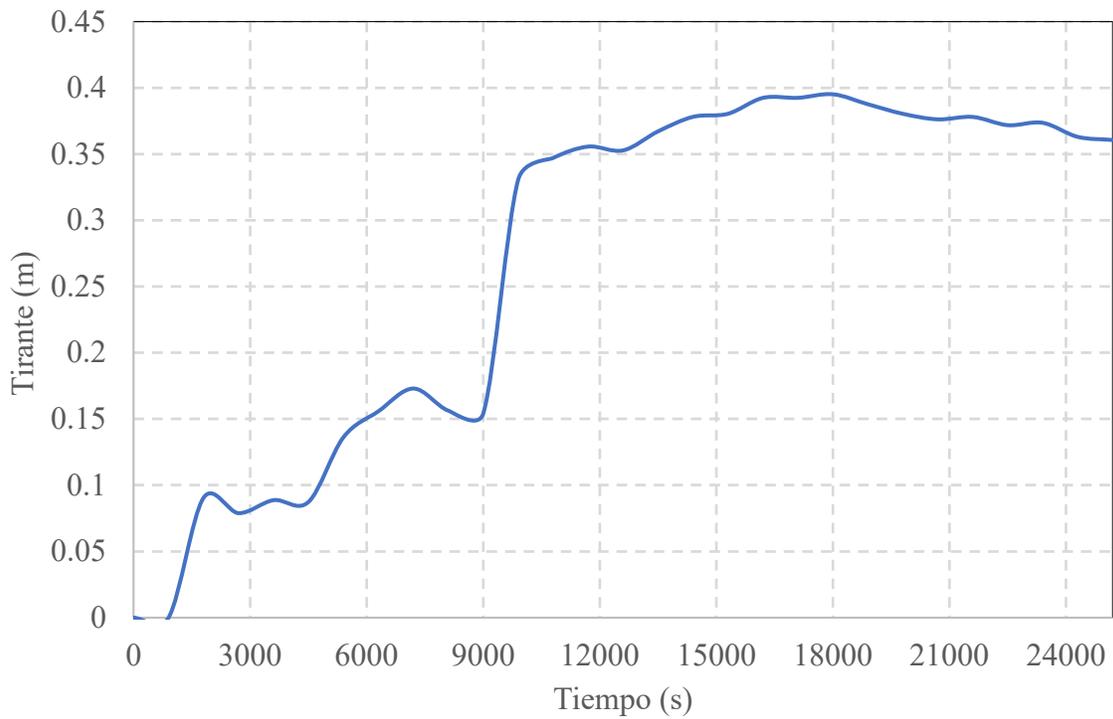


Gráfica A2.18. Comportamiento del flujo con un $Tr = 50$ en Blvd. García de León.

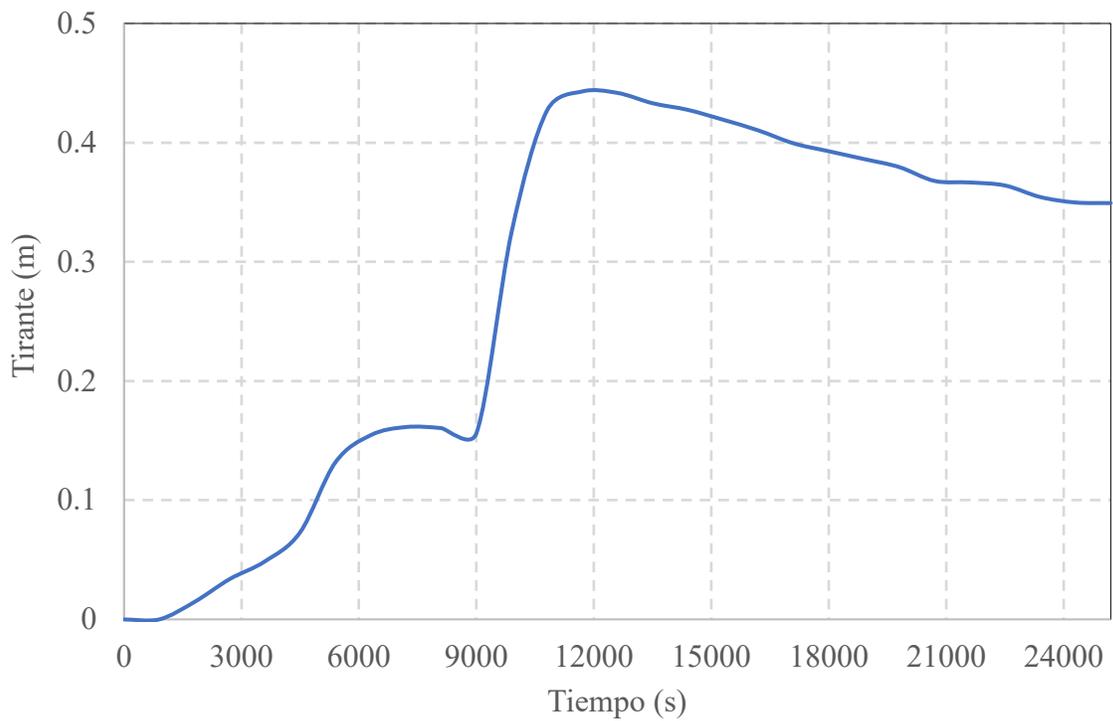




Gráfica A2.19. Comportamiento del flujo con un $Tr = 50$ en Av. Camelinas.



Gráfica A2.20. Comportamiento del flujo con un $Tr = 50$ en Av. Solidaridad.



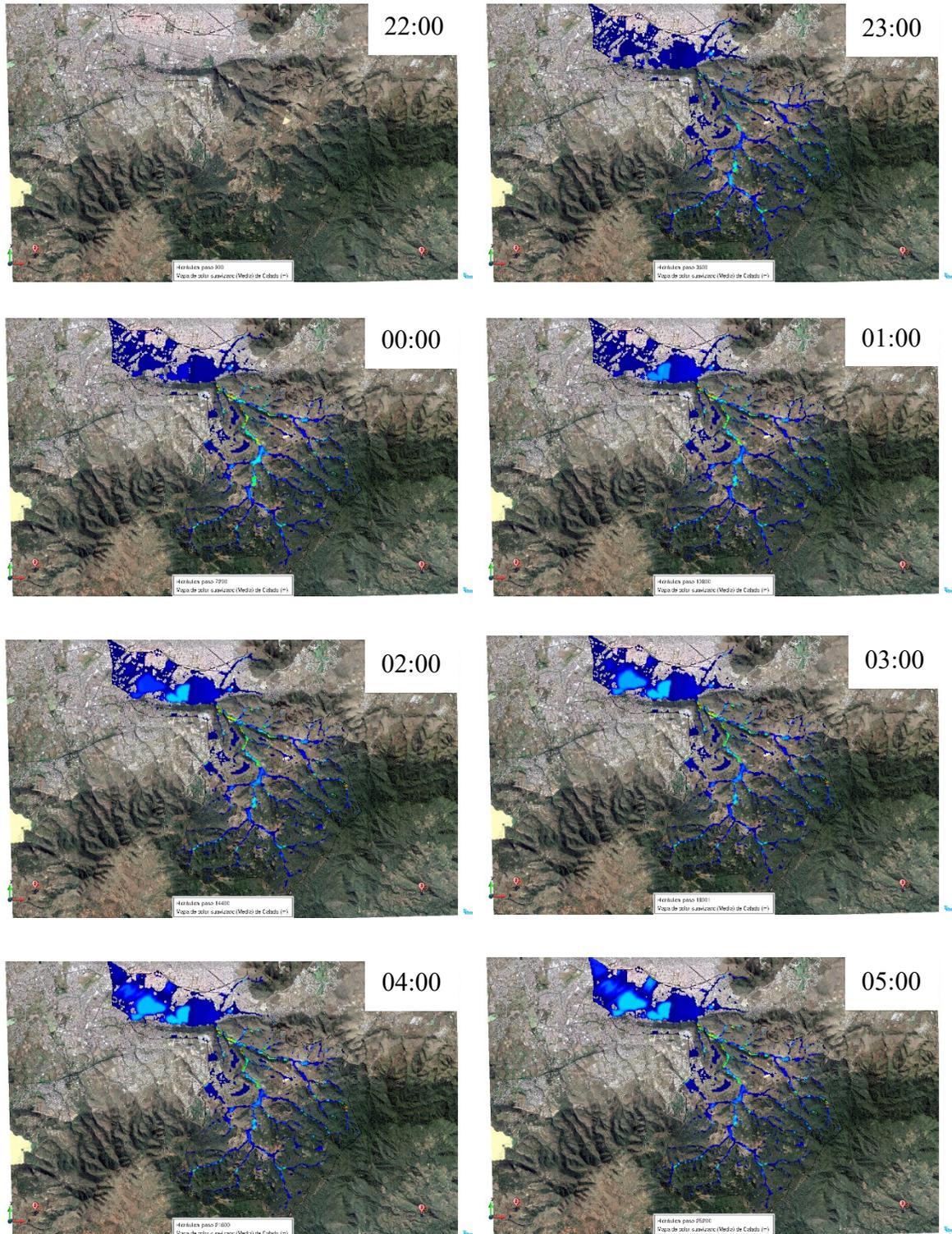


Figura A2.6. Modelación de la inundación para un $Tr = 100$ años en la microcuenca del Río Chiquito desde las 22:00 del 21 de octubre hasta las 05:00 del 22 de octubre.



Tabla A2.21. Flujo con el paso del tiempo con un $Tr = 100$ en Av. Ventura Puente.

Tiempo (s)	Tirante (m)						
900	0.0000	7200	0.1197	13500	0.5412	19800	0.5313
1800	0.0273	8101	0.1433	14400	0.5426	20700	0.5266
2700	0.0360	9000	0.2014	15300	0.5421	21600	0.5222
3600	0.0441	9900	0.3299	16200	0.5394	22500	0.5172
4500	0.0497	10800	0.4407	17100	0.5371	23400	0.5131
5400	0.0662	11700	0.5060	18000	0.5372	24300	0.5097
6300	0.0926	12600	0.5326	18900	0.5339	25200	0.5078

Tabla A2.22. Flujo con el paso del tiempo con un $Tr = 100$ en Blvd. García de León.

Tiempo (s)	Tirante (m)						
900	0.0000	7200	0.2273	13500	0.5704	19800	0.5174
1800	0.0207	8100	0.3008	14400	0.5703	20700	0.5012
2700	0.0392	9000	0.5933	15300	0.5535	21600	0.4844
3600	0.0750	9900	0.6310	16200	0.5491	22500	0.4739
4500	0.1749	10800	0.6178	17100	0.5430	23400	0.4662
5400	0.2247	11700	0.6062	18000	0.5373	24300	0.4569
6301	0.2347	12600	0.5903	18900	0.5327	25200	0.4603

Tabla A2.23. Flujo con el paso del tiempo con un $Tr = 100$ en Av. Camelinas.

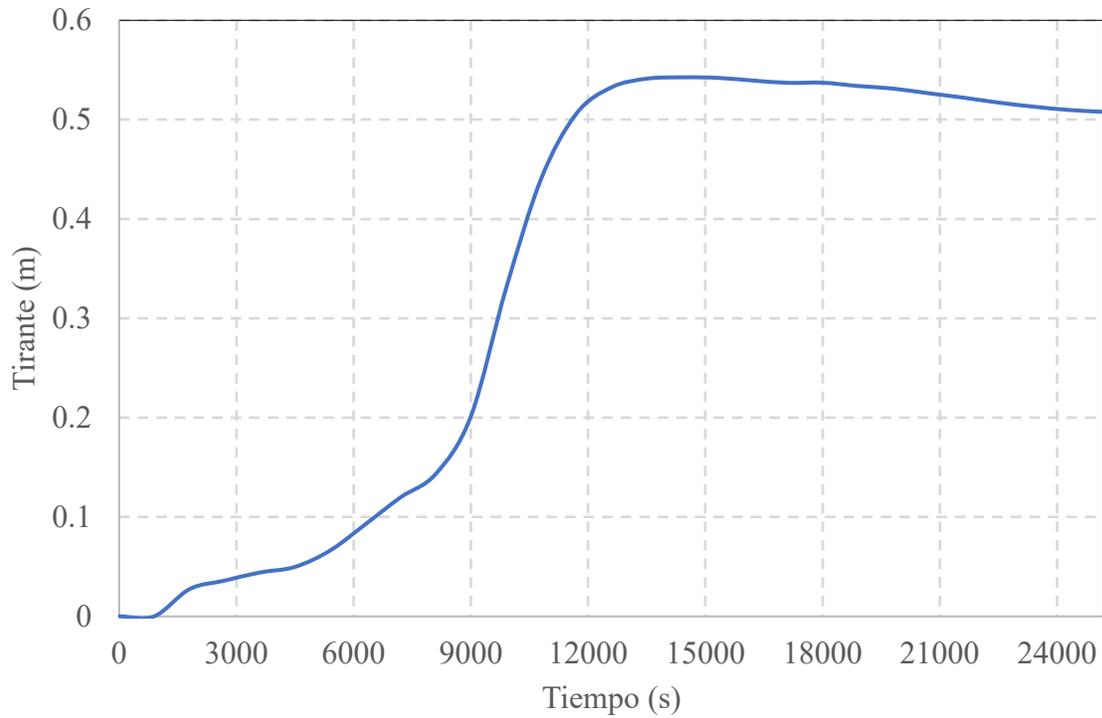
Tiempo (s)	Tirante (m)						
900	0.0000	7200	0.1726	13500	0.4538	19800	0.4131
1800	0.0805	8101	0.2406	14400	0.4523	20700	0.4014
2700	0.0898	9000	0.4606	15300	0.4448	21600	0.3924
3600	0.0813	9900	0.5017	16200	0.4372	22500	0.3809
4500	0.1395	10800	0.4921	17100	0.4315	23400	0.3729
5400	0.1830	11700	0.4840	18000	0.4295	24300	0.3657
6300	0.1800	12600	0.4734	18900	0.4239	25200	0.3686

Tabla A2.24. Flujo con el paso del tiempo con un $Tr = 100$ en Av. Solidaridad.

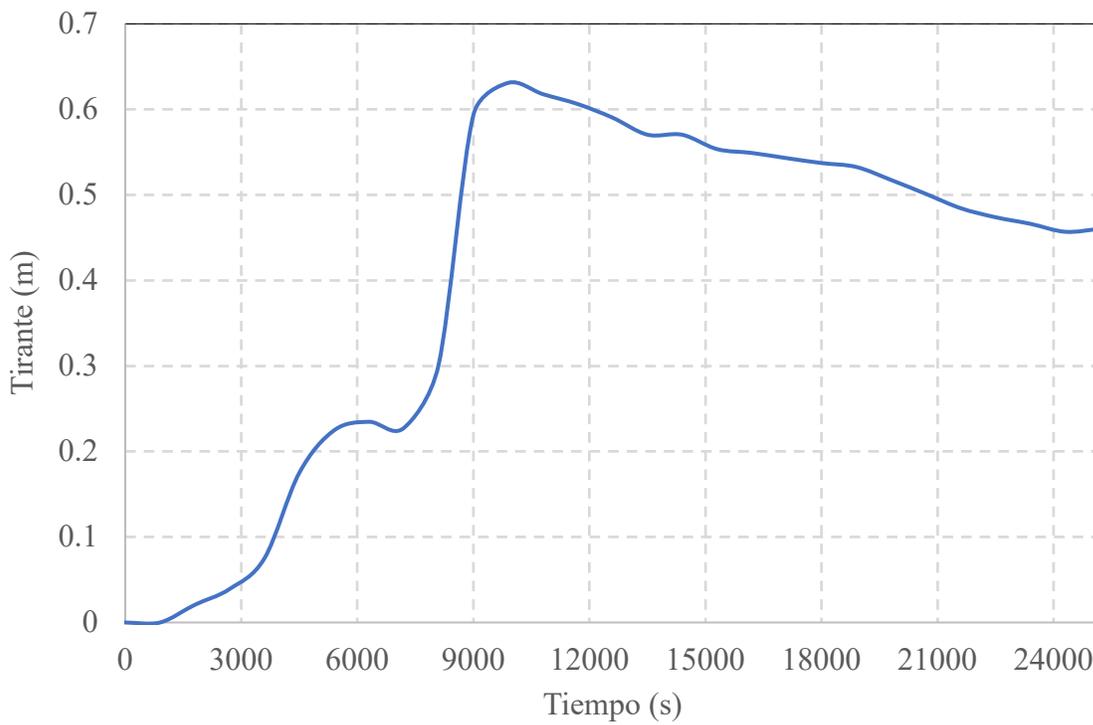
Tiempo (s)	Tirante (m)						
900	0.0000	7200	0.2044	13500	0.5148	19800	0.4694
1800	0.0201	8101	0.2756	14400	0.5146	20700	0.4556
2700	0.0504	9000	0.5253	15300	0.5031	21600	0.4410
3600	0.0753	9900	0.5686	16200	0.4972	22500	0.4301
4500	0.1562	10800	0.5573	17100	0.4909	23400	0.4226
5400	0.2014	11700	0.5463	18000	0.4865	24300	0.4157
6300	0.2105	12600	0.5362	18900	0.4821	25200	0.4177



Gráfica A2.21. Comportamiento del flujo con un $Tr = 100$ en Av. Ventura Puente.

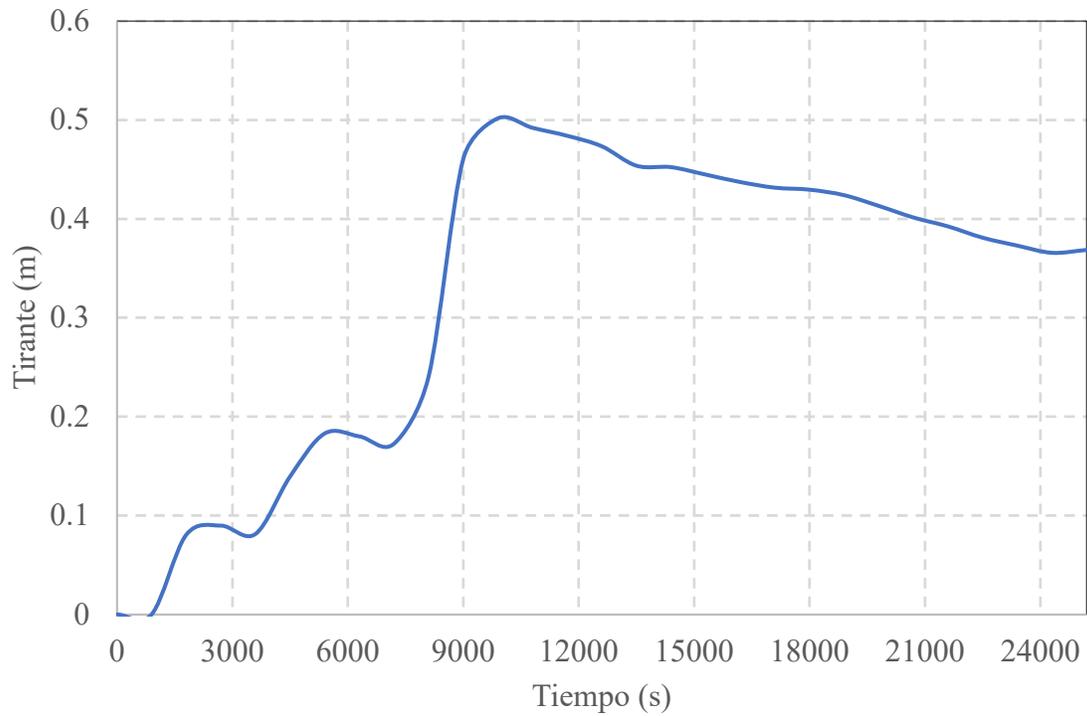


Gráfica A2.22. Comportamiento del flujo con un $Tr = 100$ en Blvd. García de León.





Gráfica A2.23. Comportamiento del flujo con un $Tr = 100$ en Av. Camelinas.



Gráfica A2.24. Comportamiento del flujo con un $Tr = 100$ en Av. Solidaridad.

