



Casa abierta al tiempo
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA UNIDAD IZTAPALAPA

POSGRADO EN ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE

**DETERMINACIÓN DE INUNDACIONES
SÚBITAS EN LA REGIÓN HIDROLÓGICA
NÚMERO 12 LERMA-SANTIAGO, MÉXICO.**

TESIS

Para obtener el grado de

MAESTRA EN CIENCIAS

(ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE)

PRESENTA:

Erika Hernández Vivar

DIRECTORA

Dra. Claudia Rojas Serna

CIUDAD DE MÉXICO, 2023

El presente trabajo de tesis se desarrolló bajo la Asesoría de:

Dra. Claudia Rojas Serna

Universidad Autónoma Metropolitana

Departamento de Ingeniería y de Procesos e Hidráulica

Como sinodales:

Dra. Lucía Guadalupe Matías Ramírez

Subdirectora de Riesgos por Inundación

CENAPRED

Dr. Antonio Zoilo Márquez García

Universidad Autónoma Metropolitana

Departamento de Hidrobiología

Dr. Oscar Arturo Fuentes Mariles

Instituto de Ingeniería

Universidad Nacional Autónoma de México

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	13
INTRODUCCIÓN.....	14
ANTECEDENTES.....	16
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	19
PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	19
HIPOTESIS.....	20
OBJETIVO GENERAL.....	20
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
ESTADO DEL ARTE	20
JUSTIFICACIÓN	23
METODOLOGÍA	24
ALCANCE	30
CAPITULO I.	31
REGIÓN HIDROLÓGICA NÚMERO 12 LERMA SANTIAGO Y DETERMINACIÓN DE LAS CUENCAS DE ESTUDIO.....	31
REGIÓN HIDROLÓGICA NÚMERO 12 LERMA SANTIAGO (RH12 LS).....	32
UBICACIÓN DE LA REGIÓN HIDROLÓGICA NÚMERO 12 LERMA SANTIAGO (RH12 LS).....	32
HIDROGRAFÍA DE LA REGIÓN HIDROLÓGICA NÚMERO 12 LERMA SANTIAGO (RH12 LS).....	33
EDAFOLOGÍA DE LA REGIÓN HIDROLÓGICA NÚMERO 12 LERMA SANTIAGO (RH12 LS).....	34
USO DE SUELO Y VEGETACIÓN DE LA REGIÓN HIDROLÓGICA NÚMERO 12 LERMA SANTIAGO (RH12 LS).....	35
LLUVIA Y ESCURRIMIENTO DE LA REGIÓN HIDROLÓGICA NÚMERO 12 LERMA SANTIAGO (RH12 LS).....	36
ANTECEDENTES DE LAS ZONAS DE INUNDACIÓN DE LA RH12 LS.....	39
CAPITULO II.	43
CUENCA DEL RÍO SAN JUAN DE DIOS	43
ANTECEDENTES DE LAS INUNDACIONES CUENCA SAN JUAN DE DIOS.....	44
UBICACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO SAN JUAN DE DIOS	46
EDAFOLOGÍA DE LA CUENCA DEL RÍO SAN JUAN DE DIOS	47
USO DE SUELO Y VEGETACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO SAN JUAN DE DIOS	47
HIDROLOGÍA DE LA CUENCA DEL RÍO SAN JUAN DE DIOS.....	48
RESULTADOS	52

LLUVIA – ESCURRIMIENTO Y SIMULACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO DE SAN JUAN DE DIOS	52
DISCUSIÓN CUENCA SAN JUAN DE DIOS	65
CAPITULO III.	68
CUENCA DEL RÍO LA LAJA	68
ANTECEDENTES DE LAS INUNDACIONES	69
UBICACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO LA LAJA	70
EDAFOLOGÍA DE LA CUENCA DEL RÍO LA LAJA	71
USO DE SUELO Y VEGETACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO LA LAJA	72
HIDROLOGÍA DE LA CUENCA DEL RÍO LA LAJA.....	73
RESULTADOS	76
LLUVIA, ESCURRIMIENTO Y SIMULACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO LA LAJA.....	76
DISCUSIÓN CUENCA LA LAJA	85
CAPITULO IV.	87
CUENCA DEL RÍO TEJALPA	87
ANTECEDENTES DE LAS INUNDACIONES CUENCA TEJALPA.....	88
UBICACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO TEJALPA	89
EDAFOLOGÍA DE LA CUENCA DEL TEJALPA.....	90
USO DE SUELO Y VEGETACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO TEJALPA	91
HIDROLOGÍA DE LA CUENCA DEL RÍO TEJALPA.....	92
RESULTADOS	95
LLUVIA, ESCURRIMIENTO Y SIMULACIÓN DE LA CUENCA DEL TEJALPA	95
DISCUSIÓN CUENCA TEJALPA.....	103
CAPITULO V	104
CUENCA DEL RÍO DUERO	104
ANTECEDENTES DE LAS INUNDACIONES CUENCA DUERO	105
UBICACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO DUERO.....	106
EDAFOLOGÍA DE LA CUENCA DEL RÍO DUERO	107
USO DE SUELO Y VEGETACIÓN DE LA CUENCA DEL DUERO	108
HIDROLOGÍA DE LA CUENCA DEL RÍO DUERO	109
RESULTADOS	112
LLUVIA, ESCURRIMIENTO Y SIMULACIÓN DE LA CUENCA DEL RIO DUERO	112
DICUSIÓN CUENCA DUERO	116
CAPITULO VI	117

CUENCA DEL RÍO CHIQUITO	117
ANTECEDENTES DE LAS INUNDACIONES CUENCA CHIQUITO	118
UBICACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO CHIQUITO	119
EDAFOLOGÍA DE LA CUENCA DEL RÍO CHIQUITO	120
USO DE SUELO Y VEGETACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO CHIQUITO	120
HIDROLOGÍA DE LA CUENCA DEL RÍO CHIQUITO	121
RESULTADOS	124
LLUVIA, ESCURRIMIENTO Y SIMULACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO CHIQUITO	124
DISCUSIÓN CUENCA RÍO CHIQUITO	127
CAPITULO VII.	128
PROTOCOLO PROPUESTO PARA EL ANÁLISIS DE INUNDACIONES SÚBITAS.....	128
CONCLUSIONES	132
REFERENCIAS BIBIOGRÁFICAS	135
REFERENCIAS ELECTRÓNICAS.....	136
REFERENCIAS DE NOTAS PERIODÍSTICAS.....	137
ANEXO 1	141
ANEXO 2	142
ANEXO 3	144

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. En color más oscuro se muestran las zonas propensas a inundación por evento extremo de precipitación en la Región Hidrológica Número 12 (Uribe-Alcántara et al., 2010).....	18
Figura 2. Localización de la Región Hidrológica Número 12 Lerma Santiago (Elaboración propia a partir de la información de INEGI, 2022).	32
Figura 3. Red Hidrográfica de la RH12 LS, líneas color verde-Red Hidrográfica completa; líneas azul oscuro-Red Hidrográfica de ríos principales; línea azul claro-río Lerma Santiago. (Elaboración propia con información de INEGI, 2022)	34
Figura 4. Cobertura superficial de la composición natural del suelo de la RH12 LS (Elaboración propia con información de CONABIO, 2021).....	34
Figura 5. Cobertura superficial de la composición de Uso de Suelo y Vegetación de la RH12 LS (Elaboración propia con información de CONABIO de 2021).	36
Figura 6. Distribución de la precipitación media anual de la RH12 LS (Elaboración propia con información del SMN, 2021)	37
Figura 7. Distribución espacial de las estaciones climatológicas y las ESIMES. (Elaboración propia con información de SMN, 2021).	38
Figura 8. Distribución espacial de las estaciones hidrométricas en la RH12 LS. (Elaboración propia con la información de BANDAS, 2021)	38
Figura 9. Mapa de vulnerabilidad por inundaciones a escala municipal delimitado a la RH12 LS, (Elaboración propia con información de los abiertos de CENAPRED, 2021)	39
Figura 10. Cuenca del río San Juan de Dios, ubicada en el estado de Jalisco. (Elaboración propia).	46
Figura 11. Composición edafológica en el área de la cuenca del río San Juan de Dios. (Elaboración propia con información de CONABIO 2021)	47
Figura 12. Composición del uso de suelo y vegetación de la cuenca del río San Juan de Dios. (Elaboración propia con información de CONABIO, 2021).	48
Figura 13. Zonas de la cuenca del río San Juan de Dios (Elaboración propia).....	50
Figura 14. Procesamiento del modelo hidrológico de la cuenca del río San Juan de Dios con Physitel.....	51
Figura 15. Procesamiento del modelo hidrológico para la cuenca del río San Juan de Dios con ArcMap	52
Figura 16. Lluvia-escurrimiento (hp-Q) analizada para la inundación súbita del 10 de agosto de 2009 en la cuenca del río San Juan de Dios.....	55
Figura 17. Mancha de inundación que se generó el 10 de agosto de 2009 a las 23:00 horas. Inciso a) representa la mancha de inundación en la cuenca, la escala de profundidad está en metros; b) representa la dispersión de la mancha de inundación con visualización satelital. En ambas figuras la profundidad de inundación está en metros.....	57
Figura 18. Mancha de inundación que se generó el 02 de septiembre de 2009 a las 18:00 horas. Inciso a) representa la mancha de inundación en la cuenca, la escala de profundidad está en metros; b) representa la dispersión de la mancha de inundación con visualización satelital. En ambas figuras la profundidad de inundación está en metros.	59
Figura 19. Mancha de inundación que se generó el 10 de agosto de 2013 a las 18:00 horas. Inciso a) representa la mancha de inundación en la cuenca, la escala de profundidad está en metros; b) representa la dispersión de la mancha de inundación con visualización satelital. En ambas figuras la profundidad de inundación está en metros.	63
Figura 20. Cuenca del río La Laja, ubicada en el estado de Querétaro (Elaboración propia).	71
Figura 21. Composición edafológica en el área de la cuenca del río La Laja. (Elaboración propia con información de CONABIO 2021)	72
Figura 22. Composición del Uso de Suelo y Vegetación de la cuenca del río La Laja. (Elaboración propia con información de CONABIO 2021).....	73
Figura 23. Zonas de la cuenca del río La Laja (Elaboración Propia).....	74
Figura 24. Procesamiento del modelo hidrológico de la cuenca del río La Laja con Physitel.	75

Figura 25. Procesamiento del modelo hidrológico para la cuenca del río La Laja con ArcMap.	76
Figura 26. Mancha de inundación que se generó el 03 de septiembre del 2001 a las 21:00 horas. Inciso a) representa la mancha de inundación en la cuenca, la escala de profundidad está en metros; b) representa la dispersión de la mancha de inundación con visualización satelital. En ambas figuras la profundidad de inundación está en metros	79
Figura 27. Mancha de inundación que se generó el 23 de agosto de 2003 a las 18:00 horas. Inciso a) representa la mancha de inundación en la cuenca, la escala de profundidad está en metros; b) representa la dispersión de la mancha de inundación con visualización satelital. En ambas figuras la profundidad de inundación está en metros.....	81
Figura 28. Mancha de inundación que se generó el 30 de septiembre de 2006 a las 17:00 horas. Inciso a) representa la mancha de inundación en la cuenca, la escala de profundidad está en metros; b) representa la dispersión de la mancha de inundación con visualización satelital. En ambas figuras la profundidad de inundación está en metros.	83
Figura 29. Cuenca del río Tejalpa, ubicada en el Estado de México. (Elaboración propia).	90
Figura 30. Composición edafológica en el área de la cuenca del río Tejalpa. (Elaboración propia con información de CONABIO 2021)	91
Figura 31. Composición del uso de suelo y vegetación de la cuenca del río Tejalpa. (Elaboración propia con información de CONABIO 2021).....	92
Figura 32. Zonas de la cuenca del río Tejalpa. (Elaboración Propia).....	93
Figura 33. Procesamiento del modelo hidrológico de la cuenca del río Tejalpa con Physitel.	94
Figura 34. Procesamiento del modelo hidrológico para la cuenca del río La Laja con ArcMap.	95
Figura 35. Mancha de inundación que se generó el 19 de junio del 2013 a las 01:00 horas. Inciso a) representa la mancha de inundación en la cuenca; b) representa la dispersión de la mancha de inundación con visualización satelital. En ambas figuras la profundidad de inundación está en metros.	98
Figura 36. Mancha de inundación que se generó el 09 de julio del 2017 a las 01:00 horas. Inciso a) representa la mancha de inundación en la cuenca; b) representa la dispersión de la mancha de inundación con visualización satelital. En ambas figuras la profundidad de inundación está en metros.	100
Figura 37. Mancha de inundación que se generó el 02 de septiembre de 2018 a las 20:00 horas. Inciso a) representa la mancha de inundación en la cuenca; b) representa la dispersión de la mancha de inundación con visualización satelital. En ambas figuras la profundidad de inundación está en metros.....	102
Figura 38. Cuenca del río San Juan de Dios, ubicada en el estado de Michoacán (Elaboración propia).....	107
Figura 39. Composición edafológica en el área de la cuenca del río Duero. (Elaboración propia con información de CONABIO 2021)	108
Figura 40. Composición del uso de suelo y vegetación de la cuenca del río Duero. (Elaboración propia con información de CONABIO 2021).....	109
Figura 41. Zonas de la cuenca del río Duero (Elaboración Propia).....	110
Figura 42. Procesamiento del modelo hidrológico de la cuenca del río Duero con Physitel.	111
Figura 43. Procesamiento del modelo hidrológico para la cuenca del río Duero con ArcMap.	112
Figura 44. Mancha de inundación que se generó el 23 de agosto de 1994 a las 21:00 horas. Inciso a) representa la mancha de inundación en la cuenca; b) representa la dispersión de la mancha de inundación con visualización satelital. En ambas figuras la profundidad de inundación está en metros.	115
Figura 45. Sección transversal del recorrido de la mancha de inundación de la cuenca del río Duero el 23 de agosto del 1994.	116
Figura 46. Cuenca del río Chiquito, ubicada en el estado de Michoacán (Elaboración propia).	119
Figura 47. Composición edafológica de la cuenca del río Chiquito. (Elaboración propia con información de CONABIO 2021).	120

Figura 48. Composición del uso de suelo y vegetación de la cuenca del río Chiquito. (Elaboración propia con información de CONABIO 2021).....	121
Figura 49. Zonas de la cuenca del río Chiquito (Elaboración Propia),	122
Figura 50. Procesamiento del modelo hidrológico de la cuenca del río Chiquito con Physitel.	123
Figura 51. Procesamiento del modelo hidrológico para la cuenca del río Chiquito con ArcMap. ...	124

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Serie de datos diarios de Lluvia-Escurrecimiento de la cuenca del río San Juan de Dios. La altura de precipitación (hp) en unidades de milímetros y el caudal (Q) en metros cúbicos por segundo [Elaboración propia con datos del SMN y del BANDAS].	53
Gráfica 2. Serie de datos en escala temporal horaria de Lluvia-Escurrecimiento de la cuenca del río San Juan de Dios La altura de precipitación (hp) en unidades de milímetros y el caudal (Q) en metros cúbicos por segundo. ESIME Guadalajara [Elaboración propia con datos del SMN y del BANDAS].	53
Gráfica 3. Lluvia-Escurrecimiento para la simulación. Intervalo de tiempo diario (intervalos de tiempo de 24 horas). Q en m ³ /s y hp en mm [Elaboración propia con datos del SMN y del BANDAS].	56
Gráfica 4. Lluvia-Escurrecimiento del 09 al 14 de agosto de 2009 (intervalos de tiempo de 24 horas) [Elaboración propia con datos del SMN y del BANDAS].	56
Gráfica 5. Lluvia-Escurrecimiento del 31 de agosto al 06 de septiembre de 2009 (intervalos de tiempo de 24 horas) [Elaboración propia con datos del SMN y del BANDAS].	58
Gráfica 6. Datos de Lluvia-Escurrecimiento para la entrada para la simulación. Intervalos de tiempo de entre las 06:00 a 12:00 h y de 18:00 a 06:00 h de cada una de las fechas [Elaboración propia con datos del SMN y del BANDAS].	60
Gráfica 7. Datos de Lluvia-Escurrecimiento para el intervalo de tiempo de 24 horas [Elaboración propia con datos del SMN y del BANDAS].	61
Gráfica 8. Lluvia-Escurrecimiento del 10 de agosto a las 18:00 h y hasta el 11 de agosto a las 18:00 h (intervalos de tiempo de 24 horas) [Elaboración propia con datos del SMN y del BANDAS].	62
Gráfica 9. Lluvia-Escurrecimiento del 08 al 13 de agosto considerando las estaciones climatológicas (intervalos de tiempo de 24 horas) [Elaboración propia con datos del SMN y del BANDAS].	62
Gráfica 10. Hietograma del 11 de agosto de 2013 (intervalo de tiempo a 10 minutos) [Elaboración propia con datos del SMN]	64
Gráfica 11. Hietograma del 17 de septiembre de 2018 (intervalo de tiempo a 10 minutos) [Elaboración propia con datos del SMN]	64
Gráfica 12. Hietogramas de las estaciones climatológicas (intervalos de tiempo de 24 horas) [Elaboración propia con datos del SMN]	65
Gráfica 13. Serie Lluvia-Escurrecimiento de la cuenca del río La Laja. La altura de precipitación (hp) en unidades de milímetros y el caudal (Q) en metros cúbicos por segundo [Elaboración propia con datos del SMN y del BANDAS].	76
Gráfica 14. Lluvia-Escurrecimiento para el intervalo de tiempo horario en la cuenca del río La Laja. La altura de precipitación (hp) en unidades de milímetros y el caudal (Q) en metros cúbicos por segundo [Elaboración propia con datos del SMN y del BANDAS].	77
Gráfica 15. Datos de entrada de Lluvia-Escurrecimiento para la simulación (Intervalo de tiempo a 24 horas) [Elaboración propia con datos del SMN y del BANDAS].	78
Gráfica 16. Lluvia-Escurrecimiento del 31 de agosto al 05 de septiembre del 2001 (intervalos de tiempo a 24 horas) [Elaboración propia con datos del SMN y del BANDAS].	78
Gráfica 17. Datos de entrada de Lluvia-Escurrecimiento para la simulación (Intervalo de tiempo a 24 horas). [Elaboración propia con datos del SMN y del BANDAS].	80
Gráfica 18. Lluvia-Escurrecimiento del 20 al 25 de agosto del 2003 (intervalo de tiempo de 24 horas). [Elaboración propia con datos del SMN y del BANDAS].	80
Gráfica 19. Datos de entrada de Lluvia-Escurrecimiento para la simulación. Intervalo de tiempo diario (intervalos de tiempo de 24 horas) [Elaboración propia con datos del SMN y del BANDAS].	82
Gráfica 20. Lluvia-Escurrecimiento del 27 de septiembre al 02 de octubre del 2006 (intervalos de tiempo de 24 horas). [Elaboración propia con datos del SMN y del BANDAS].	82
Gráfica 21. Datos de entrada de Lluvia-Escurrecimiento para la simulación (intervalos de tiempo de 24 horas). [Elaboración propia con datos del SMN y del BANDAS].	84
Gráfica 22. Lluvia-Escurrecimiento del 01 al 20 de junio de 2013 (intervalo de tiempo de 24 horas). [Elaboración propia con datos del SMN y del BANDAS].	85

Gráfica 23. Serie de datos de Lluvia-Escorrimento de la cuenca del río Tejalpa. Altura de precipitación (hp), caudal (Q) [Elaboración propia con datos del SMN y del BANDAS].	95
Gráfica 24. Serie de datos para el intervalo de tiempo horario de Lluvia-Escorrimento de la cuenca del río Tejalpa. Altura de precipitación (hp) y caudal (Q) [Elaboración propia con datos del SMN y del BANDAS].	96
Gráfica 25. Datos de entrada de Lluvia-Escorrimento para la simulación. Intervalo temporal diario (datos a cada 24 horas). Q en m ³ /s y hp en mm [Elaboración propia con datos del SMN y del BANDAS].	97
Gráfica 26. Lluvia-Escorrimento del 19 de junio del 2013 (intervalo de tiempo de 24 horas) [Elaboración propia con datos del SMN y del BANDAS].	97
Gráfica 27. Datos de entrada de Escorrimento para la simulación (Intervalos de tiempo de 24 horas) [Elaboración propia con datos del BANDAS].	99
Gráfica 28. Lluvia del 09 de julio del 2017(intervalo de tiempo de 10 minutos). [Elaboración propia con datos del SMN].	99
Gráfica 29. Datos de entrada de escorrimento para la simulación. Intervalo temporal diario (datos a cada 24 horas); Q en m ³ /s [Elaboración propia con datos del BANDAS]	101
Gráfica 30. Serie de datos Lluvia-Escorrimento de la cuenca del río Duero. Altura de precipitación (hp) y caudal (Q) [Elaboración propia con datos del SMN y del BANDAS].	113
Gráfica 31. Serie de datos en intervalo de tiempo horario de Lluvia-Escorrimento de la cuenca del río Duero altura de precipitación (hp) y caudal (Q) [Elaboración propia con datos del SMN y del BANDAS].	113
Gráfica 32. Datos de entrada de Escorrimento para la simulación. Intervalo de tiempo diario, caudal Q en m ³ /s [Elaboración propia con datos del BANDAS].	114
Gráfica 33. Serie Lluvia-Escorrimento de la cuenca del río Chiquito, altura de precipitación (hp) y el caudal (Q) [Elaboración propia con datos del SMN y del BANDAS].	124
Gráfica 34. Serie de datos para el intervalo de tiempo horario Lluvia-Escorrimento de la cuenca del río Chiquito, altura de precipitación (hp) y caudal (Q) [Elaboración propia con datos del SMN y de BANDAS].	125
Gráfica 35. Hietograma ocurrido en la inundación del 18 de septiembre del 2003 (intervalo de tiempo de 24 horas). [Elaboración propia con datos del SMN].	126
Gráfica 36. Hietograma ocurrido en la inundación del 16 de marzo del 2015 (intervalo de tiempo de 24 horas) [Elaboración propia con datos del SMN].	127
Gráfica 37. Gráfica de lluvia-índice de infiltración-periodo de retorno de los eventos de inundaciones de la RH12 LS.	130

ÍNDICE DE ORGANIGRAMAS

Organigrama 1. Presentación esquemática del método para la elección de las cuencas de estudio de la RH12 LS (elaboración propia).	42
Organigrama 2. Organigrama del modelo hidrológico (Elaboración propia, 2022).	49

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Inundaciones súbitas a nivel municipal publicadas en notas periodísticas [Elaboración propia con información recopilada de hemerotecas digitales].	39
Tabla 2. Inundaciones ocurridas en los municipios de Guadalajara y Zapopan, Jalisco. [Elaboración propia con información recopilada de hemerotecas digitales].	45
Tabla 3. Distribución de la lluvia promedio anual por zonas de la cuenca del río San Juan de Dios. [Elaboración propia con información del SMN].	50
Tabla 4. Lluvias analizadas para la inundación del 10 de agosto de 2009 en la cuenca del río San Juan de Dios [Elaboración propia con datos del SMN]	54

Tabla 5. Lluvias analizadas para la inundación del 11 de agosto del 2013 en la cuenca del río San Juan de Dios [Elaboración propia con datos del SMN].	61
Tabla 6. Lluvias analizadas para la inundación del 17 de septiembre de 2018 en la cuenca del río San Juan de Dios [Elaboración propia con datos del SMN].	65
Tabla 7. Intensidades de lluvia para las inundaciones súbitas en el río San Juan de Dios [Elaboración propia con datos del SMN].	67
Tabla 8. Notas periodísticas sobre inundaciones en el municipio de Querétaro, Querétaro [Elaboración propia con información recopilada de hemerotecas digitales].	69
Tabla 9. Distribución de la lluvia promedio anual por zonas de la cuenca del río La Laja [Elaboración propia con información de SMN].	74
Tabla 10. Intensidades de lluvia para las inundaciones del río La Laja [Elaboración propia con datos del SMN].	84
Tabla 11. Notas periodísticas sobre inundaciones en el municipio de Zinacantepec, Estado de México [Elaboración propia con información recopilada de hemerotecas digitales].	88
Tabla 12. Distribución de la lluvia promedio anual de las zonas de la cuenca del río Tejalpa. [Elaboración propia con información del SMN].	92
Tabla 13. Intensidades de lluvia para las inundaciones del río La Laja [Elaboración propia con datos del SMN].	101
Tabla 14. Notas periodísticas sobre inundaciones en el municipio de Zamora, Michoacán [Elaboración propia con información recopilada de hemerotecas digitales].	105
Tabla 15. Distribución de la lluvia promedio anual por zonas de la cuenca del río Duero. [Elaboración propia con información del SMN].	109
Tabla 16. Notas periodísticas sobre inundaciones en el municipio de Morelia, Michoacán [Elaboración propia con información recopilada de hemerotecas digitales].	118
Tabla 17. Distribución espacial de la lluvia promedio anual por zonas de la cuenca del río Chiquito. [Elaboración propia con información del SNM].	121
Tabla 18. Intensidades de las lluvias registradas en las fechas de las inundaciones reportadas en la cuenca del río Chiquito [Elaboración propia con datos del SMN].	126
Tabla 19. Periodo de Retorno (Tr) e índice de infiltración (Φ) de las tormentas en las cuencas analizadas.	130

ÍNDICE DE TABLAS ANEXO

Tabla A. 1. Tabla de coeficientes de rugosidad en zonas inundables con características de canales naturales y canales fabricados. (Ven-Te-Chow, 1959).	141
Tabla A. 2. Tabla de eventos hidrometeorológicos extremos del Pacífico en las fechas de algunas inundaciones analizadas [Elaboración propia con información de la NOAA].	142

AGRADECIMIENTOS

*En el proceso de desarrollo de la tesis hubo circunstancias que parecían ser desalentadoras para el mundo entero, sin embargo la atención y alternativas de la **Universidad Autónoma Metropolitana** fueron fundamentales para posibilitar el término de este trabajo, razón por la cual me siento agradecida en gran manera.*

*Sin embargo, antes que todo, **agradezco a Dios** por cada plan cumplido en mi vida, por permitir tener a personas que me brindaron el apoyo en lo académico y en lo moral.*

Los agradecimientos son para:

***Dra. Claudia Rojas.** Gracias por su paciencia, por compartir su conocimiento, y la oportunidad de aprender de su experiencia profesional y conocer su calidad humana, por dar lo mejor de sí y la forma tan correcta de dirigirme.*

***CAPEMA** (Comisión Académica de Posgrado en Energía y Medio Ambiente). Gracias por mantener ese grado de profesionalidad para estar atentos de toda la comunidad del posgrado, por ir a nuestro lado para terminar este proyecto.*

*Gracias a **mis sinodales, Dr. A. Zoilo, Dra. G. Matías y Dr. O. Fuentes**, por la aportación de sus comentarios y observaciones que sumaron a este trabajo.*

*Gracias al **CONACYT** por la oportunidad y el financiamiento.*

*Agradezco **colegas, amistades y familia espiritual** que permaneció atenta a cumplir con responsabilidad este trabajo, que cuando caía me alentaban a levantarme y seguir, hasta terminar con esto. Gracias.*

*Gracias a **mi familia**, mis padres y mis cuatro hermanos, por creer en mí.*

Y si pudiese dedicar esto, lo hago a la comunidad del área específica de Recursos Hidrológicos del PEMA.

RESUMEN

Las inundaciones súbitas son consecuencia de tormentas que caen en una superficie pequeña y con fuertes pendientes; ocurren en cuestión de minutos (CENAPRED, 2023), sabiendo por súbita a una ocurrencia pronta, sin preparación o aviso, estas inundaciones se presentan también, cuando impactan en la superficie terrestre y no existe suficiente capacidad de drenaje donde el agua pueda fluir hasta el punto de salida, además pueden verse influidas si los estratos de suelo no tienen la capacidad de infiltrar el agua ya sea por saturación o que exista algún tipo de suelo impermeable que lo impida (CONAGUA, 2011).

Las inundaciones súbitas se definen como la ocupación por parte del agua en zonas que habitualmente se encuentran secas que suceden de manera repentina, para su estudio se conlleva un procedimiento de análisis de las condiciones hidrológicas de la cuenca en estudio que se ven influenciadas por los eventos donde la altura de precipitación que cae en un tiempo corto se acumula hasta generarlas.

Es posible que exista un mayor número de inundaciones cuando existen fenómenos hidrometeorológicos extremos; sin embargo, las inundaciones súbitas pueden generarse con la ocurrencia de lluvias de alta intensidad y corta duración que interactúan directamente con desequilibrios en el entorno físico, asentamientos urbanos y degradación del medio ambiente.

Mediante las acciones de monitoreo y del estudio de la cantidad de lluvia sobre una zona superficial en estudio, se puede generar información oportuna tanto para las autoridades de protección civil, sociedad e investigadores que pretendan aunar con mayor profundidad para pronósticos futuros y para las medidas preventivas adecuadas ante el incremento de la frecuencia y la magnitud de las inundaciones.

Este trabajo tiene por objetivo la identificación de las zonas inundables más importantes en cuanto a vulnerabilidad y riesgo de afectaciones a zonas urbanas de la Región Hidrológica número 12 Lerma Santiago, en respuesta a las lluvias que históricamente han ocasionado dificultades de comunicación vial, pérdidas materiales y económicas y en algunos casos, pérdidas humanas.

La metodología utilizada consta de una caracterización física a detalle de la Región Hidrológica número 12 Lerma-Santiago, así como la selección y la representación de la dispersión de las manchas de inundación generadas en 5 áreas superficiales cuidadosamente delimitadas como cuencas de estudio, las cuales se demarcan dentro de municipios de alto impacto social en el país. La realización de la representación de respuesta al fenómeno súbito consta de la composición holística para análisis de las áreas inundadas de acuerdo con la superficie física y la hidrología.

INTRODUCCIÓN

Los estudios de inundaciones súbitas ocurren con mayor incidencia en las zonas donde pueden provocar daños mayores. Las inundaciones súbitas suceden en tiempo relativamente corto y son vinculadas con flujos de lodo en las cuencas, deficiencias en los drenajes que pueden ocurrir por diferentes razones, por lo que los escurrimientos se re-direccionan y pueden alcanzar altas velocidades arrastrando objetos a su paso y obstruir el paso del agua. También puede faltar capacidad en las estructuras hidráulicas para el desagüe, o desbordamientos de los cauces en zonas planas de la cuenca, donde es muy común encontrar cambios en ecosistemas por la frecuencia de las actividades humanas.

En esta tesis se estudian las inundaciones súbitas de alto impacto con registro histórico a escala municipal. Se delimitan las zonas de estudio por cuencas hidrológicas estratégicamente seleccionadas por su contenido de información espacial de organismos públicos oficiales sobre lluvias, escurrimientos superficiales y su caracterización fisiográfica sobre el área de la Región Hidrológica número 12 Lerma Santiago. Estas inundaciones se presentan a consecuencia de tormentas que caen en superficie con difícil drenaje, terreno saturando de agua o suelo impermeable donde la lluvia excedente se acumula y escurre súbitamente en minutos u horas.

Las inundaciones súbitas son muy difíciles de prevenir ya que se presentan de manera repentina y generan caudales importantes como respuesta de la cuenca. Generalmente estas inundaciones son más frecuentes cuando existen eventos hidrometeorológicos extremos, pero no son particulares de ellos, ya que pueden ocurrir en cualquier momento siendo la lluvia una variable meteorológica aleatoria en su frecuencia de ocurrencia. Las inundaciones súbitas son comunes en zonas urbanas y son tan rápidas que es difícil observar y registrar su inicio y desarrollo por lo tanto, son poco documentadas.

La Región Hidrológica número 12 Lerma Santiago es la tercera Región Hidrológica más grande de México; se caracteriza por tener una topografía con grandes pendientes entre serranías, la cual es una región bastante enriquecida de grandes ríos en donde su aprovechamiento de agua es para usos múltiples, su ubicación es pertinente para recibir los efectos de los eventos hidrometeorológicos de los dos grandes océanos entre los que se encuentra rodeado el país.

En esta tesis, el estudio de inundaciones súbitas se realizó para 5 cuencas de la Región Hidrológica número 12 Lerma Santiago, con áreas de entre 2300 y 75 km². La elección de estas cuencas fue a partir de la revisión documentada de riesgos y vulnerabilidad de inundaciones, en conjunto con la revisión de noticias periodísticas sobre las afectaciones más importantes a través de los años en los municipios de la Región Hidrológica. Además de considerar la disponibilidad de información de la

altura de precipitación e hidrometría. Se caracterizó su superficie fisiográfica (topografía, red hídrica, presencia de vegetación, uso y tipo de suelo).

La tesis se fundamenta en información consultada en hemerografía digital y organismos oficiales. Entre las fuentes de información de disposición oficial destacan datos en forma puntual, vectorial y ráster provenientes de la Comisión Nacional para conocimiento y uso de la Biodiversidad (CONABIO), del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) que depende de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), del Banco Nacional de Aguas Superficiales (BANDAS) de la CONAGUA y el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

La construcción del modelo hidrológico es una de las bases fundamentales para la representación más aproximada a la realidad, por lo que, en este trabajo se evaluó el tipo de modelo (modelo hidrológico global o modelo hidrológico distribuido) que mejor se adecua al modelado de escurrimiento.

Se construyó un modelo hidrológico para integrarlo a un modelo de simulación de escurrimiento, para esto, se utilizaron los SIG Physitel y ArcMap para la caracterización e inclusión de parámetros necesarios para en el Modelo 2D de HEC-RAS, así como el proceso de análisis de los datos de altura de precipitación e hidrometría para la obtención de los hidrogramas y hietogramas de las series de datos temporales necesarias y óptimas para este trabajo.

Uno de los desafíos en el desarrollo de este trabajo fue determinar los datos de lluvia que generan las inundaciones súbitas, para lo que se analizó la evolución de la lluvia y del escurrimiento en las cuencas de estudio. Con esto se propone e incentivan estrategias y protocolos de mediciones climatológicas, particularmente de registros de lluvias que sean compatibles y eficientes para el análisis y las metodologías de predicción de las inundaciones súbitas en México. En este trabajo se señalan distintos escenarios de registros climatológicos como antecedentes para una mejora en la recopilación y análisis de la altura de precipitación requerida para el estudio de inundaciones súbitas.

La tesis se compone por los siguientes capítulos: Capítulo I “Región Hidrológica y cuencas de estudio”; Capítulo II “Cuenca del río San Juan de Dios”, Capítulo III “Cuenca del río La Laja”, Capítulo IV “Cuenca del río Tejalpa”, Capítulo V “Cuenca del río Duero”, Capítulo VI “Cuenca del río Chiquito”, Capítulo VII “Protocolo de análisis de inundaciones súbitas”. Se tiene la siguiente estructura: ubicación y caracterización de la zona, antecedentes de las inundaciones, análisis de información de altura de precipitación e hidrometría, presentación de hietogramas e hidrogramas de las fechas de ocurrencia de inundación, aplicación del modelo de inundaciones, análisis de resultados, conclusiones y discusión.

ANTECEDENTES

En México, el impacto de los desastres desencadenados por amenazas de alta magnitud y baja frecuencia tal como lo son las inundaciones súbitas han involucrado cuantiosas pérdidas humanas y bienes materiales, estos impactos se han ido incrementando al paso de los años debido principalmente a la falta de organización en los asentamientos urbanos, así como en la modificación de los elementos naturales como cauces de agua y modificación al uso del suelo.

De acuerdo con los registros de *The Georeferenced Emergency Events Database* (EM-DAT) presentados en el artículo “Desastres en México” por Alcántara-Anaya I., de 2019 (Alcántara-Anaya, 2019), durante el periodo 1900-2018 en México se han registrado 231 desastres debidos a eventos hidrometeorológicos que han producido inundaciones.

La Región Hidrológica agrupa varias cuencas hidrográficas y está definida a partir de grandes parteaguas del país. En México se tienen 37 Regiones Hidrológicas. En esta tesis se estudia la tercera región más grande en tamaño superficial y una de las más importantes en su uso, aprovechamiento y cantidad de escurrimiento de sus aguas superficiales, esta región hidrológica es la número 12 Lerma-Santiago (RH12 LS). La RH12 LS se compone de uno de los sistemas hidrológicos más grandes del país que contribuye a la estabilidad del funcionamiento ecológico, social y económico de la región. De entre los aprovechamientos del recurso agua en esta región destacan la generación de energía eléctrica, riego y uso doméstico, que se pueden ver afectados por inundaciones provocadas por la influencia de fenómenos hidrometeorológicos.

Estos fenómenos pueden ocurrir con mayor frecuencia e intensidad cuando el ecosistema natural es modificado en cada uno de sus elementos del medio ambiente, como lo son la vegetación, geomorfología y el uso del suelo, ya que provocan procesos de erosión, depósito de sedimentos, así como movimientos de masa como deslizamientos y principalmente las inundaciones (Marciel Flores R., *et al.*, 2016).

En general en algunas zonas de planicies y con uso de suelo urbano, se producen inundaciones derivadas por la dificultad de drenar el agua de manera eficiente y rápida; mientras que en zonas semiáridas las inundaciones son menos frecuentes; sin embargo, cuando se presentan pueden tener consecuencias más severas.

Los estudios de inundaciones permiten la identificación de riesgos de daños, su mitigación y prevención. Sin embargo, las inundaciones súbitas resultan más difíciles de analizar, debido a la falta de información en intervalos de tiempo suficientemente adecuados para comprender la relación entre el fenómeno meteorológico y la respuesta rápida de la cuenca al producirse el escurrimiento.

La relación entre la lluvia y el escurrimiento se puede estudiar a partir de la información disponible a través de las estaciones climatológicas e hidrométricas. Los datos climatológicos a nivel nacional son actualizados por los Organismos de Cuenca y Direcciones Locales de la CONAGUA. Estos registros son altura de precipitación en 24 horas; es decir, la acumulación de la lluvia en un día. La información está disponible mediante tablas en un supervisor de mapas y una aplicación para Google Earth (KMZ). Otra información disponible es a través de sistemas autónomos y automáticos formados por un conjunto de sensores de medición, dispositivos electrónicos y mecánicos, montados sobre una estructura de soporte, en donde son distribuidos, orientados y conectados al Sistema de Adquisición, Procesamiento y Almacenamiento de Datos (SADAP). Estos sistemas son las Estaciones Sinópticas Automatizadas (ESIME) y su función principal es generar y transmitir un mensaje codificado que sigue los lineamientos de la Organización Mundial Meteorológica (OMM) para su integración y difusión a nivel nacional e internacional.

Los datos de altura de precipitación a cada 24 horas no son suficientes para el análisis de las inundaciones súbitas, esto dado que se presentan en muy poco tiempo, minutos u horas después del inicio de la lluvia. Sin embargo, siendo la información registrada a nivel nacional y contando con registros mayores de 10 años, son utilizadas con el fin de conocer los hietogramas de las tormentas que ocurrieron durante el proceso de las inundaciones de cada una de las cuencas de estudio en esta tesis.

Los datos disponibles de la ESIME, a cada 10 minutos, son mejores para entender el proceso de reacción inmediata en las zonas de inundación. Esta información está disponible a partir de 2013 con intervalos de tiempo “no medidos”, este registro de la información sería suficiente para el análisis de las lluvias; sin embargo, en algunos casos no se dispone de registros para las fechas en que se presentaron las inundaciones estudiadas en esta tesis.

Las estaciones hidrométricas miden la cantidad de agua que fluye en los ríos, canales y a la entrada y salida de algunas presas. Esta información se puede usar para saber cómo influye el agua en la zona de estudio y así permitir estimar el área de inundación.

El manejo digital de la información hidrométrica es de suma importancia, por tal motivo, la CONAGUA, a través del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) ha venido actualizando el Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) que integra la red hidrométrica nacional. La información de las estaciones hidrométricas está disponible para intervalos de tiempo anual, mensual, diario y en algunos casos a cada 6, 3 o 1 hora.

En el año de 2009 se publicó el artículo titulado “Mapa Nacional de Índice de Inundación” (Uribe-Alcántara, *et al.*, 2010), este trabajo asoció las inundaciones con factores como desbordamientos de ríos, inundaciones súbitas, mareas altas con

huracanes y rompimiento de estructuras de control; esta información fue usada para realizar el mapa de la (Figura 1), este fue un primer paso para la elección de las cuencas con mayor impacto de inundación en esta tesis, que después se profundizó con el análisis y metodología que se describe durante el desarrollo de la misma.

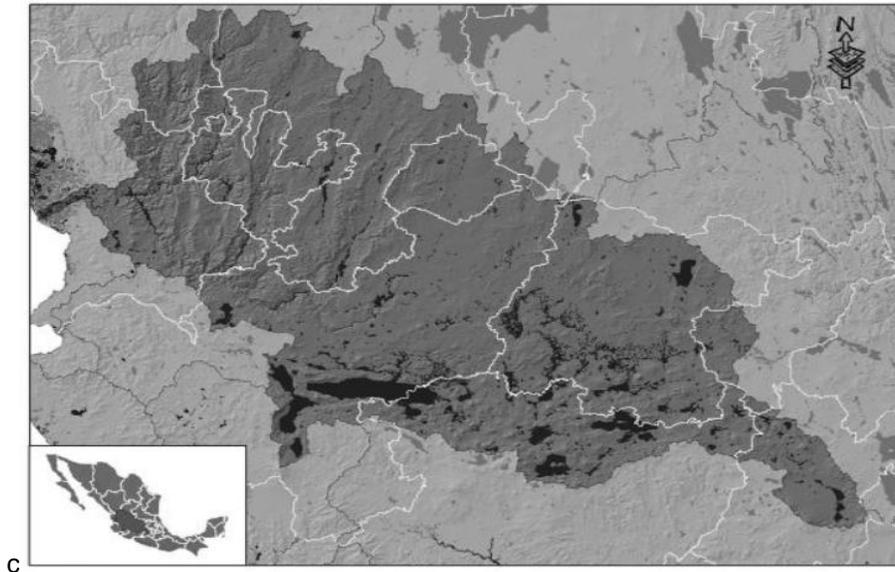


Figura 1. En color más oscuro se muestran las zonas propensas a inundación por evento extremo de precipitación en la Región Hidrológica Número 12 (Uribe-Alcántara et al., 2010).

La complejidad de los procesos físicos que generan las inundaciones súbitas, son difíciles de analizar cuando no existe información en intervalos de tiempo corto, ya que no se puede conocer la razón de incremento de la altura que alcanza la lluvia respecto al tiempo (intensidad) para una corta duración. Siendo que esto implica la rápida acumulación de agua de lluvia y su tránsito como escurrimiento que ha llevado a condiciones de vulnerabilidad a muchas poblaciones (Serna R., 2013).

Las altas intensidades de lluvia generalmente propician inundaciones súbitas, esto se traduce con frecuencia en afectaciones de diferentes maneras. Por otro lado, cuando la acumulación de agua en una zona específica se prolonga por mucho tiempo, la calidad del agua es desfavorable, se generan enfermedades infecciosas.

Ante los peligros y vulnerabilidad expuestos por inundaciones, es muy importante la elaboración de estrategias de gestión de riesgos e, incluso, respuesta de emergencia frente a impactos climáticos extremos.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En los últimos años, las investigaciones sobre inundaciones súbitas han sido escasas; sin embargo, este estudios son cada vez más importantes ya que las lluvias fuertes e intensas (clasificación de lluvias según el Servicio Meteorológico Nacional¹) ocurren con alta frecuencia en el territorio mexicano y la necesidad de expansión urbana, factores que influyen a su vez a la presencia de las inundaciones.

A través de esta tesis se estudiarán las lluvias que han generado desastres en zonas urbanas delimitadas a las cuencas correspondientes, de gran importancia de la Región Hidrológica número 12 Lerma-Santiago.

Se analizará la información disponible de climatología, hidrografía y uso de terreno para obtener una base de datos óptima y simular con el modelo HEC-RAS, además se describe la metodología desarrollada y aplicada.

En caso de que la recopilación de información no sea suficiente para la presente investigación, es decir, la serie de datos sea poco favorable o no es representativa para cumplir el objetivo de este estudio en alguna cuenca, se generará un apartado de recomendación para proponer la observación de las variables a escala temporal de manera óptima y cumplir con satisfacción los estudios pertinentes.

Se pretende un análisis comprobable con el resultado de la simulación de procesamiento numérico. Lo anterior con el propósito de desarrollar una investigación que pueda utilizarse en próximos estudios y que ayude a mitigar la falta de planificación del ordenamiento poblacional para influir en una mejora en el sistema de drenaje hidráulico.

PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Se cuenta con la información necesaria para simular las afectaciones en las zonas de peligro² por inundaciones súbitas, que además permita realizar los mapas de inundación para exponer las zonas con probabilidad de que se produzcan alteraciones de funcionamiento normal económicos o ambientales?

¹ Servicio Meteorológico Nacional, fuente oficial del Gobierno de México, clasifica a precipitación acumulada en 24 horas: lluvia intensa extraordinaria (>75mm), lluvia fuerte a muy fuerte (25 a 75 mm), lluvia (<25mm).

² Probabilidad de que un fenómeno físico, potencialmente dañino, de origen natural o inducido por la acción humana, se presente en un lugar específico con una cierta intensidad y en un periodo de tiempo y frecuencia definidos (SEGURIDAD, CNPC y CENAPRED, 2021).

HIPOTESIS

Es posible desarrollar una metodología para manejo integral que permita mitigar los impactos de las inundaciones súbitas con base en una modelación hidrográfica adecuada y series de tiempo coincidentes a diferentes intervalos de corto tiempo (diarios, minutos y horarios), a partir de la información disponible de organismos e instituciones oficiales de hidrología, climatología y cobertura de terreno.

OBJETIVO GENERAL

Simular las inundaciones súbitas en cuencas de la Región Hidrológica número 12 Lerma-Santiago para identificar zonas de peligro de daño por inundaciones súbitas.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Caracterizar las cuencas en estudio de manera fisiográfica de acuerdo con el peligro por inundación.

Identificar, reconstruir y caracterizar a las inundaciones súbitas ocurridas en cuencas de la Región Hidrológica número 12.

Caracterizar las representaciones de lluvias que se presentaron ante cada evento de ocurrencia de inundaciones.

ESTADO DEL ARTE

Actualmente hay avances importantes en los estudios de inundaciones en México así como a nivel global. Entre éstos se tienen objetivos asociados a acciones que salvaguarden a la población; por ejemplo, de pronóstico y gestión de protección como: búsquedas y rescates, asistencia médica, evaluación y gestión de los desplazamientos de la población, reducción a corto plazo del riesgo individual de exposición a enfermedades transmitidas por el agua, concienciación sobre los riesgos que conllevan las actividades de limpieza y mantenimiento de las condiciones de seguridad alimentaria a largo plazo (OMS, 2021)

De esta manera, las diferentes investigaciones alrededor del mundo muestran la importancia de la aplicación de modelos de simulación computacional parametrizadas con las características fisiográficas por cuencas que son herramientas para análisis de vulnerabilidad y pronóstico, ante eventos de similares a los estudiados en esta tesis.

A continuación, se presentan algunas fuentes consultadas, que sirven de ayuda para comprender los avances y alcances en México sobre estos temas de investigación.

Para la integración de conjuntos de acciones que ayuden a los tomadores de decisiones en el manejo y control de las inundaciones, el Ingeniero Rodríguez Vásquez, H. G. (2012) integró las acciones estructurales y no estructurales para el control y manejo de inundaciones en zonas urbanas.

En este trabajo se observó que las inundaciones no son un fenómeno reciente y que a través del tiempo se han incrementado y a su vez provocan pérdidas materiales y humanas. Estas últimas disminuyen por las acciones preventivas que se han implementado de manera exitosa, además de la disponibilidad de los modelos computacionales simplificados que permiten la obtención de mapas de peligro.

Las inundaciones durante septiembre de 2003, en Guanajuato, fueron estudiadas por Matías Ramírez, L. G., *et al.* (2007), se concluye que las inundaciones se debieron a lluvias extraordinarias que provocaron el desbordamiento del río Lerma y sus afluentes más importantes, La Laja y Turbio, sobre las planicies aluviales y lacustres del Bajío. En ese trabajo se presentó una distribución espacial de lluvias máximas acumuladas en 14 días llegando a valores de entre 90 y 300 mm. Los impactos más graves fueron en la zona urbana, así como en el sector agropecuario. En el estudio, se resaltan las inundaciones recurrentes en Guanajuato y se recomienda el incremento de las redes de estaciones climatológicas e hidrométricas para darle continuidad a los sistemas de monitoreo, debido a lo limitante que puede ser su análisis.

Por otra parte, existen estudios aledaños a los de la propagación de las inundaciones, tales como métodos que proporcionan una aproximación de la magnitud de las afectaciones por inundación en zonas habitacionales de México. Este método consta de curvas de daños por inundación en función de la altura de lámina de agua haciendo una estimación económica de los daños generados en una cuenca. Baró-Suárez, J. E., *et al.* (2011); desarrollaron el método de evaluación directa de los daños tangibles, contribuyendo con la metodología como una herramienta práctica y orientadora para las instituciones públicas y privadas que intervienen en la gestión de eventos hidrometeorológicos extremos, particularmente en la toma de decisiones para las diferentes etapas de prevención, emergencia, rehabilitación y reconstrucción.

El Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) tiene entre sus objetivos estudiar, desarrollar, aplicar y coordinar tecnologías para la prevención y mitigación de desastres, así como promover capacitaciones profesionales y técnicas sobre la materia, además de apoyar la difusión de medidas de preparación y autoprotección a la población ante la contingencia de un desastre.

El CENAPRED ha trabajado en proponer estrategias para la reducción de la vulnerabilidad y del riesgo por inundaciones. Referente a esto, existen trabajos que se van delimitando de lo general a lo particular, como el caso del estudio de Olín Fabela, L. A., (2021); en el que proponen integrar indicadores de aspectos

socioeconómicos y ambientales a partir de las características de la población, y asocian la vulnerabilidad como una consecuencia de las acciones que desarrolla el hombre, vinculando el enfoque del urbanismo al aspecto social, y presentan un compendio cartográfico del grado de vulnerabilidad que comparan con los del CENAPRED. Existiendo una evidente diferencia, por lo que se hace sugerencia al seguimiento de la metodología, como avante a su potencial para aplicar a los niveles municipales o hasta locales.

Otro estudio elaborado por He, M. & Hogue, T. S. (2012), integra un modelo hidrológico y proyecciones de uso de la tierra para poder predecir impactos a largo plazo de la urbanización sobre el comportamiento hidrológico y el suministro de agua en regiones semiáridas. Se centra en el Upper Santa Cuenca del río Clara en el norte del condado de los Ángeles en Estados Unidos, el cual experimenta un rápido y extenso desarrollo. En este trabajo se utilizó un programa de simulación hidrológica semi-distribuida parametrizado con las características fisiográficas de la cuenca proporcionando una herramienta para la toma de decisiones en el desarrollo urbano regional planificado y gestión del abastecimiento de agua. El análisis y modelado mostraron que para conjuntos de valores con mayores precipitaciones los resultados arrojados eran mejores.

Es importante resaltar que a medida que pasa el tiempo, existe un mayor interés por el estudio de eventos que han desencadenado una serie de problemas que perjudican la estabilidad económica, estructural, ambiental y social. Existen estudios que proponen nuevas metodologías, así como investigaciones comparativas para perfeccionar metodologías ya establecidas o estudios donde se vinculan elementos de investigaciones actuales para contribuir en la aplicación ingenieril, para conocer por qué y cómo es que la actual sociedad se enfrenta a estos retos.

La implementación tecnológica, análisis de eventos de ocurrencia y pronósticos oportunos son algunos de los principales objetivos ante la temática de inundaciones, tal es el caso del estudio Güitrón de los Reyes, A. *et al.*, (2012), en donde presentan la integración de un modelo hidrológico distribuido desarrollado en la plataforma Hydrotel, con un modelo de simulación, para definir el área de inundación en la cuenca del río Conchos. El análisis de las inundaciones las desarrolló con base en un algoritmo que permite la comunicación entre los dos modelos.

Por otro lado, la delimitación de las cuencas hidrológicas constituye el paso inicial o de preproceso con la herramienta SIG (Sistema de Información Geográfica). Para Verdín, K. L. & Verdín, J. P., (1999), el uso de un SIG en la planeación tiene el objetivo de conformar un modelo hidráulico detallado, fiable y representativo para la planeación ante eventos de inundaciones.

Las inundaciones súbitas es el objeto de interés en esta tesis, siendo las más peligrosas del tipo de inundaciones que se pueden presentar, ya que ocurren en cuestión de minutos y llegan a causar pérdidas materiales y de vida, cuando toman desprevenida a la población, en corrientes con gran velocidad es común que se

presenten las inundaciones súbitas. La pendiente del terreno es el factor más importante, generalmente estos flujos van acompañados de gran contenido de sedimentos e, incluso, de escombros.

La Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR, 2021), ha establecido que los problemas influyentes en la generación de riesgos como el de las inundaciones, se relacionan con los siguientes aspectos:

1. El crecimiento de las poblaciones urbanas y su creciente densidad, que ejerce presión en los suelos y servicios, origina el aumento de asentamientos urbanos en zonas propensas al riesgo.
2. La concentración de recursos y capacidades a nivel nacional, con la falta de recursos fiscales, humanos y limitadas capacidades en el gobierno local incluyendo mandatos poco definidos para la reducción del riesgo de desastres y la respuesta.
3. La débil planificación local y la pobre participación de los socios locales en la planificación y la gestión urbana.
4. La inadecuada gestión de los recursos hídricos, de los sistemas de alcantarillado y de los residuos sólidos que son la causa de emergencias en inundaciones y deslizamientos.
5. El declive de los ecosistemas debido a las actividades humanas como la construcción de carreteras, la contaminación y la extracción insostenible de recursos que ponen en peligro la capacidad de brindar servicios ecosistémicos con la regulación y la protección en caso de inundaciones.
6. Las infraestructuras debilitadas y los estándares de construcción inseguros que pueden provocar el desplome de estructuras.
7. Los servicios de emergencia descoordinados, con la consiguiente disminución de la capacidad de respuesta rápida y del estado de preparación.
8. Los efectos propios de la naturaleza que repercuten en la frecuencia, la intensidad y la ubicación de las inundaciones y de otros desastres relacionados con el entorno natural.

JUSTIFICACIÓN

Los fenómenos naturales extremos, el rápido crecimiento urbano y el cambio climático han impactado en eventos de ocurrencia como lo son las inundaciones súbitas, las cuales representan una exposición peligrosa en las pérdidas de bienes y de personas. Así mismo, las inundaciones súbitas suceden de manera aleatoria sobre una superficie en donde gran número de elementos y variables se relacionan hasta evitar que el agua sea drenada y causar inundación, de cierta forma esto ocurre en zonas planas, donde el escurrimiento se acumula en un intervalo de tiempo corto.

Las principales zonas de alto impacto social, económico y ecológico de los diferentes sistemas de las cuencas de estudio de la RH12 LS son afectadas históricamente por las inundaciones súbitas.

Es necesario entender y analizar la rapidez de respuesta de la cuenca ante las lluvias de alta intensidad y de corta duración para tener conocimiento del desarrollo de inundaciones súbitas. Esto puede ser una herramienta para los organismos encargados de la prevención y mitigación de afectaciones ante inundaciones. La presente tesis es una propuesta del protocolo a considerar respecto al tiempo en que podría ocurrir una inundación súbita, e identificar posibles: 1. Zonas en peligro, 2. Modificación de ecosistemas naturales y 3. Pérdidas humanas y materiales.

METODOLOGÍA

Se realizó la modelación hidrológica de cinco cuencas seleccionadas por el alto impacto social, ecosistémico y económico en la Región Hidrológica número 12 Lerma Santiago. Las cuencas de estudio son: 1. Cuenca del río San Juan de Dios, 2. Cuenca del río La Laja, 3. Cuenca del río Tejalpa, 4. Cuenca del río Duero y 5. Cuenca del río Chiquito, en donde se determinaron las manchas de inundaciones generadas por las lluvias. Estas cuencas fueron delimitadas de acuerdo con la caracterización edafológica, topográfica, hidrográfica, de uso de suelo y vegetación, la lluvia representativa de la cuenca y la zona de inundación.

En la primera fase, se caracterizó la fisiografía con los Sistemas de Información Geográfica (SIG) ArcGIS 5.0 y Physitel 4.0, esto sirvió para comparar los resultados de ambas plataformas que requieren de componentes geográficos a través de imágenes y mapas con atributos vinculados a hojas de cálculo y tablas. Con este análisis espacial se evaluó la eficiencia de las plataformas considerando su facilidad de manejo y capacidad de procesamiento para dar salida a la información necesaria, que permitió obtener los atributos específicos de la RH12 LS, de cada una de las cuencas de estudio, así como de los coeficientes hidráulicos de cada una de ellas. Esta información se consideró como elementos de entrada al modelo de simulación bidimensional HEC-RAS 5.0.4 con proyección Universal Transverse Mercator (UTM).

La modelación hidrológica con el Sistema de Información Geográfica (SIG) "Physitel", permite construir las características de un modelo hidrológico distribuido; es decir, al aplicarlo se modelan un número determinado de Unidades Hidrológicas (UH)³ que conforman a la cuenca de estudio.

El modelo hidrológico distribuido "Hydrotel" es un modelo que calcula el escurrimiento con base en las unidades hidrológicas previamente determinadas con

³ Unidades Hidrológicas: división de una cuenca en subcuencas con el SIG Physitel.

Physitel, este aprovecha al máximo la información geográfica y meteorológica disponible. Hydrotel es un software relativamente nuevo que se ha implementado con resultados satisfactorios en cuencas de Canadá (Québec, Ontario, Colombie-Britannique) y aún está en proceso para que pueda implementarse para cualquier parte del mundo (FORTIN, Jean-Pierre, *et al.*, 1995).

La modelación hidrológica con el Sistema de Información Geográfica (SIG) “ArcMap”, permite construir las características de un modelo hidrológico global o distribuido, es decir, al aplicarlo se modela un número determinado de subcuencas, sin embargo este depende del punto de salida de interés.

El modelo de escurrimiento Hec-Ras es un simulador de inundaciones, que representa de manera adecuada a los modelos hidrológicos globales.

El SIG Physitel es especializado para el soporte e implementación de los modelos hidrológicos distribuidos Hydrotel. Physitel determina los parámetros fisiográficos para calcular las Unidades Hidrológicas (UH) homogéneas y determina la estructura interna del drenaje (pendientes y direcciones de flujo), límites de la cuenca y los límites de subcuencas y laderas (Frêne, C., & Oyarzún, C. 2014). Del SIG ArcGIS se empleó ArcMap y sus herramientas de Hidrología.

Mediante el análisis de los resultados de los modelos hidrológicos a través de Physitel y ArcMap se determinó que para las 5 cuencas de estudio se implementaría una simulación de escurrimiento con Hec-Ras, debido a que los modelos hidrológicos son muy bien representados como modelos hidrológicos globales.

En la segunda fase de la tesis se analizaron los datos históricos disponibles de altura de precipitación de la lluvia y datos de hidrometría de la RH12 LS para posteriormente seleccionar los requeridos. En este sentido cabe mencionar que el SMN (Servicio Meteorológico Nacional) a través de la CONAGUA tiene registros de las estaciones climatológicas que registran los datos diarios, tales como, la altura de precipitación (hp) -que es la acumulación de lluvia en las últimas 24 horas, contabilizadas a partir de las 08:00 horas y medidas en milímetros (mm). Con el método de precipitación media de una cuenca, se calculó la precipitación diaria representativa en las 5 cuencas de estudio realizándose los hietogramas correspondientes. Otra información que se utilizó para la lámina de precipitación hp representativa de la cuenca fue la de las Estaciones Sinópticas Automatizadas (ESIME) que registran automáticamente la lluvia –y otras variables climáticas- a cada 10 minutos y que también se presenta con hietogramas.

El registro de las ESIME de los datos de altura de precipitación (hp) están dados en milímetros y la medición registra el valor de lluvia del intervalo ($\Delta t = 10min$ entre cada dato) de t_i a t_{i+1} , donde el valor de la lluvia neta (hp_N) es:

$$hp_N = 0 \quad \text{si } hp_{i+1} - hp_i \leq 0$$

$$\text{y } hp_N = hp_{i+1} - hp_i \quad \text{si } hp_{i+1} - hp_i > 0$$

Donde

hp_N : Altura de precipitación neta, mm

hp_i : Dato de altura de precipitación registrado en el tiempo i , mm

hp_{i+1} : Dato de altura de precipitación registrado 10 minutos después, mm

Los datos para los hietogramas con la información de las ESIME corresponden a la altura de precipitación neta en unidades de milímetros.

Los datos hidrométricos son registros de cantidad de escurrimiento o caudal (Q) medido en m³/s, su obtención fue a través del Banco Nacional de Aguas Superficiales (BANDAS) de la CONAGUA. Esta información está disponible para intervalo de tiempo diario y a veces a cada 6, 3 o 1 hora. Esta información se presenta en hidrogramas.

Se retuvieron únicamente los datos de lluvia y escurrimiento para las mismas fechas de registro y se presentan en gráficas lluvia-escurrimiento.

Se presenta la distribución espacial de la lluvia por zonas (zona alta, media y baja) las cuales corresponden según a su topografía de cada una de la cuencas, esta distribución es de la lluvia promedio anual en milímetros.

Se estimaron los periodos de retorno (Tr) de la lluvia para cada evento en donde se presentaron las inundaciones, este concepto estadístico es el lapso o números de años que en promedio, se cree que será igualado o excedido el evento extremo de lluvias (Aparicio, F., 2018). El Tr de los eventos de lluvia máxima acumulada en 24 h.

$$Tr = \frac{n + 1}{m}$$

Donde

Tr : Periodo de retorno, años.

n : Número de datos.

m : Número de orden en una lista con los datos ordenados de mayor a menor valor.

Se calculó el índice de infiltración durante cada una de las tormentas de análisis en donde se presentaron las inundaciones, la capacidad de infiltración es constante durante toda la tormenta y se calcula de la siguiente manera:

- a) Del hidrograma de la avenida se separa el gasto base y se calcula el volumen de escurrimiento directo.

- b) Se calcula la altura de lluvia en exceso efectiva $hp_e = \frac{V_{ed}}{A_c}$ (en función del volumen de escurrimiento directo entre el área de la cuenca).
- c) El índice de infiltración (Φ) es igual a la altura de precipitación correspondiente a la suma de las alturas que queden por arriba de una línea imaginaria en el hietograma que iguale a hp_e dividida entre el intervalo de tiempo (Δt) que dure cada barra del hietograma.

Para la tercera fase, se realizó una revisión bibliográfica de documentos y de notas periodísticas de los municipios de la RH12 LS con mayor recurrencia de eventos con alto impacto por las inundaciones súbitas. Se comparó con la cobertura de uso de suelo urbano, verificando así la selección de las 5 cuencas en estudio y buscando tener una estación hidrométrica con aforos del escurrimiento a la salida de cada cuenca para poder validar los resultados.

La representación gráfica se realizó con la altura de precipitación en la parte superior de la gráfica en forma descendente con gráfico de barras según la representación oficial de un hietograma y el escurrimiento representado en la parte inferior de la gráfica en forma ascendente graficado en línea continua como corresponde a un hidrograma. A esta representación gráfica se le denominó como *Gráfica de lluvia-escurrimiento*.

En la cuarta etapa, para los eventos de las inundaciones súbitas, se determinaron los hietogramas e hidrogramas discretizados para un intervalo de tiempo más corto del que se tiene disponibilidad.

En la quinta fase se realizaron y validaron las simulaciones hidráulicas con HEC-RAS de las cinco cuencas para cada una de las inundaciones súbitas documentadas y presentadas de acuerdo con la etapa anterior. Esto, una vez hecho el pre-proceso con los SIG requerido para el modelo hidráulico bidimensional, para la modelización de detalle de los canales de la cuenca, así como las márgenes de inundación de las múltiples zonas de flujo en la única geometría.

El modelo de inundaciones debe cumplir con el proceso de preparación; primeramente el Modelo Digital de Elevación (DEM, por sus siglas en inglés) debe estar libre de sumideros, ésta es una entrada deseada para que no haya problema en la determinación de la dirección del flujo que se realiza con el modelo hidrológico de ArcMap, por lo que, es importante que se compare la morfología de las cuencas e identificar celdas que carecen de información para procesar un tratamiento con álgebra de mapas y corregir.

En este trabajo, al DEM de las cuencas en estudio se le implementa la herramienta *Geoprocessing Fill* para actualizarlo con los valores interpolados de las celdas que se encuentran alrededor de la faltante, asegurando el DEM de entrada para la simulación libre de sumideros.

Siguiendo el proceso de modelación hidrológica la herramienta *Flow Accumulation* crea un ráster de acumulación de flujo para cada celda de acuerdo con su composición topográfica, matemáticamente cuando se tiene el volumen acumulado en cada celda en automático se le asigna un factor de peso, y este funciona para formar el trayecto en donde haya cambios de pendiente entre celdas consecutivas. Para concluir con el modelo hidrológico de entrada al modelo de simulación se utiliza la herramienta *Flow Direction* la cual asigna un vector de dirección de acuerdo con el factor de peso que va hacia la pendiente descendente más empinada.

Una vez que se tiene el procesamiento del modelo hidrológico, éste permite delimitar las áreas de contribución sobre un conjunto de celdas de los ráster que contribuyen en dirección al río principal según decrece la pendiente, éstas son denominadas como Unidades Hidrológicas (UH).

Es importante analizar a las UH ya que si presentan grandes cambios hidrogeomorfológicos se tendrá que implementar un Modelo Hidrológico Distribuido para presentar resultados con mejor detalle de cada UH si es el caso, debido a esto, se realiza el proceso con ArcMap y con Physitel, dos SIG que comparan la distribución, morfología y el modelo hidrológico resultante. Si la comparación cumple bajas variaciones entre UH, se tomará la decisión para un Modelado Hidrológico Global y así no usar el Hydrotel.

Las fases para la estructura computacional entran con una malla de 30x30 m amplificada al doble de la malla original disponible para abarcar mayor área en detalle hacia las dos márgenes, izquierda y derecha del sistema de drenaje principal, el modelado se realizó desde la extensión Ras Mapper de HEC-RAS, la cual dio una buena aproximación al modelo real, ya que se detalló a partir de la salida de mapas con imágenes satelitales en condición a los componentes hidrográficos actuales.

Los datos de entrada para el modelo de escurrimiento son el coeficiente de escurrimiento, que depende también de la composición edafológica y de uso de suelo o de la vegetación en el área de estudio, se procesó el DEM y la información de la cantidad de escurrimiento o gasto (Q; con unidades en metros cúbicos por segundo) en las fechas de ocurrencia de inundación.

El modelo mediante la continuidad de la masa por unidad de longitud (densidad del fluido de modo que sus derivadas parciales respecto a la longitud (x) y tiempo (t) siempre existen y son continuas) definida como:

$$\frac{dm}{dt} = \rho \vec{v} d\vec{S}$$

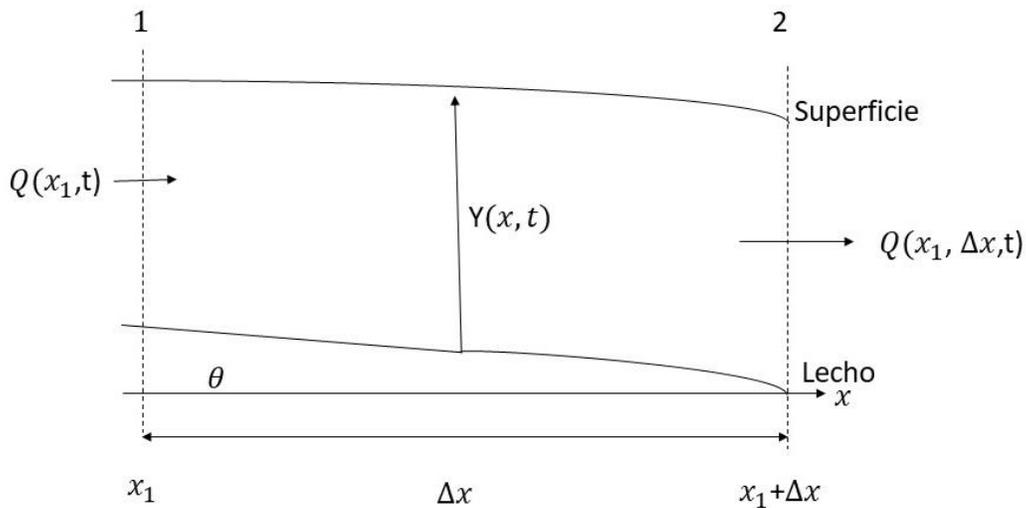
Donde:

m : masa contenida o volumen

ρ : densidad del flujo.

S : superficie.

Para derivar el modelo, primero se definió un llamado volumen de control, denotado como Ω que consta de los primeros 15 datos de la serie de la corrida, que corresponde a un volumen arbitrario de agua en el campo de flujo rodeado por una superficie envolvente “imaginaria”; conveniente el trabajar con el volumen base del hidrograma, para obtener el control y seguir el sistema de partículas fluidas. Para el canal abierto se determinó el volumen como tramos de longitud $\Delta x = 30$ m, que se describe en el esquema 1.



Esquema 1. Vista longitudinal de un pequeño tramo del canal.

Cuando el sistema es controlado, el modelo representa de manera adecuada a la mancha de dispersión del agua a lo largo de Δx pasando por cada celda hasta tener la cobertura de toda la malla, que representa a la cuenca en estudio y ésta varía en función del tiempo.

Después de la investigación sobre inundaciones súbitas con alto impacto que se muestra en la Tabla 1, se identifican las fechas y el municipio en donde ocurrieron, se analizaron y obtuvieron las gráficas de lluvia-escorrentamiento, hietogramas y las manchas de inundación simuladas con el software HEC-RAS, cumpliendo con el objetivo de caracterizar la causa-efecto de la ocurrencia súbita en las cuencas de estudio.

ALCANCE

La tesis presenta una revisión de documentos de inundaciones súbitas en el país en las que se determinaron las manchas de inundación a partir de la simulación de escurrimiento. Se realiza la caracterización de las precipitaciones que ocurrieron previamente a las inundaciones, así como de las simulaciones de las inundaciones súbitas documentadas en las cuencas de la RH12 LS.

CAPITULO I.

REGIÓN HIDROLÓGICA NÚMERO 12

LERMA SANTIAGO Y

DETERMINACIÓN DE LAS CUENCAS

DE ESTUDIO

REGIÓN HIDROLÓGICA NÚMERO 12 LERMA SANTIAGO (RH12 LS)

La RH12 LS, es la tercera más grande de México con extensión de 133 853 km² y comprende una de las zonas económicamente más dinámicas de México, ya que forma un eje de desarrollo entre grandes ciudades con aprovechamiento agroindustrial, agrícola, energía eléctrica y el agua superficial aprovechada altamente a nivel nacional. Esta región tiene una riqueza de tipos de ecosistemas continentales; sin embargo, el crecimiento urbano sumado a diferentes factores antropogénicos y sociales han desencadenado fuertes rezagos. Según la CONAGUA (2018), la mayoría de los habitantes tienen acceso a un servicio adecuado y seguro de agua potable y un alto porcentaje está cubierto con el servicio del alcantarillado.

UBICACIÓN DE LA REGIÓN HIDROLÓGICA NÚMERO 12 LERMA SANTIAGO (RH12 LS)

El área de la RH12 LS incluye territorio de los estados de Jalisco, Nayarit, Zacatecas, Aguascalientes, Guanajuato, Durango, Michoacán, Querétaro y México (Figura 2). La región se ubica al centro occidente de la República Mexicana entre las coordenadas 453067 y 471637 metros Este y 2099542 y 2595405 metros Norte, de acuerdo con el Sistema de Coordenadas WGS 1984 UTM, Zona 14N.

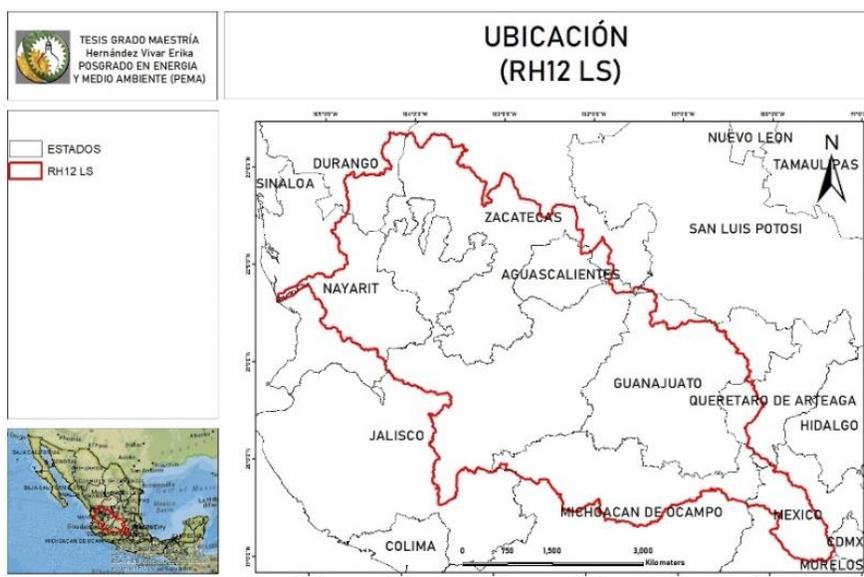


Figura 2. Localización de la Región Hidrológica Número 12 Lerma Santiago (Elaboración propia a partir de la información de INEGI, 2022).

La RH12 LS es importante para el aprovechamiento del sistema de aguas superficiales a través de 60 sistemas de presas, de éstas la mayoría están clasificadas como *Grandes Presas*, según el conocimiento de la Comisión Internacional de Grandes Presas. Su capacidad de almacenamiento es muy grande, a su vez la composición de estos sistemas, entre otros factores, ha modificado el

régimen hidrológico y, la diversidad de usuarios beneficiados, resulta en desigualdad del agua en la región. Esto también se debe a la dinámica poblacional, el desarrollo de actividades económicas, asentamientos urbanos desordenados, degradación de las cuencas, contaminación de los recursos hídricos, pérdidas de capital natural, sobreexplotación de los acuíferos, eventos hidrometeorológicos extremos que se reflejan en sequías e inundaciones, con mayor intensidad en ciertas regiones de la cuenca (Flores Díaz, *et al.*, 2017).

La RH12 LS representa los límites naturales de 58 cuencas hidrológicas administradas por la CONAGUA, definidas por la división de las aguas debidas a la conformación del relieve. Es una zona de superficie topográfica con elevación máxima de 4 587 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.), que corresponde a la parte más alta de la región en el Estado de México y desemboca en la costa del estado de Nayarit.

HIDROGRAFÍA DE LA REGIÓN HIDROLÓGICA NÚMERO 12 LERMA SANTIAGO (RH12 LS)

Lerma-Santiago, es una región que es drenada por una serie de corrientes perennes y subcolectores intermitentes que presentan un patrón de drenaje dendrítico, y en algunos aparatos volcánicos la red hídrica es radial; su dirección de escurrimiento es de sureste a noroeste.

El río Santiago es el principal de la región hidrológica, y el segundo afluente más largo de México, así como uno de los más importantes del occidente del país; los segundos ríos más trascendentales son Lerma-Chapala. El río Lerma se origina en el Estado de México, continúa sobre Querétaro, Guanajuato y Michoacán, para desembocar en el Lago de Chapala, Jalisco. Es ahí donde nace el río Santiago, que recorre 475 km hasta desembocar en el Océano Pacífico por el estado de Nayarit, el río es alimentado por varios tributarios de gran importancia por su volumen de escurrimiento de agua, que a su vez son almacenados en las Grandes Presas para aprovechamiento del recurso. Este sistema atraviesa zonas de urbes importantes por la cantidad de habitantes, su demanda por los recursos para su supervivencia e importantes también por la generación económica que producen, el municipio de Guadalajara en Jalisco, Zamora y Morelia en Michoacán, Toluca en el Estado de México y el municipio de Querétaro en el estado de Querétaro.

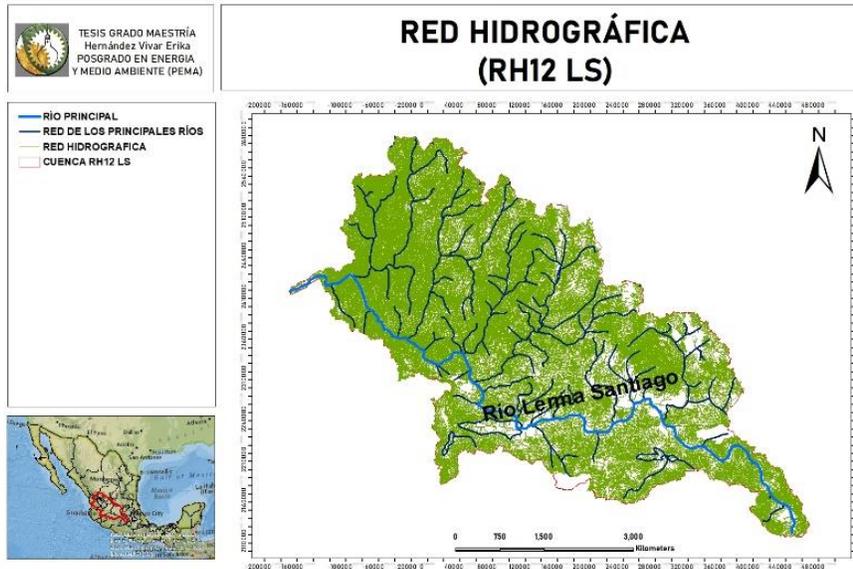


Figura 3. Red Hidrográfica de la RH12 LS, líneas color verde-Red Hidrográfica completa; líneas azul oscuro-Red Hidrográfica de ríos principales; línea azul claro-río Lerma Santiago. (Elaboración propia con información de INEGI, 2022)

EDAFOLOGÍA DE LA REGIÓN HIDROLÓGICA NÚMERO 12 LERMA SANTIAGO (RH12 LS)

La RH12 LS tiene una composición edafológica de acrisol, andasol, cambisol, feozem, litosol, luvisol, planosol, regosol, vertisol y xerosol, suelos característicos del tipo de suelo en donde sus propiedades físicas, así como su textura influye en la infiltración de agua y en el escurrimiento de la cuenca. La RH12 LS muestra una predominancia en el tipo de suelo vertisol y feozem (Figura 4).

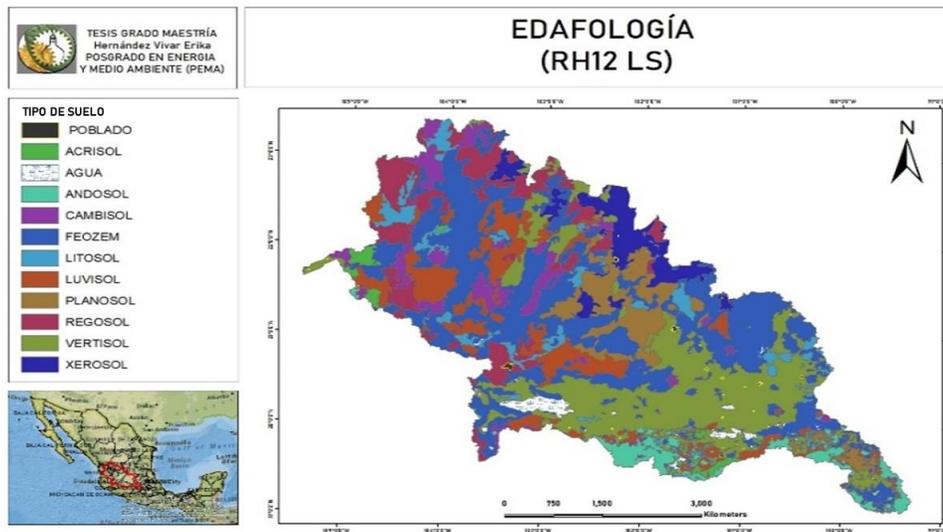


Figura 4. Cobertura superficial de la composición natural del suelo de la RH12 LS (Elaboración propia con información de CONABIO, 2021).

El vertisol se encuentra sobre todo en climas templados y cálidos, especialmente en zonas con una marcada estación seca y otra lluviosa; la vegetación natural va de selvas bajas a pastizales y matorrales, este suelo tiene alto contenido de arcilla, la cual es expandible en húmedo formando superficies de deslizamiento llamadas facetas, y por ser colapsables en seco ya que pueden formar grietas en la superficie o a una determinada profundidad. Su uso agrícola es muy extenso, variado y productivo. El vertisol tiene baja susceptibilidad a la erosión y alto riesgo de salinización (INEGI, 2014).

El feozem se puede encontrar en cualquier tipo de relieve y clima, excepto en regiones tropicales lluviosas o zonas muy desérticas, la profundidad de este suelo es muy variable. Cuando son profundos se encuentran generalmente en terrenos planos y se utilizan para la agricultura de riego temporal. Los feozem menos profundos, situados en laderas o pendientes, presentan como principal limitante la roca o alguna cementación, muy fuerte en el suelo, tiene rendimientos más bajos y se erosionan con facilidad (INEGI, 2014).

La RH12 LS se compone de una gran diversidad de suelo; sin embargo, la composición entre arcillosa y presentación de rocas y cementación importante ocasionan que la permeabilidad sea de muy lenta a moderada (de 0.05 a 6.3 cm de profundidad por hora). La permeabilidad del suelo suele medirse en función de la velocidad del flujo del agua en un tiempo determinado, para este trabajo se tiene un especial cuidado a las áreas con los tres tipos de suelos descritos, ya que complementan la información hidráulica del área de estudio en donde se puede encontrar poca infiltración y dificultad de flujo en zonas planas, resultando en posibles zonas de ocurrencias de inundaciones.

USO DE SUELO Y VEGETACIÓN DE LA REGIÓN HIDROLÓGICA NÚMERO 12 LERMA SANTIAGO (RH12 LS)

El Uso de Suelo y Vegetación (USV) se han visto modificados en los últimos tiempos, identificando deterioros en el ambiente e incrementando al uso urbano. Como se observa en la (Figura 5) la RH12 LS se compone de áreas de uso agrícola y uso **de suelo urbano**, áreas de bosque, selva, pequeñas áreas de manglar, sabanoide y suelos sin vegetación, ni población.

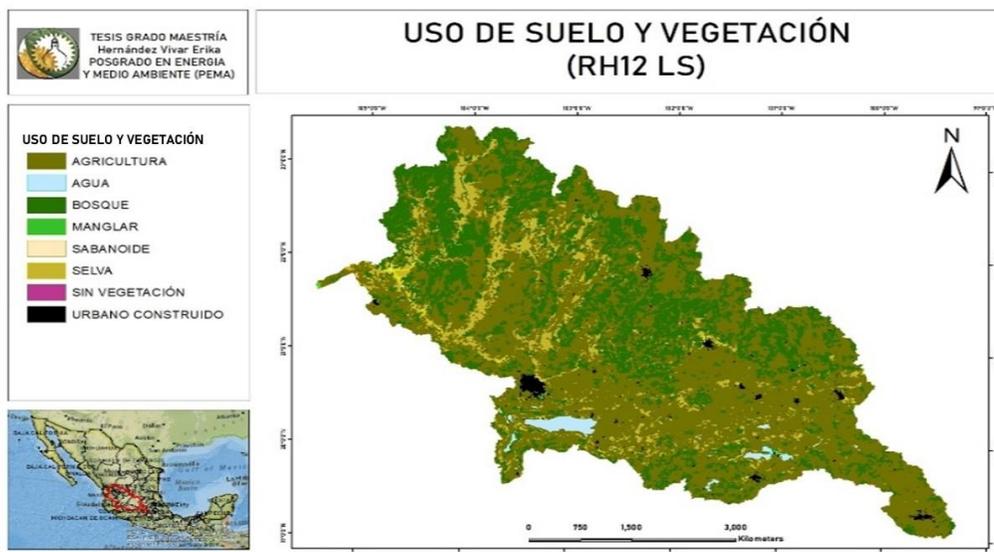


Figura 5. Cobertura superficial de la composición de Uso de Suelo y Vegetación de la RH12 LS (Elaboración propia con información de CONABIO de 2021).

Como ya se mencionó, el elemento de uso urbano construido hace referencia a aquel suelo que se incluye en el planeamiento urbanístico de cada municipio, se trata de un terreno que cuenta con todos los servicios urbanos o al menos la mayoría, entre ellos: servicio de agua, saneamiento, acceso rodado y energía eléctrica. La modificación antropogénica para la estructura de los elementos de servicios urbanos que ha cambiado el estado natural del ecosistema de las cuencas, de manera específica se desarrollan en zonas metropolitanas ya definidas a nivel municipal, razón por la cual la tesis se centra en el análisis de los parámetros fisiográficos y en el uso de suelo urbano.

LLUVIA Y ESCURRIMIENTO DE LA REGIÓN HIDROLÓGICA NÚMERO 12 LERMA SANTIAGO (RH12 LS)

La precipitación promedio anual registrada en la región es de 766.8 mm (6.1% por arriba de la media nacional, que es de 722.5 mm) según el Programa Hídrico Regional 2021-2024 (PHR 2021-2024, CONAGUA). Con régimen de lluvias que van desde finales de mayo, hasta el mes de septiembre y en algunos casos hasta octubre.

Las mayores precipitaciones están dadas de acuerdo con eventos hidrometeorológicos extremos, que ocurren alrededor del país; sin embargo, con mayor influencia son los originados en el Océano Pacífico, se tienen precipitaciones promedio anuales máximas de 1500 mm, desde la zona noroeste (NW) hasta la parte más alta de la región sureste (SE) como se puede apreciar en la Figura 6.

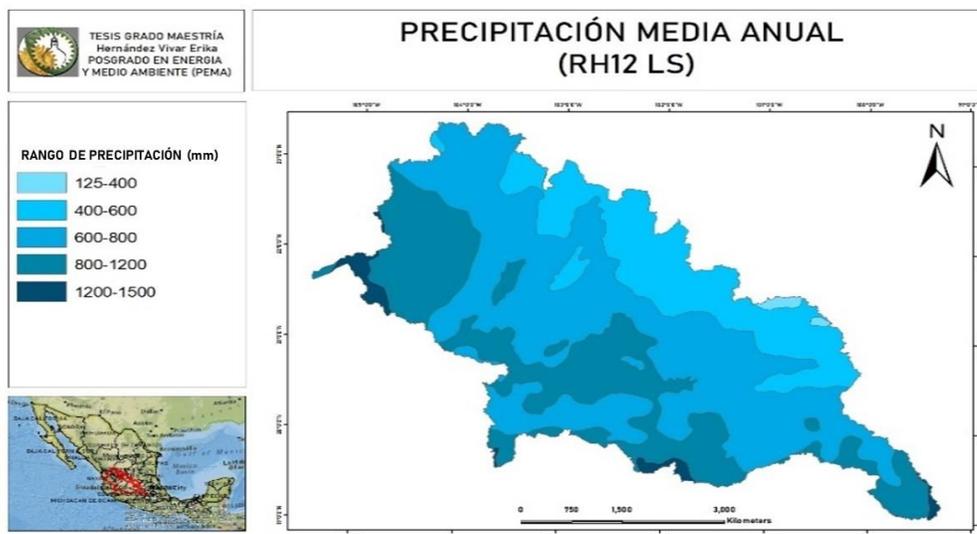


Figura 6. Distribución de la precipitación media anual de la RH12 LS (Elaboración propia con información del SMN, 2021)

Las estaciones climatológicas son las que miden la precipitación, esta variable varía geográfica y temporalmente, por lo que su medición resulta relevante para el registro de afectaciones como son las inundaciones.

La RH12 LS tiene una densidad de 380 estaciones climatológicas en operación por la CONAGUA, éstas poseen datos a partir de 1900 hasta la fecha y cuenta con 6 estaciones sinópticas meteorológicas (ESIME) en operación a través del SMN (Figura 7).

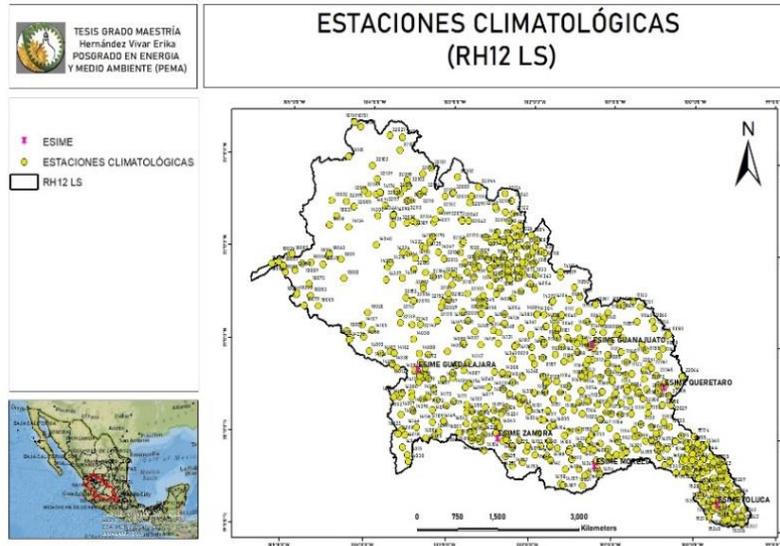


Figura 7. Distribución espacial de las estaciones climatológicas y las ESIMES. (Elaboración propia con información de SMN, 2021).

La RH12 LS tiene un escurrimiento medio superficial de la cuenca aguas abajo, en función de los cálculos de 1981 al 2010, de 13 062 hm³/año (CONAGUA, 2018). La RH12 LS contiene en su área la distribución de 284 estaciones hidrométricas administradas por la CONAGUA como se observa en la Figura 8.

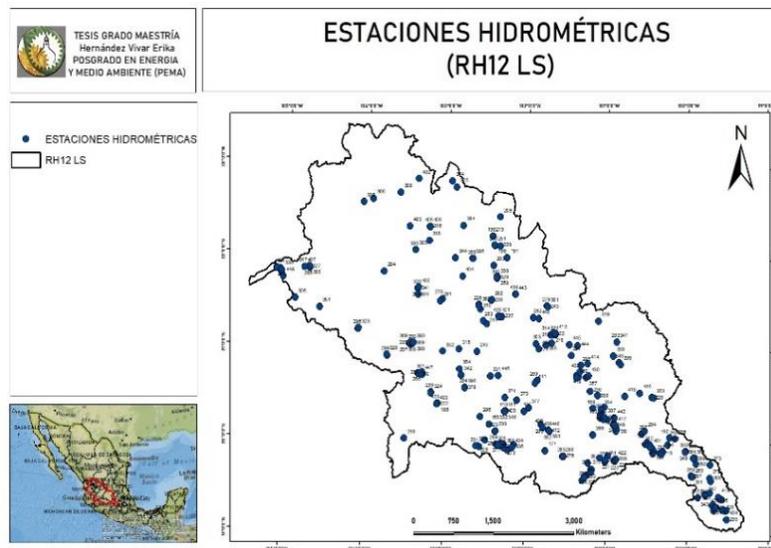


Figura 8. Distribución espacial de las estaciones hidrométricas en la RH12 LS. (Elaboración propia con la información de BANDAS, 2021)

ANTECEDENTES DE LAS ZONAS DE INUNDACIÓN DE LA RH12 LS

El CENAPRED a través del portal de datos abiertos de peligro por inundaciones (CENAPRED, 2021), ha dispuesto información de vulnerabilidad por inundaciones a nivel municipal; lo cual es un antecedente que nos permite comparar entre los municipios con vulnerabilidad⁴ media y alta (Figura 9) de ocurrencia de inundaciones y notas periodísticas sobre noticias de inundaciones en los municipios de la RH12 LS. De la Tabla 1 se identificaron 5 zonas urbanas en donde la presencia de lluvias ha provocado afectaciones de alto impacto, siendo noticia de encabezados en notas periodísticas, resaltando los daños sociales, a la naturaleza y dificultades en la planeación de respuesta inmediata del gobierno.

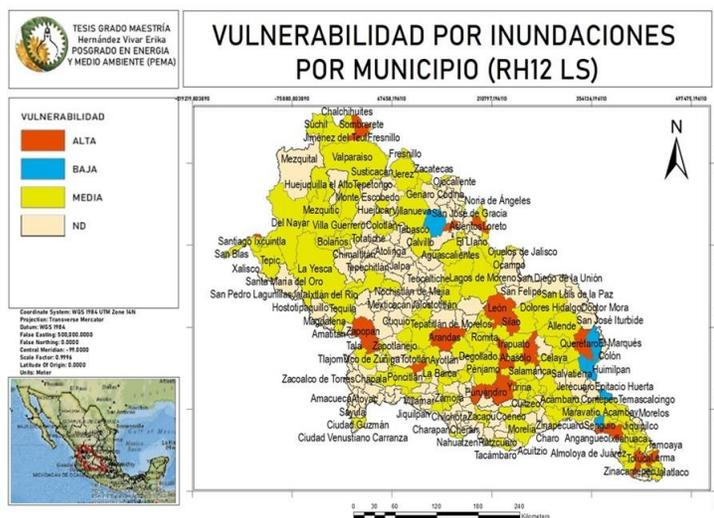


Figura 9. Mapa de vulnerabilidad por inundaciones a escala municipal delimitado a la RH12 LS, (Elaboración propia con información de los abiertos de CENAPRED, 2021)

Tabla 1. Inundaciones súbitas a nivel municipal publicadas en notas periodísticas [Elaboración propia con información recopilada de hemerotecas digitales].

MUNICIPIO	ESTADO	AÑO			
		1973	1994	2001	2003
IRAPUATO	GUANAJUATO	18 de Agosto, el día que el agua devastó a Irapuato (EL SOL DE IRAPUATO)			
ZAMORA	MICHOACÁN		23 de Agosto, Lluvias Extremas (ATLAS DE RIESGOS DE ZAMORA)		
MORELIA	MICHOACÁN				18 de Septiembre, Inundaciones en Morelia por tromba (PROCESO)
QUERÉTARO	QUERÉTARO			04 de Septiembre, Inundan las lluvias agro en Querétaro (v lex)	24 de Agosto, Deja caos lluvia en Querétaro (v lex)
MUNICIPIO	ESTADO	AÑO			

⁴ Susceptibilidad o propensión de los sistemas expuestos a ser afectados o dañados por el efecto de un fenómeno perturbador (SEGURIDAD, CNPC y CENAPRED, 2021)

		2006	2007	2008	2009
CALVILLO	AGUASCALIENTES			29 de Agosto, Cuatro muertos por lluvias en Aguascalientes y Chihuahua (LA JORNADA)	
EL LLANO	AGUASCALIENTES			29 de Agosto, Cuatro muertos por lluvias en Aguascalientes y Chihuahua (LA JORNADA)	
ENCARNACIÓN	JALISCO			23 de Agosto, Lluvia provoca inundaciones en poblados del municipio de Encarnación de Díaz (EL INFORMADOR)	
GUADALAJARA	JALISCO				11 de Agosto, Reportan inundaciones en zona metropolitana de Guadalajara (W Radio) 02 de Septiembre, Lluvia genera inundación en ZMG (INFORMADOR.MX)
LERMA	MÉXICO	07 de Septiembre, Afectan las lluvias cuatro municipios del estado de México (LA JORNADA)			
OTZOLOTEPEC	MÉXICO	07 de Septiembre, Afectan las lluvias cuatro municipios del estado de México (LA JORNADA)			
TOLUCA	MÉXICO	07 de Septiembre, Afectan las lluvias cuatro municipios del estado de México (LA JORNADA)			
ZAMORA	MICHOACÁN		24 de Julio, Deja "Dalia" 200 damnificados e inundaciones en Michoacán (W Radio)		
QUERÉTARO	QUERÉTARO	02 de Octubre, Desalojan a 80 familias en Querétaro (LA JORNADA)			
MUNICIPIO	ESTADO	AÑO			
		2013	2014	2015	2017
CALVILLO	AGUASCALIENTES	16 de Junio, Lluvias dejan 3 mil damnificados (LA JORNADA)			
EL LLANO	AGUASCALIENTES			25 de Octubre, Se desborda presa en Aguascalientes (REFORMA)	
PABELLÓN DE ARTEAGA	AGUASCALIENTES			21 de Junio, Fotogalería de inundación en Pabellón de Arteaga (EL CLARINETE)	
SAN FRANCISCO DE LOS ROMO	AGUASCALIENTES		22 de Septiembre, Periódico Oficial de Estado de Aguascalientes; Inundaciones		
SAN FRANCISCO DEL RINCÓN	GUANAJUATO			14 de Marzo, Lluvias inundan San Francisco del Roncón (ARTÍCULO 7)	
MANUEL DOBLADO	GUANAJUATO			14 de Marzo, Lluvias inundan San Francisco del Roncón (ARTÍCULO 7)	
PÉNJAMO	GUANAJUATO	22 de Septiembre, Resiente inundaciones Guanajuato (v lex)			
ABASOLO	GUANAJUATO	22 de Septiembre, Guanajuato pide declarar zona de desastre en Pénjamo (EL UNIVERSAL)			
LEÓN	GUANAJUATO	22 de Septiembre, Resiente inundaciones Guanajuato (v lex)			
GUADALAJARA	JALISCO	12 de Agosto, La tormenta sabatina puso de cabeza a toda la ciudad (EL INFORMADOR)			
LERMA	MÉXICO			18 de Septiembre, Lluvia provoca inundaciones en Lerma, Metepec y San Mateo Atenco (AGENDA INFORMATIVA)	
ZINACANTEPEC	MÉXICO				10 de Julio, Lluvia registrada en el valle de Toluca dejó inundaciones (v lex)
ZAMORA	MICHOACÁN			16 de Marzo, Estragos en Michoacán y Guerrero por aguaceros (LA JORNADA)	

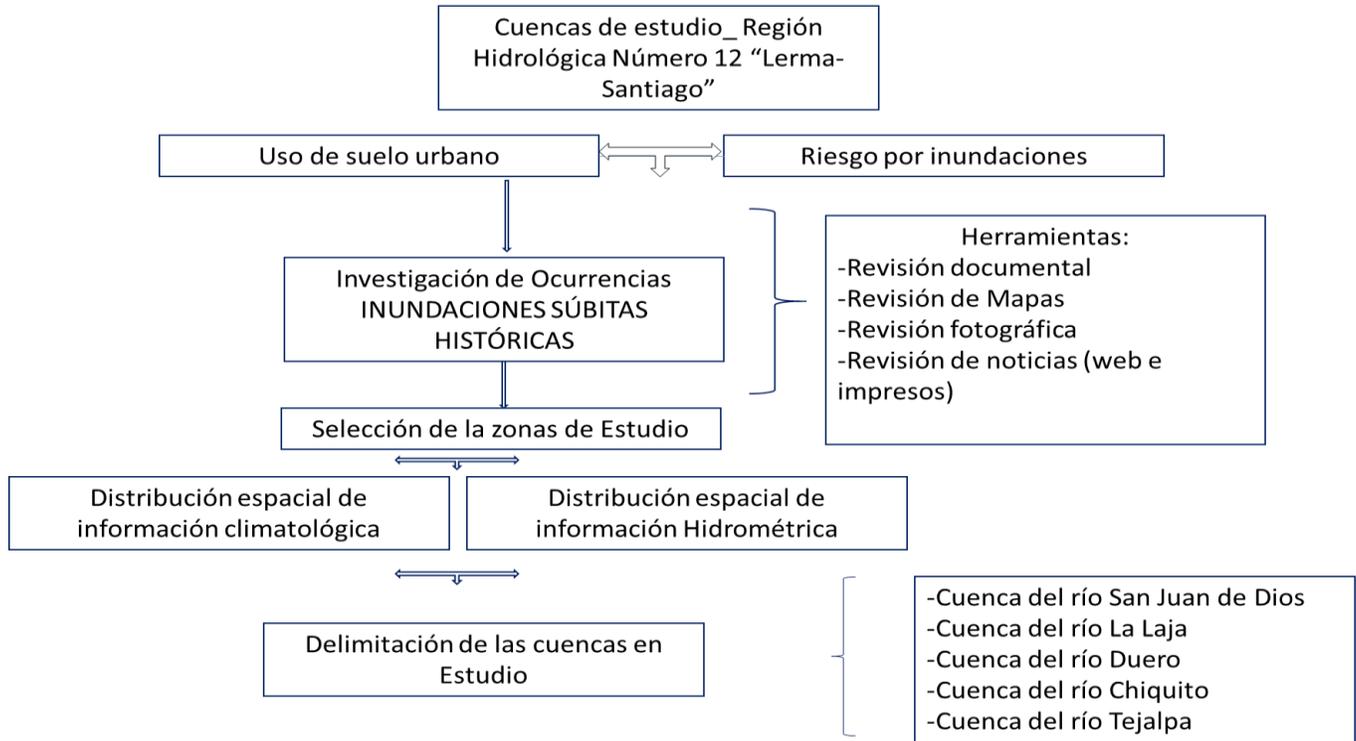
MUNICIPIO	ESTADO	AÑO		
		2018	2019	2020
		MORELIA	MICHOACÁN	
QUERÉTARO	QUERÉTARO	11 de Junio, Inundaciones en Querétaro dejan al menos 830 afectados (LA JORNADA)		
CALVILLO	AGUASCALIENTES	30 de Septiembre, Tormenta Atípica afectó 35 viviendas de colonias en Calvillo, Aguascalientes (LJA.MX)		
PABELLÓN DE ARTEAGA	AGUASCALIENTES			27 de Agosto, (PERIODICO OFICIAL DEL ESTADO DE AGUASCALIENTES)
PURISIMA DEL RINCÓN	GUANAJUATO		05 de Junio, Atiende municipio problemáticas por lluvias (LEÓN AYUNTAMIENTO)	
PÉNJAMO	GUANAJUATO	29 de Septiembre, Torrenciales lluvias desbordan "La Golondrina" (EL SOL DE IRAPUATO)		
ABASOLO	GUANAJUATO	29 de Septiembre, Torrenciales lluvias desbordan "La Golondrina" (EL SOL DE IRAPUATO)		
IRAPUATO	GUANAJUATO	11 de Julio, Lluvias en Irapuato deja inundaciones (NOTICIAS DE IRAPUATO)		16 de Agosto, Inundación (CON TEXTO NN)
ROMITA	GUANAJUATO		18 de Agosto, Agosto lluvioso (EL SOL DE IRAPUATO)	
ENCARNACIÓN	JALISCO	20 de Septiembre, Tromba azota Encarnación de Díaz Jalisco (EL CLARINETE)		
GUADALAJARA	JALISCO	17 de Septiembre, Lluvias provocan inundaciones en Guadalajara y Zapopan (López-Dóriga Digital)		
LERMA	MÉXICO	2 de Septiembre, Desborde del río Lerma afecta mil casas (LA JORNADA)		
METEPEC	MÉXICO	02 de Septiembre, Desborde del río Lerma afecta mil casas (LA JORNADA)	19 de Junio, Lluvias dejan inundaciones en Metepec (ADN 40)	
TOLUCA	MÉXICO	09 de Septiembre, Nuevamente se registran inundaciones (EL SOL DE TOLUCA)	04 de junio, Lluvia causa inundaciones en varios puntos del valle de Toluca (EL SOL DE TOLUCA)	
ZINACANTEPEC	MÉXICO	02 de Septiembre, Granizada causa inundación en Zinacantepec (El Sol de Toluca)		
ZAMORA	MICHOACÁN	31 de Agosto, Lluvias provocan deslaves e inundaciones en Zamora (NUESTRA VISIÓN NOTICIAS)	21 de Julio, Intensas lluvias en Zamora provocan inundación en un nuevo Wal-Mart (REGIONAL)	09 de Septiembre, Vigila SSP zonas afectadas por lluvias en Zamora (EL SOL DE MORELIA)

Los municipios de Zapopan, Guadalajara, Querétaro, Toluca, Zamora y Morelia están construidos sobre una base de uso de suelo urbano, que ha modificado la composición edafológica, además en estos municipios han ocurrido frecuentes inundaciones. El CENAPRED ha categorizado a estos municipios entre vulnerabilidad media y alta por inundaciones.

Las ESIME que se identificaron en las cuencas son: GUADALAJARA, QUERÉTARO, TOLUCA, ZAMORA y MORELIA. Las redes principales de escurrimiento que atraviesan a estos municipios son los ríos: San Juan de Dios, La Laja, Tejalpa, Duero y Chiquito. Sobre estos cauces se tiene monitoreo y medición

hidrométrica con las estaciones: 12573 “La Experiencia”, 12718 “Amache”, 12543 “Calixtlahuapa”, 12310 “La Estanzuela” y 12224 “Chiquito”.

A continuación, se presenta el organigrama para la elección de las cuencas en estudio (Organigrama 1).



Organigrama 1. Presentación esquemática del método para la elección de las cuencas de estudio de la RH12 LS (elaboración propia).

CAPITULO II.
CUENCA DEL RÍO SAN JUAN DE
DIOS

El Área Metropolitana de Guadalajara (AMG) es la segunda más poblada de la República Mexicana, se localiza en la parte central del estado de Jalisco, se integra por 8 municipios entre ellos Zapopan y Guadalajara. Históricamente el AMG ha sido centro político y económico, con la ventaja de tener priorización en proyectos de urbanización cofinanciados por autoridades municipales y estatales.

La creciente mancha urbana obliga a plantear nuevos retos de coordinación entre los tres órdenes de gobierno que posibiliten la planeación integral de territorio, así como la planeación ante los eventos hidrometeorológicos. La ciudad de Guadalajara es un sitio de inundaciones que prácticamente ocupan todo el municipio (Villanueva L. R., 2019)

ANTECEDENTES DE LAS INUNDACIONES CUENCA SAN JUAN DE DIOS

El estado de Jalisco, tiene un registro de lluvias abundantes, ciclones y huracanes en los años de 1832, 1866, 1878, 1881, 1882, 1883, 1885, 1886, 1890, 1892, 1896, 1897, 1898 y 1899; Escobar A. Ohmstede (2004) en el libro “Desastres Agrícolas en México; Tomo II”, presenta este registro como una recopilación de información que permite conocer sobre procesos derivados no sólo de escasez de agua sino también sobre aquellos en los que la abundancia o el exceso de dicho recurso, así como la presencia de amenazas como ciclones tropicales que afectaron la producción agrícola. En el interés de este trabajo, se tiene como antecedente que existe documentación en México, que resalta las afectaciones negativas por la presencia de inundaciones desde el siglo XIX.

Generalmente los registros de las inundaciones de alto impacto, cuentan con evidencia fotográfica a través de las notas periodísticas; sin embargo, hasta antes del auge de la era digital, las notas solamente se disponían en impreso y a partir de la década de 2000 se tiene mayor facilidad para consultar y recuperar las notas a través de internet.

En la Tabla 2 se tiene la compilación de las notas periodísticas con mayor impacto por consecuencias de algunas de las inundaciones más sobresalientes en los municipios de Zapopan y Guadalajara.

Tabla 2. Inundaciones ocurridas en los municipios de Guadalajara y Zapopan, Jalisco. [Elaboración propia con información recopilada de hemerotecas digitales].

Mes	Año	Nota Periodística	Referencia
Agosto	2009	Incremento de nivel de agua, ascendiendo a 1.5 m. Las afectaciones se registraron sobre vías públicas del municipio de Zapopan y Guadalajara	W Radio
Septiembre	2009	La lluvia ocasionó atención por parte de Protección civil a los reportes de inundación	El informador
Agosto	2013	El agua subió, en toda la metrópoli hubo reporte de daños	El informador
Septiembre	2018	Lluvias provocan inundaciones en Guadalajara y Zapopan	Nacional

Se resumen las notas periodísticas:

- La lluvia que comenzó la noche del 10 de agosto de 2009, provocó inundaciones, incrementando el problema con la presencia de árboles caídos en avenidas de la zona metropolitana, el nivel del agua ascendió en 1.5 m, donde una camioneta quedó atrapada tras no hacer caso a las indicaciones de no cruzar por el lugar (W Radio, 11/08/2009).
- La lluvia de la tarde del 2 de septiembre de 2009 ocasionó que los elementos rescaten Zapopano, realizaran maniobras de limpieza debido a que por el taponamiento de alcantarillas la inundación alcanzó 1.5 m de altura (El Informador, 02/09/2009).
- La nota periodística hace referencia a una lluvia ocurrida entre la noche del 10 y la madrugada del 11 de agosto de 2013, con una duración de 80 minutos, según registros de la Unidad Estatal y Municipal de Protección Civil. Los niveles más altos de inundación alcanzaron los 0.5 m que provocaron daños a casa habitación (El Informador, 19/09/2009).
- La Lluvia que cayó el lunes 17 de septiembre de 2018, provocó inundaciones en vía pública. La Unidad de Protección Civil Zapopan informó que el nivel del agua alcanzó de 0.20 a 1.5 m de altura, durante esto se presentaron problemas como caídas de árboles y la pérdida de un civil (López Dóriga, 17/09/2018).

Se asocia la relación entre lluvias ocurridas en la temporada de lluvias, específicamente entre los meses de agosto y septiembre. Según las notas las duraciones de las lluvias están entre 60 a 180 minutos o más, y se definen como tormentas severas. Las corrientes que se forman en la traza urbana escurren de acuerdo con la pendiente topográfica, estancándose en la zona plana.

UBICACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO SAN JUAN DE DIOS

La cuenca del río San Juan de Dios se ubica entre los municipios Zapopan y Guadalajara, el escurrimiento de la cuenca comienza en el punto más alto que corresponde a la curva de nivel 2 090 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.). La cuenca se ubica entre las coordenadas 28552 y 50667 m Este y 2290547 y 2300690 m Norte (sistema de proyección universal transversal de Mercator).

La cuenca tiene un área de 119.43 km² y su punto de salida está en la ubicación de la estación hidrométrica “La Experiencia”. Su afluente principal es el “Río San Juan de Dios” que nace a 5 km al norte de la ciudad de Guadalajara, éste fluye en dirección noroeste (NW) y alcanza un desarrollo de aproximadamente 12 km, es un tributario izquierdo del río Santiago.

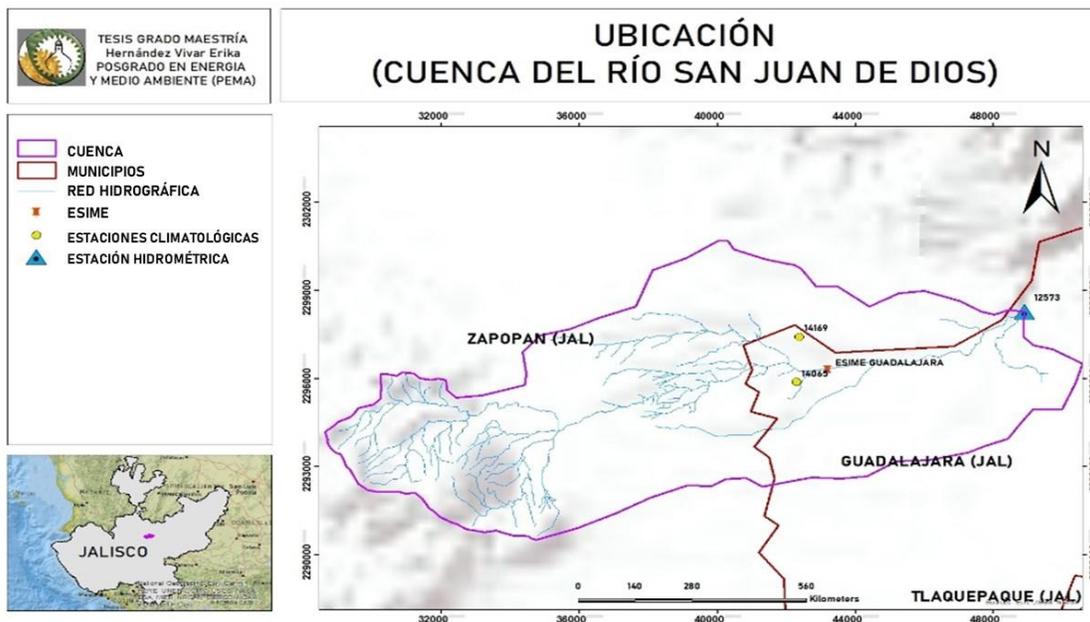


Figura 10. Cuenca del río San Juan de Dios, ubicada en el estado de Jalisco. (Elaboración propia).

Las estaciones utilizadas para el análisis en la cuenca del río San Juan de Dios son (Figura 10) las estaciones climatológicas con clave 14169 “Zapopan” y 14065 “Guadalajara”; la ESIME “Guadalajara” y la hidrométrica 12573 “La Experiencia”.

EDAFOLOGÍA DE LA CUENCA DEL RÍO SAN JUAN DE DIOS

La cuenca río San Juan de Dios se compone por el suelo regosol, el cual es poco desarrollado en materia orgánica, asociado con afloramientos de roca o tepetate, frecuentemente son suelos de capas someras, su fertilidad es variable y su productividad está condicionada a la profundidad y pedregosidad.

En el proceso erosivo a causa del agente de transporte de agua, el regosol puede liberar gran cantidad de sedimentos, a través del proceso se forman distintos paisajes compuestos por diferentes propiedades, principalmente limos y arcillas. El área de suelo poblado no es de material parental, lo que significa que el material de la roca madre o del depósito superficial ya ha sido alterado.

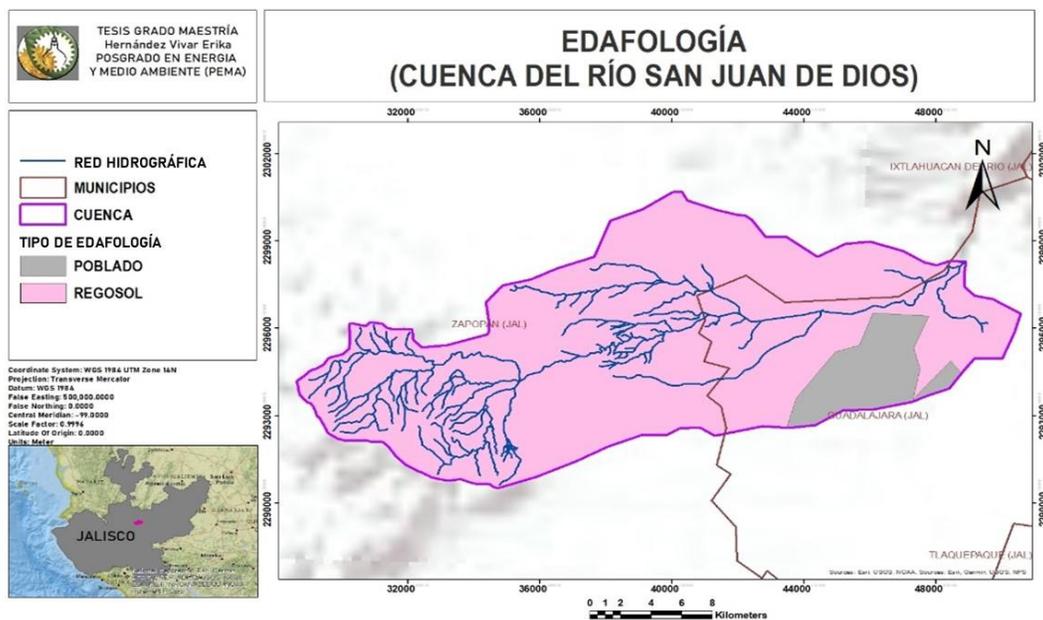


Figura 11. Composición edafológica en el área de la cuenca del río San Juan de Dios. (Elaboración propia con información de CONABIO 2021)

USO DE SUELO Y VEGETACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO SAN JUAN DE DIOS

El uso de suelo y la vegetación que predomina en la cuenca del río San Juan de Dios está distribuida en la parte alta con bosque de pino-encino y también es un área designada para el uso agrícola. La parte media y baja de la cuenca se encuentra totalmente cubierta por el uso urbano construido (Figura 12). Esta zona es plana y ha presentado afectaciones por inundaciones, razón por la cual posee muros de protección contra dicho fenómeno, los cuales son útiles para eventos normales; sin embargo, para los eventos súbitos estas estructuras han superado su

capacidad de protección, provocando una zona de inundación paralela a las márgenes del río. Esta área metropolitana se localiza en la parte central del estado de Jalisco y ha sido el centro más importante en el sector político y económico.

En 1950 inició la expansión de la mancha urbana y las inmobiliarias comenzaron a modificar el relieve, mediante el relleno de barrancas, rectificación, entubamiento y desaparición de cauces, relleno y nivelación de grandes superficies (Vázquez Piombo, P., *et al.*, 2015).

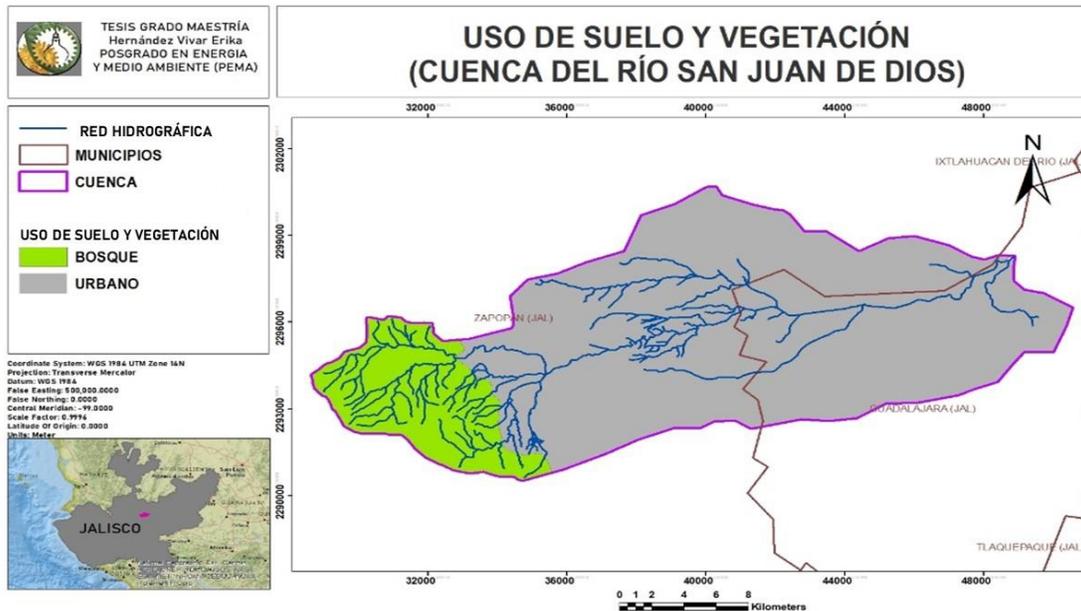


Figura 12. Composición del uso de suelo y vegetación de la cuenca del río San Juan de Dios. (Elaboración propia con información de CONABIO, 2021).

El comportamiento del caudal y de las crecidas, se conoce que pueden ser modificadas por las propiedades morfométricas de la cuenca, tales como la forma, el tamaño y el cambio de las pendientes, ya que pueden operar tanto para atenuarlas o bien para intensificar las crecidas. La mayor parte de estas propiedades actúan incrementando el volumen del flujo y la velocidad de su movimiento. En lo que respecta al coeficiente de rugosidad de la cuenca del río San Juan de Dios, el escurrimiento fluye principalmente sobre el río San Juan de Dios, con un coeficiente de 0.035 y márgenes modificadas por estructuras urbanas, que modifican dicho coeficiente a 0.025 de acuerdo con la referencia de la Tabla A. 1 del Anexo 1.

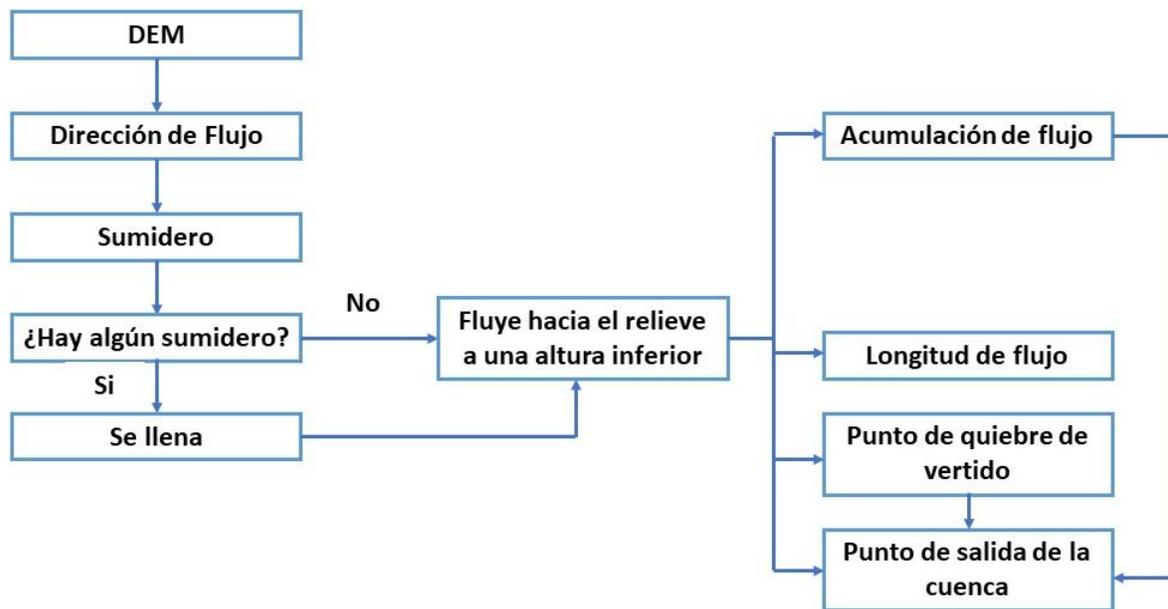
HIDROLOGÍA DE LA CUENCA DEL RÍO SAN JUAN DE DIOS

La cuenca se delimitó a partir de la topografía, con la información vectorial de las curvas de nivel y la red de drenaje superficial a escala 1:50 000 de los datos disponibles en el apartado de Geografía y Medio Ambiente por INEGI 2021,

considerando como punto de salida la ubicación de la estación hidrométrica 12573 “La Experiencia”.

El Modelo Digital de Elevaciones (DEM) de la cuenca del río San Juan de Dios es una representación de ráster de la superficie continua mediante valores que indican puntos sobre la superficie del terreno, cuya ubicación geográfica se encuentra definida por las coordenadas geográficas y la elevación. Este producto es del Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0), disponible a través del Relieve Continental (CEM, INEGI, 2021). La delimitación del DEM para la cuenca del río San Juan de Dios se obtuvo por un corte referido a la delimitación de la misma cuenca del área geográfica del estado de Jalisco a una resolución de 15 m, descargado en formato TIFF y procesado con el SIG ArcMap.

Al definir la cuenca y la superficie del terreno, se obtienen las redes de cauces. Se sabe que el flujo va en dirección de la pendiente más empinada; el modelo hidrológico, una vez que conoce la dirección de la salida del flujo de cada celda determina cuál y cuántas celdas fluyen. En el Organigrama 2 se presenta el proceso de extracción de información hidrológica de la cuenca del río San Juan de Dios.



Organigrama 2. Organigrama del modelo hidrológico (Elaboración propia, 2022).

La cuenca del río San Juan de Dios está distribuida en tres zonas: alta, media y baja, entre las alturas 2090-1680, 1680-1550 y 1550-1390 en m.s.n.m., respectivamente. Las partes media y baja no tienen cambios de pendientes bruscos por lo que se tiene 2 áreas planas como se observan en la Figura 13, estas depresiones actúan como sumideros naturales en la ocurrencia de eventos de

Lluvias fuertes o intensas, generando acumulación de volumen de escurrimiento en un corto tiempo –inundación súbita-.

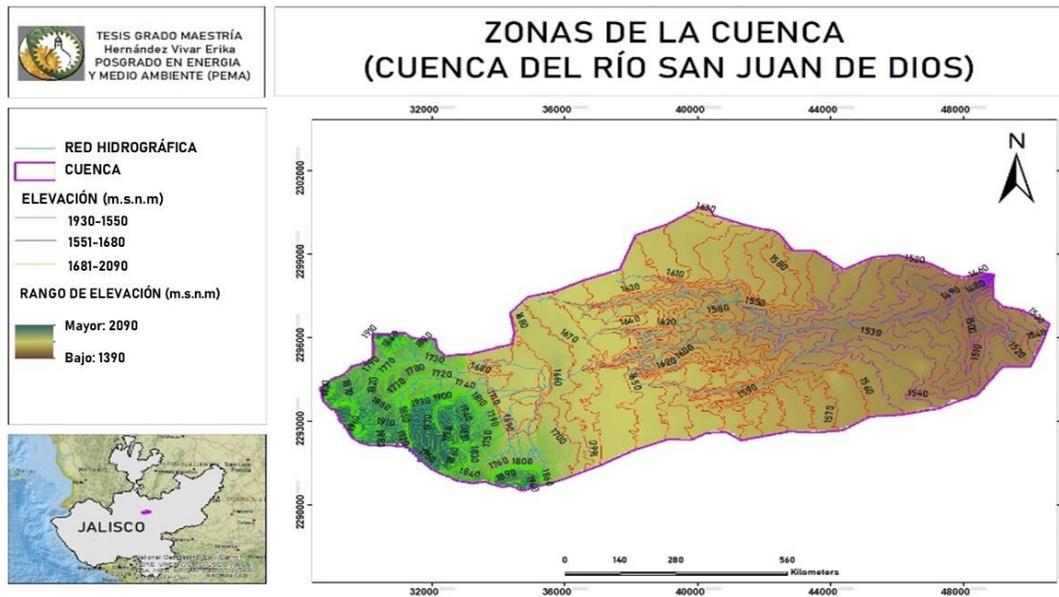


Figura 13. Zonas de la cuenca del río San Juan de Dios (Elaboración propia).

En las zonas de la cuenca, la distribución espacial de la lluvia sobre la superficie cambia con respecto a la altura, conociendo que los valores de precipitación media en la zona alta son mayores a la zona media y baja, la lluvia una vez que cae una parte se infiltra hasta saturar el suelo y la mayoría de ella tiende a ser drenada en dirección hacia la zona baja. La cuenca del río San Juan de Dios se caracteriza por tener la mayor superficie de zona baja con poca pendiente de la cual se asume que posiblemente el escurrimiento pueda ser almacenado en esa zona antes de que continúe su drenado a la salida. A continuación, en la Tabla 3 se presenta la distribución de la lluvia media anual en las zonas de la cuenca.

Tabla 3. Distribución de la lluvia promedio anual por zonas de la cuenca del río San Juan de Dios. [Elaboración propia con información del SMN]

Zona de la cuenca	Lluvia promedio anual, mm
Media	80.2
Baja	65.3

El procesamiento del modelo hidrológico con el SIG Physitel se muestra en la Figura 14, donde:

- Inciso A): *Geoprocessing Fill*
- Inciso B): Unidades Hidrológicas (UH)
- Inciso C): *Flow Accumulation*
- Inciso D): Cambio de pendiente

- Inciso E): *Flow Direction*

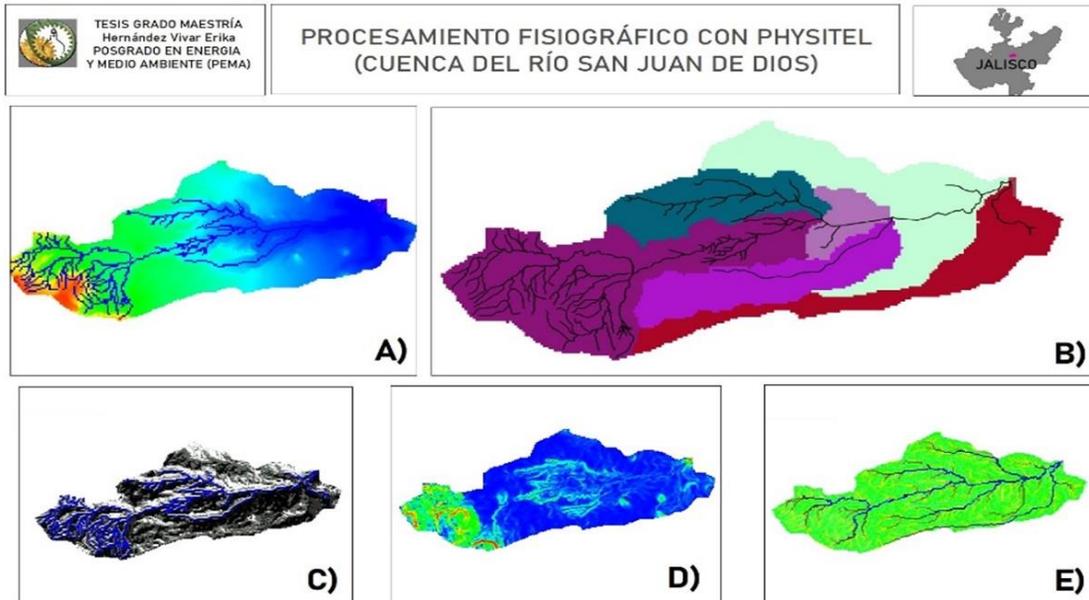


Figura 14. Procesamiento del modelo hidrológico de la cuenca del río San Juan de Dios con Physitel.

El procesamiento del modelo hidrológico con el SIG ArcMap se muestra en la Figura 15, donde:

- Inciso A): *Geoprocessing Fill*
- Inciso B): Unidades Hidrológicas (UH)
- Inciso C): *Flow Accumulation*
- Inciso D): Cambio de pendiente
- Inciso E): *Flow Direction*

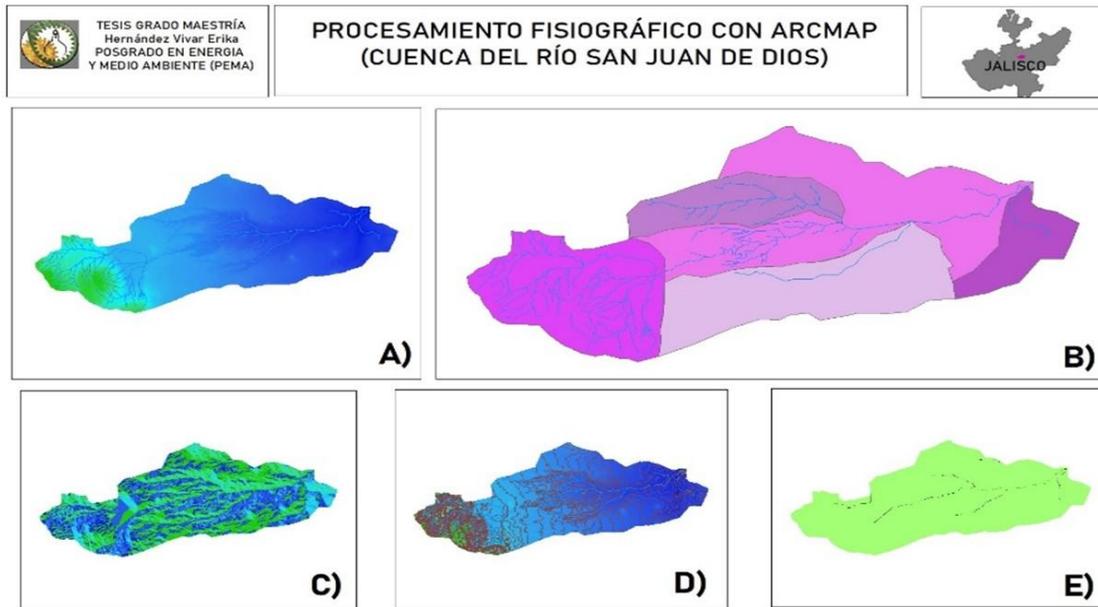


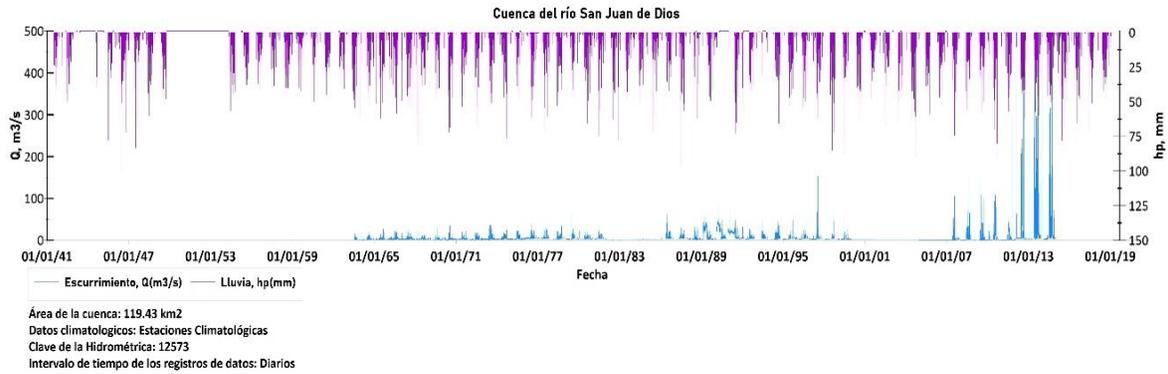
Figura 15. Procesamiento del modelo hidrológico para la cuenca del río San Juan de Dios con ArcMAP

RESULTADOS

LLUVIA – ESCURRIMIENTO Y SIMULACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO DE SAN JUAN DE DIOS

En el caso de la estación 12573 “La Experiencia” se analizaron datos con variación en intervalos de tiempo en escala horaria del 10 de julio de 1963 al 31 de diciembre de 2014, a diferencia, los datos diarios son representados de manera constante en su intervalo de tiempo diario y éstos fueron del 11 de julio de 1963 al 31 de diciembre del 2014.

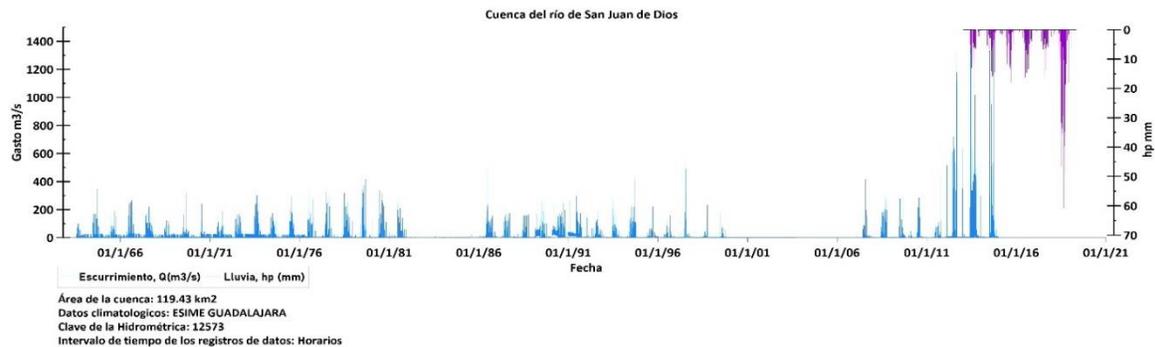
Para las estaciones climatológicas 14169 “Zapopan” y 14065 “Guadalajara” son las estaciones locales y en operación analizadas para la cuenca del río San Juan de Dios, se tiene un registro histórico secuencial del 1 de julio de 1941 al 30 de abril de 2019.



Gráfica 1. Serie de datos diarios de Lluvia-Escorrentamiento de la cuenca del río San Juan de Dios. La altura de precipitación (hp) en unidades de milímetros y el caudal (Q) en metros cúbicos por segundo [Elaboración propia con datos del SMN y del BANDAS].

En la Gráfica 1, el periodo del 11 de julio de 1963 al 31 de diciembre de 2014 representa la serie de datos de precipitación (hp) en la gráfica superior y caudal (Q) que es la gráfica inferior, esta gráfica se denominada lluvia-escorrentamiento, que muestra los datos en donde, la información de ambas variables coinciden y en las que no coinciden, las cuales no se pueden analizar en conjunto. En la gráfica se observa un ligero incremento en la hp a partir de 2001, mientras que el Q se aumentó en 2007.

El periodo de datos de hp de la ESIME Guadalajara comprende del 09 de enero de 2013 al 30 de abril de 2019.



Gráfica 2. Serie de datos en escala temporal horaria de Lluvia-Escorrentamiento de la cuenca del río San Juan de Dios La altura de precipitación (hp) en unidades de milímetros y el caudal (Q) en metros cúbicos por segundo. ESIME Guadalajara [Elaboración propia con datos del SMN y del BANDAS].

La Gráfica 2 representa la base de datos histórica a escala temporal horaria de la que se dispone sobre la cuenca del río San Juan de Dios. Los datos de hp y caudal Q coinciden del 09 de enero de 2013 al 31 de diciembre de 2014.

A continuación se presentan los gráficos de los eventos de ocurrencia que influyeron en las inundaciones súbitas, esta información son los datos de entrada para el modelo de simulación para determinar la mancha de inundación en los municipios de la cuenca que posteriormente se discutirán:

Inundaciones en el 2009

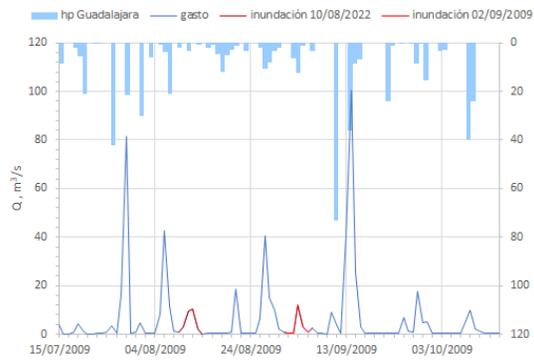
Se realizaron simulaciones diarias de la cuenca del río San Juan de Dios para obtener la salida (respuesta de la cuenca) en intervalos a cada hora, 2 simulaciones en la temporada de lluvia, una es del 15 de julio al 15 de octubre de 2009 y la otra que del 15 de julio al 15 de octubre de 2013. En las gráficas del lado izquierdo de la Figura 16 se presentan las precipitaciones y gastos para estos periodos. El objetivo de simulación en estos dos periodos de tiempo es obtener las características de las manchas de inundación que se generaron en esas fechas, las cuales hipotéticamente deberían coincidir con los reportes periodísticos consultados en los antecedentes de inundaciones súbitas mencionadas en párrafos anteriores.

Para identificar mejor las lluvias que contribuyeron a las inundaciones súbitas, en las gráficas del lado derecho de la Figura 16 se tienen los registros hasta el día de las inundaciones que están identificadas en color rojo y considerando que: a) sólo la estación Guadalajara, b) sólo la estación Zapopan, c) el promedio de las dos estaciones y, c) las lluvias acumuladas en la cuenca. Estas últimas corresponden a los registros de las lluvias ocurridas simultáneamente en dos tributarios que desembocan al río San Juan de Dios (Figura 10). En la Tabla 4 se muestran los cálculos para estas cuatro condiciones y para las cuales se hicieron las simulaciones.

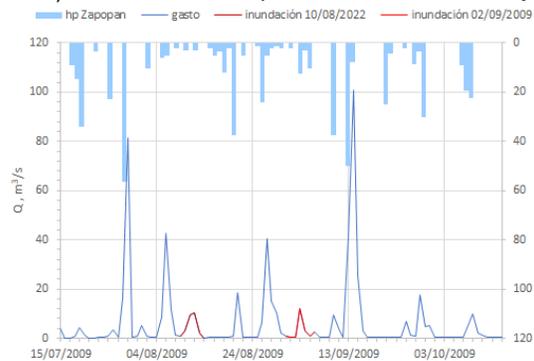
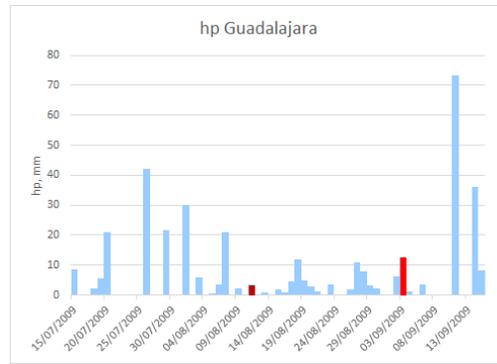
En la Gráfica 3 se presenta la condición que mejor representó la inundación ocurrida el 10 de agosto de 2009 y que corresponde a la lluvia acumulada.

Tabla 4. Lluvias analizadas para la inundación del 10 de agosto de 2009 en la cuenca del río San Juan de Dios [Elaboración propia con datos del SMN]

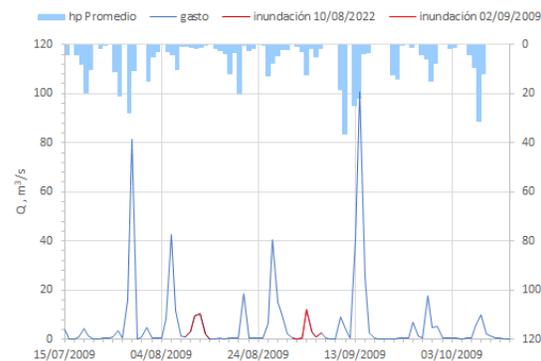
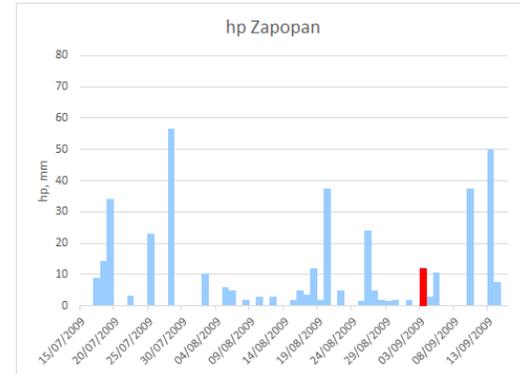
duración de la(s) tormenta(s)	Precipitación acumulada al 11/08/2009 (mm)			precipitación acumulada al 03/09/2009 (mm)		
	24h (Del 10/08 al 11/08)	7 días (Del 04/08 al 11/08) a	28 días (Del 14/07 al 11/08)	24h (Del 02/09 al 03/09)	7 días (Del 31/08 al 03/09)	28 días (Del 07/08 al 03/09)
hp Guadalajara	3.5	30.9	168.4	12.6	43.1	108.3
hp Zapopan	0.0	16.0	166.7	12.5	25.0	136.5
hp Promedio	1.8	23.5	167.6	12.6	34.1	122.4
hp acumulada (G+Z)	3.5	46.9	335.1	25.1	68.1	244.8



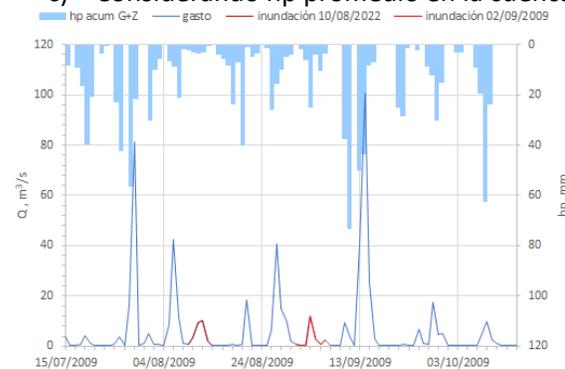
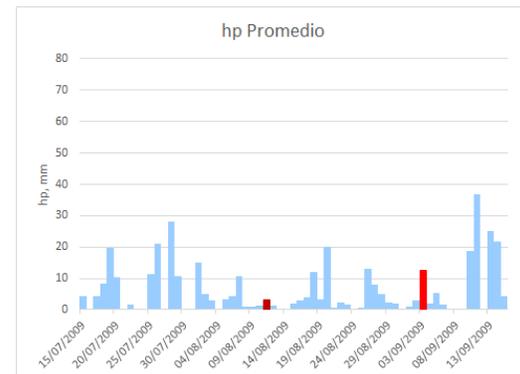
a) Considerando hp en la estación Guadalajara



b) Considerando hp en la estación Zapopan



c) Considerando hp promedio en la cuenca



d) Considerando hp acumulada en la cuenca

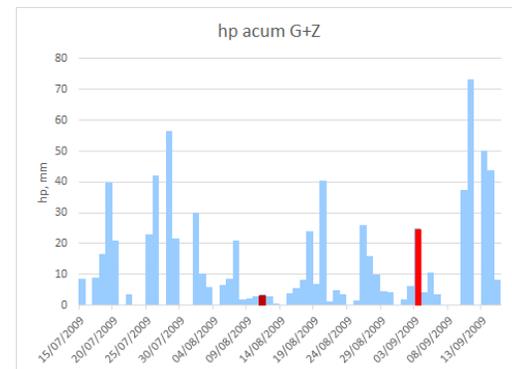
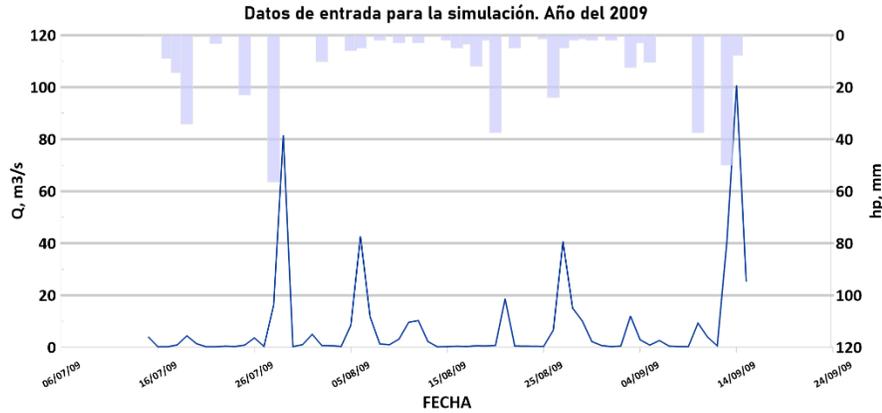


Figura 16. Lluvia-escorrentía (hp-Q) analizada para la inundación súbita del 10 de agosto de 2009 en la cuenca del río San Juan de Dios



Gráfica 3. Lluvia-Escorrimento para la simulación. Intervalo de tiempo diario (intervalos de tiempo de 24 horas). Q en m³/s y hp en mm [Elaboración propia con datos del SMN y del BANDAS].

- Inundación del 10 de agosto del año 2009.

A continuación, se tiene la gráfica de Lluvia-Escorrimento (Gráfica 4) del 09 al 14 de agosto de 2009, donde se observa la altura de precipitación máxima acumulada de 3.5 mm (categorizada como lluvia, según la clasificación de la SEMAR-SMN, Anexo 3), en 24 h, entre las 08:00 horas del 10 de agosto de 2009 y las 08:00 horas del 11 de agosto de 2009, así como el caudal máximo que se presentó hasta el 12 de agosto, de 10.261 m³/s.



Gráfica 4. Lluvia-Escorrimento del 09 al 14 de agosto de 2009 (intervalos de tiempo de 24 horas) [Elaboración propia con datos del SMN y del BANDAS].

El periodo de retorno asociado para la precipitación máxima acumulada de 3.5 mm es de 0.08 años y el índice de infiltración para esta tormenta es de 0.02 mm/h.

Los datos de entrada de la simulación están enfocadas a la fecha señalada como ocurrencia de inundación súbita, la simulación permitirá de acuerdo con la iteración de datos en el modelo matemático que utiliza el *software* (modelo finito) la hora calculada en donde se presenta el mayor problema. El 10 de Agosto de 2009 a las

23 horas la presencia de lluvia, la cual de acuerdo clasificación de la SEMAR-SMN, la presencia de lluvias menores a 25 mm acumuladas en 24 horas, tal como lo fue para el caso de esta cuenca generó unas inundaciones de hasta 3 m de profundidad en el centro de ella, una de las zonas más planas, esta inundación tuvo afectaciones a carreteras y algunas zonas habitadas aproximadas a los límites de la margen derecha e izquierda del río de San Juan de Dios, alcanzando profundidades de entre 1 y 1.5 m; las figuras de la simulación se presentan en las siguientes imágenes (Figura 17).

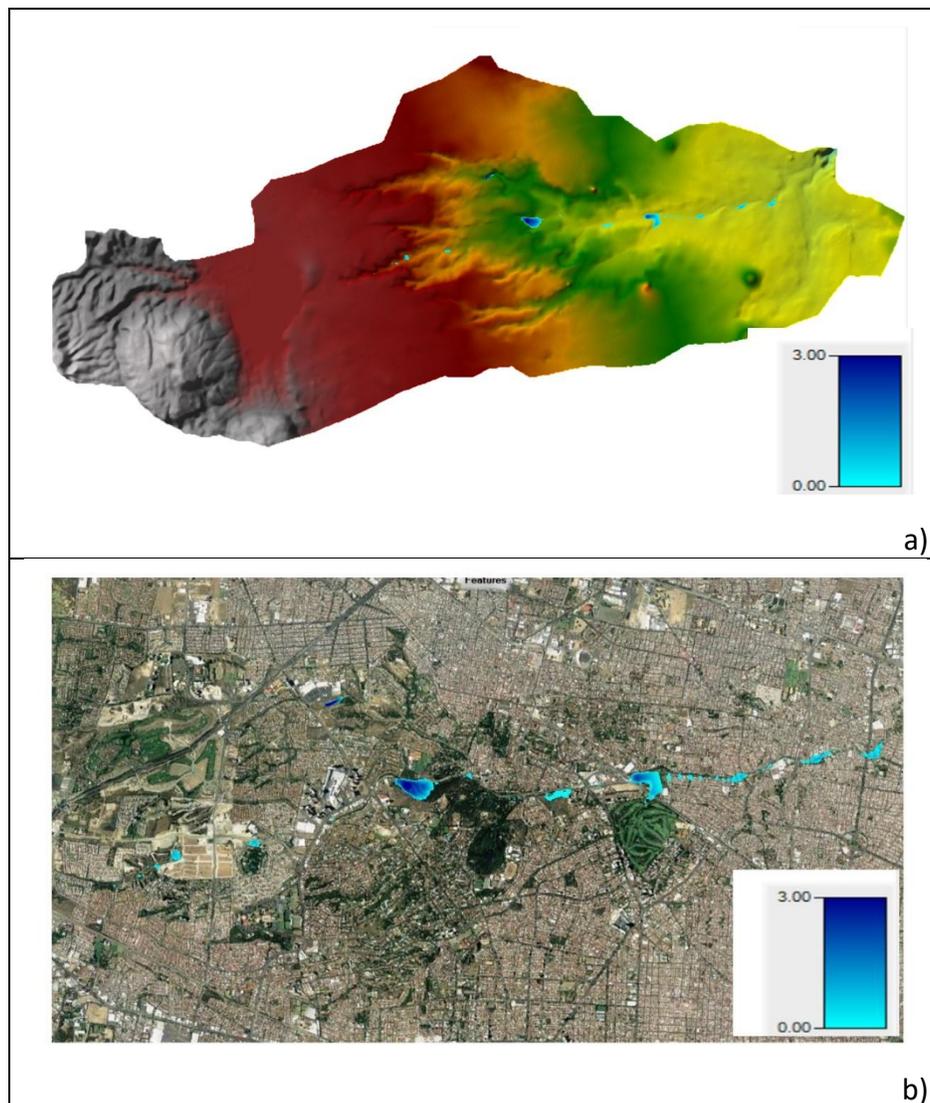
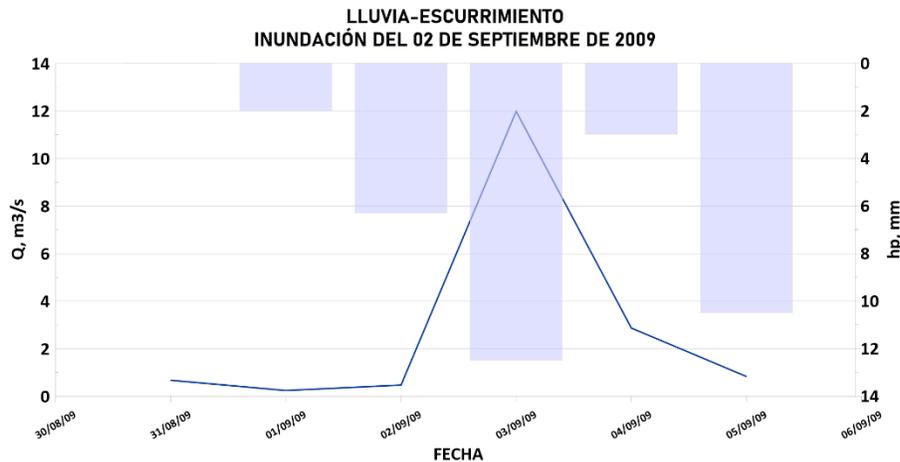


Figura 17. Mancha de inundación que se generó el 10 de agosto de 2009 a las 23:00 horas. Inciso a) representa la mancha de inundación en la cuenca, la escala de profundidad está en metros; b) representa la dispersión de la mancha de inundación con visualización satelital. En ambas figuras la profundidad de inundación está en metros.

- Inundación del 02 de Septiembre de 2009

La gráfica de Lluvia-Escorrimento de la inundación del 02 de septiembre de 2009, comprende el intervalo del 31 de agosto al 06 de septiembre del mismo año, donde la altura de precipitación máxima es de 25.1 mm, acumulada entre las 8:00 horas del 02 de septiembre hasta las 08:00 horas del 03 de septiembre y el caudal máximo se presentó el 03 de septiembre con un gasto de 11.986 m³/s.



Gráfica 5. Lluvia-Escorrimento del 31 de agosto al 06 de septiembre de 2009 (intervalos de tiempo de 24 horas) [Elaboración propia con datos del SMN y del BANDAS].

El periodo de retorno asociado para la precipitación máxima acumulada de 25.1 mm es de 10.3 años y el índice de infiltración para esta tormenta es de 0.4 mm/h.

Los resultados de la simulación para el 02 de septiembre de 2009 muestra que la inundación fue a las 18:00 horas, y se localizó prácticamente en la misma ubicación que la simulación del 10 de agosto, concentrando la mayor profundidad en la parte centro y baja de la cuenca del río San Juan de Dios, con una profundidad máxima de 1.5 m en las carreteras, en la periferia de las márgenes izquierda y derecha del río principal. Los resultados se muestran en la Figura 18.

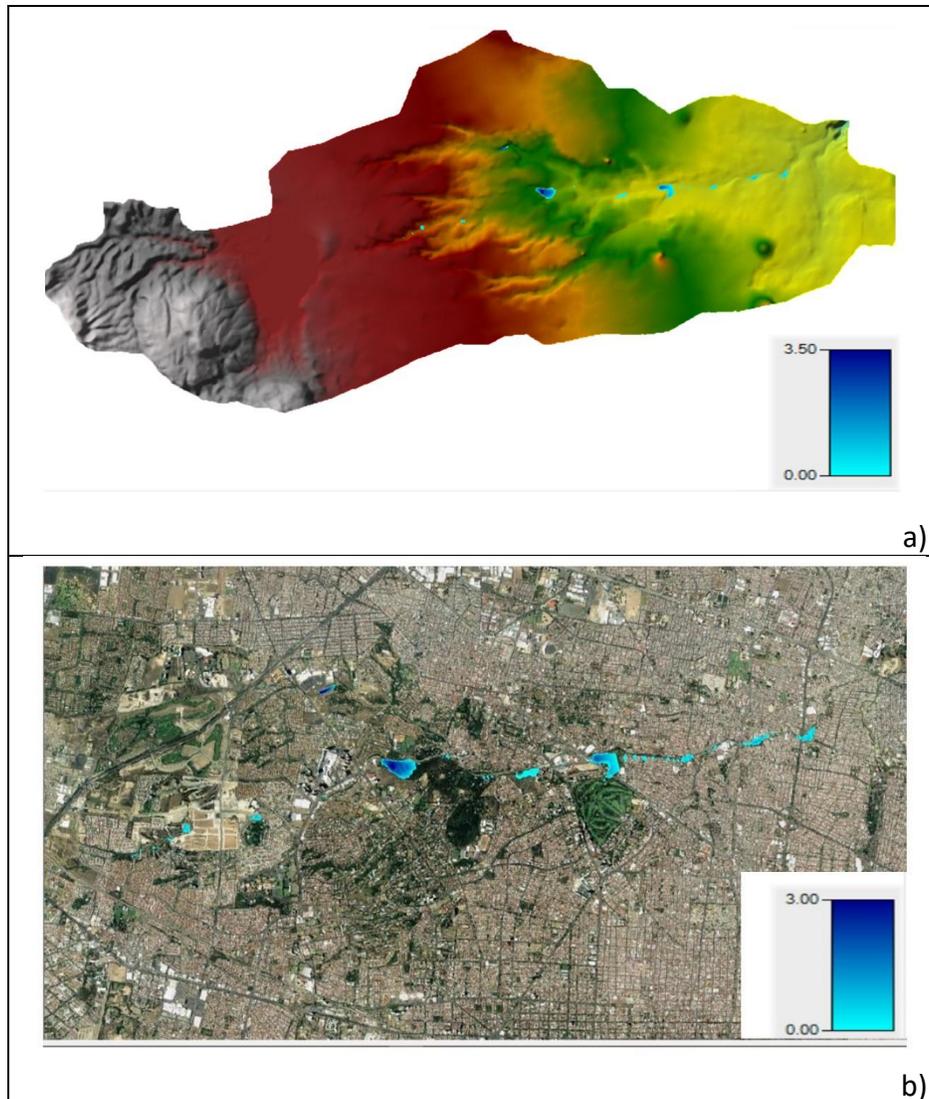


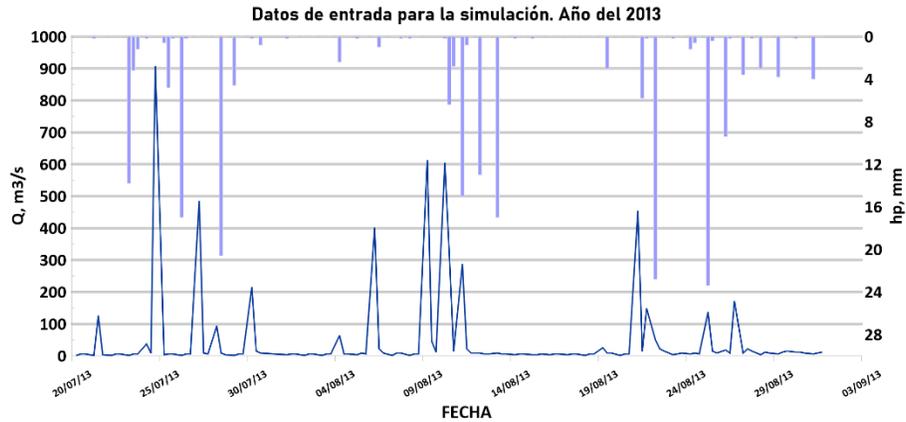
Figura 18. Mancha de inundación que se generó el 02 de septiembre de 2009 a las 18:00 horas. Inciso a) representa la mancha de inundación en la cuenca, la escala de profundidad está en metros; b) representa la dispersión de la mancha de inundación con visualización satelital. En ambas figuras la profundidad de inundación está en metros.

Inundación de 2013

En la Gráfica 6 se presenta la relación lluvia-escorrimento del periodo del 20 de julio al 31 de agosto de 2013. Se observa un incremento muy grande de la altura de precipitación y del gasto, a diferencia de 2009, el hidrograma crece en respuesta a un promedio de 5 mm de lluvia. Se resalta el incremento del gasto base en la temporada de lluvia, por lo que la probabilidad de ocurrencia de inundaciones por lluvias fuertes es alta, así como la respuesta de escurrimiento es muy rápida.

En la Gráfica 6 se presentan 5 picos importantes en el hidrograma donde los gastos van de 906.65 m³/s medido el 24 de julio de 2013 a las 18:00 h, 484.58 m³/s registrado el 27 de julio de 2013 a las 06:00 h, 401.17 m³/s calculado el 06 de agosto

de 2013 a las 06:00 h, 612.47 m³/s determinado el 09 de agosto de 2013 a las 06:00 h y de 453.80 m³/s medido el 21 de agosto de 2013 a las 06:00 h.

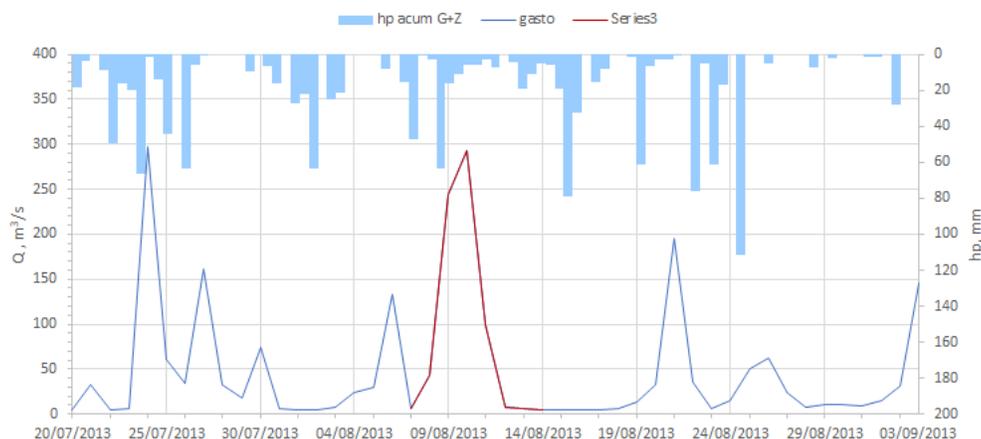


Gráfica 6. Datos de Lluvia-Escorrimento para la entrada para la simulación. Intervalos de tiempo de entre las 06:00 a 12:00 h y de 18:00 a 06:00 h de cada una de las fechas [Elaboración propia con datos del SMN y del BANDAS].

Se observa el proceso de acción y respuesta de la cuenca del río San Juan de Dios, para las fechas de estudio, en este caso la gráfica representa la relación lluvia-escorrimento en un intervalo temporal de las 6:00 a 12:00 h, de 12:00 a 18:00 h y de 18:00 a 6:00 h, éste se mantuvo de acuerdo con la medición registrada por la estación hidrométrica 12573, con falta de datos a media noche, mientras que para la lluvia se calculó la acumulación de hp_N (altura de precipitación neta) entre cada intervalo de tiempo para la correcta representación, mediante la información de los datos de la ESIME Guadalajara.

En la Gráfica 7 se presenta la relación registrada lluvia-escorrimento donde las lluvias corresponden a las estaciones climatológicas, esto es, registros acumulados en 24 horas. Se remarca en rojo el hidrograma de la inundación del 11 de agosto.

En la Tabla 5 se presenta la información para los intervalos de tiempo de la ESIME (6, 12 y 18 horas) y de las estaciones climatológicas (24 horas).



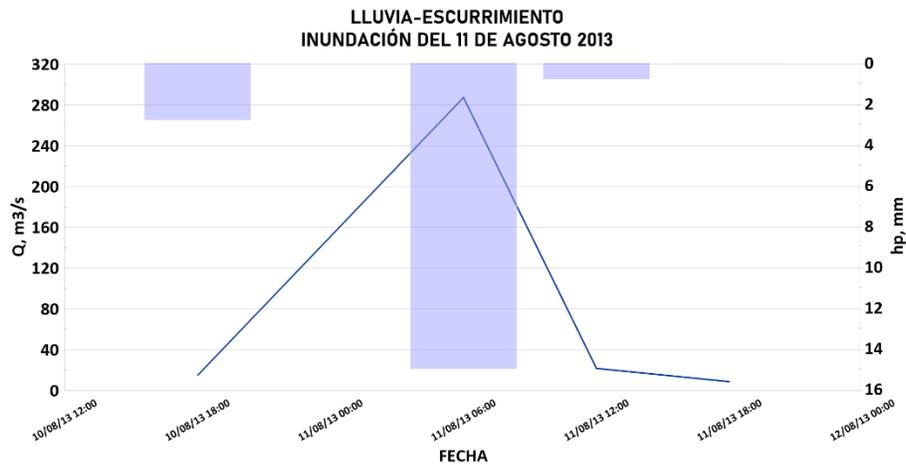
Gráfica 7. Datos de Lluvia-Escorrimento para el intervalo de tiempo de 24 horas [Elaboración propia con datos del SMN y del BANDAS].

Tabla 5. Lluvias analizadas para la inundación del 11 de agosto del 2013 en la cuenca del río San Juan de Dios [Elaboración propia con datos del SMN].

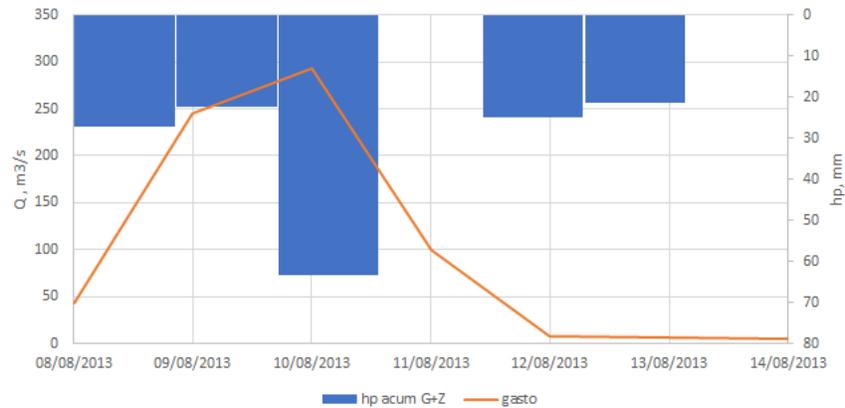
Estaciones	precipitación acumulada (mm)					
	duración de la(s) tormenta(s) al 10/08/2013 (mm)			duración de la(s) tormenta(s) al 11/08/2013		
	24h (Del 09/08 al 10/08)	7 días (Del 03/08 al 10/08)	28 días (Del 13/07 al 10/08)	24h (Del 10/08 al 11/08)	7 días (Del 04/08 al 11/08)	28 días (Del 14/07 al 11/08)
hp Guadalajara	31.4	61.2	206.9	0.0	61.2	206.9
hp Zapopan	32.0	74.0	248.5	0.0	74.0	248.5
hp Promedio	31.7	67.6	227.7	0.0	67.6	227.7
hp acumulada (G+Z)	63.4	135.2	455.4	0.0	135.2	455.4
ESIME Guadalajara	8.6	32.0	134.4	16.0	47.4	165.6

Inundación del 11 de Agosto de 2013

El análisis para entender el comportamiento de las lluvias y el escurrimiento de la fecha del 11 de agosto de 2013 se observa en Gráfica 8 y Gráfica 9, se tiene que la hp máxima es de 15 mm, en donde el Q máximo medido es de 287.28 m³/s.



Gráfica 8. Lluvia-Escorrimento del 10 de agosto a las 18:00 h y hasta el 11 de agosto a las 18:00 h (intervalos de tiempo de 24 horas) [Elaboración propia con datos del SMN y del BANDAS].



Gráfica 9. Lluvia-Escorrimento del 08 al 13 de agosto considerando las estaciones climatológicas (intervalos de tiempo de 24 horas) [Elaboración propia con datos del SMN y del BANDAS].

El periodo de retorno asociado para la precipitación máxima acumulada de 15 mm es de 1.1 años y el índice de infiltración para esta tormenta es de 0 mm/h, lo que significa que no hay infiltración.

Los resultados de la simulación realizada con la información de la Gráfica 6 muestran que la inundación es en las márgenes izquierda y derecha desde la zona alta de la cuenca dispersándose en una longitud transversal de aproximadamente 300 m, y en la parte media de la cuenca, la mancha de inundación alcanza una dispersión de 1 km transversal fluyendo principalmente hacia el área verde que es un club deportivo. Las profundidades máximas de acuerdo con la simulación son de 3m desde el centro de la red de drenado y de 0.5 m de profundidad en la zona alta. Aunque esta última es la zona menos habitada de la cuenca, tiene afectaciones directas sobre caminos y carreteras acumulándose el escurrimiento debido a la poca pendiente, y además se observa a través del acercamiento de imágenes satelitales, un suelo arcilloso que no permite percolación o filtración rápida (Figura 19).

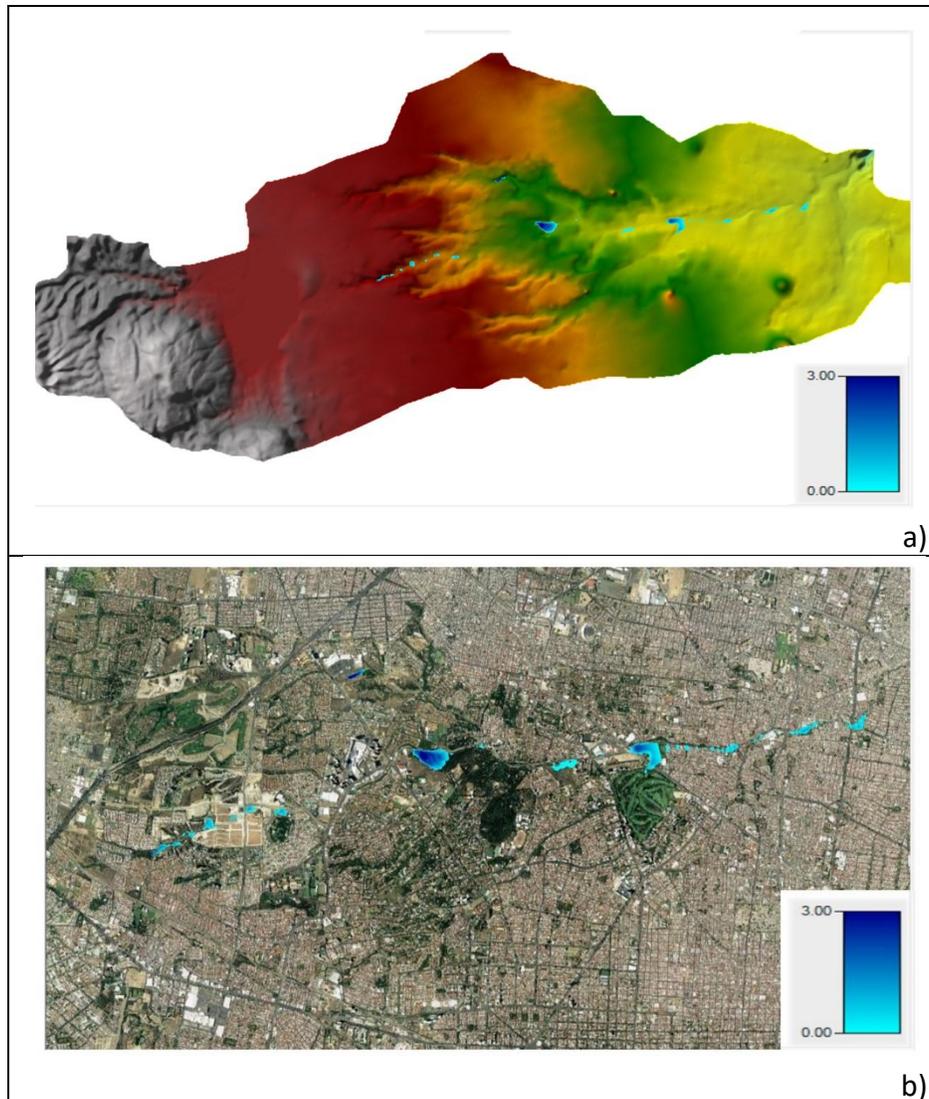


Figura 19. Mancha de inundación que se generó el 10 de agosto de 2013 a las 18:00 horas. Inciso a) representa la mancha de inundación en la cuenca, la escala de profundidad está en metros; b) representa la dispersión de la mancha de inundación con visualización satelital. En ambas figuras la profundidad de inundación está en metros.

A continuación se presenta el hietograma con los datos de hp de la ESIME Guadalajara, la precipitación acumulada en 20 minutos entre las 3:30 y las 3:50 de la madrugada del 11 de agosto de 2013 es de 13 mm.



Gráfica 10. Hietograma del 11 de agosto de 2013 (intervalo de tiempo a 10 minutos) [Elaboración propia con datos del SMN]

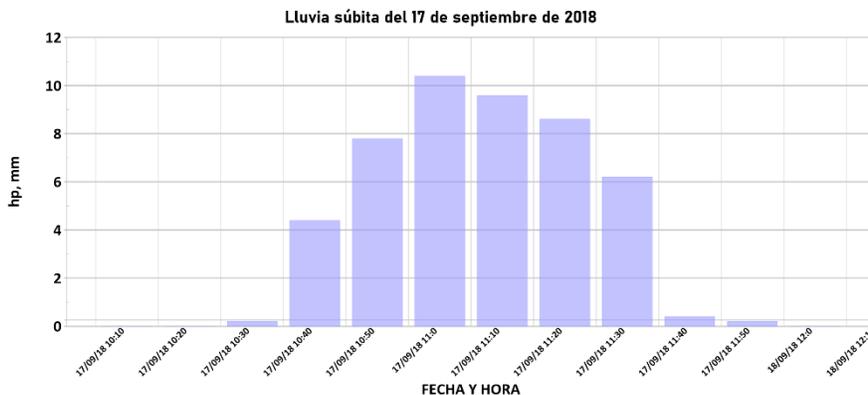
La Gráfica 10 es relevante de acuerdo con el principal objetivo de esta tesis, estos datos en un intervalo de tiempo pequeño de 10 minutos, vemos que la lluvia es el elemento principal para la presencia de la inundación súbita registrada en el periódico como nota importante por los problemas generados.

Inundación de 2018

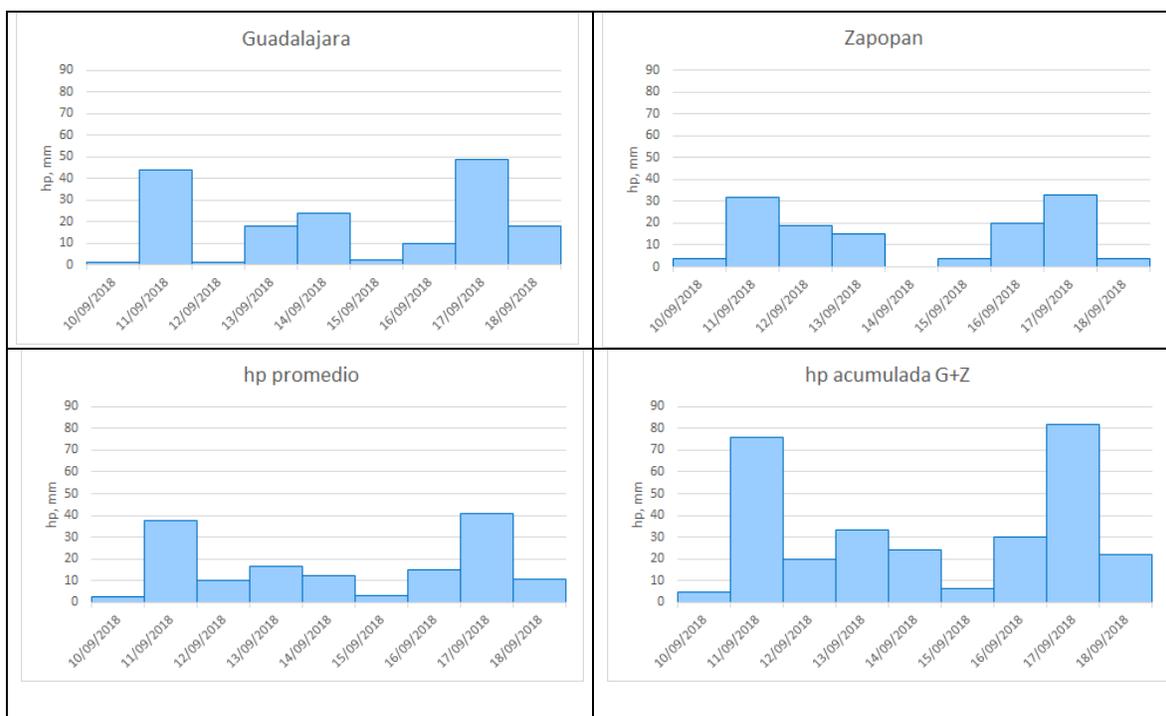
- Inundación del 17 de septiembre de 2018.

A partir de 2018 se identificaron con mayor frecuencia noticias periodísticas sobre inundaciones súbitas; sin embargo, con los datos disponibles no se tienen los hietogramas de los últimos años por lo que no se realizó el modelo de simulación de esta inundación para la fecha del 17 de septiembre de 2018. La Gráfica 11 es el hietograma con la lluvia máxima de 10.4 mm en 10 minutos, esta tormenta acumuló 47.8 mm en 1 hora 20 minutos.

En la Gráfica 12 se presentan los hietogramas considerando las lluvias de las estaciones climatológicas. En la Tabla 6 se presentan los valores.



Gráfica 11. Hietograma del 17 de septiembre de 2018 (intervalo de tiempo a 10 minutos) [Elaboración propia con datos del SMN]



Gráfica 12. Hietogramas de las estaciones climatológicas (intervalos de tiempo de 24 horas) [Elaboración propia con datos del SMN]

Tabla 6. Lluvias analizadas para la inundación del 17 de septiembre de 2018 en la cuenca del río San Juan de Dios [Elaboración propia con datos del SMN].

Estaciones	precipitación acumulada al 17/09/2018 (mm)	
	en 24 horas (Del 16/09 al 17/09)	en 7 días (Del 10/09/ al 17/09)
hp Guadalajara	17.8	147.5
hp Zapopan	33.0	123.0
hp Promedio	40.8	135.3
hp acumulada (G+Z)	81.6	270.5
ESIME Guadalajara	47.8	141.8

DISCUSIÓN CUENCA SAN JUAN DE DIOS

De las simulaciones que se realizaron del 15 de julio al 15 de septiembre de 2009, en el inciso d) la Figura 16 y en la Gráfica 3 se observa la ocurrencia de lluvias con registro de altura de precipitación mayores a las que ocurrieron en la fecha de la inundación del 10 de agosto y que se reportó a través de medios periodísticos. También, se observó que la respuesta de escurrimiento es al menos con un día de retraso después de la ocurrencia de la precipitación, esto significaría que la lluvia caída se desplaza por la cuenca durante aproximadamente un día. Si sólo se observa la gráfica 4 se tiene que la inundación se presentó con un gasto pico de

10.261 m³/s y con una precipitación de 3.5 mm registrada un día antes y 3 mm ese mismo día, este evento se le asocia un Tr de 0.8, lo que significa que es muy probable que el evento se presente cada año, también, se determinó que el índice de infiltración (Φ) es de 0.02 mm/h y esto se puede asociar directamente al uso de suelo urbano. Sin embargo, esta información no es suficiente evidencia para entender la inundación, ya que es necesario conocer las lluvias antecedentes a la misma. En los incisos a, b, c y d, de la Figura 16 se observa la gran variación que existe en la lluvia si sólo se considera una estación climatológica, el promedio de las estaciones o incluso, la acumulada de las estaciones. De la Gráfica 3 y la Tabla 4 se sabe que las lluvias acumuladas en 24 h, 7 y 28 días antes de la inundación son de 3.5, 46.9 y 335.1 mm, respectivamente (ocurrencia de categoría de lluvia, según la clasificación de la SEMAR-SMN, Anexo 3). Esto indica que la inundación súbita del 10 de agosto se presentó después de varias tormentas previas y que ocurrieron desde el 15 de julio; en la nota periodística del Informador se dice que la duración de la lluvia fue de 80 minutos (El Informador, 19/09/2009), sin embargo, esto no fue posible verificar en los registros oficiales disponibles.

De igual forma, para la inundación del 02 de septiembre de 2009, se tiene que el gasto fue de 11.986 m³/s y la inundación súbita ocurrió con lluvias antecedentes de 25.1, 68.1 y 244.8 mm, acumuladas en 24 h, 7 y 28 días, respectivamente (ocurrencia de categoría de lluvias fuertes, según la clasificación de la SEMAR-SMN, Anexo 3). Para la lluvia acumulada de 24.1 mm se asocia un Tr de 10.3, lo que significa que el evento puede ocurrir mínimo 1 vez cada 10 años, en esta tormenta el Φ es de 0.4 mm/h.

Para la inundación del 11 de agosto de 2013 se tienen registros de lluvias cada 6 y 24 horas, a partir de las 06:00 h y hasta las 18:00 h. Considerando las lluvias cada 24 horas, se tiene que la inundación ocurrió con un gasto pico de 292.596 m³/s y una lluvia de 63.6 mm (ocurrencia de categoría de lluvia muy fuerte, según la clasificación de la SEMAR-SMN, Anexo 3). Mientras que considerando el intervalo de 6 horas, se tiene que la inundación ocurrió con un gasto pico de 287.28 m³/s y una lluvia de 15 mm, asociada a un Tr de 1.1 años y Φ de 0 mm/h.

Para la inundación del 17 de septiembre de 2018 no se tiene registro de la magnitud del gasto que la ocasionó, sólo se cuenta con las lluvias cada 6 y 24 horas, siendo de 10.4 mm en 10 min y 81.6 mm en 24 horas (ocurrencia de categoría de lluvia muy fuerte, según la clasificación de la SEMAR-SMN, Anexo 3), respectivamente.

En la Tabla 7 se resumen las intensidades de lluvia que se registraron de acuerdo con los diferentes intervalos de tiempo, así como las profundidades máximas que se obtuvieron con las simulaciones y que coinciden con las que fueron reportadas en las notas periodísticas.

Tabla 7. Intensidades de lluvia para las inundaciones súbitas en el río San Juan de Dios [Elaboración propia con datos del SMN].

fecha	intensidad (mm/h)				gasto (m ³ /s)	profundidad máxima de la inundación (m)		
	6 horas	24 horas	7 días	28 días		centro de la cuenca	en carreteras	zona alta de la cuenca
10/08/2009	-	0.15	0.28	0.50	10.3	3.0	1.5	
02/09/2009		1.05	0.41	0.36	11.9	1.5	1.5	
11/08/2013		2.65			292.6	3.0		0.5
17/09/2018	36.8							

Las inundaciones súbitas de la cuenca del río San Juan de Dios se han presentado al corto tiempo de ocurrencia de lluvia con intensidades de 0.15 a 3.4 mm/h, aun cuando no se hayan tenido precipitaciones precedentes registradas. Lo anterior ha ocurrido en temporada de lluvia, particularmente entre agosto y septiembre, se puede observar que las precipitaciones ocurridas 7 días antes, incluso, 28 días antes tienen influencia en las inundaciones súbitas. El estudio de estas inundaciones es importante para la estimar la bondad de los pronósticos y mayor eficacia en estrategias de respuesta y mitigación ante los problemas que pueden generar.

CAPITULO III.

CUENCA DEL RÍO LA LAJA

Querétaro es uno de los estados más pequeños del país y con más atractivos turísticos, cumple con una gran diversidad ocupaciones económicas en las que destacan la agricultura, la ganadería, la industria y el turismo. En lo que se refiere al municipio de Querétaro, lugar al cual se enfoca esta investigación por la mayor parte de la superficie delimitada por la cuenca del río La Laja, la población municipal es de 1 049 777 habitantes para 2020 (Presidencia Municipal de Querétaro, 2021).

En el municipio de Querétaro el aumento poblacional está directamente relacionado con el nivel de urbanización, esto coloca a la capital como la principal zona metropolitana del estado, sobre la línea de investigación, las inundaciones recurrentes de la ciudad de Querétaro, continúan evolucionando al mismo ritmo al crecimiento de la población, tanto en su zona metropolitana como en sus áreas periurbanas (González, Sosa, 2018)

ANTECEDENTES DE LAS INUNDACIONES

En el artículo de investigación “Propensión de las inundaciones Históricas de los últimos 100 años en Querétaro” (González, Sosa, 2018) se hace mención de la preocupación por el riesgo de sufrir una gran inundación como la ocurrida el 11 de julio de 1912, sobre todo, cuando su análisis estableció un crecimiento de la superficie urbana, de la población y del cambio de uso de suelo para los últimos 50 años. Durante julio de 2012, Querétaro reportó una de las mayores inundaciones en la historia, la cual ocasionó pérdidas y daños por más de dos millones de pesos, teniendo en cuenta que la urbanización en ese año apenas representaba el 3% de la actual.

La ciudad de Querétaro ha sufrido diversos cambios y éstos se acentuaron en las últimas décadas; los daños por inundación han sido más frecuentes, dentro de ellas destaca la de 2003, en la cual se reportaron grandes pérdidas económicas.

En la Tabla 8 se tiene la compilación de las notas periodísticas con mayor impacto como consecuencias de algunas de las inundaciones en el municipio de Querétaro.

Tabla 8. Notas periodísticas sobre inundaciones en el municipio de Querétaro, Querétaro [Elaboración propia con información recopilada de hemerotecas digitales].

Mes	Año	Nota Periodística	Referencia
Septiembre	2001	Inundan las lluvias agro en Querétaro	V lex
Agosto	2003	Deja caos lluvia en Querétaro	V lex
Septiembre	2006	Desalojan a 80 familias en Querétaro	La Jornada
Junio	2013	Inundaciones en Querétaro dejan al menos 830 afectados	La Jornada

A continuación se resumen las notas periodísticas:

- Las lluvias del 3 de septiembre de 2001, provocaron el derramamiento de cuatro bordos, lo que originó que cuando menos cuatro colonias sufrieran inundaciones, que en algunos sitios alcanzaron hasta un metro de altura, las lluvias presentadas en tan solo algunas horas causaron severos daños e inundaciones en zonas agrícolas y colonias residenciales del municipio de Querétaro (Paniagua, F., 04/09/2001).
- La tromba registrada el sábado 23 de agosto de 2003 fue considerada por las autoridades de Protección civil, con la misma intensidad que en 1986 y 1991 al registrarse una precipitación de 80 mm en una hora, lo que colapsó la zona metropolitana con una avenida de 35 m³/s. En solo una hora se afectaron 150 km² de la zona conurbada de Querétaro (Paniagua, F., 24/08/2003).
- Aproximadamente 80 familias de las colonias Las Flores y Las Pirámides, así como de la cabecera municipal de Corregidora, Querétaro, fueron desalojadas la madrugada del 30 de septiembre de 2006, debido a inundaciones hasta de 60 cm de altura, producto de una tormenta. El Ejército aplicó el plan DN-III (Chávez, M., 02/10/2006).
- El 11 de junio de 2013, por lo menos 590 personas y 128 viviendas resultaron afectadas por las lluvias que cayeron en el municipio. En algunas casas el agua alcanzó un nivel de 1.2 m, informó la Unidad Estatal de Protección Civil (Chávez, M., 12/06/2013).

Para esta cuenca se asocia que la ocurrencia de inundaciones es debido a la mayor frecuencia de lluvias en los meses de agosto y septiembre. En junio de 2013 las precipitaciones se debieron a la baja presión atmosférica ante la formación del huracán Cosme que entró por el océano Pacífico, el 23 de junio de 2013 (Blake, E., 10/09/2013). Según las notas periodísticas, la profundidad máxima alcanzó 1.2 m. El principal problema para esta cuenca fueron los desbordamientos de obras hidráulicas de control de avenidas, aunque hubo afectaciones a casas habitación, no hubo reportes de pérdidas humanas.

UBICACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO LA LAJA

La cuenca del río La Laja se ubica entre los municipios de Marqués, Huimilpan, Corregidora y Querétaro, siendo este último el de mayor porcentaje de superficie, el escurrimiento de la cuenca comienza en el punto más alto que corresponde a la curva de nivel de 2 900 m.s.n.m. cerrando en el punto más bajo que es de 1 800 m.s.n.m. La cuenca está ubicada entre las coordenadas (UTM) 328274 y 388218 m Este y 2215173 y 2241682 m Norte.

La cuenca tiene un área de 2 317.81 km² y su punto de salida está en la ubicación de la estación hidrométrica con clave 12718 "Amache". Su afluente principal es el

“Río La Laja” que nace a 27 km al Noreste (NE) de la ciudad de Querétaro, este fluye con una longitud de 75 km en dirección Sur (S)- Noroeste (NO). El río ha escurrido con un caudal hasta de 89 m³/s, que en condiciones ordinarias no representa un riesgo para desbordarse, pero éstas pueden cambiar con las intensas lluvias en la región. Es un tributario del río Apaseo el Grande que a su vez es tributario del río Santiago.

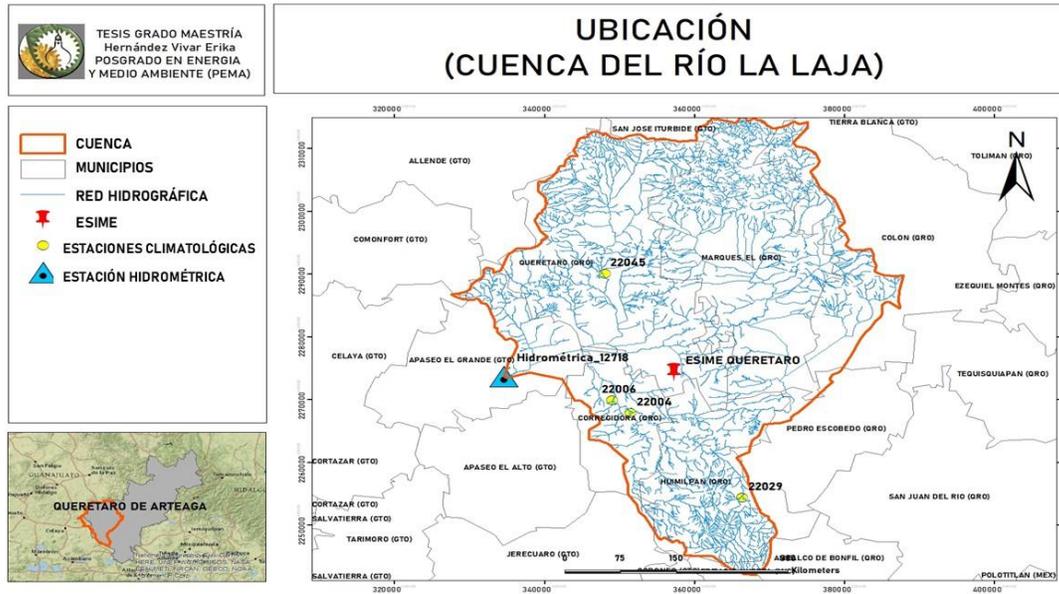


Figura 20. Cuenca del río La Laja, ubicada en el estado de Querétaro (Elaboración propia).

Las estaciones usadas para el análisis en la cuenca del río La Laja son (Figura 20): estaciones climatológicas con clave 22029 “Huimilpan”, 22006 “El Pueblito”, 22045 “Juriquilla” y 22004 “El Batán”; la ESIME “Querétaro” y la estación Hidrométrica 12718 “Amache”.

EDAFOLOGÍA DE LA CUENCA DEL RÍO LA LAJA

La cuenca del río La Laja se compone por vertisol que es un suelo seco de una consistencia dura, la filtración del agua en los vertisoles secos (agrietados), con una superficie estructurada es rápida; sin embargo, una vez que la superficie se humedece y las grietas se cierran, la infiltración es casi nula y hace que el agua escurra con mayor facilidad. También, pero en menor porcentaje, la cuenca tiene litosol y feozem, estos suelos principalmente contienen alto contenido orgánico de material calcáreo que libera gran cantidad de sedimentos.

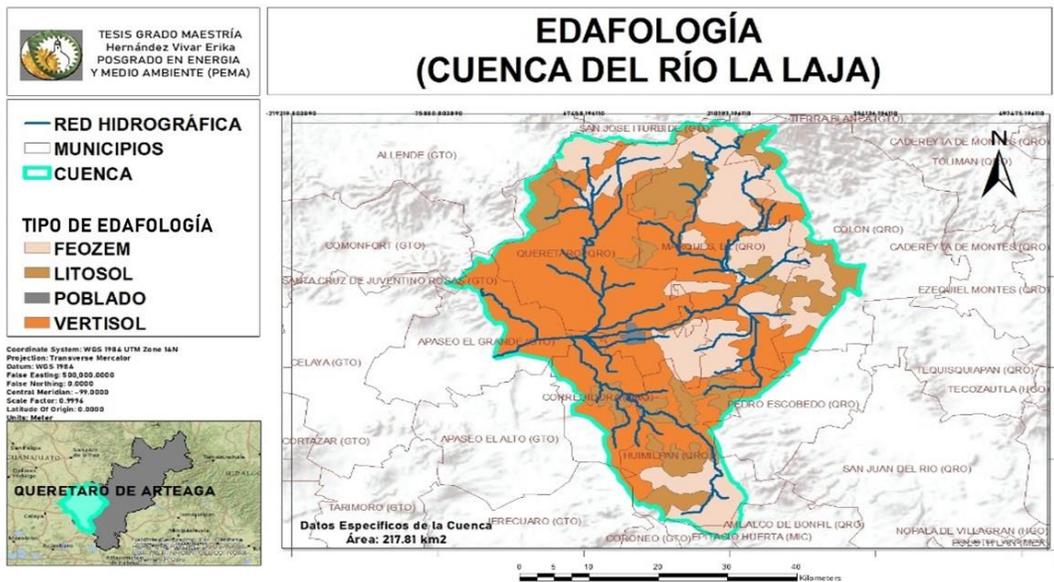


Figura 21. Composición edafológica en el área de la cuenca del río La Laja. (Elaboración propia con información de CONABIO 2021)

USO DE SUELO Y VEGETACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO LA LAJA

El uso de suelo y la vegetación que predomina en la cuenca del río La Laja está distribuida con mayor porcentaje de área cubierta por uso para agricultura. La cuenca se caracteriza por producir diferentes productos agrícolas en los que destacan: maíz, frijol, sorgo, cebada y alfalfa. Estos productos se producen en terrenos que para su riego se utiliza el método de inundación, razón por la cual estas superficies son planas casi en su totalidad. También la cuenca cuenta con áreas de pastizales, bosques y selvas, lo que detona una diversificación de orografía y clima, en lo que destacan grandes lomeríos, sierras y llanuras que presentan colinas redondeadas y 3 principales climas que son subhúmedo, semicálido y templado.

En la última década se registró el 30.9% de aumento poblacional humano, lo cual ha modificado la distribución demográfica (CONAPO, 2022).

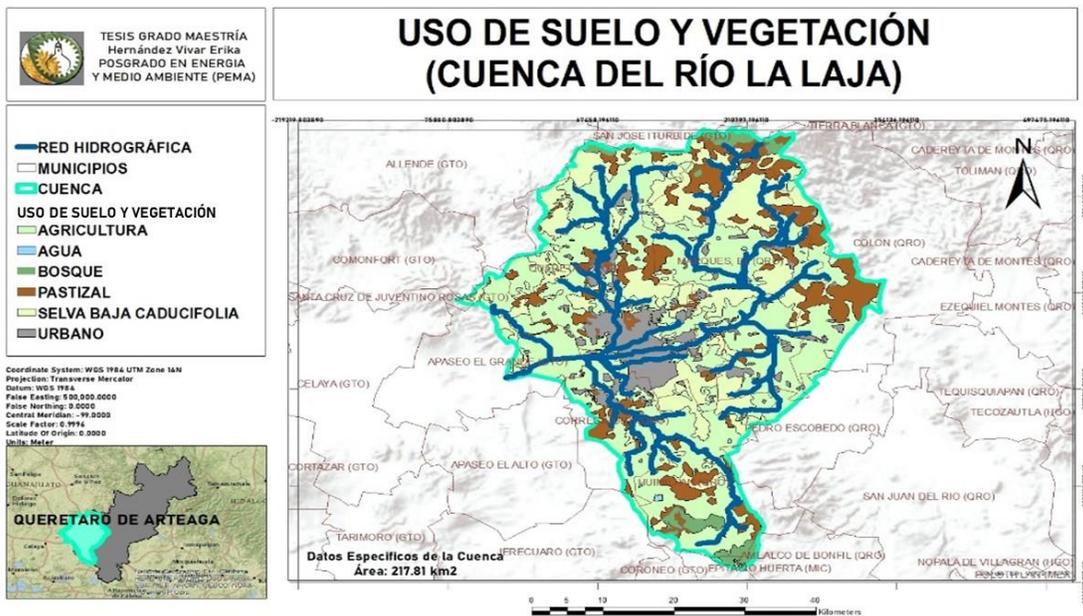


Figura 22. Composición del Uso de Suelo y Vegetación de la cuenca del río La Laja. (Elaboración propia con información de CONABIO 2021).

El coeficiente de rugosidad de la cuenca del río La Laja es de 0.035 en el lecho y las ambas márgenes (izquierda y derecha). Esto de acuerdo al tipo de cauce y la Tabla A. 1 del Anexo 1.

HIDROLOGÍA DE LA CUENCA DEL RÍO LA LAJA

En la superficie de la cuenca del río La Laja existen dos tipos de escurrimientos que lo abastecen:

- Escurrimiento natural de la cuenca: Tiene características que eventualmente desembocan en el punto de salida que corresponde a la ubicación de la estación hidrométrica “Amache”.
- Escurrimiento de canal: Son canales artificiales que son construidos para el sistema de riego para las áreas agrícolas que tiene la cuenca.

La cuenca del río La Laja está distribuida por dos zonas altas con una altitud máxima de 2 980 m.s.n.m., es en ese punto donde comienza el escurrimiento distribuido en forma radial, desplazándose hacia la parte central de la cuenca, en donde está ubicado la mayor parte del uso urbano. Posteriormente toma dirección al suroeste (SO) para desembocar a la salida planteada para esta investigación. El punto más bajo de la cuenca está en 1 765 m.s.n.m.

La cuenca La Laja tiene una cobertura superficial mayormente de zona baja de acuerdo a la topografía, en ella se tiene la siguiente distribución espacial por zonas de la lluvia media anual, Tabla 9.

Tabla 9. Distribución de la lluvia promedio anual por zonas de la cuenca del río La Laja [Elaboración propia con información de SMN].

Zona de la Cuenca	Lluvia promedio anual, mm
Alta	65.2
Baja	49.4

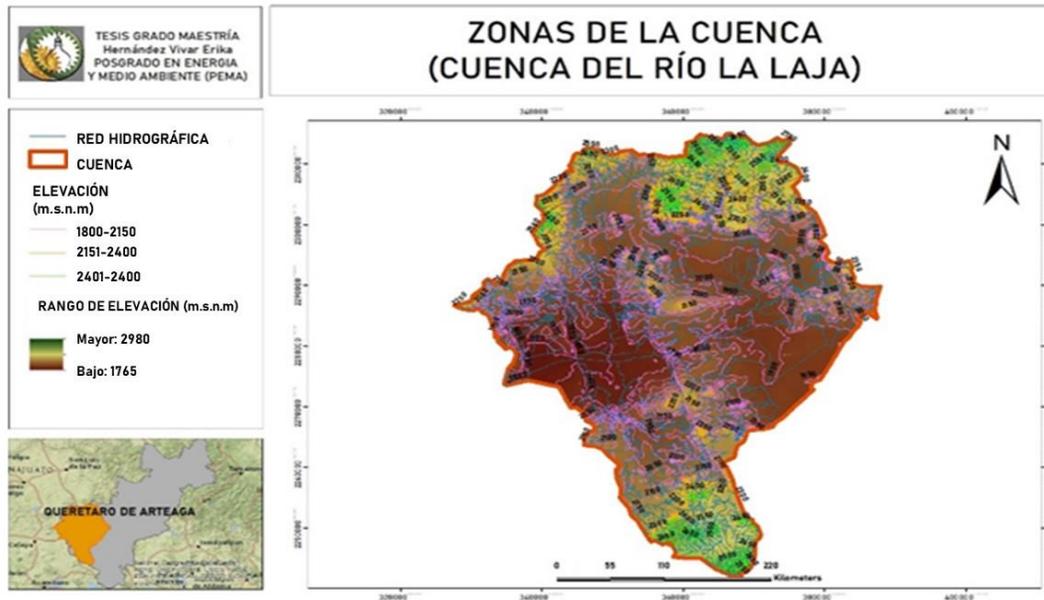


Figura 23. Zonas de la cuenca del río La Laja (Elaboración Propia)

El procesamiento del modelo hidrológico con el SIG Physitel se muestra en la Figura 24, donde:

- Inciso A): *Geoprocessing Fill*
- Inciso B): Unidades Hidrológicas (UH)
- Inciso C): *Flow Accumulation*
- Inciso D): Cambio de pendiente
- Inciso E): *Flow Direction*

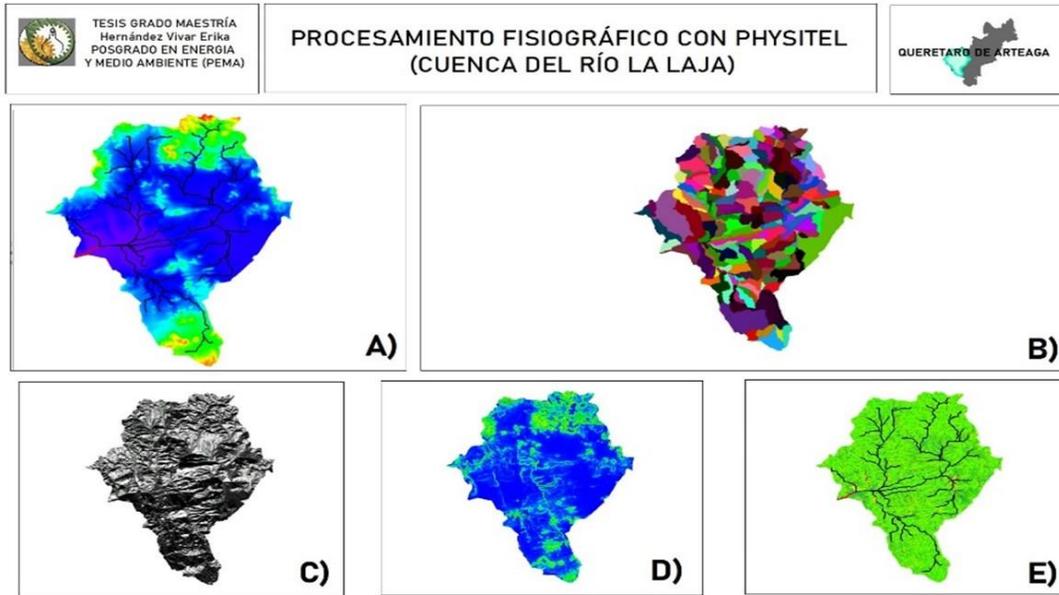


Figura 24. Procesamiento del modelo hidrológico de la cuenca del río La Laja con Physitel.

El procesamiento del modelo hidrológico con el SIG ArcMap se muestra en la Figura 25, donde:

- Inciso A): *Geoprocessing Fill*
- Inciso B): Unidades Hidrológicas (UH)
- Inciso C): *Flow Accumulation*
- Inciso D): Cambio de pendiente
- Inciso E): *Flow Direction*

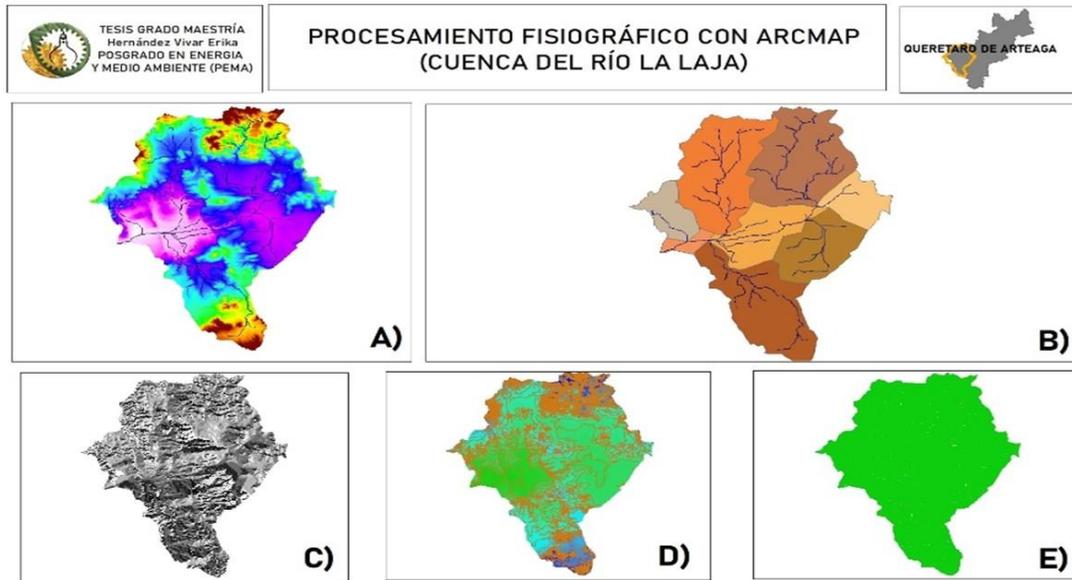


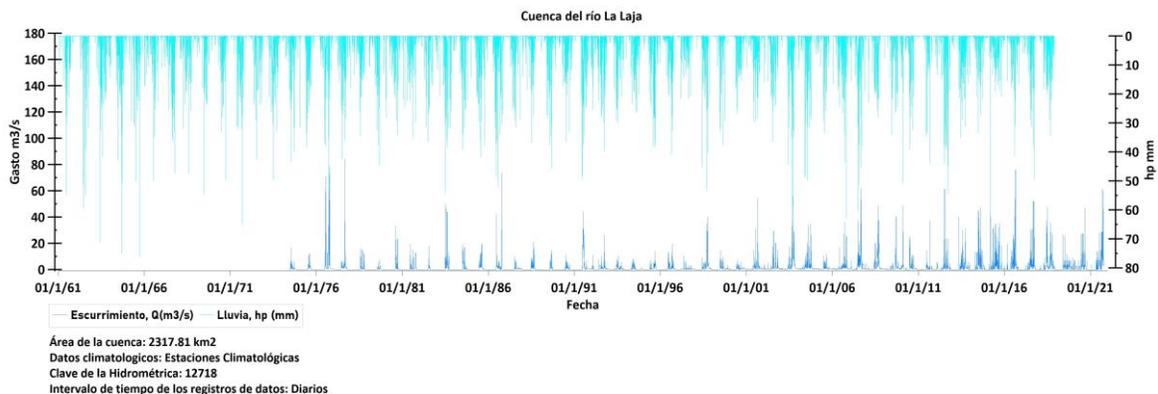
Figura 25. Procesamiento del modelo hidrológico para la cuenca del río La Laja con ArcMap.

RESULTADOS

LLUVIA, ESCURRIMIENTO Y SIMULACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO LA LAJA

De la estación 12718 “Amache” se analizaron datos a cada 24 horas (intervalo diario) de la fecha del 01 de mayo de 1974 al 19 de octubre de 2021; para los datos horarios, el intervalo de tiempo entre cada dato varía, algunos son de cada 4 o 6 horas y están registrados desde el 01 de julio de 1974 al 08 de julio de 2014.

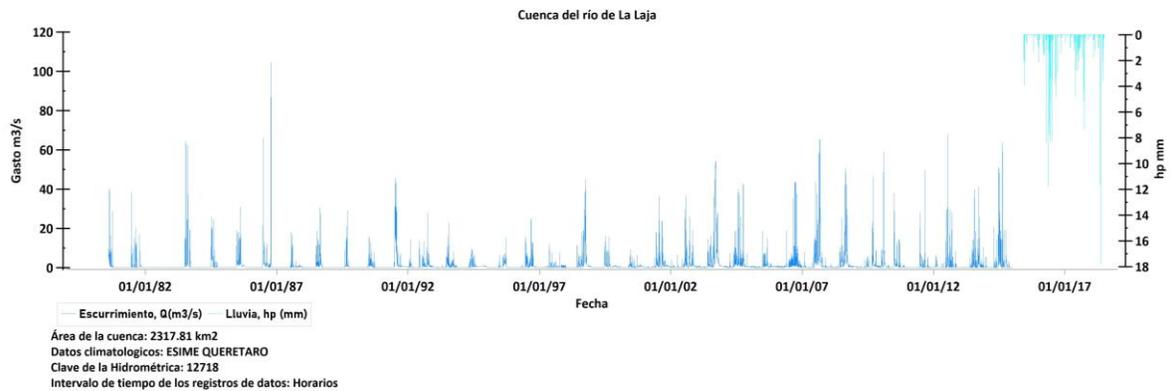
Con las estaciones climatológicas locales 22029, 22006, 22045 y 22004, se determinó la lluvia de la cuenca del 01 de enero de 1961 al 31 de noviembre de 2018 y para el intervalo de tiempo de 24 horas.



Gráfica 13. Serie Lluvia-Escurrecimiento de la cuenca del río La Laja. La altura de precipitación (hp) en unidades de milímetros y el caudal (Q) en metros cúbicos por segundo [Elaboración propia con datos del SMN y del BANDAS].

En la Gráfica 13 se representa la lluvia y el escurrimiento en el periodo del 01 de enero de 1961 al 19 de octubre de 2021. Se observa que la altura de precipitación máxima está directamente relacionada con el tiempo de ocurrencia del escurrimiento, es decir, los picos de altura de precipitación coinciden con los picos de escurrimiento.

El periodo de datos de altura de precipitación de la ESIME Querétaro es del 26 de mayo del 2015 al 30 de junio de 2018.



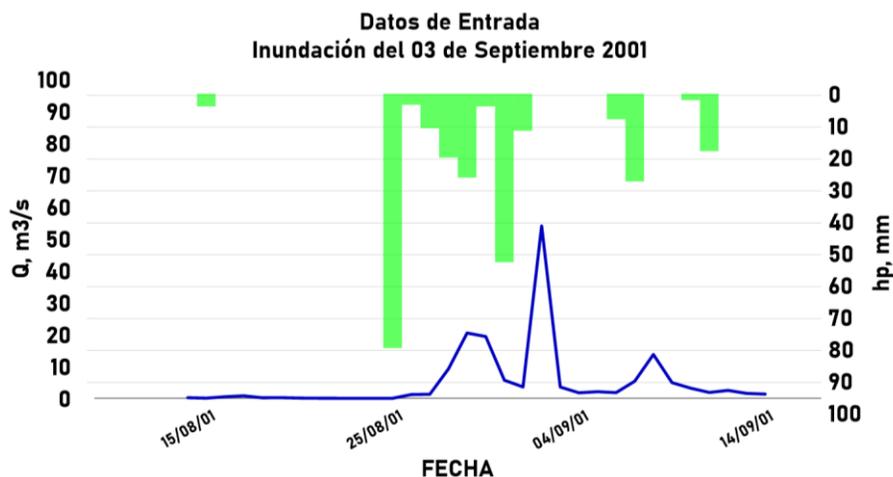
Gráfica 14. Lluvia-Escurrecimiento para el intervalo de tiempo horario en la cuenca del río La Laja. La altura de precipitación (hp) en unidades de milímetros y el caudal (Q) en metros cúbicos por segundo [Elaboración propia con datos del SMN y del BANDAS].

En la Gráfica 14 se observa que las fechas de los datos históricos horarios en la cuenca del río La Laja no coinciden con las de los datos de caudal.

A continuación se presentan los gráficos de los eventos que ocurrieron durante las inundaciones súbitas reportadas, siendo los datos de entrada para la simulación que permitirá determinar la mancha de inundación, posteriormente se discutirá al respecto.

Inundación del 03 de Septiembre de 2001

Para poder validar las simulaciones de la cuenca del río La Laja, se realizaron con el intervalo de tiempo diario. Los datos de entrada para el modelo de simulación son del 15 de agosto al 15 de septiembre de 2001, periodo en donde se presenta la inundación registrada para el día del 03 de septiembre.

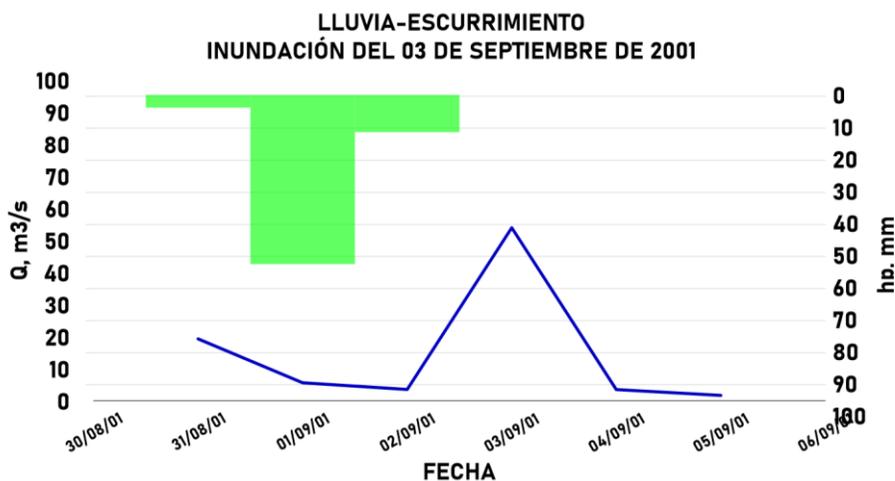


Gráfica 15. Datos de entrada de Lluvia-Escurrecimiento para la simulación (Intervalo de tiempo a 24 horas) [Elaboración propia con datos del SMN y del BANDAS].

En la Gráfica 16 de Lluvia-Escurrecimiento se observa que la lluvia máxima se presentó durante el 31 de agosto y en las primeras horas del 01 de septiembre, acumulando un total de 52.8 mm. También se muestra un efecto de retraso en el escurrecimiento, ya que el hidrograma tiene el pico máximo de 54 m³/s el 03 de septiembre.

La lluvia durante el 02 y la madrugada del 03 de diciembre fue de 11.6 mm la cual se asocia a un periodo de retorno (Tr) de 0.07 años; para esta tormenta el índice de infiltración (Φ) es de 2.08 mm/h.

Sin embargo, la tormenta que ocasionó la inundación duró 8 días, del 24 de agosto al 02 de septiembre con una lluvia total de 106.1 mm.



Gráfica 16. Lluvia-Escurrecimiento del 31 de agosto al 05 de septiembre del 2001 (intervalos de tiempo a 24 horas) [Elaboración propia con datos del SMN y del BANDAS].

De la simulación se tiene que el 03 de septiembre de 2001 a las 21:00 horas la presencia de la lluvia generó inundaciones de hasta 1.6 m de profundidad en zonas

de planicie, sobre todo en terrenos que son destinados para aprovechamiento agrícola al Oeste (O) de la cuenca. El área industrial Benito Juárez alcanzó una profundidad de 0.5 m y las zonas con grandes taludes “El Limonar” y “Buganblias” al este de la cuenca con profundidades de hasta 1.3 m, como se muestra en la Figura 26.

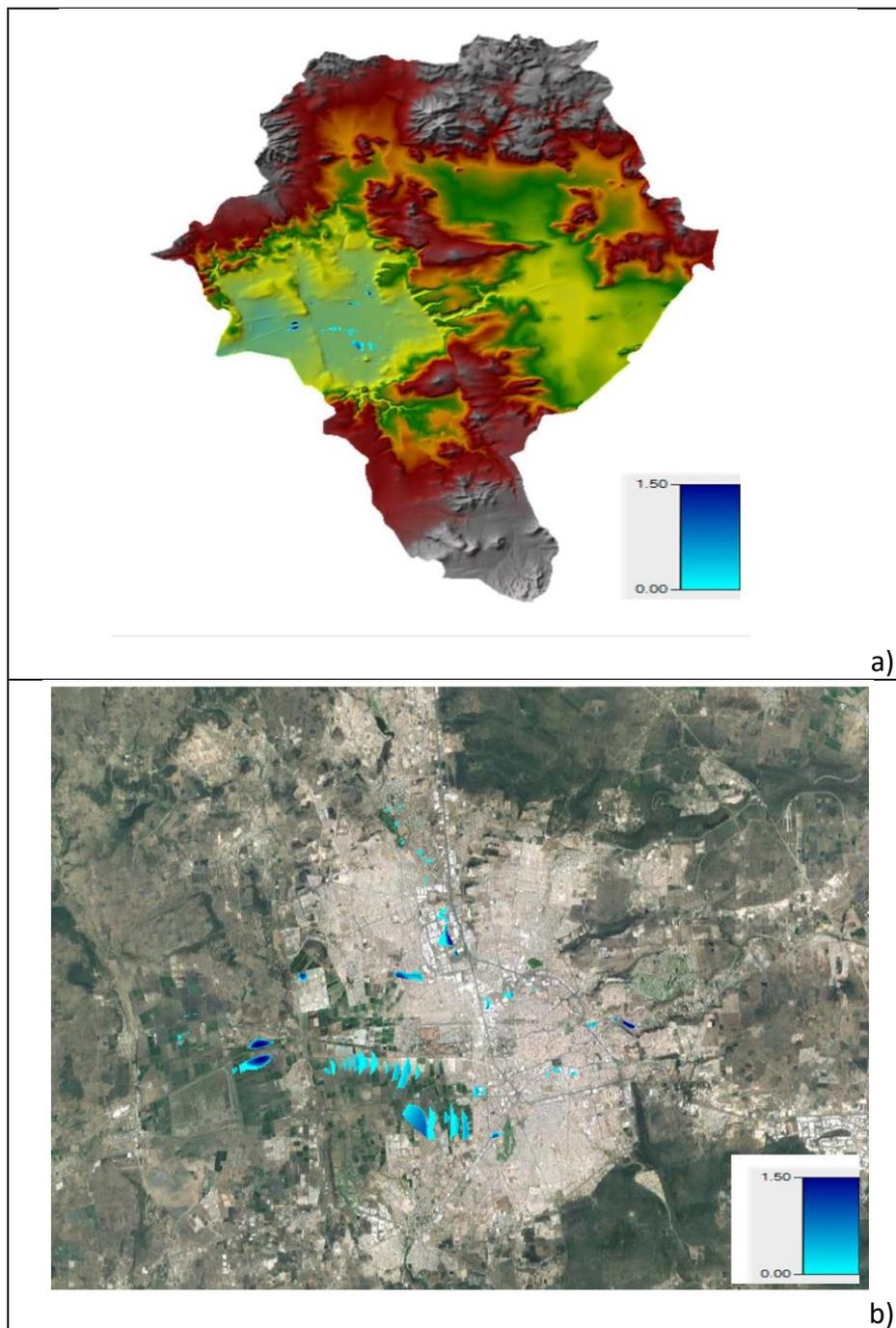
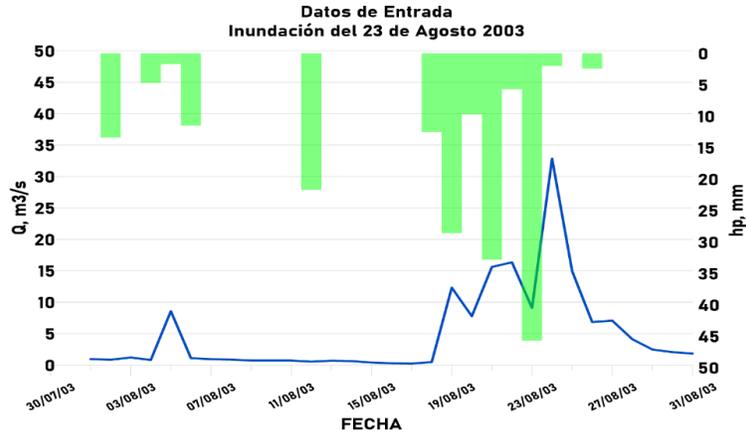


Figura 26. Mancha de inundación que se generó el 03 de septiembre del 2001 a las 21:00 horas. Inciso a) representa la mancha de inundación en la cuenca, la escala de profundidad está en metros; b) representa la dispersión de la mancha de inundación con visualización satelital. En ambas figuras la profundidad de inundación está en metros

Inundación del 23 de Agosto de 2003

Los datos de entrada para el modelo de la simulación son del 01 al 31 de agosto de 2003, periodo en donde se presenta la inundación registrada para la fecha del día 23.

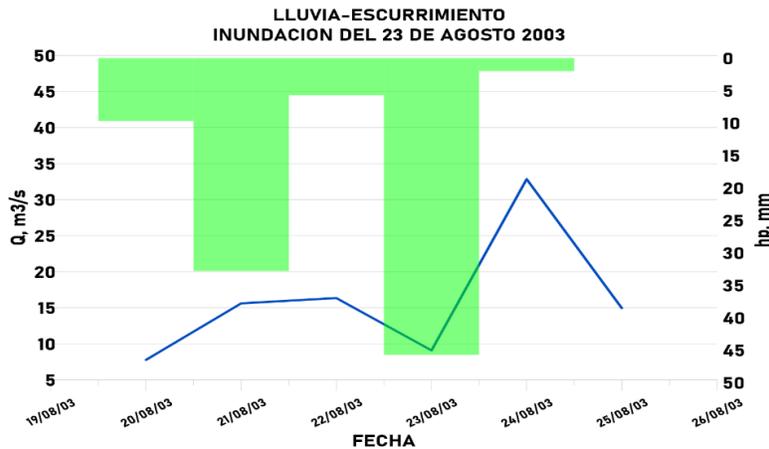


Gráfica 17. Datos de entrada de Lluvia-Escorrentamiento para la simulación (Intervalo de tiempo a 24 horas). [Elaboración propia con datos del SMN y del BANDAS].

La Gráfica 18 representa Lluvia-Escorrentamiento, se observa que la lluvia máxima se presentó durante el 22 y la madrugada del 23 de agosto de 2003, acumulando un total de 47.7 mm, después de un día el escurrimento incrementó un pico de 32.80 m³/s.

Para la lluvia acumulada de 47.7 mm se asocia el Tr de 1.3 años, en esta tormenta el Φ es de 1.8 mm/h.

La tormenta que ocasionó la inundación duró 7 días, del 18 al 24 de agosto con una lluvia total de 118.1 mm.



Gráfica 18. Lluvia-Escorrentamiento del 20 al 25 de agosto del 2003 (intervalo de tiempo de 24 horas). [Elaboración propia con datos del SMN y del BANDAS].

El día 23 de agosto de 2003 a las 18:00 horas se generó una inundación alcanzando profundidades de 0.8 m que afectaron a la localidad El Pueblito que se encuentra al sur de la cuenca, también se presentó la mayor parte de zonas inundadas en la parte baja de la cuenca alcanzando profundidades de 2.1 m (Figura 27).

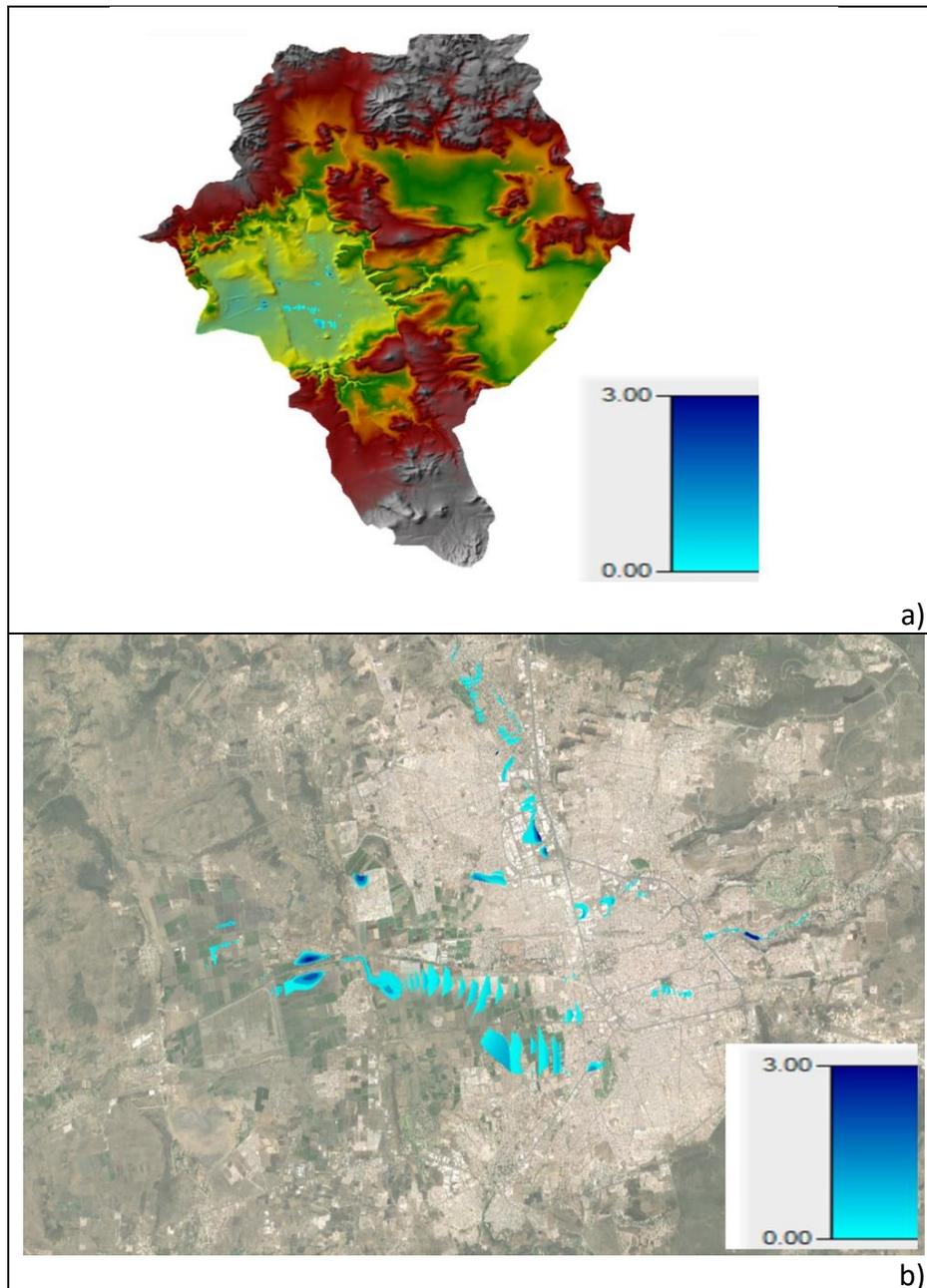
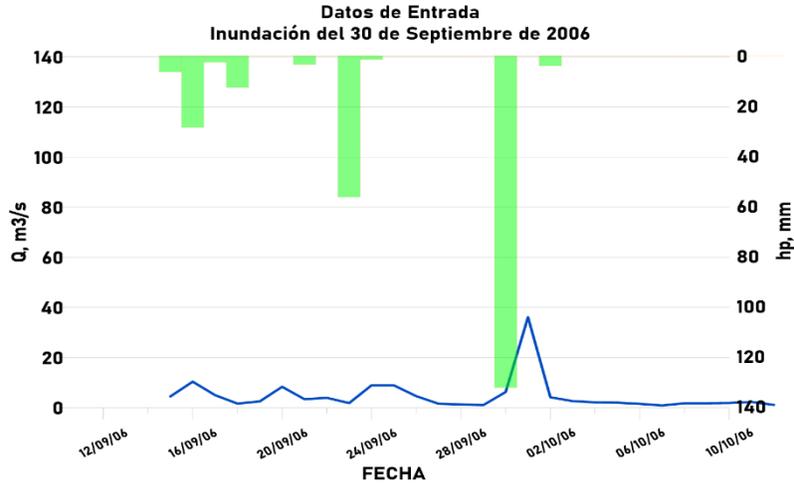


Figura 27. Mancha de inundación que se generó el 23 de agosto de 2003 a las 18:00 horas. Inciso a) representa la mancha de inundación en la cuenca, la escala de profundidad está en metros; b) representa la dispersión de la mancha de inundación con visualización satelital. En ambas figuras la profundidad de inundación está en metros.

Inundación del 30 de Septiembre de 2006

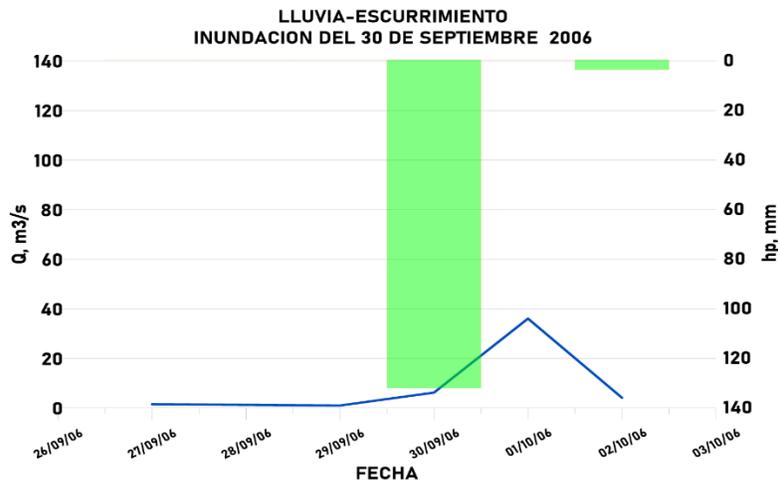
La simulación se realizó con los datos de entrada del periodo de información del 15 de septiembre al 10 de octubre de 2006.



Gráfica 19. Datos de entrada de Lluvia-Escorrimento para la simulación. Intervalo de tiempo diario (intervalos de tiempo de 24 horas) [Elaboración propia con datos del SMN y del BANDAS].

De la Gráfica 20 de Lluvia-Escorrimento se tiene que la lluvia máxima se presentó durante el día del 29 y madrugada del 30 de septiembre acumulando 132 mm, provocando que el gasto pico se presentara un día después con un valor de 36 m³/s.

En este evento se asocia un periodo de retorno de 1136 años para la precipitación acumulada de 132 mm y el índice de infiltración es de 5.3 mm/h.



Gráfica 20. Lluvia-Escorrimento del 27 de septiembre al 02 de octubre del 2006 (intervalos de tiempo de 24 horas). [Elaboración propia con datos del SMN y del BANDAS].

El día 30 de septiembre de 2006 a las 17:00 h, la mancha de inundación que se muestra en la Figura 28 alcanzó profundidades de 0.3 a 0.6 m, donde las mayores afectaciones fueron en la localidad “El Pueblito” y “Querétaro de Santiago”.

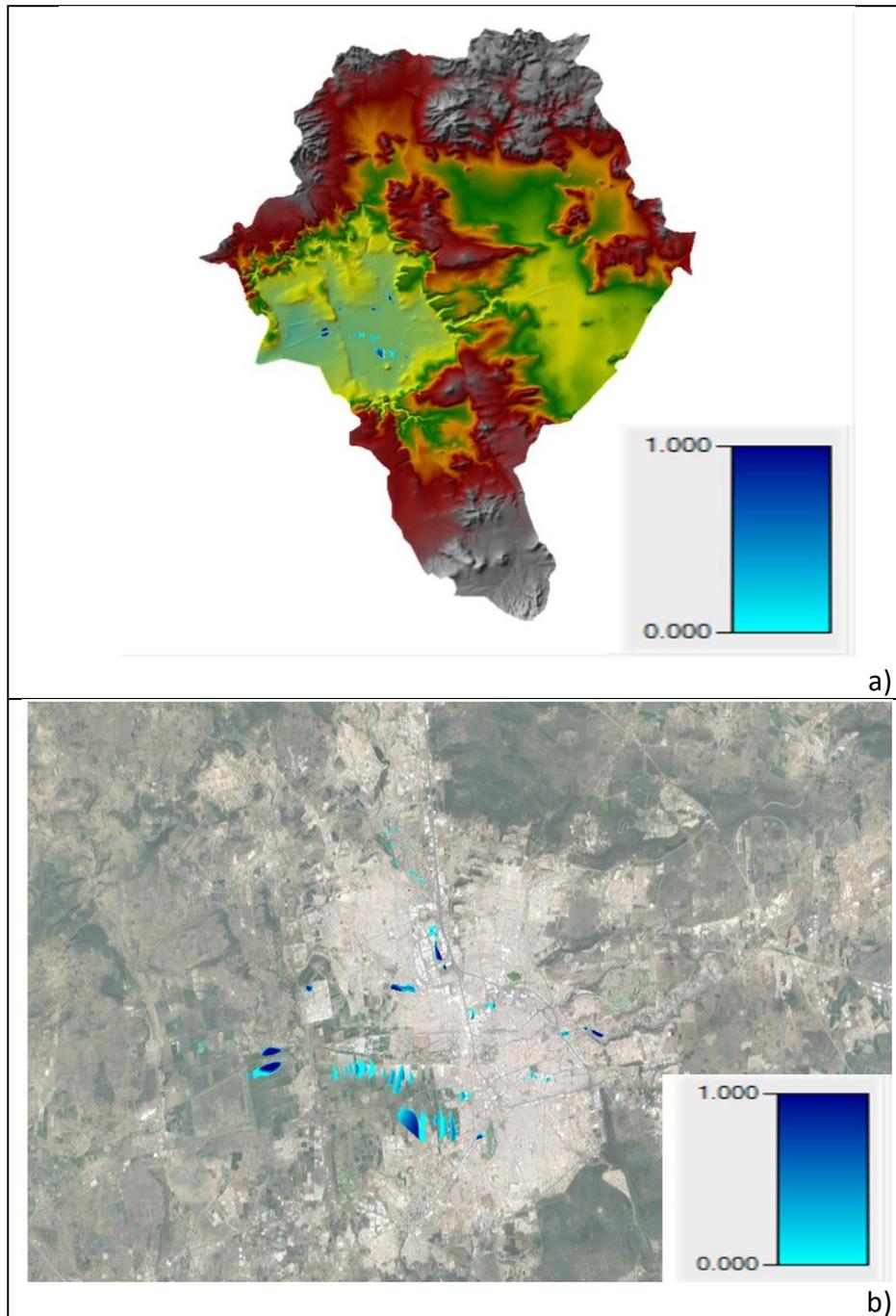
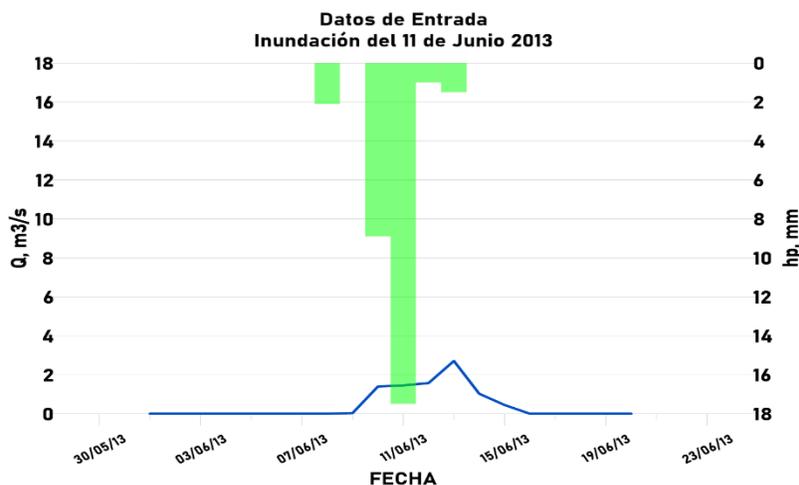


Figura 28. Mancha de inundación que se generó el 30 de septiembre de 2006 a las 17:00 horas. Inciso a) representa la mancha de inundación en la cuenca, la escala de profundidad está en metros; b) representa la dispersión de la mancha de inundación con visualización satelital. En ambas figuras la profundidad de inundación está en metros.

Inundación del 11 de Junio de 2013

Para esta fecha la simulación no se realizó, ya que en los datos de gasto del 01 al 20 de junio de 2013, se encontró un valor nulo en las ramas ascendente y descendente del hidrograma, así que el modelo no alcanza a procesar y calibrar con esta información para generar la mancha inundable.



Gráfica 21. Datos de entrada de Lluvia-Escorrentamiento para la simulación (intervalos de tiempo de 24 horas). [Elaboración propia con datos del SMN y del BANDAS].

En la Gráfica 22 se observa que la lluvia máxima se presentó durante el 10 y madrugada del 11 de junio, 17.5 mm, provocó que el gasto pico se presentara un día después alcanzando un pico de 2.71 m³/s. Sin embargo, la tormenta que se presentó previamente a la inundación duró 4 días, del 10 al 13 de junio con una lluvia total de 29.4 mm.

La lluvia acumulada de 17.5 mm está asociada a un Tr de 0.1 años, para esta tormenta se tiene el Φ de 0.7 mm/h.

En la Tabla 10 se resumen las intensidades de lluvia que se presentaron durante las inundaciones.

Tabla 10. Intensidades de lluvia para las inundaciones del río La Laja [Elaboración propia con datos del SMN].

Fecha	intensidad (mm/h)		gasto (m ³ /s)	profundidad máxima de la inundación(m)		
	24 horas	duración de la tormenta (4-8 días)		en planicie	área industrial	zonas con grandes taludes
03/09/2001	2.2	0.8	54.0	1.6	0.5	1.3
23/08/2003	2.0	0.8	32.8	2.1	0.8	-
30/09/2006	5.5	-	36.0	-	0.6	-
11/06/2013	0.7	0.3	2.7	-	-	-



Gráfica 22. Lluvia-Escorrimento del 01 al 20 de junio de 2013 (intervalo de tiempo de 24 horas). [Elaboración propia con datos del SMN y del BANDAS].

DISCUSIÓN CUENCA LA LAJA

Las inundaciones analizadas en la cuenca del río La Laja, sólo se pudieron simular para el intervalo de tiempo diario. Esto no permite analizar a detalle las intensidades de lluvia que ocasionaron las inundaciones súbitas. En general, la información y resultados de la inundación coinciden con los datos de las notas periodísticas. Sin embargo, las horas reportadas de mayor precipitación no son lo suficientemente confiables. Existe la posibilidad de lluvias intensas que impactaron sobre la superficie total de la cuenca y que provocaron las inundaciones. Del análisis de los hidrogramas se tiene que existe un período de retraso en la respuesta del escurrimiento, presentándose los gastos picos entre 1 y dos días después de las lluvias máximas en 24 horas.

Los eventos de análisis muestran que los periodos de retorno son entre 0.07 y 1.3 para eventos que prácticamente se presentan al menos una vez cada año, además se presentó el evento de 30 de septiembre de 2006 con un T_r de 1136 lo que significa que es un evento extraordinario. Para el caso de los índices de infiltración, esta cuenca en promedio infiltra 2.4 mm por cada hora, lo que se debe al uso de suelo para agricultura.

Se destaca que para la inundación del 30 de septiembre de 2006, en relación con las otras inundaciones analizadas, se tuvo una precipitación bastante alta (132 mm acumulados en un período de 24 horas, ocurrencia de categoría de lluvia intensa, según la clasificación de la SEMAR-SMN, Anexo 3), que no tuvo un alto impacto en el escurrimiento hasta la salida de la cuenca. Esto sugiere que la intensidad de esta tormenta no es uniforme sobre toda la superficie de la cuenca.

Otro punto importante es que, las áreas inundadas con mayor intensidad son las que están destinadas para uso agrícola, producción de hortalizas y otros cultivos, además de que el tipo de suelo favorece la retención del agua.

CAPITULO IV.

CUENCA DEL RÍO TEJALPA

El municipio Zinacantepec se encuentra ubicado mayormente en la cuenca del río Tejalpa, en la cual se localizan principales áreas urbanas que son vulnerables ante las inundaciones provocadas por el desbordamiento del río Tejalpa.

La ubicación del municipio lo convierte en un lugar de oportunidad para impulsar las actividades económicas, cruza dos importantes vías de comunicación hacia los estados de Michoacán y Guerrero. De acuerdo con la CONAPO (2022) la población total de Zinacantepec en 2020 fue de 203 872 habitantes, este municipio ha tenido un crecimiento urbano notorio a partir de 2015 (Data México, 2022).

ANTECEDENTES DE LAS INUNDACIONES CUENCA TEJALPA

En el Atlas de Riesgo del Municipio de Zinacantepec son mencionadas las inundaciones ocurridas el 19 de junio de 2013 en las cuales fueron afectadas más de 36 viviendas, además de afectaciones en los terrenos de cultivo. Adicionalmente a las lluvias que provocaron las inundaciones se localizan diversas zonas susceptibles de afectaciones por fenómenos de deslizamientos de tierra (SEDATU, 2013).

Para 2020 y 2021, las inundaciones han ocasionado problemas en casas habitación con considerables pérdidas económicas.

En la siguiente tabla se tiene la compilación de las notas periodísticas con mayor impacto de inundaciones en el municipio de Zinacantepec.

Tabla 11. Notas periodísticas sobre inundaciones en el municipio de Zinacantepec, Estado de México [Elaboración propia con información recopilada de hemerotecas digitales].

Mes	Año	Nota Periodística	Referencia
Junio	2013	Riesgo por inundación en el municipio de Zinacantepec, México	Atlas de Riesgo (SEDATU, 2013).
Julio	2017	Y otra vez San Mateo Atenco	V lex
Septiembre	2018	Granizada causa inundación en Zinacantepec	El Sol de Toluca

A continuación, se resumen las notas periodísticas:

- La lluvia que se registró en el Valle de Toluca el 9 de Junio dejó nuevamente inundaciones, arrastre de agua en los municipios de Toluca, Metepec y Zinacantepec. El nivel de inundación impidió a peatones y automovilistas transitar por la calle principal de acceso al Municipio. Alrededor de las 18:00 h, personal del Grupo Tláloc inició trabajos de limpieza.

- 10 de julio de 2017. La lluvia que se registró en el Valle de Toluca dejó nuevamente inundaciones debido al arrastre que tiene el agua de los municipios de Toluca, Metepec y Zinacantepec.
- 02 de septiembre de 2018. El nivel de agua alcanzó hasta los 60 centímetros en la vialidad Adolfo López Mateos, su máximo a las 15:30 h, afectando a peatones, automovilistas y comercios.

Para esta cuenca se asocia que la ocurrencia de inundaciones es debido a la mayor frecuencia de lluvias en temporada, sobre todo en junio, julio y agosto. El reporte de las notas periodísticas menciona enfáticamente pérdidas materiales en casa habitación.

UBICACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO TEJALPA

La cuenca del río Tejalpa se ubica en el municipio Zinacantepec en el Estado de México, el escurrimiento de la cuenca comienza en el punto más alto que corresponde a la curva de nivel de 3 700 m.s.n.m. cerrando en el punto más bajo que es de 2 460 m.s.n.m. La cuenca está ubicada entre las coordenadas (UTM) 408017 y 428681 m Este y 2114533 y 2138849 m Norte.

La cuenca tiene un área de 217.42 km² y su punto de salida está en la ubicación de la estación hidrométrica con clave 12543 "Calixtlahuaca". Su afluente principal es el "Río Tejalpa" que nace a 13 km al suroeste (SO) del municipio de Zinacantepec, este fluye con una longitud de 25 km en dirección noroeste (NE)- suroeste (SE). El río ha escurrido un caudal hasta de 143 m³/s de acuerdo a la información de los registros diarios de la estación hidrométrica, en condiciones ordinarias no representa riesgo de desbordarse. Las condiciones cambian ante la ocurrencia de intensas lluvias, el río Tejalpa es un tributario del río Lerma.

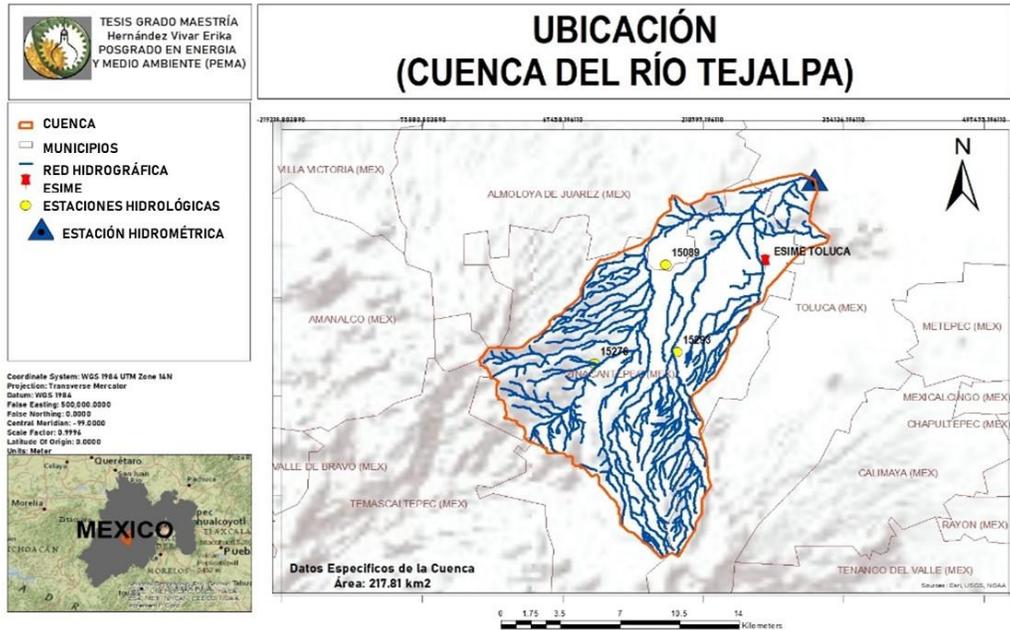


Figura 29. Cuenca del río Tejalpa, ubicada en el Estado de México. (Elaboración propia).

Las estaciones utilizadas para el análisis en la cuenca del río Tejalpa son (Figura 29) las estaciones climatológicas con clave 15089 “San Francisco Tlalcalalcalpan”, 15276 “San José del Contadero” y 15293 “San Juan de los Huertos”; la ESIME “Toluca” y la estación hidrométrica 12543 “Calixtlahuaca”.

EDAFOLOGÍA DE LA CUENCA DEL TEJALPA

La cuenca del río Tejalpa se compone por andosol en la parte alta de la cuenca, este suelo está desarrollado sobre materiales piroclásticos depositados por erupciones volcánicas y feozem (suelos con alto contenido orgánico de material calcáreo) depositado en las partes media y baja de la cuenca.

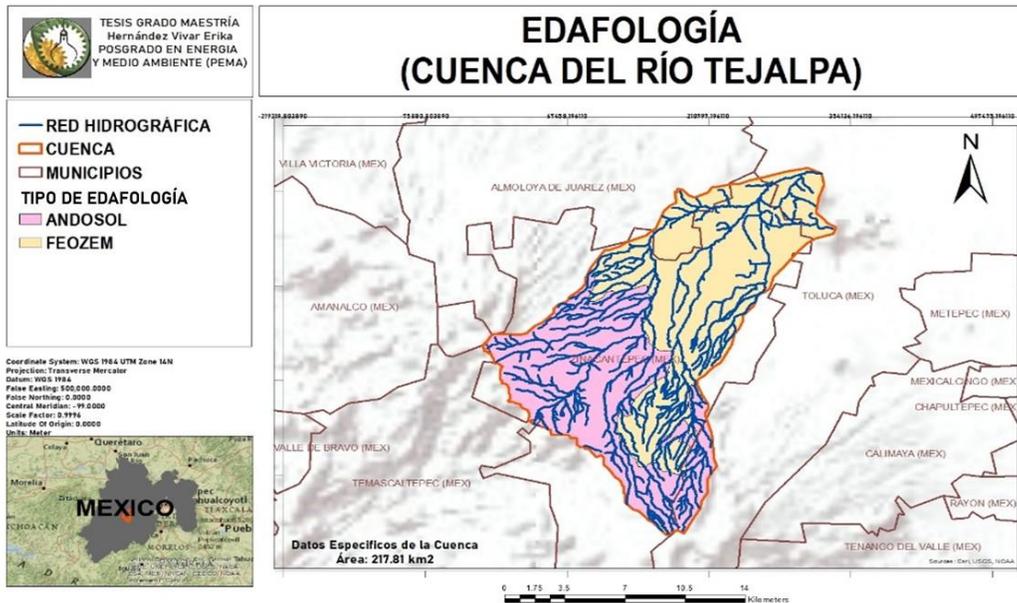


Figura 30. Composición edafológica en el área de la cuenca del río Tejalpa. (Elaboración propia con información de CONABIO 2021)

USO DE SUELO Y VEGETACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO TEJALPA

El uso de suelo y la vegetación que predomina en la cuenca del río Tejalpa está distribuida con mayor porcentaje para la agricultura, siendo la producción de maíz la de mayor importancia; en la parte alta al sureste (SE) de la cuenca se encuentra el área de bosque. Es importante señalar que en la parte baja se encuentra la extensión de la mancha de uso urbano.

En el 2020, la población en Zinacantepec fue de 203 872 habitantes, en comparación a 2010, la población creció un 22% (CONAPO, 2022).

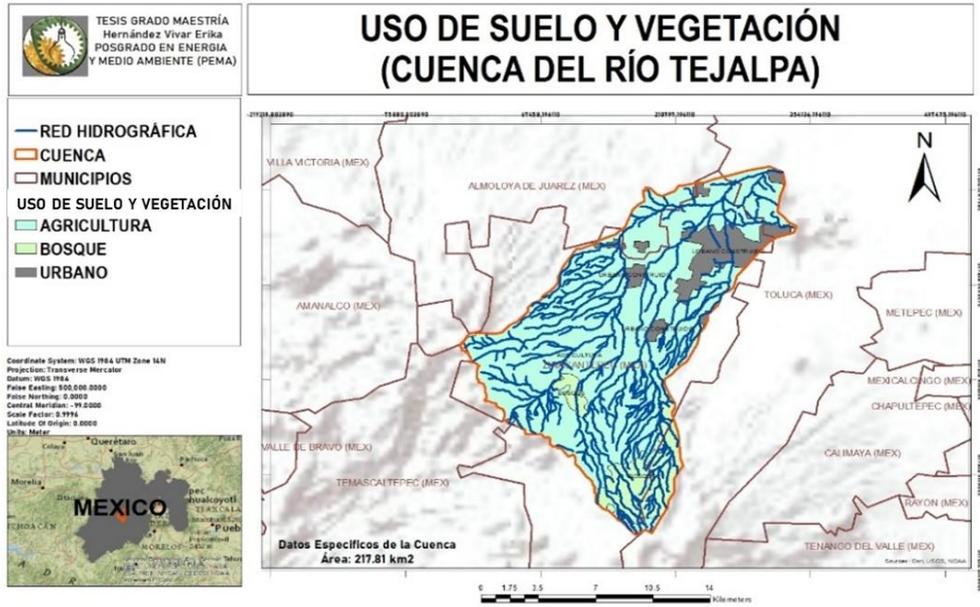


Figura 31. Composición del uso de suelo y vegetación de la cuenca del río Tejalpa. (Elaboración propia con información de CONABIO 2021).

El coeficiente de rugosidad de la cuenca del río Tejalpa es de 0.03 en la parte alta, la parte baja tiene un coeficiente de rugosidad de 0.20, esto de acuerdo al tipo de cauce y la Tabla A. 1 del Anexo 1.

HIDROLOGÍA DE LA CUENCA DEL RÍO TEJALPA

El escurrimiento de la cuenca comienza a una altura de 3 700 m.s.n.m., fluyendo al noroeste, en donde se encuentra la parte más baja de la cuenca y donde está la mayor parte de la mancha urbana y se concentra la población.

La cuenca del río Tejalpa tiene una distribución mayormente de zona baja, en la Tabla 12 se presenta la distribución espacial por zonas de la lluvia promedio anual.

Tabla 12. Distribución de la lluvia promedio anual de las zonas de la cuenca del río Tejalpa. [Elaboración propia con información del SMN]

Zona de la cuenca	Lluvia promedio anual, mm
Media	81.1
Baja	65.0

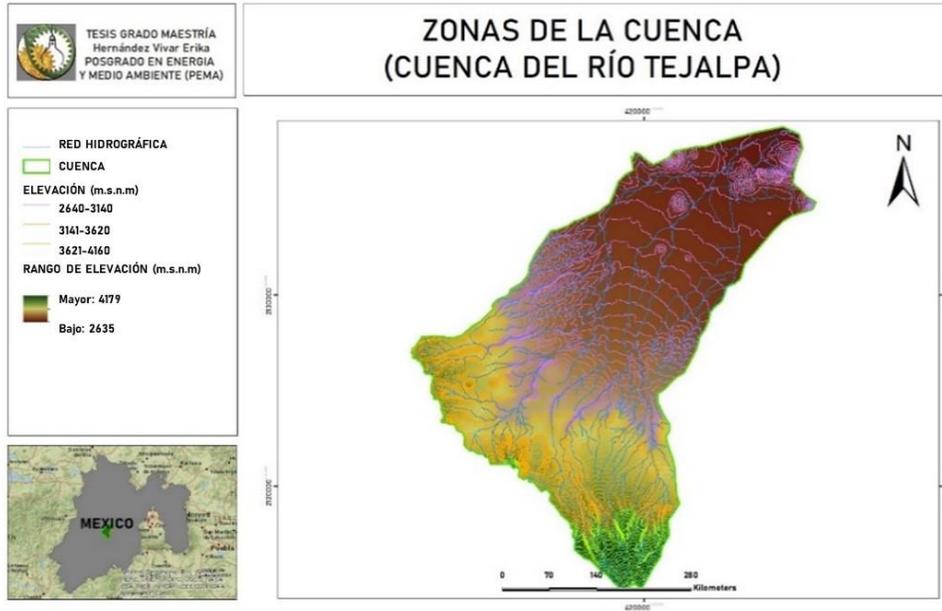


Figura 32. Zonas de la cuenca del río Tejalpa. (Elaboración Propia)

El procesamiento del modelo hidrológico con el SIG Physitel se muestra en la Figura 33, donde:

- Inciso A): *Geoprocessing Fill*
- Inciso B): Unidades Hidrológicas (UH)
- Inciso C): *Flow Accumulation*
- Inciso D): Cambio de pendiente
- Inciso E): *Flow Direction*

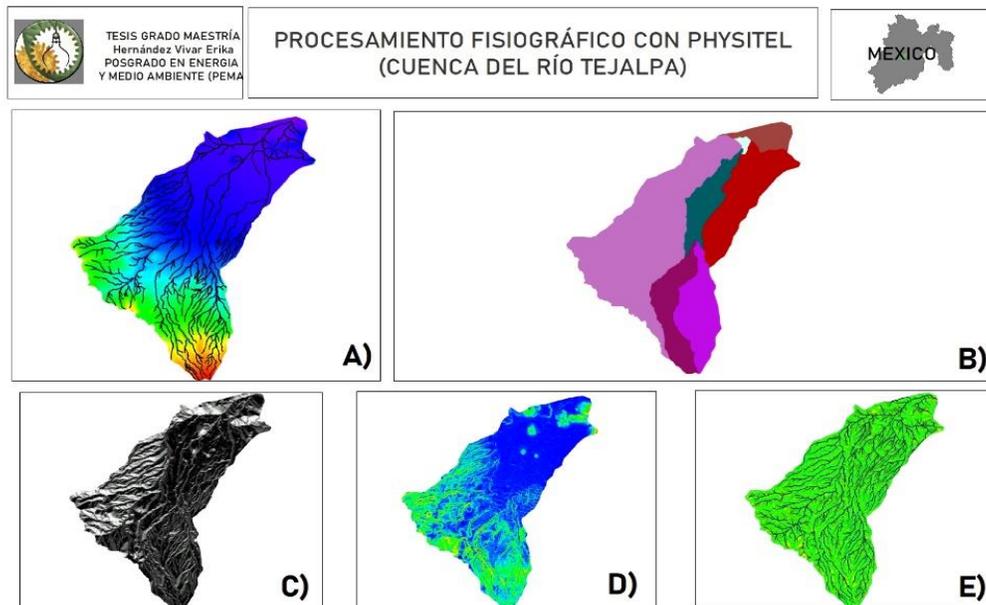


Figura 33. Procesamiento del modelo hidrológico de la cuenca del río Tejalpa con Physitel.

El procesamiento del modelo hidrológico con el SIG ArcMap se muestra en la Figura 34, donde:

- Inciso A): *Geoprocessing Fill*
- Inciso B): Unidades Hidrológicas (UH)
- Inciso C): *Flow Accumulation*
- Inciso D): Cambio de pendiente
- Inciso E): *Flow Direction*

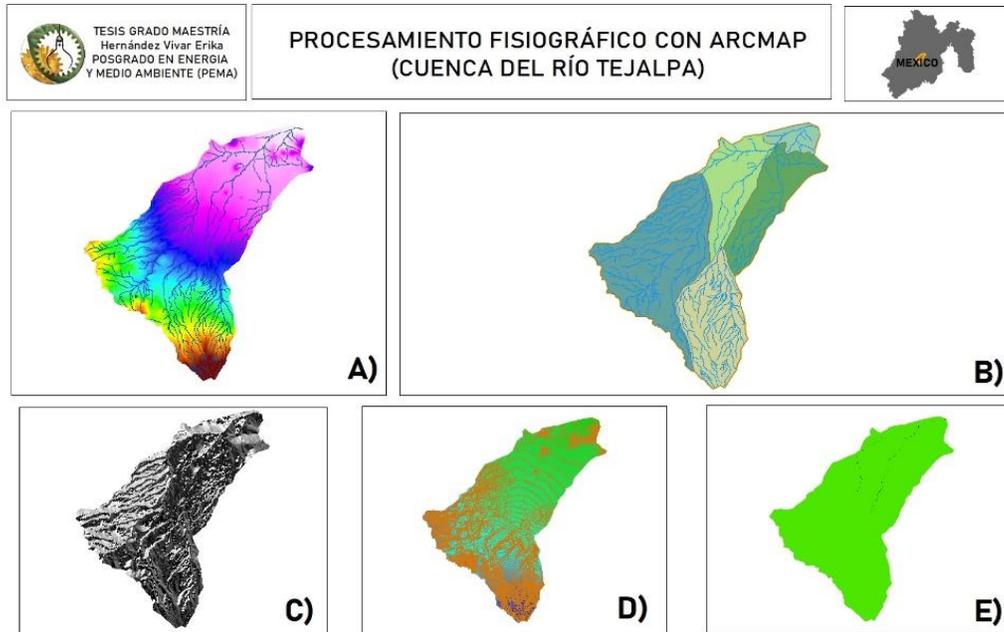


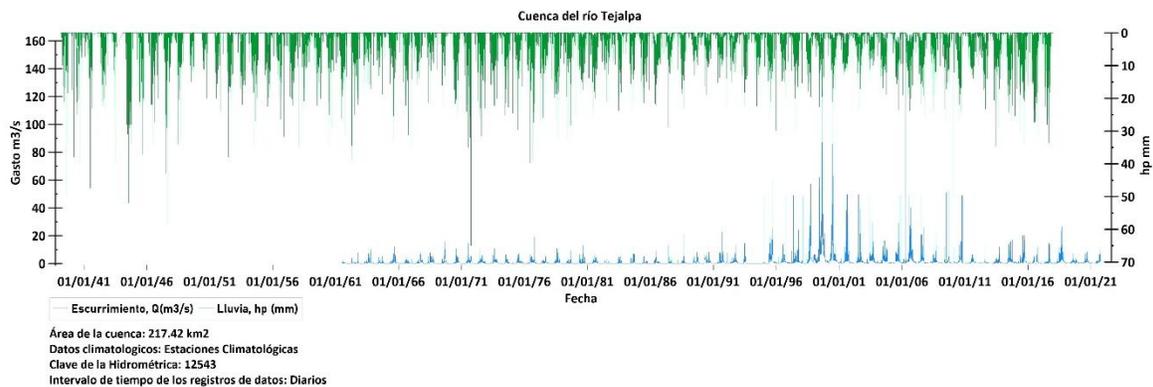
Figura 34. Procesamiento del modelo hidrológico para la cuenca del río La Laja con ArcMap.

RESULTADOS

LLUVIA, ESCURRIMIENTO Y SIMULACIÓN DE LA CUENCA DEL TEJALPA

De la estación 12543 “Calixtlahuaca” se trabajó con los datos diarios del 01 de julio de 1961 al 19 de octubre de 2021. Para los datos horarios, el intervalo de tiempo entre cada dato varía, algunos son cada hora o 6 horas y desde el 01 de julio de 1961 al 24 de julio de 2013.

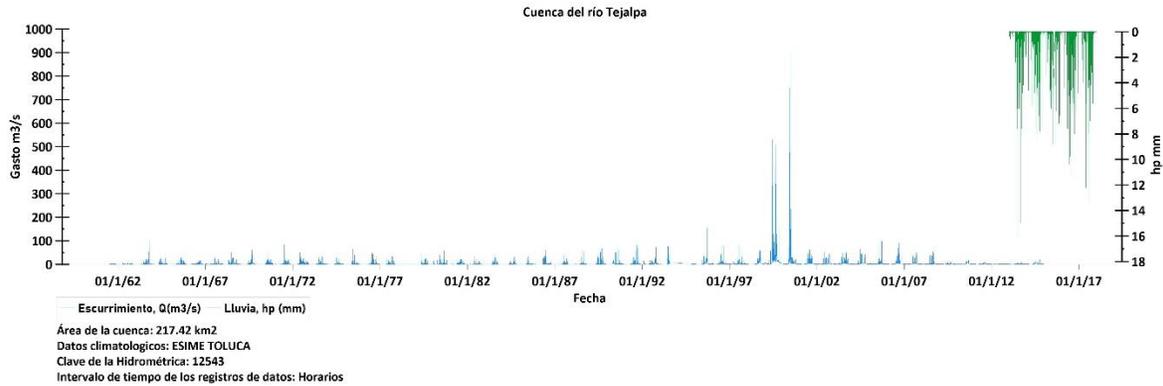
Con las estaciones climatológicas 15089, 15276 y 15293, se determinó la lluvia de la cuenca en un periodo de tiempo del 01 de marzo de 1939 al 31 de diciembre de 2017 y para el intervalo de tiempo diario.



Gráfica 23. Serie de datos de Lluvia-Escorrentamiento de la cuenca del río Tejalpa. Altura de precipitación (hp), caudal (Q) [Elaboración propia con datos del SMN y del BANDAS].

En la Gráfica 23 se representa la información Lluvia-Escorrimento del periodo del 01 de marzo de 1939 al 19 de octubre de 2021.

El periodo de datos de altura de precipitación de la ESIME Toluca es del 01 de enero de 2013 al 31 de diciembre de 2017.



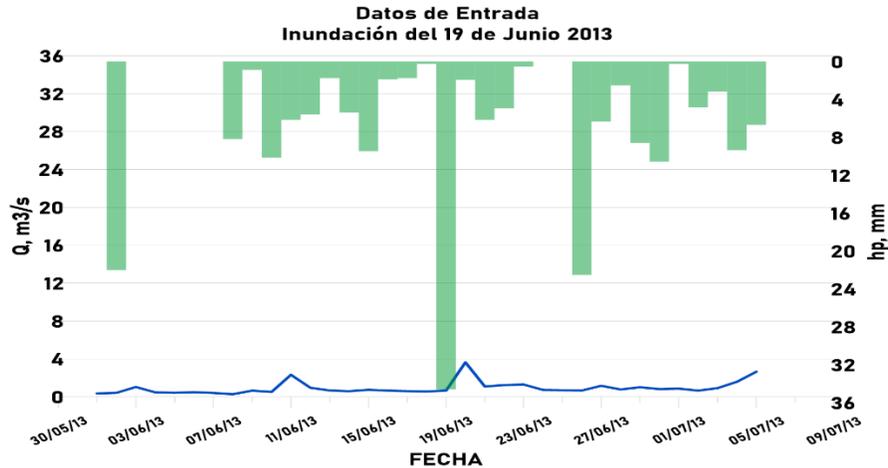
Gráfica 24. Serie de datos para el intervalo de tiempo horario de Lluvia-Escorrimento de la cuenca del río Tejalpa. Altura de precipitación (hp) y caudal (Q) [Elaboración propia con datos del SMN y del BANDAS].

En la Gráfica 24 se presenta la base de datos históricos horarios de la cuenca del río La Laja, para esta cuenca se tienen 5 meses en los que coinciden las fechas de precipitación y caudal.

A continuación se presentan los gráficos de los eventos que se presentaron durante las inundaciones súbitas, estos son los datos de entrada para la simulación para determinar la mancha de inundación.

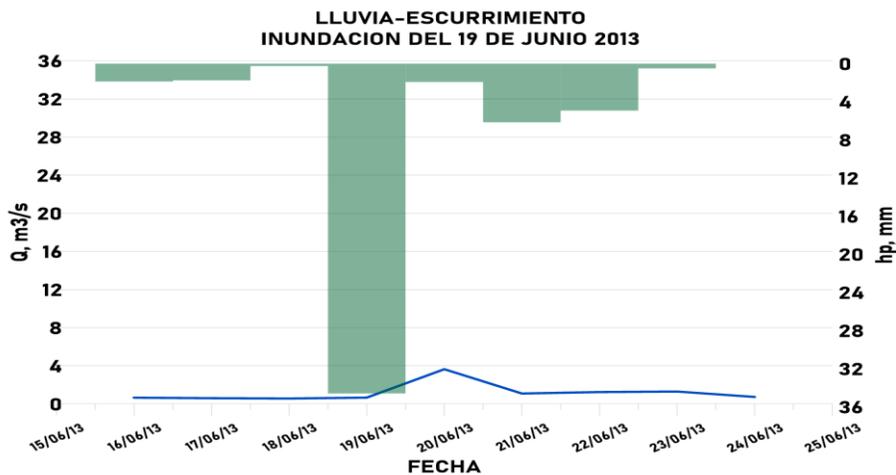
Inundación del 19 de Junio de 2013

La simulación de la inundación de 2013 en la cuenca del río Tejalpa se realizó con el intervalo de tiempo diario. Los datos de entrada para el modelo de simulación son del 01 de junio al 05 de julio de 2013, periodo en donde se registró la inundación, el 19 de junio de 2013.



Gráfica 25. Datos de entrada de Lluvia-Escorrentamiento para la simulación. Intervalo temporal diario (datos a cada 24 horas). Q en m³/s y hp en mm [Elaboración propia con datos del SMN y del BANDAS].

En la Gráfica 25 se observa que la lluvia máxima se presentó el 18 de junio y las primeras horas del 19 de junio, acumulando un total de 34.6 mm, y el hidrograma tiene el pico máximo de 3.6 m³/s el día 10 de junio. La lluvia de 34.6 mm está asociada a un periodo de retorno (Tr) de 1.8 años; para este evento el índice de infiltración es de 0.02 mm/h.



Gráfica 26. Lluvia-Escorrentamiento del 19 de junio del 2013 (intervalo de tiempo de 24 horas) [Elaboración propia con datos del SMN y del BANDAS].

El día 19 de junio de 2013 a las 01:00 horas la presencia de la lluvia generó inundaciones de hasta 0.7 m de profundidad, la mayor afectación fue en la cabecera municipal, en la parte baja de la cuenca. En la parte baja de la cuenca, el río principal se presenta en una forma meándrica, la mancha de inundación afecta a la margen izquierda sin tener pérdidas materiales ya que no llega a la parte poblada (ver Figura 35).

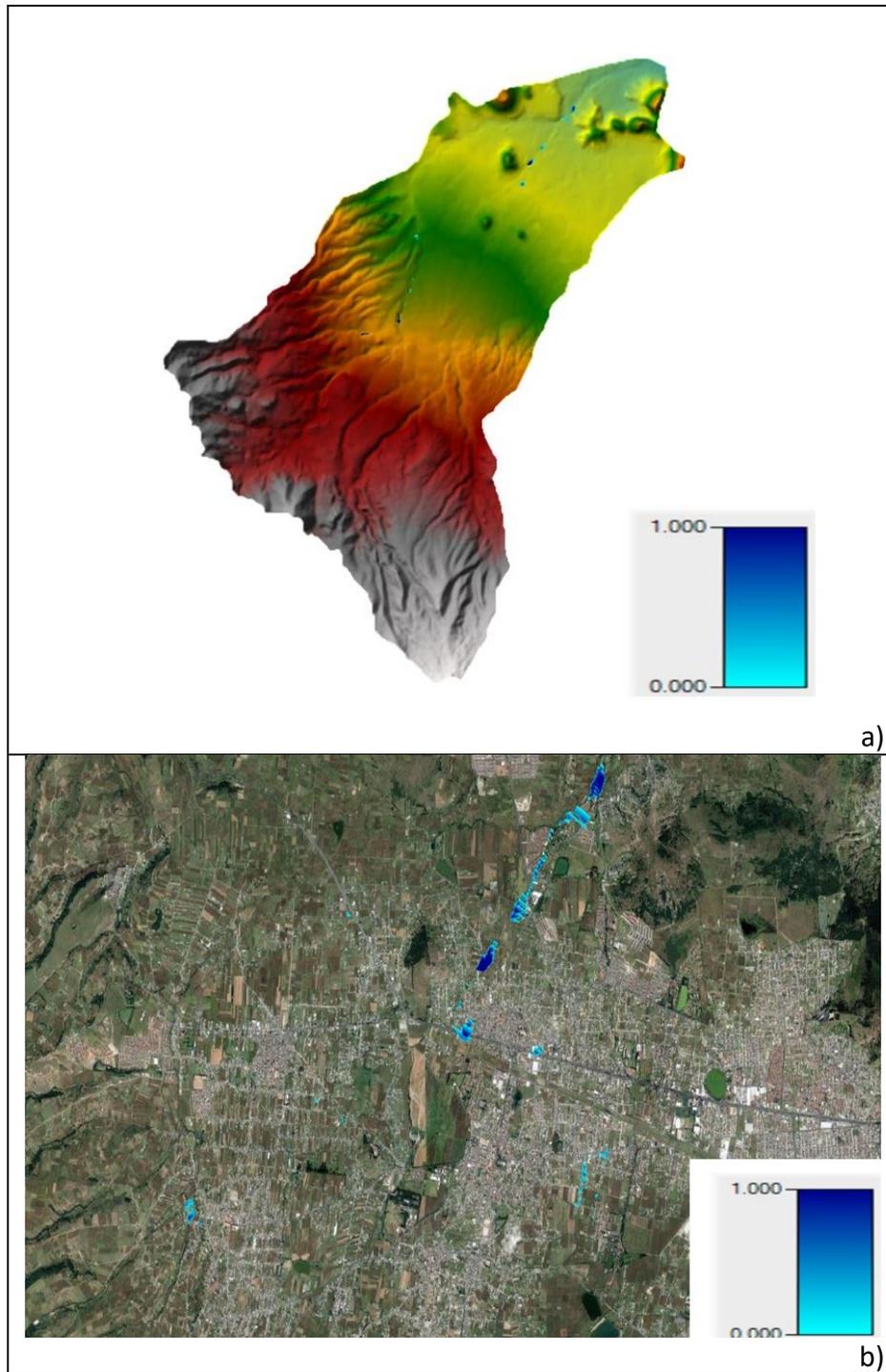
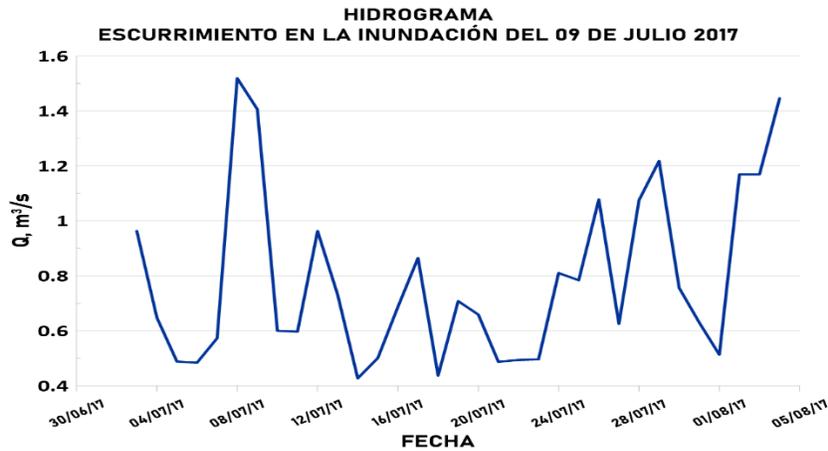


Figura 35. Mancha de inundación que se generó el 19 de junio del 2013 a las 01:00 horas. Inciso a) representa la mancha de inundación en la cuenca; b) representa la dispersión de la mancha de inundación con visualización satelital. En ambas figuras la profundidad de inundación está en metros.

Inundación del 09 de Julio de 2017

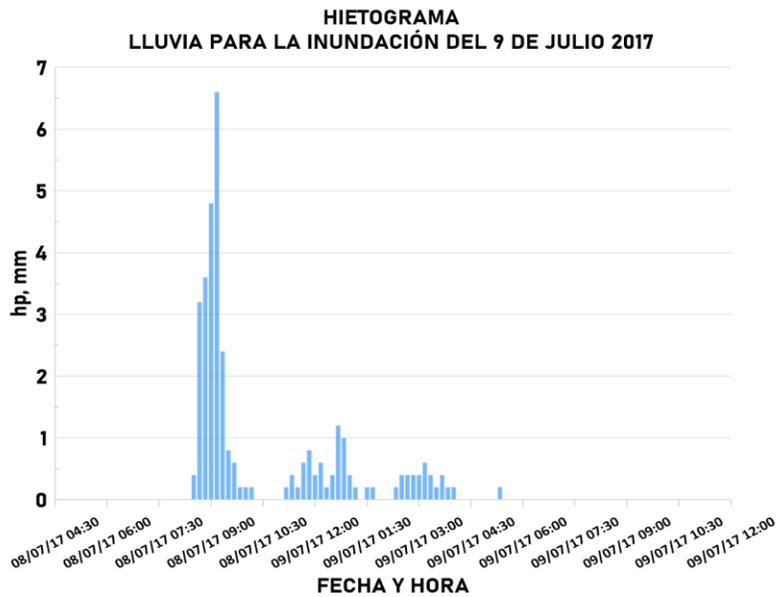
Los datos de entrada para el modelo de la simulación son del 03 de julio al 04 de agosto de 2017, periodo en donde se presenta la inundación registrada para la fecha del 09 de julio de 2017 (Gráfica 27).

Para este caso, no se tiene registro de lluvia en intervalo horario.



Gráfica 27. Datos de entrada de Escurrimiento para la simulación (Intervalos de tiempo de 24 horas) [Elaboración propia con datos del BANDAS].

El hietograma (Gráfica 28) está en un intervalo a cada 10 minutos, la precipitación fue constante durante 22 minutos, entre las 00:00 y las 00:20 horas del 09 de julio de 2017 lo cual generó inundaciones como se muestra en la Figura 36.



Gráfica 28. Lluvia del 09 de julio del 2017(intervalo de tiempo de 10 minutos). [Elaboración propia con datos del SMN].

El día 09 de julio de 2017 a las 01:00 horas se generó una inundación alcanzando profundidades de 1.2 m, afectando al barrio Guadalupe y Vista Nevado I. Además, hubo afectaciones en el barrio San Antonio Acahualco donde se alcanzó una profundidad de 0.6 m (Figura 36).

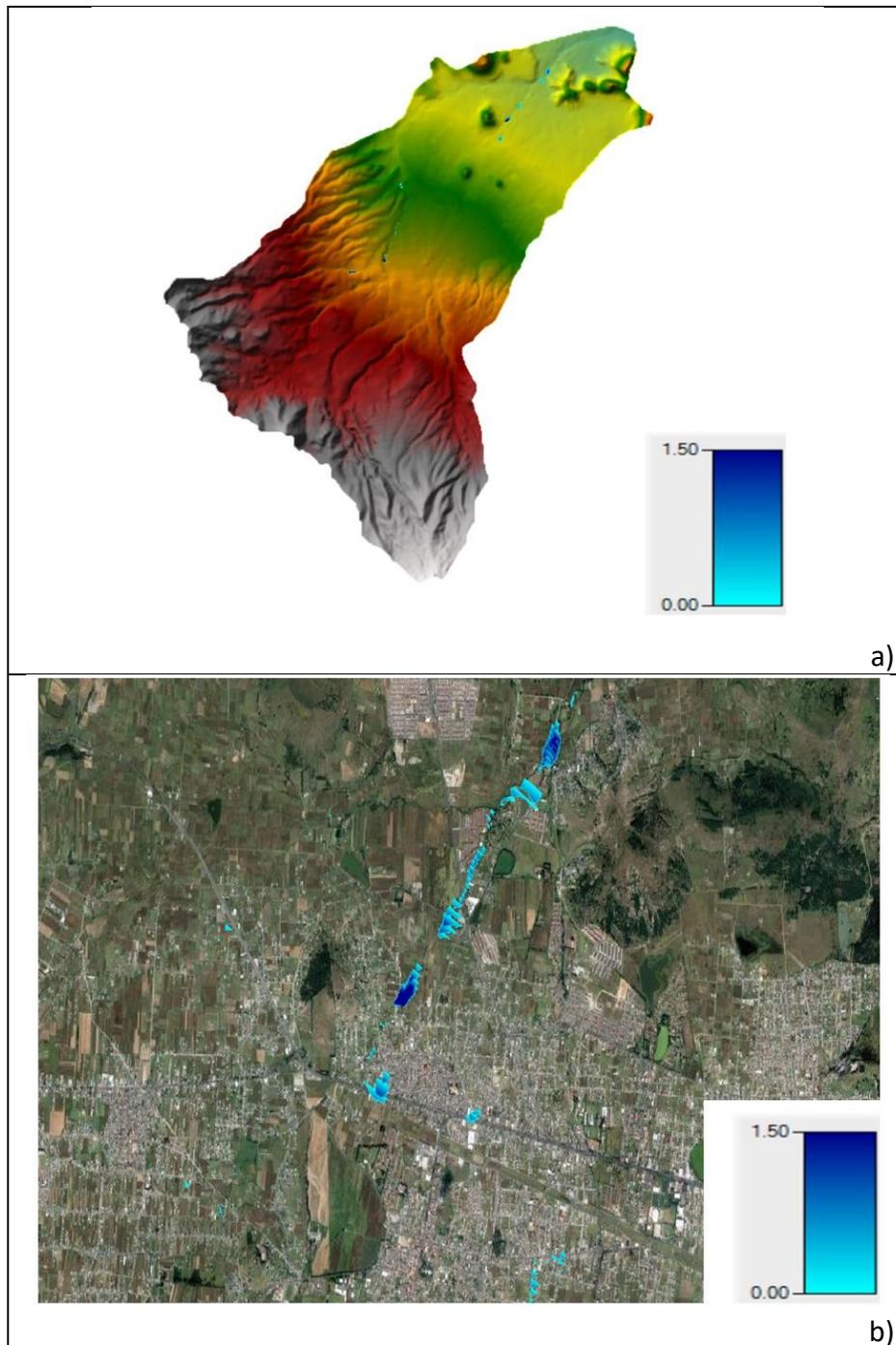
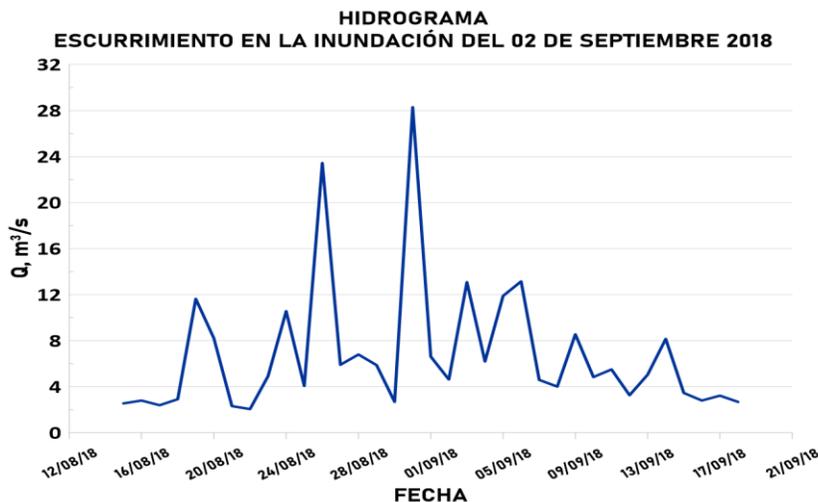


Figura 36. Mancha de inundación que se generó el 09 de julio del 2017 a las 01:00 horas. Inciso a) representa la mancha de inundación en la cuenca; b) representa la dispersión de la mancha de inundación con visualización satelital. En ambas figuras la profundidad de inundación está en metros.

Inundación del 02 de Septiembre de 2018

La simulación se realizó con los datos de entrada de escurrimiento del periodo de información del 15 de agosto al 18 de septiembre de 2018. Se analizará la mancha de inundación generada el 02 de septiembre. Desafortunadamente, no se tienen datos de lluvia de ningún intervalo de tiempo.

El caudal que presentó el pico máximo fue de 28.29 m³/s, el 31 de agosto de 2018.



Gráfica 29. Datos de entrada de escurrimiento para la simulación. Intervalo temporal diario (datos a cada 24 horas); Q en m³/s [Elaboración propia con datos del BANDAS]

El 02 de septiembre de 2018 a las 20:00 horas, la mancha de inundación que se muestra en la Figura 37 alcanzó profundidades de 1.2 m, donde las mayores afectaciones fueron para el barrio “Los Carbajales 1era y 2da secciones”.

En Tabla 13 se resumen las intensidades de lluvia que se presentaron durante las inundaciones.

Tabla 13. Intensidades de lluvia para las inundaciones del río La Laja [Elaboración propia con datos del SMN].

Fecha	intensidad (mm/h)		gasto (m ³ /s)	profundidad máxima de la inundación(m)
	24 horas	duración de la tormenta (12 días-22min)		
19/06/2013	1.4	0.3	3.6	0.7
09/07/2017		6.0	1.5	1.2
02/09/2018	-	-	28.3	1.2

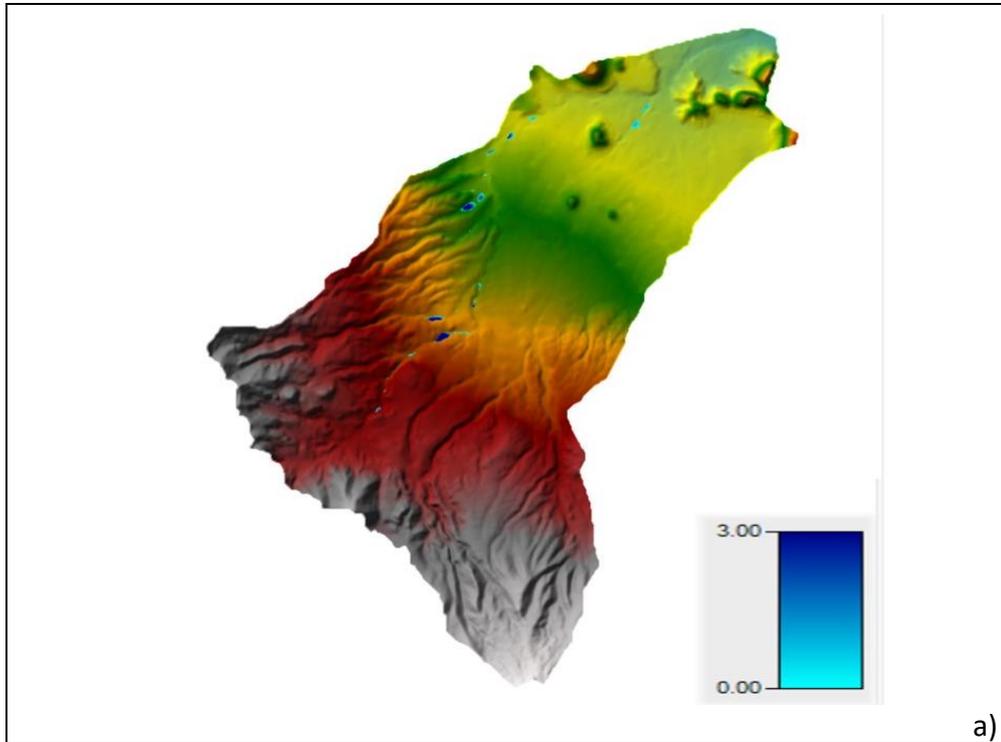


Figura 37. Mancha de inundación que se generó el 02 de septiembre de 2018 a las 20:00 horas. Inciso a) representa la mancha de inundación en la cuenca; b) representa la dispersión de la mancha de inundación con visualización satelital. En ambas figuras la profundidad de inundación está en metros.

DISCUSIÓN CUENCA TEJALPA

La cuenca del río Tejalpa, presenta alturas de precipitación diaria hasta de 63 mm, registrada en 1971, aunque se tiene una serie de datos amplia, en algunos casos falta de información. La lluvia de la Gráfica 23 representa la precipitación registrada al centro de la cuenca sobre las zonas planas, que son identificadas como zonas de inundación.

De acuerdo con el análisis para determinar el periodo de retorno se tiene que los eventos de lluvia máxima acumulada va de entre 0.7 a 128.4 años y el índice de infiltración es de 0.02 mm/h lo cual se puede asumir directamente con el uso de suelo urbano.

La información disponible en la cuenca del río Tejalpa, no permite analizar con detalle las lluvias ocurridas en las fechas de las inundaciones súbitas registradas y referidas en las notas periodísticas. Considerando la ESIME Toluca, la disponibilidad de los periodos e intervalos de tiempo de la información climatológica e hidrométrica no coincide para las fechas de las inundaciones súbitas reportadas. En los hidrogramas si se tienen los registros de los gastos pico en las fechas de las inundaciones, lo que permitió realizar las simulaciones identificando que en las zonas donde el río presenta formas meándricas la mancha de inundación es más extensa, además de verificar las profundidades máximas que se reportaron.

CAPITULO V

CUENCA DEL RÍO DUERO

La cuenca baja del río Duero está ubicada en el municipio de Zamora y Chavinda, Michoacán, lugares de alto impacto al problema de inundaciones. Zamora ha sido el centro de una zona económica muy importante de Michoacán. La región es importante productora de cultivos de fresa.

En la cuenca la mayor parte del año el clima es soleado y en verano se tienen abundantes lluvias. El sistema hidráulico que atraviesa a la cuenca es el del río Duero.

El municipio de Zamora tiene una población de 196 208 habitantes, siendo este municipio un lugar de uso urbano.

ANTECEDENTES DE LAS INUNDACIONES CUENCA DUERO

Según el Atlas de Riesgos Naturales de Zamora Michoacán 2013 (SEDATU, 2013), en temporada de lluvias se suelen inundar algunas localidades por el desbordamiento del río Duero, en las regiones urbanas en ocasiones se acumula la cantidad de granizo suficiente para obstruir el drenaje para el paso del agua y genera inundaciones durante algunas horas. Se reportaron granizos en noviembre de 2007 y febrero de 2010.

En Tabla 14 se tiene la compilación de las notas periodísticas de algunas de las inundaciones más sobresalientes por sus afectaciones en el municipio de Zamora.

Tabla 14. Notas periodísticas sobre inundaciones en el municipio de Zamora, Michoacán [Elaboración propia con información recopilada de hemerotecas digitales].

Mes	Año	Nota Periodística	Referencia
Agosto	1994	Inundación en la zona centro de la localidad de Lombardía	SEDATU
Julio	2007	Deja "Dalia" 200 damnificados e inundaciones en Michoacán.	W Radio
Agosto	2018	Lluvias provocan deslaves e inundaciones en Zamora	Nuestra Visión Noticias
Julio	2019	Intensas lluvias en Zamora provocan inundación en un Walmart	Regional
Septiembre	2020	Vigila SSP zonas afectadas por lluvias en Zamora	El Sol de Morelia

A continuación, se resumen las notas periodísticas:

- En 1994 hubo una inundación en la zona centro de la localidad de Lombardía por exceso de lluvia, registrándose alturas de agua hasta de un metro, causando daños a negocios y viviendas (SEDATU, 2013).
- Las lluvias ocasionadas por la tormenta tropical “Dalia” dejaron por lo menos 200 damnificados en Morelia, mientras que en Zamora diez colonias registraron inundaciones de hasta 40 centímetros, informó la Unidad Estatal de Protección Civil.
- Personal de la Coordinación de Protección Civil y Bomberos de Zamora atendieron de manera oportuna los deslaves y bajadas de aguas broncas de los cerros.
- Debido a las intensas lluvias que se registran en Zamora, el agua comenzó a brotar dentro de un Walmart en lo que posiblemente sería un ducto de la coladera (La voz de Michoacán, 21/07/2019).
- Debido a las intensas lluvias registradas este día en diferentes zonas de la región, la secretaría de Seguridad Pública mantiene constante vigilancia en las colonias afectadas (El Sol de Michoacán, 09/09/2020).

UBICACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO DUERO

La cuenca del río Duero se ubica entre los municipios Cheran, Chavinda, Jacona, Tangancicuaro, Tlazazalca, Purepero, Chilchota y Zamora, estando este último en la zona plana de la cuenca. El escurrimiento de la cuenca comienza en la zona alta que corresponde a la curva de nivel de 2 700 m.s.n.m. y cerrando en el punto más bajo de 1 560 m.s.n.m. La cuenca está ubicada entre las coordenadas (UTM) 131682 y 199077 m Este y 2179914 y 2229274 m Norte.

La cuenca tiene un área de 2 226.24 km² y su punto de salida está en la ubicación de la estación hidrométrica con clave 12310 “La Estanzuela”. Su afluente principal es el río “Duero” que nace a 11 km en el centro de la cuenca, en donde el escurrimiento es de forma radial. El caudal registrado ha sido hasta de 97 m³/s, el cual en condiciones ordinarias no representa un riesgo para desbordarse, pero las condiciones cambian con las fuertes lluvias en la región.

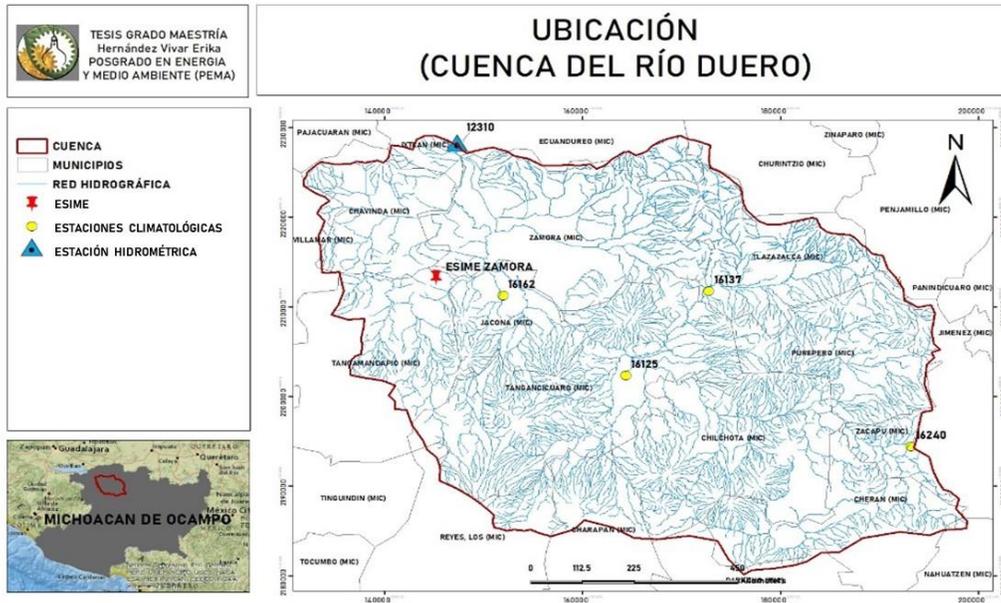


Figura 38. Cuenca del río San Juan de Dios, ubicada en el estado de Michoacán (Elaboración propia).

Las estaciones usadas para el análisis en la cuenca del río Duero son (Figura 38): estaciones climatológicas con clave 16162 “Orandino”, 16125 “Tangancicuaro”, 16240 “El Pueblito” y 16137 “Urepetiro” y la estación Hidrométrica 12310 “La Estanzuela”.

EDAFOLOGÍA DE LA CUENCA DEL RÍO DUERO

La cuenca del río La Laja se compone por vertisol, andasol, cambisol, feozem, litosol, luvisol y vertisol, estos suelos contienen principalmente alto contenido orgánico por lo que tienen alto contenido de nutrientes para los cultivos agrícolas. Es un suelo de estructura fina en la parte baja de la cuenca, resultado de depósito de suelos que se transportan desde la parte alta donde inicia el escurrimiento.

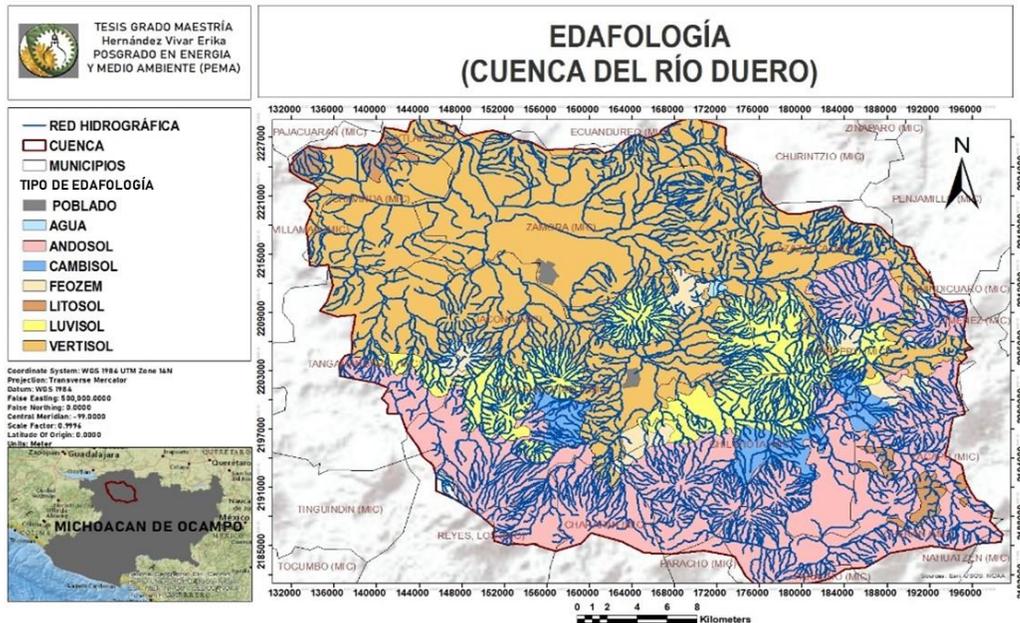


Figura 39. Composición edafológica en el área de la cuenca del río Duero. (Elaboración propia con información de CONABIO 2021)

USO DE SUELO Y VEGETACIÓN DE LA CUENCA DEL DUERO

El uso de suelo y la vegetación que predomina en la cuenca del río Duero está distribuida con mayor porcentaje de área cubierta por uso de agricultura, la cuenca se caracteriza por producir diferentes productos agrícolas en los que destaca el maíz. La cuenca cuenta con áreas de bosque, selva y uso urbano, presenta una variada diversificación de orografía y clima, en lo que destaca grandes lomeríos, sierras y llanuras que presentan colinas redondeadas y 3 principales climas que son subhúmedo, semicálido y templado.

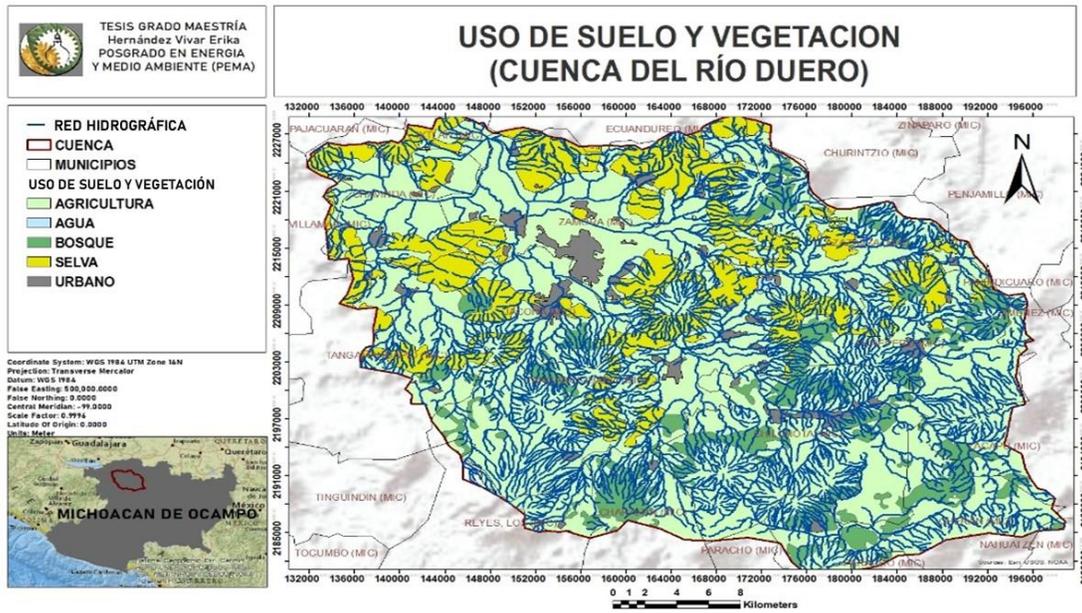


Figura 40. Composición del uso de suelo y vegetación de la cuenca del río Duero. (Elaboración propia con información de CONABIO 2021).

El coeficiente de rugosidad del río Duero es de 0.035, de acuerdo con el tipo de cauce y la Tabla A. 1 del Anexo 1.

HIDROLOGÍA DE LA CUENCA DEL RÍO DUERO

La superficie de la cuenca del río Duero tiene un tipo de escurrimiento radial. Esta cuenca es la que menor modificación antropogénica ha sufrido. Sin embargo, el aprovechamiento para la agricultura ha modificado al suelo, trayendo consigo un problema de arrastre y depósito de sedimentos en la cuenca baja que repercute en el drenaje, disminuyendo su capacidad de escurrimiento por el canal principal.

La cuenca del río Duero tiene una cobertura superficial de mayor extensión de la zona baja, en ella, la distribución espacial por zonas de la lluvia promedio anual es mayor en la zona alta en comparación a la zona baja, Tabla 15.

Tabla 15. Distribución de la lluvia promedio anual por zonas de la cuenca del río Duero. [Elaboración propia con información del SMN]

Zona de la cuenca	Lluvia promedio anual, mm
Alta	85.0
Baja	67.8

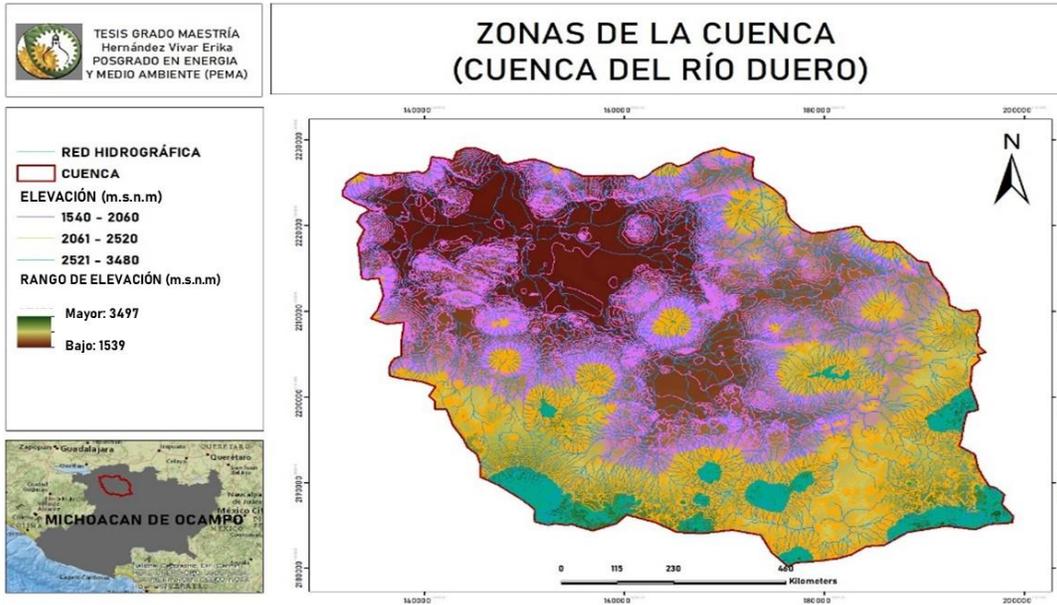


Figura 41. Zonas de la cuenca del río Duero (Elaboración Propia)

El procesamiento del modelo hidrológico con el SIG Physitel se muestra en la Figura 42 donde:

- Inciso A): *Geoprocessing Fill*
- Inciso B): Unidades Hidrológicas (UH)
- Inciso C): *Flow Accumulation*
- Inciso D): Cambio de pendiente
- Inciso E): *Flow Direction*

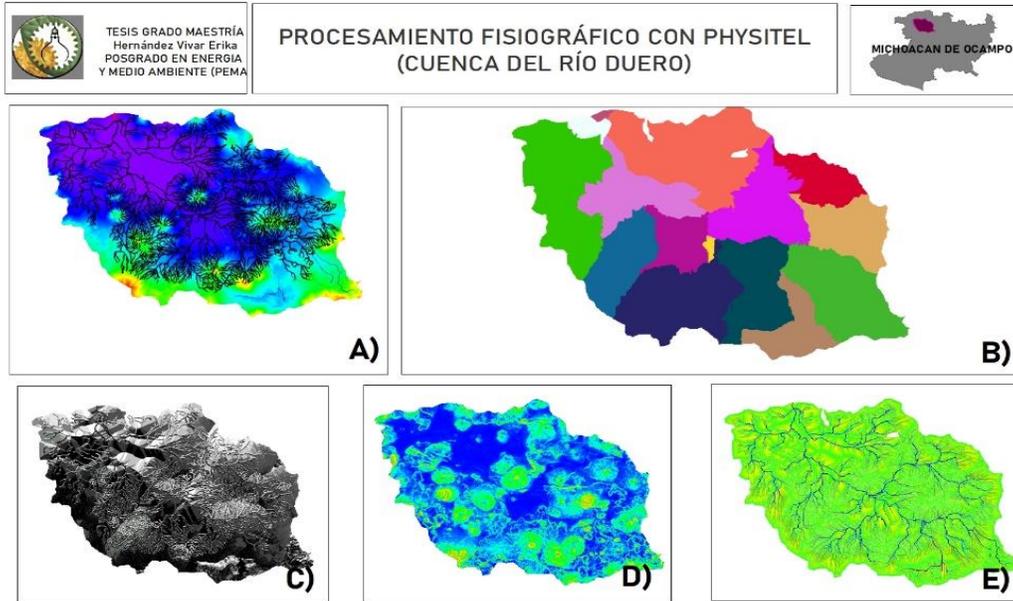


Figura 42. Procesamiento del modelo hidrológico de la cuenca del río Duero con Physitel.

El procesamiento del modelo hidrológico con el SIG ArcMap se muestra en la Figura 43, donde:

- Inciso A): *Geoprocessing Fill*
- Inciso B): Unidades Hidrológicas (UH)
- Inciso C): *Flow Accumulation*
- Inciso D): Cambio de pendiente
- Inciso E): *Flow Direction*

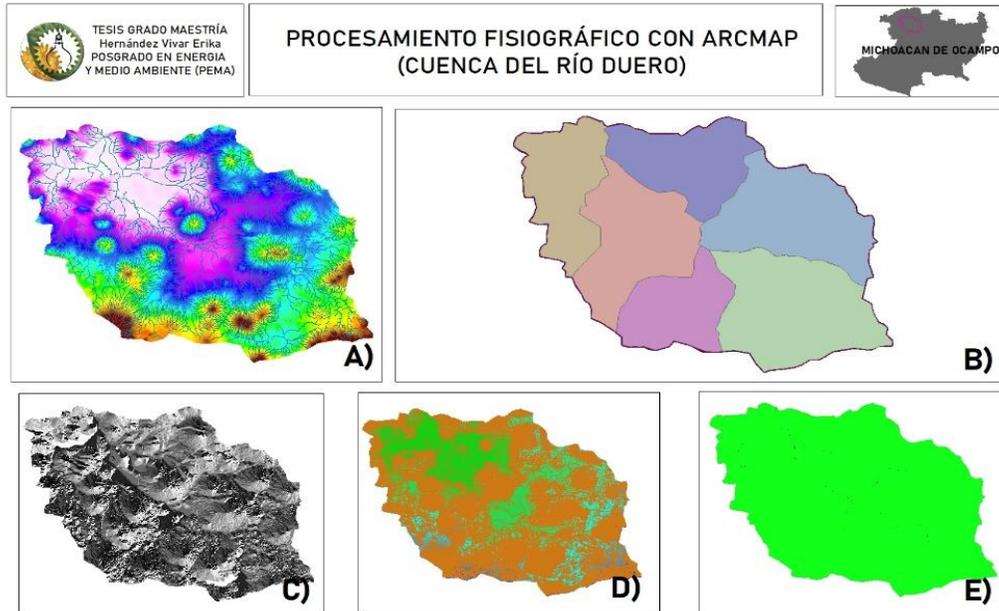


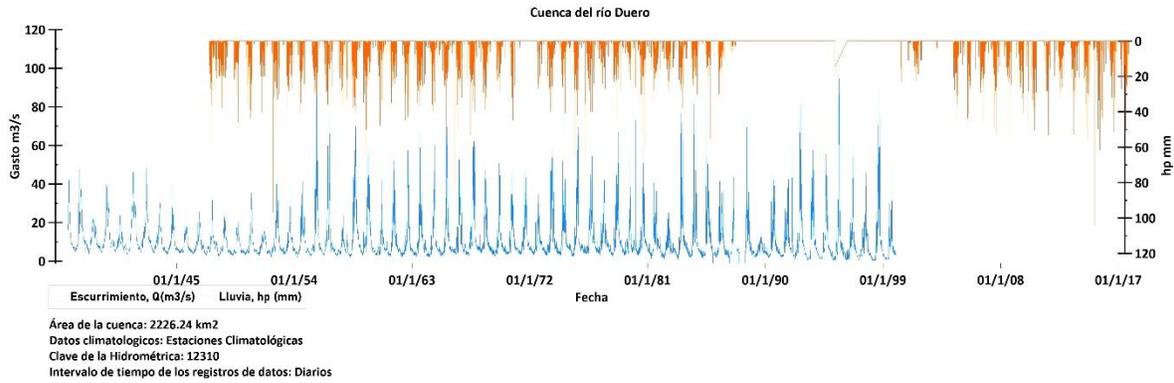
Figura 43. Procesamiento del modelo hidrológico para la cuenca del río Duero con ArcMap.

RESULTADOS

LLUVIA, ESCURRIMIENTO Y SIMULACIÓN DE LA CUENCA DEL RIO DUERO

De la estación 12310 “Estanzuela” se analizaron datos a cada 24 horas (intervalo diario), de la fecha del 01 de septiembre de 1936 al 31 de diciembre de 1999. Para los datos horarios, el intervalo de tiempo entre cada dato varía, algunos son de cada 6 h y otros de 4 h y están dados desde el 09 de enero de 1936 al 31 de diciembre de 1999.

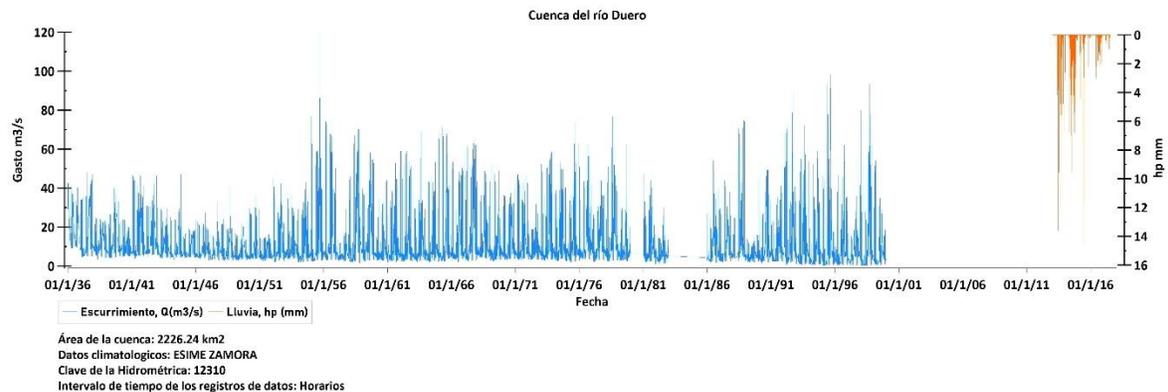
De las estaciones climatológicas 16162, 16125, 16240 y 16137 se determinó la lluvia la cuenca desde el 01 de julio de 1947 hasta el 31 de diciembre de 2017 y en un intervalo de tiempo diario. Este periodo tiene bastantes huecos de información, por ejemplo, del 01 de enero de 1988 al 21 de noviembre de 1994 no se cuenta con datos lluvia, esto se muestra en la Gráfica 30.



Gráfica 30. Serie de datos Lluvia-Escurrecimiento de la cuenca del río Duero. Altura de precipitación (hp) y caudal (Q) [Elaboración propia con datos del SMN y del BANDAS].

En la Gráfica 30 se presenta Lluvia-Escurrecimiento para el periodo del 01 de septiembre de 1936 al 31 de diciembre de 2017. Se observa que los picos de altura de precipitación coinciden con los picos de escurrecimiento.

El periodo de datos de altura de precipitación de la ESIME Zamora es del 01 de enero de 2013 al 30 de abril de 2019.



Gráfica 31. Serie de datos en intervalo de tiempo horario de Lluvia-Escurrecimiento de la cuenca del río Duero altura de precipitación (hp) y caudal (Q) [Elaboración propia con datos del SMN y del BANDAS].

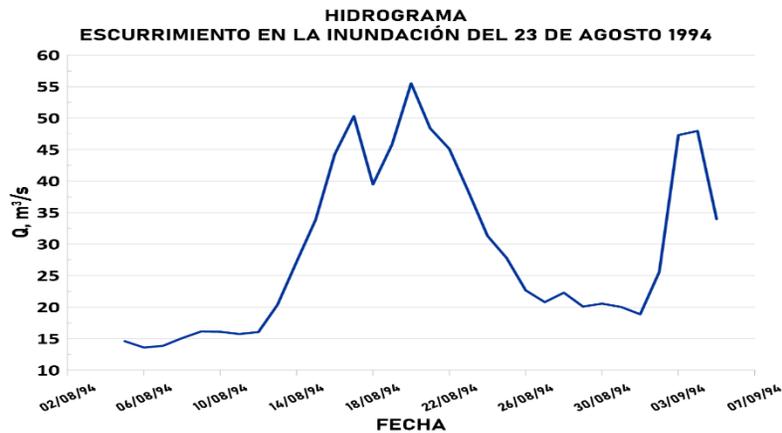
La Gráfica 31 representa la base de datos históricos horarios de la cuenca del río Duero, para esta cuenca no se disponen de información histórica de lluvia y escurrecimiento coincidentes en fechas.

A continuación se presentan los gráficos de los eventos de lluvia que ocurrieron durante las inundaciones súbitas. Esta será la información de entrada para la simulación para determinar la mancha de inundación.

Inundación del 23 de Agosto de 1994

La simulación de esta fecha en la cuenca del río Duero se realizó con el intervalo de tiempo diario. Los datos de entrada para el modelo de simulación son del 05 de agosto al 05 de septiembre de 1994, periodo en donde se presenta la inundación registrada para la fecha del 23 de Agosto de 1994. Para esta fecha no se cuenta

con información de lluvia, por lo que no se pudo realizar la gráfica de Lluvia-Escurrecimiento. En la Gráfica 32 muestra el hidrograma correspondiente para la fecha de estudio.



Gráfica 32. Datos de entrada de Escurrimiento para la simulación. Intervalo de tiempo diario, caudal Q en m³/s [Elaboración propia con datos del BANDAS].

La Gráfica 32 de Escurrimiento, representa el escurrimiento de la cuenca del río Duero, se observa que el pico máximo (55.3 m³/s) de la cuenca se presentó el día 20 de agosto, y según el reporte periodístico la inundación fue el 23 de agosto donde el escurrimiento medido fue de 38.3 m³/s.

El día 23 de agosto de 1994 a las 21:00 horas la presencia de la lluvia generó inundaciones de hasta 3 m de profundidad en localidades del “Platanal” y “El Carajo” desplazándose sobre la carretera Lib. Zamora-Jacona Sur, la inundación alcanzó a la comunidad Lomas de Bosque. Esta parte de la cuenca tiene una forma como se muestra en el perfil de sección transversal de la Figura 45. Otra zona inundada de considerablemente importancia por la profundidad que alcanzó de 2.2 m, está ubicada sobre la comunidad “El Llano”.

Ambas zonas inundadas están en la zona baja de la cuenca en donde se encuentra uso urbano.

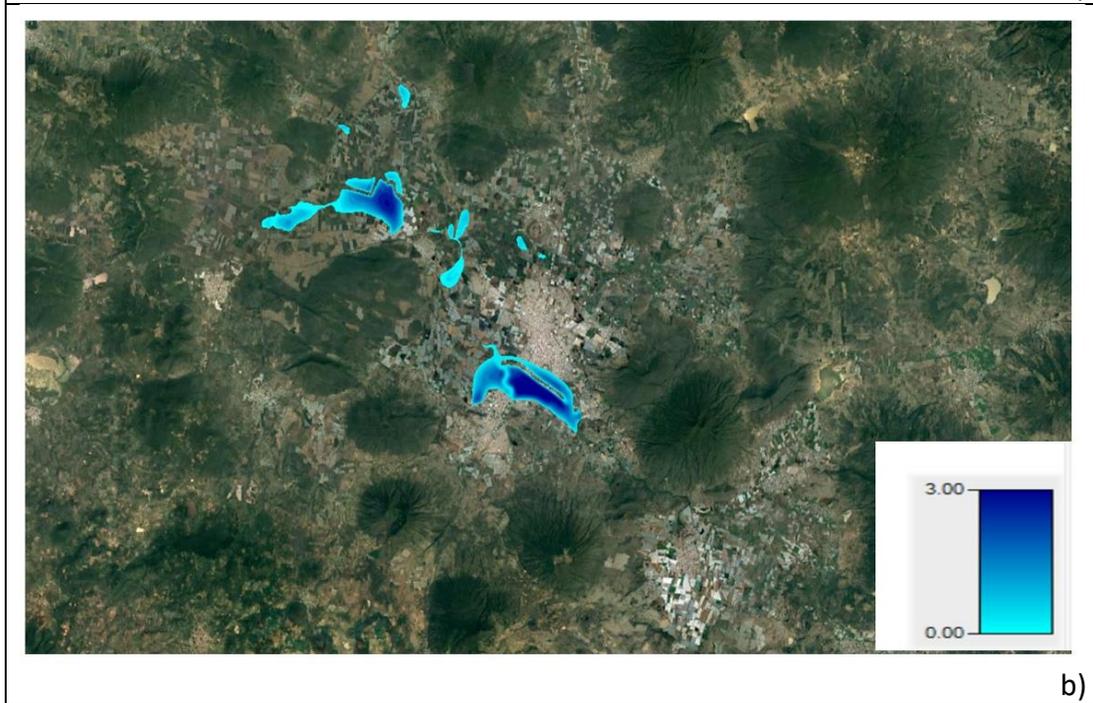
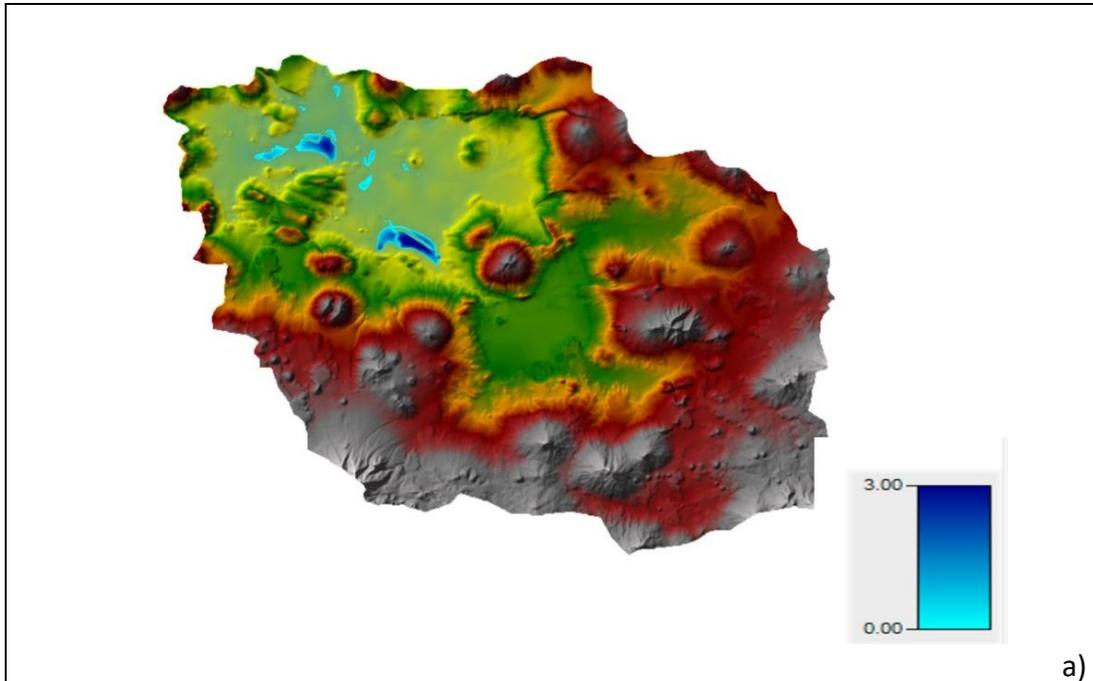


Figura 44. Mancha de inundación que se generó el 23 de agosto de 1994 a las 21:00 horas. Inciso a) representa la mancha de inundación en la cuenca; b) representa la dispersión de la mancha de inundación con visualización satelital. En ambas figuras la profundidad de inundación está en metros.

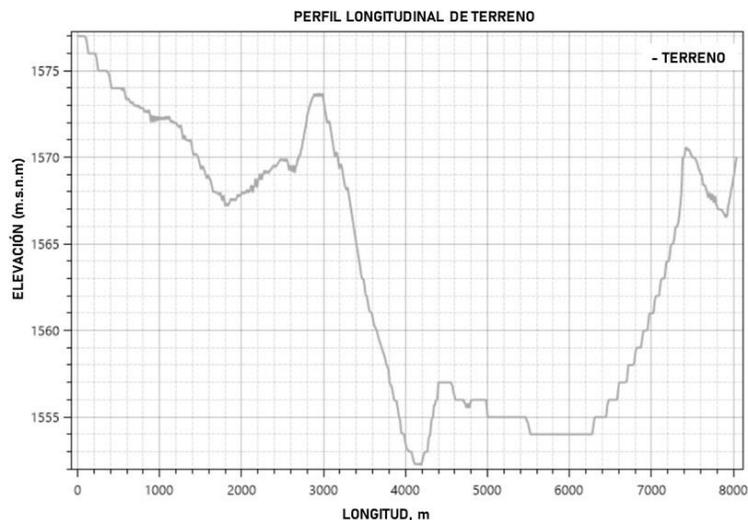


Figura 45. Sección transversal del recorrido de la mancha de inundación de la cuenca del río Duero el 23 de agosto del 1994.

DICUSIÓN CUENCA DUERO

De acuerdo con la Gráfica 32 de escurrimiento, la cuenca se saturó con los gastos picos de la avenida, siendo el máximo pico el 20 de agosto, y es al inicio de la rama descendente del hidrograma, el 23 de agosto que la respuesta de la cuenca pareciera ser la inundación súbita. Sin embargo, la duración de la avenida desde el inicio de la rama ascendente del hidrograma hasta el día de la inundación fue de 10 días. No se tiene registro de la intensidad de la lluvia en la cuenca del 23 de agosto, aunque por el hidrograma podría ser que la lluvia máxima ocurrió el 19 y 20 de agosto.

La falta de información de lluvias en la cuenca del río Duero, no permitió analizar la influencia de las lluvias en la inundación del 23 de agosto de 1994. Resulta difícil el análisis sin información suficiente, esta es una dificultad general de ésta y otras investigaciones sobre inundaciones súbitas.

CAPITULO VI

CUENCA DEL RÍO CHIQUITO

La ciudad de Morelia, en Michoacán, se ubica en el Cinturón Volcánico Transversal. En las últimas tres décadas, diferentes zonas urbanas en el centro de México han sido afectadas por hundimientos diferenciales de suelo, en la ciudad de Morelia este fenómeno inició en 1983; sin embargo, la ciudad se urbanizó rápidamente. A partir de la década de 1970, la ciudad creció sobre zonas de riesgo donde pueden presentarse inundaciones.

Son numerosos los fraccionamientos construidos en zonas inundables, tal parece que los constructores no se daban cuenta de las circunstancias, ni el municipio (Güiza F. y López, E., 2022).

La cuenca del río Chiquito es la más pequeña en superficie; sin embargo, su salida está sobre el municipio que es la capital del estado de Michoacán.

ANTECEDENTES DE LAS INUNDACIONES CUENCA CHIQUITO

La ciudad de Morelia tiene zonas en donde cada año sufren inundaciones, con la llegada de las lluvias también arriban las preocupaciones y sufrimiento de miles de familias que viven cerca de los cuerpos de agua y en colonias que no cuentan con el drenaje adecuado (Gobierno de Morelia, PPI, 2022).

Morelia, capital del estado de Michoacán de la República Mexicana, sufrió inundaciones desde su fundación, pues se encuentra atravesada por el curso del río Chiquito. La problemática se fue acentuando por el azolvamiento de los ríos y los asentamientos urbanos inmediatos al cauce. En algunas temporadas de lluvia el nivel del río crecía hasta desbordarse y las inundaciones permanecían considerándose insalubres y propagadoras de enfermedades (Oseguera, 2014).

En la Tabla 16 se tienen 2 notas periodísticas que reportaron mayor impacto de las inundaciones en la ciudad de Morelia.

Tabla 16. Notas periodísticas sobre inundaciones en el municipio de Morelia, Michoacán [Elaboración propia con información recopilada de hemerotecas digitales].

Mes	Año	Nota Periodística	Referencia
Septiembre	2003	Inundaciones en Morelia por tromba	Proceso
Marzo	2015	Estragos en Michoacán y Guerrero por aguaceros	La Jornada

A continuación se resumen las notas periodísticas:

- Una tromba provocó la madrugada del miércoles 17 de septiembre, el desbordamiento de ríos e inundaciones en al menos 10 colonias de Morelia, donde el nivel del agua superó el metro de altura, después de la tromba, la

Secretaría de Salud, desplegó brigadas para brindar asistencia médica y preventiva para la población afectada (Proceso, 18/09/2003).

- Las intensas lluvias que cayeron el sábado y el domingo provocaron inundaciones, deslaves y daños en viviendas de Zamora. El sábado, las precipitaciones de 150 mm, causaron grandes estragos (Juárez, 16/03/2015).

UBICACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO CHIQUITO

La cuenca del río Chiquito se ubica al este del municipio de Morelia, el escurrimiento de la cuenca comienza en el punto más alto que corresponde a la curva de nivel de 2 300 m.s.n.m. cerrando en el punto más bajo que es de 1 900 m.s.n.m. La cuenca está ubicada entre las coordenadas (UTM) 272032 y 281716 m Este y 2167913 y 2180105 m Norte.

La cuenca tiene un área de 75.19 km² y su punto de salida está en la ubicación de la estación hidrométrica con clave 12224 “Río Chiquito”. Su afluente principal es el “Río Chiquito” que nace al sureste (SE) del municipio de Morelia, este fluye una longitud de 12 km en dirección Noroeste (NO), el río ha escurrido un caudal hasta de 50.3 m³/s, el cual en condiciones ordinarias no representa un riesgo para desbordarse, pero las condiciones cambian con las fuertes lluvias en la región, este río es un tributario del río Lerma.

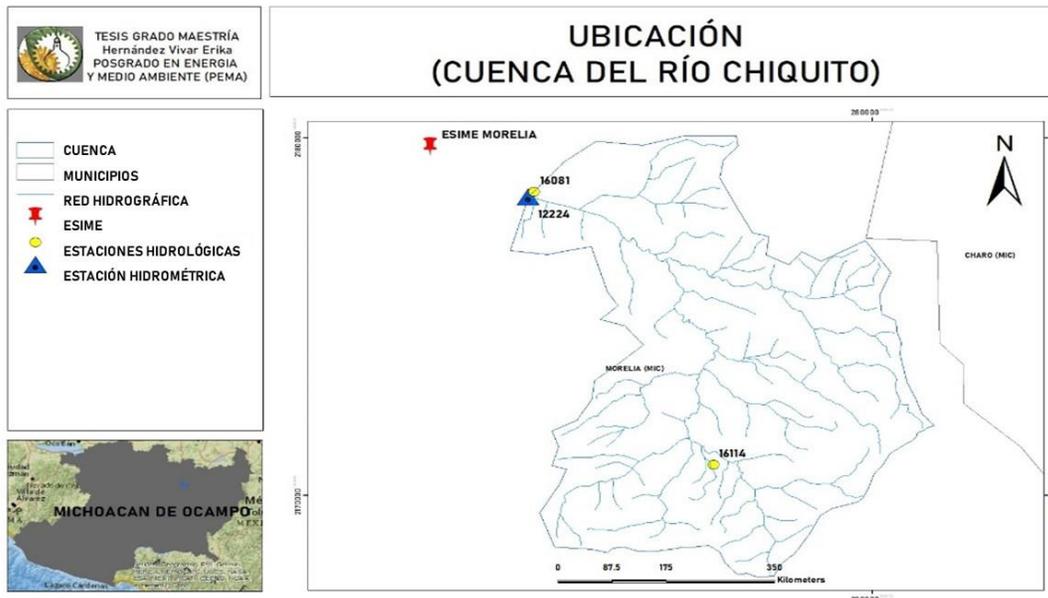


Figura 46. Cuenca del río Chiquito, ubicada en el estado de Michoacán (Elaboración propia).

Las estaciones usadas para el análisis en la cuenca del río Chiquito, como se ve en la Figura 46 son: estación climatológica 16114 “San Miguel del Monte”, 16081 “Morelia”, la ESIME “Morelia” y la estación hidrométrica 12224 “Chiquito”.

EDAFOLOGÍA DE LA CUENCA DEL RÍO CHIQUITO

La cuenca del río Chiquito se compone por Acrisol, el cual es un suelo que se desarrolla principalmente sobre productos de alteración de rocas ácidas, este tipo de suelo predomina en viejas superficies con una topografía colinada⁵ y se degradan rápidamente aportando al transporte de sedimentos. También posee suelo de Ranker y Feozem, que de igual manera son suelos de material calcáreo los cuales liberan gran cantidad de sedimentos.

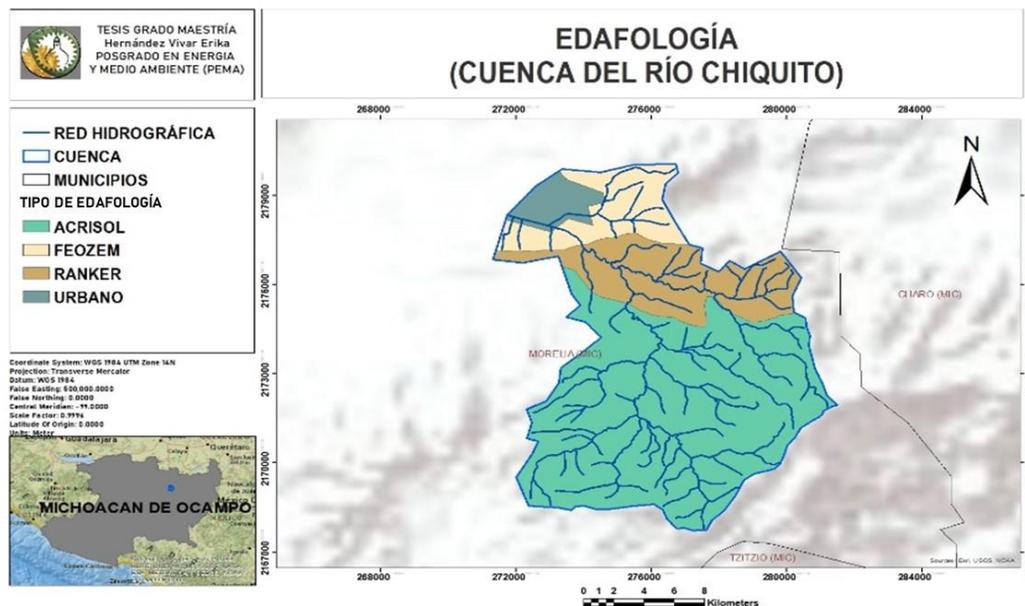


Figura 47. Composición edafológica de la cuenca del río Chiquito. (Elaboración propia con información de CONABIO 2021).

USO DE SUELO Y VEGETACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO CHIQUITO

El uso de suelo y la vegetación que predomina en la cuenca del río Chiquito es en su mayoría de superficie abarcada por bosque, seguida por el uso de agricultura y en la parte baja de la cuenca se ubica la superficie con uso urbano construido.

⁵ Topografía colinada: eminencia del terreno que, en general, no supera los 100 metros desde la base hasta la cima (Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía, 2008)

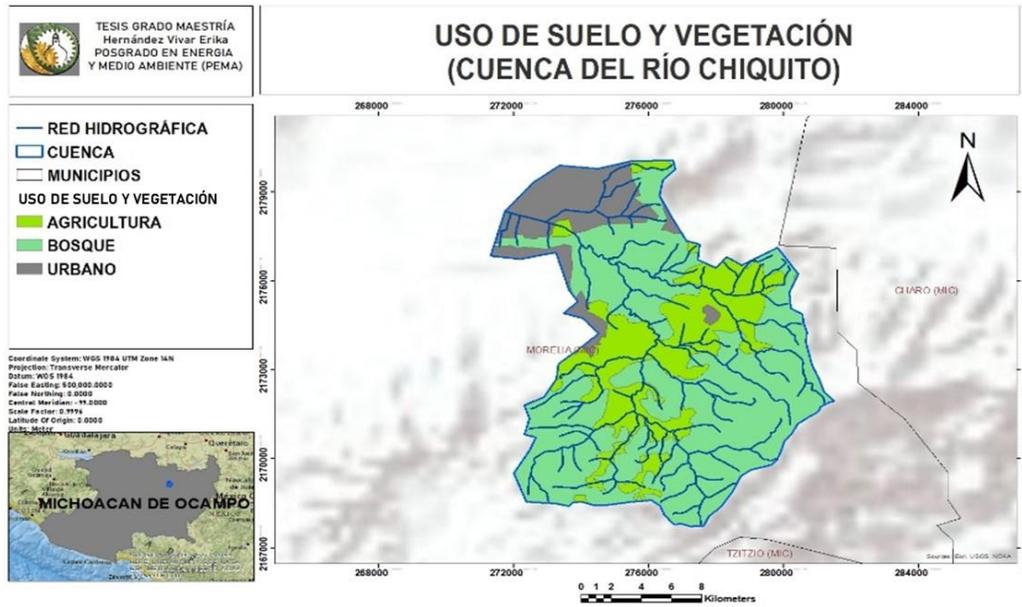


Figura 48. Composición del uso de suelo y vegetación de la cuenca del río Chiquito. (Elaboración propia con información de CONABIO 2021).

El coeficiente de rugosidad de la cuenca del río Chiquito es de 0.03 en el lecho y en ambas márgenes (izquierda y derecha), esto de acuerdo con el tipo de cauce y la Tabla A. 1 del Anexo 1.

HIDROLOGÍA DE LA CUENCA DEL RÍO CHIQUITO

La cuenca del río Chiquito está distribuida por dos zonas altas con una altitud máxima de 2 300 m.s.n.m., es en ese punto donde comienza el escurrimiento distribuido en dirección norte - noroeste (N-NO), hasta la parte más baja que tiene elevación de 1 900 m.s.n.m.

La cuenca del río Chiquito tiene una superficie de mayor extensión de la zona media, en ella la distribución espacial por zonas de la lluvia promedio anual se presenta en la Tabla 17.

Tabla 17. Distribución espacial de la lluvia promedio anual por zonas de la cuenca del río Chiquito. [Elaboración propia con información del SNM].

Zona de la cuenca	Lluvia promedio anual, mm
Media	80.2
Baja	65.3

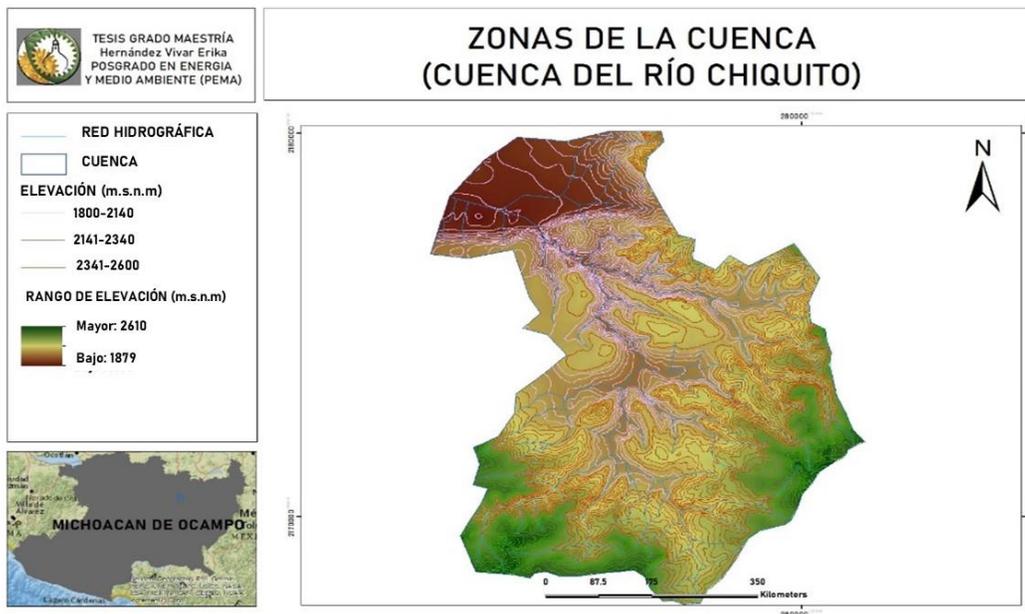


Figura 49. Zonas de la cuenca del río Chiquito (Elaboración Propia),

El procesamiento del modelo hidrológico con el SIG Physitel se muestra en la Figura 50 donde:

- Inciso A): *Geoprocessing Fill*
- Inciso B): Unidades Hidrológicas (UH)
- Inciso C): *Flow Accumulation*
- Inciso D): Cambio de pendiente
- Inciso E): *Flow Direction*

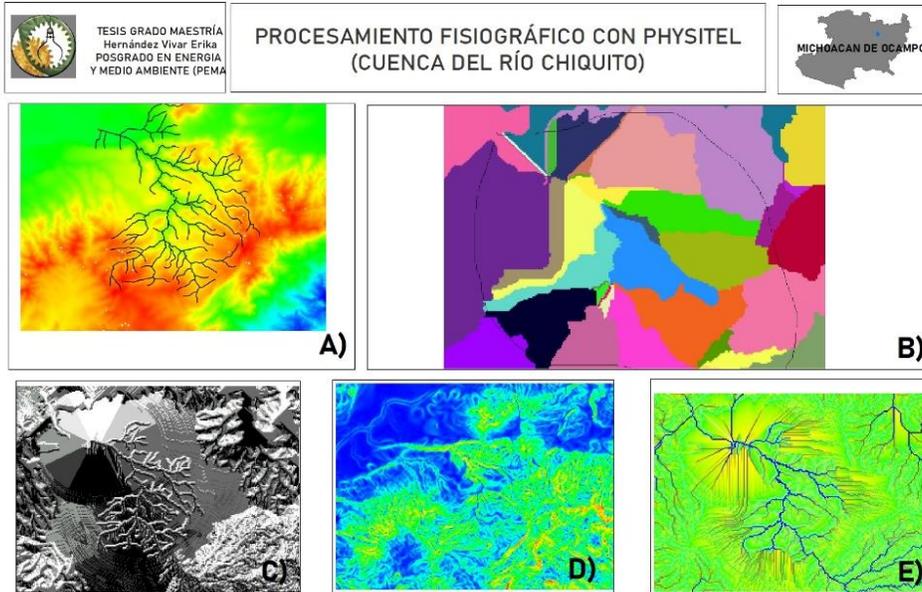


Figura 50. Procesamiento del modelo hidrológico de la cuenca del río Chiquito con Physitel.

El procesamiento del modelo hidrológico con el SIG ArcMap se muestra en la Figura 51, donde:

- Inciso A): *Geoprocessing Fill*
- Inciso B): Unidades Hidrológicas (UH)
- Inciso C): *Flow Accumulation*
- Inciso D): Cambio de pendiente
- Inciso E): *Flow Direction*

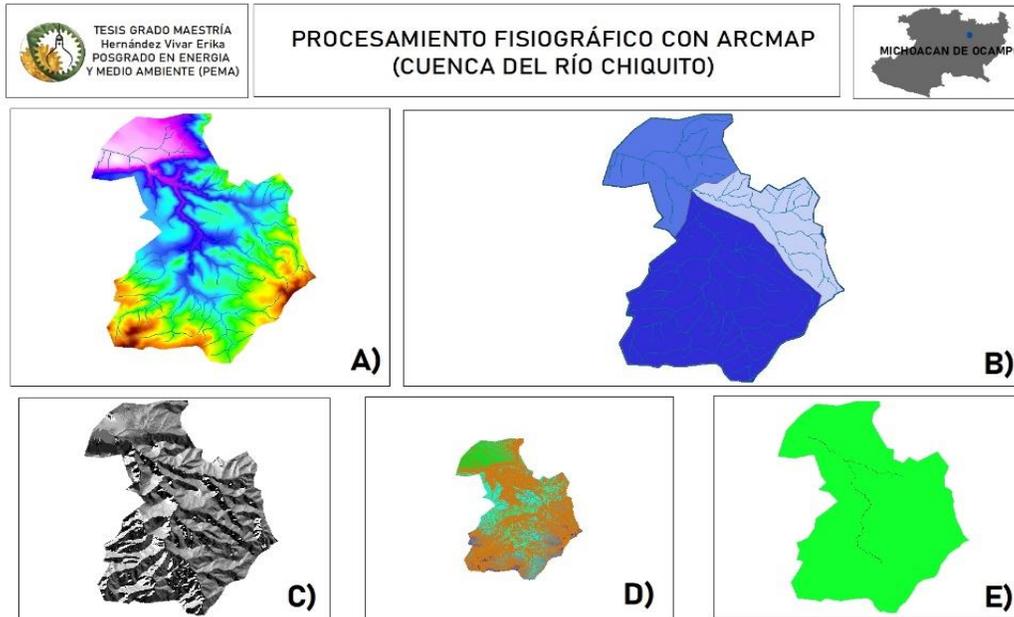


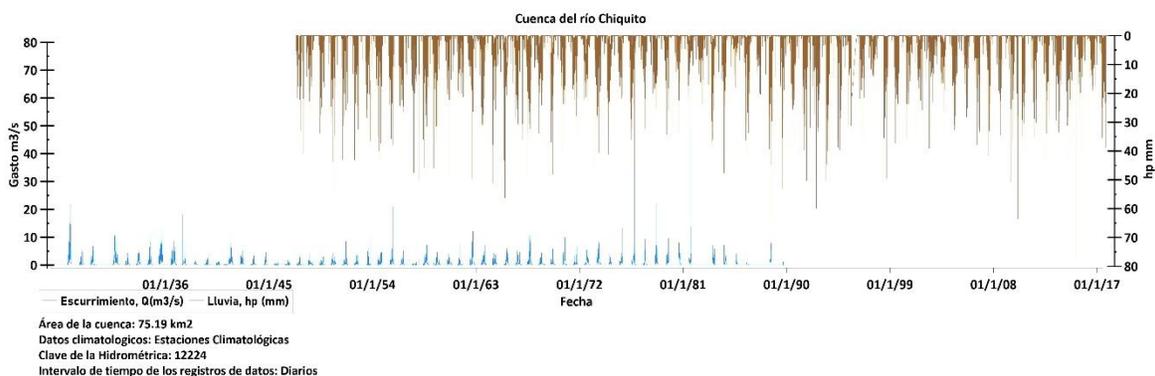
Figura 51. Procesamiento del modelo hidrológico para la cuenca del río Chiquito con ArcMap.

RESULTADOS

LLUVIA, ESCURRIMIENTO Y SIMULACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO CHIQUITO

De la estación 12224 “Chiquito” se analizaron datos a cada 24 horas (intervalo diario) del 01 de enero de 1927 al 31 de diciembre de 1989. Para los datos horarios, el intervalo de tiempo entre cada dato varía, algunos son cada 6 h y otros cada 4 h y desde el 01 de enero de 1927 al 14 de septiembre de 1989.

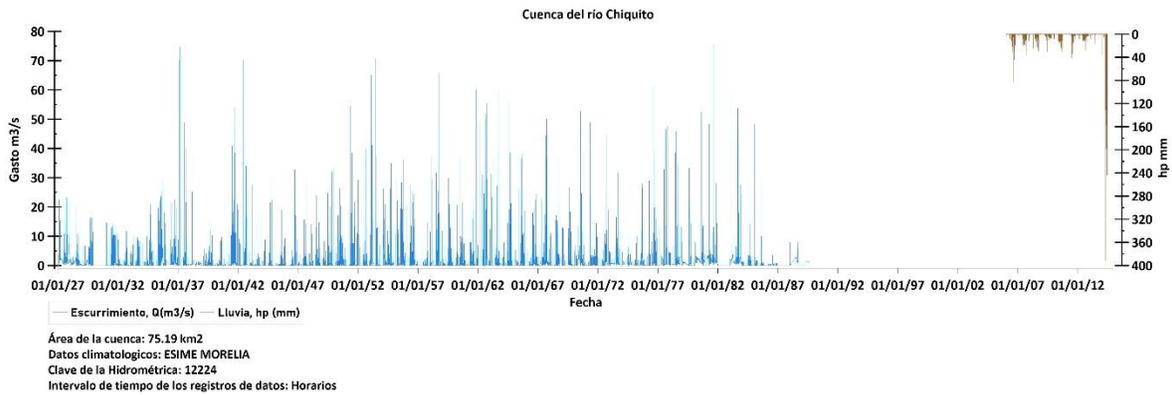
De la estación climatológica 12224 se tiene la lluvia del 08 de mayo de 1947 al 31 de diciembre de 2017.



Gráfica 33. Serie Lluvia-Escurrecimiento de la cuenca del río Chiquito, altura de precipitación (hp) y el caudal (Q) [Elaboración propia con datos del SMN y del BANDAS].

En la Gráfica 33 se tiene estos valores y se presenta la información Lluvia-Escorrimento del periodo del 01 de enero de 1927 al 31 de diciembre de 2017. Se observa que los picos de altura de precipitación coinciden con los picos de escurrimiento.

El periodo de datos de altura de precipitación de la ESIME Morelia es del 01 de enero del 2006 al 11 de junio de 2014. Estos datos horarios se presentan en la Gráfica 34, donde se observa que para esta cuenca no tenemos datos de lluvia y escurrimiento coincidentes en fechas.

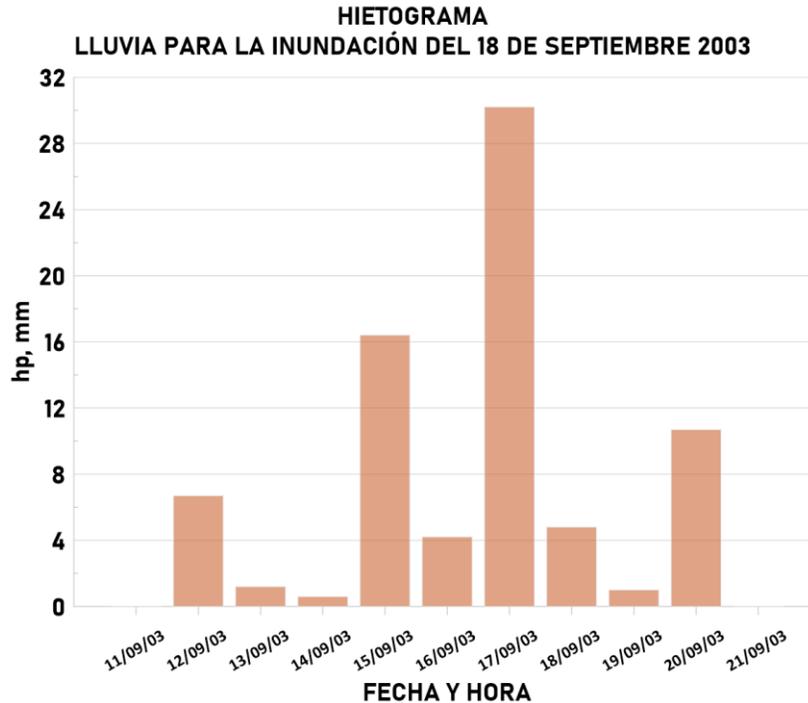


Gráfica 34. Serie de datos para el intervalo de tiempo horario Lluvia-Escorrimento de la cuenca del río Chiquito, altura de precipitación (hp) y caudal (Q) [Elaboración propia con datos del SMN y de BANDAS].

A continuación se presentan los gráficos de los eventos de lluvia que se presentaron en las fechas de las inundaciones súbitas. Esta será la información de entrada para la simulación para determinar la mancha de inundación.

Inundación del 18 de Septiembre de 2003

Según el reporte periodístico (Proceso, 18/09/2003), la lluvia ocurrida durante los días 16 y 17 de septiembre fue la que ocasionó la inundación. De acuerdo con los registros, la altura de precipitación acumulada en esos días fue de 34.4 mm (Gráfica 35). Sin embargo, se identificó una tormenta con una duración de 7 días y precipitación acumulada al 18 de septiembre de 64.1 mm.



Gráfica 35. Hietograma ocurrido en la inundación del 18 de septiembre del 2003 (intervalo de tiempo de 24 horas). [Elaboración propia con datos del SMN].

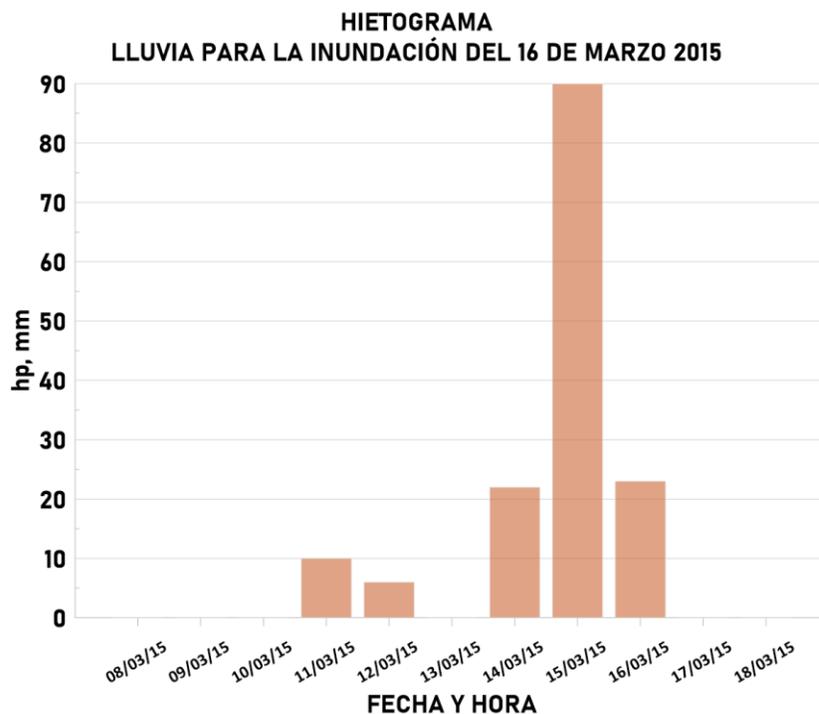
Inundación del 16 de Marzo de 2015

Según el reporte periodístico (Juárez, 16/03/2015), la lluvia del 14 y el 15 de marzo fueron las que ocasionaron la inundación. La altura de precipitación acumulada en esas fechas fue de 112.4 mm (Gráfica 36). Sin embargo, se registró una tormenta con una duración de 3 días y precipitación acumulada al 16 de marzo de 135 mm.

En Tabla 18 se resumen las intensidades de lluvia para las inundaciones reportadas en la cuenca del río Chiquito. En esta Tabla, la duración de la tormenta para el 8 de septiembre es de 6 días y para el 16 de marzo es de 3 días, para ambas inundaciones no se tiene registro de caudales ocurridos.

Tabla 18. Intensidades de las lluvias registradas en las fechas de las inundaciones reportadas en la cuenca del río Chiquito [Elaboración propia con datos del SMN].

Fecha	intensidad (mm/h)		gasto (m ³ /s)	profundidad máxima reportada de la inundación (m)
	24 horas	duración de la tormenta (6-3 días)		
18/09/2003	1.4	0.4	-	se reportó más de 1 m
16/03/2015	4.6	1.8	-	-



Gráfica 36. Hietograma ocurrido en la inundación del 16 de marzo del 2015 (intervalo de tiempo de 24 horas)
[Elaboración propia con datos del SMN].

DISCUSIÓN CUENCA RÍO CHIQUITO

La simulación de la mancha de inundación en la cuenca del río Chiquito no se desarrolló debido a la falta de datos de escurrimiento para realizar la validación. La falta de monitoreo y registro de las variables climáticas e hidrométricas frenó el objetivo de análisis de inundaciones súbitas para esta cuenca.

Se muestra en los hietogramas presentados que la presencia de lluvias en la cuenca, fueron de fuertes a muy fuertes (categoría de lluvia, según la clasificación de la SEMAR-SMN, Anexo 3), lo cual puede ser un factor directamente relacionado a la presencia de las inundaciones súbitas analizadas.

CAPITULO VII.

**PROTOCOLO PROPUESTO PARA EL
ANÁLISIS DE INUNDACIONES
SÚBITAS**

PROTOCOLO PROPUESTO PARA EL ANÁLISIS DE INUNDACIONES SÚBITAS

Dada la falta de información de las lluvias para el pronóstico y análisis de lluvias, se propone el siguiente protocolo que permitiría el conocimiento de posibles inundaciones súbitas:

1. Recabar la información de las tormentas registradas para los intervalos de tiempo disponibles, preferentemente a cada 10 minutos (Estaciones Automatizadas). En caso de no disponer de esta información, existen metodologías para estimar lluvias con duración de horas a partir de lluvias de 24 horas, por ejemplo, Aranda, D. F. C. (1998) en el trabajo que realizó sobre la estimación estadística de la precipitación máxima probable, hace referencia al procedimiento estadístico desarrollado por Hershfield, D. M. (1962) que puede ser aplicado con series de datos mayores a 20 años de información, sin embargo, esta metodología se aprovecha para obtener aproximaciones.

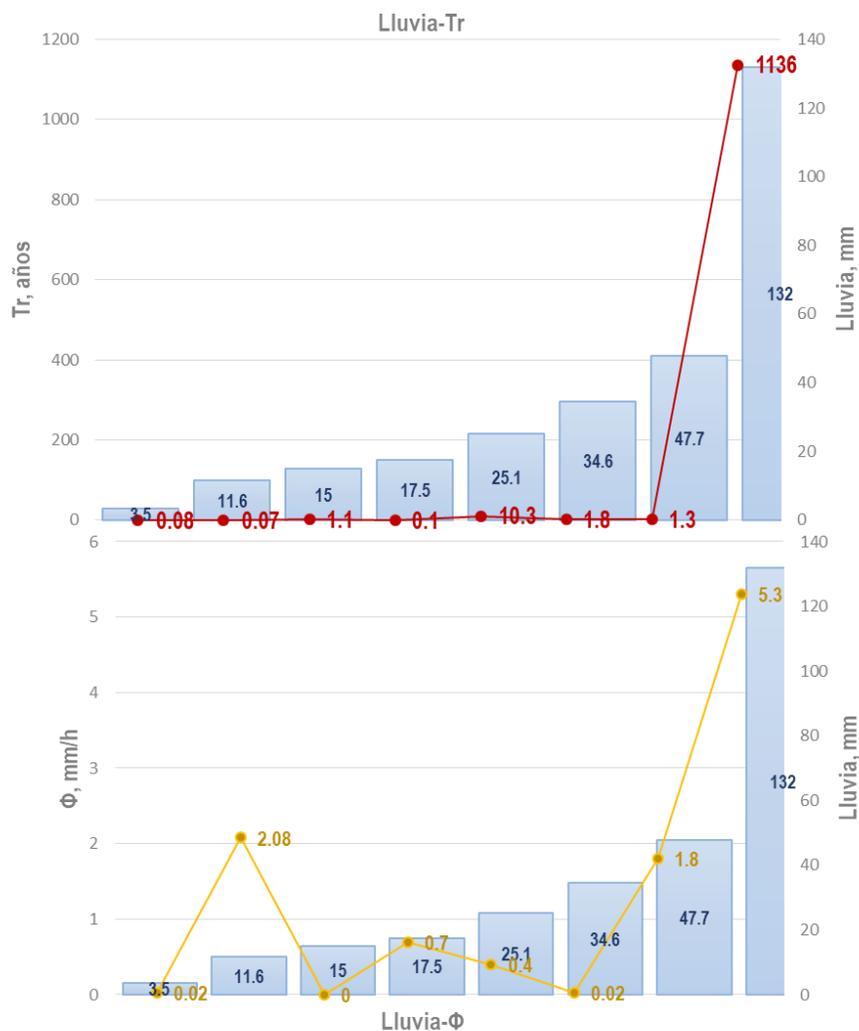
Esta tesis no considera obtener datos aproximados ya que no se tienen bases de datos medidas para validarlos y conocer el grado de confiabilidad de las aproximaciones que permitan relacionarlas con la ocurrencia de inundaciones súbitas.

2. Realizar los hietogramas con las tormentas registradas en: 28 días, 7 días y 1 día precedente(s) al análisis.
3. Determinar las tormentas que están actuando directamente en las diferentes zonas de la cuenca. Esto es, con la ubicación de las diferentes estaciones de lluvia identificar si las tormentas están provocando escurrimiento en diferentes tributarios de la cuenca de análisis. Esto es importante para definir si los registros de las tormentas se deben promediar o considerar las lluvias acumuladas registradas en las diferentes estaciones.
4. Una vez identificado el procedimiento para considerar las tormentas, aplicar un modelo lluvia-escurrimiento, preferentemente a un intervalo de tiempo horario, si es posible, esto para caracterizar las posibles inundaciones súbitas de acuerdo con su: caudal, profundidad y velocidad del agua, y área inundable.
5. Determinar el índice de infiltración (Φ) de las tormentas durante el periodo de análisis, por ejemplo durante toda la temporada de lluvias, o durante el mes más lluvioso. Cuando se tengan tormentas para las que el índice de infiltración en la cuenca empieza a disminuir, es muy probable que a partir de valores <5 mm/h, se presente una inundación súbita. Esto de acuerdo al análisis en la región Lerma-Santiago (Tabla 19).

Tabla 19. Periodo de Retorno (Tr) e índice de infiltración (Φ) de las tormentas en las cuencas analizadas.

Cuenca	Fecha	Lluvia, mm	Tr , años	Φ , mm/h
San Juan de Dios	10/08/2009	3.5	0.08	0.02
San Juan de Dios	02/09/2009	25.1	10.30	0.40
San Juan de Dios	11/08/2013	15.0	1.10	0.00
La Laja	03/09/2001	11.6	0.07	2.08
La Laja	23/08/2003	47.7	1.30	1.80
La Laja	30/09/2006	132.0	1136.00	5.30
La Laja	11/06/2013	17.5	0.10	0.70
Tejalpa	09/06/2013	34.6	1.80	0.02

6. Determinar el periodo de retorno de las tormentas analizadas y realizar una gráfica de lluvia-índice de infiltración-periodo de retorno para identificar los posibles casos de inundaciones súbitas.



Gráfica 37. Gráfica de lluvia-índice de infiltración-periodo de retorno de los eventos de inundaciones de la RH12 LS.

7. Realizar las simulaciones transitando las avenidas correspondientes a las tormentas identificadas en el punto anterior y validarlas con la información de la hidrometría registrada en la cuenca.

CONCLUSIONES

Las inundaciones súbitas analizadas en la RH12 LS se presentaron en la temporada de lluvias, en los meses de junio, julio, agosto y septiembre, en los años: 1994, 2001, 2003, 2006, 2009, 2013, 2017, 2018, y una en época de estiaje en marzo de 2015. Estas inundaciones tuvieron profundidades máximas entre 0.5 y 3.3 m afectando a los siguientes municipios: en Aguascalientes: Calvillo, El Llano, Pabellón de Arteaga y San Francisco de Los Romo; en el Estado de México: Lerma, Metepec, Oztoltepec, Toluca y Zinacantepec; en Guanajuato: Abasolo, Irapuato, León, Manuel Doblado, Pénjamo, Romita y San Francisco del Rincón; en Jalisco: Encarnación y Guadalajara; en Michoacán: Morelia y Zamora; y en Querétaro: Querétaro. En el municipio de Irapuato, Guanajuato, se tiene el reporte de una inundación el 18 de agosto de 1973 de la cual no se tuvo información para hacer su análisis. De acuerdo con las simulaciones realizadas, el uso de suelo afectado y las intensidades de las lluvias fueron como se menciona a continuación:

- Cuenca San Juan de Dios: en el centro de la cuenca que es una de las zonas más planas, se afectaron carreteras, zonas próximas a las márgenes del río, con profundidades de inundación entre 1 y 3 m. En la zona alta se tuvieron profundidades de 0.5 m que afectaron carreteras y caminos. Intensidades máximas: 36.8 mm/h (obtenida con registro de lluvias a cada 10 min) y 3.4 mm/h (obtenida con registros diarios de lluvia). El índice de infiltración promedio de la cuenca de acuerdo a los eventos estudiados es de 0.14 mm/h, resultado relacionado al uso de suelo urbano.
- Cuenca del río La Laja: en el centro izquierdo de la cuenca que es una zona de planicie y uso de suelo agrícola, con profundidades inundadas de hasta 1.6 m. En la zona industrial Benito Juárez se alcanzó una profundidad de 0.5 m. En zonas con grandes taludes “El Limonar” y “Bugambillas” se tuvieron hasta 1.3 m de profundidad. En las localidades “El Pueblito” y “Querétaro de Santiago” fueron desde 0.3 a 0.8 m, y en la parte baja de la cuenca se alcanzaron profundidades de 2.1 m. Intensidad máxima: 5.5 mm/h (obtenida con registros diarios de lluvia). El índice de infiltración promedio de la cuenca de acuerdo a los eventos estudiados es de 1.9 mm/h, resultado relacionado al uso de suelo para aprovechamiento agrícola.
- Cuenca del río Tejalpa: en la cabecera municipal ubicada parte baja de la cuenca con profundidad de 0.7 m. En los barrios Guadalupe y Vista Nevado I se tuvieron profundidades de 1.2 m, mientras que en el barrio de San Antonio Acahualco la profundidad alcanzó 0.6 m. En el barrio Los Carbajales 1era y 2da Secciones las profundidades fueron de 1.2 m. Intensidad máxima: 1.4 mm/h (obtenida con registros diarios de lluvia). No se tienen registros de lluvia para algún intervalo de tiempo. El índice de infiltración promedio de la cuenca de acuerdo a los eventos estudiados es de 0.02 mm/h, resultado relacionado al uso de suelo urbano.

- Cuenca del río Duero: en la zona plana de la cuenca con uso urbano, en las localidades Platanar, El Carajo y Lomas de Bosque se tuvieron 3 m de profundidad, misma que se desplazó hacia la carretera Lib. Zamora-Jacona Sur. En la comunidad El Llano se alcanzó 2.2 m de profundidad. Intensidad máxima: 4.7 mm/h (obtenida con registros diarios de lluvia).
- En la cuenca del río Chiquito no se tuvo suficiente información para poder realizar alguna simulación en las fechas donde se reportaron inundaciones súbitas. Sin embargo, en los reportes periodísticos se mencionan inundaciones con más de 1 m de profundidad en colonias de Morelia y en viviendas de Zamora.

De la delimitación de las unidades hidrológicas con *Physitel* se tiene un mayor número de unidades en comparación con las obtenidas con *ArcMap*. Para fines de análisis, los resultados no cambian con el número de unidades hidrológicas consideradas para cada cuenca de estudio, por lo que se empleó un modelo hidrológico global en cada cuenca de estudio de la RH12 LS, además de que ambos programas permiten adecuar las unidades hidrológicas de acuerdo con el objetivo del trabajo que se persiga, referente a esto, el software utilizado para la simulación de escurrimiento del modelo hidrológico global fue HecRas.

La ocurrencia de estas inundaciones súbitas están asociadas, en primer lugar, al crecimiento demográfico y establecimiento de la zona urbana muy próximas a los ríos principales de las subcuencas lo cual ha intensificado los conflictos para el orden a escala local, regional y nacional.

A partir del análisis de las lluvias de la RH12 LS que se presentaron durante los eventos de inundaciones, Tabla 19, se concluye que el promedio de lluvias máximas en 24 horas es de 21.6 mm las cuales ocurren mínimo 2 veces por año. El índice de infiltración como se hace mención en la metodología depende de la duración de la tormenta, por lo cual no se hace un comentario concluyente, sin embargo, importa resaltar que se existe el caso de no haber infiltración en la cuenca y esto puede estar directamente relacionado también al uso de suelo; como se ve en la Gráfica 37 la cantidad de lluvia es directamente proporcional al índice de infiltración.

En eventos extraordinarios la lluvia máxima en 24 horas registrada fue de 132 mm la cual se asocia a un periodo de retorno de 1136 años, presentando el mayor índice de infiltración que es de 5.3 mm/h, este evento tuvo lugar en la parte noreste de la RH12 LS (cuenca del río La Laja).

En términos generales, el comportamiento espacial y temporal de los desastres por inundaciones súbitas coincide con la decisión del espacio urbano y la fisiografía de la cuenca; los sectores más afectados son aquellos con pendientes pronunciadas y terrenos en zonas planas.

El desborde de los canales da pauta a inundar hacia las márgenes de los ríos que principalmente abarcan las vialidades de transporte aledañas a éstas.

La ocurrencia de las inundaciones está directamente asociada a las lluvias y éstas a su vez se intensifican ante fenómenos hidrometeorológicos extremos, en el (Anexo 2, (*Hurricane Database* de la NOAA, 2022)) se presentan algunos eventos hidrometeorológicos en el Océano Pacífico ya que en relación a la ubicación de la zona de estudio, cabe la posibilidad de que debido a la presencia de dichos eventos estos tenga relación directa con las inundaciones súbitas ocasionada por las lluvias durante el mismo, en las fechas de las inundaciones analizadas en esta tesis,

A pesar de cumplir con el objetivo de este trabajo que es la representación de las inundaciones súbitas en las cuencas de la región hidrológica número 12 Lerma-Santiago, para la identificación de peligro por inundaciones súbitas, es importante mencionar que la caracterización para eventos súbitos realmente resultó difícil por la falta de datos medidos, lo que responde a la pregunta de investigación y a través de esta tesis se recomienda a las futuras investigaciones utilizar registros de variables hidrometeorológicas e hidrométricas con intervalos de corto tiempo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alcántara-Ayala, I. (2019). Desastres en México: mapas y apuntes sobre una historia inconclusa. *Investigaciones geográficas*, (100).

Aparicio, F. (2018). Fundamentos de hidrología de superficie.

Aranda, D. F. C. (1998). Estimación estadística de la precipitación máxima probable en San Luis Potosí., *Tecnología y ciencias del agua*, 13(3), 45-46.

Baró-Suárez, J. E., Díaz-Delgado, C., Calderón-Aragón, G., Esteller-Alberich, M. V., & Cadena-Vargas, E. (2011). Costo más probable de daños por inundación en zonas habitacionales de México. *Tecnología y ciencias del agua*, 2(3), 201-218.

Comisión Nacional del Agua (2011). Manual para el control de inundaciones, Comisión Nacional del Agua.

Comisión Nacional del Agua. (2018). Atlas del Agua en México 2016. CDMX, México, Sistema Nacional de Información del Agua.

Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía (2008), Representación del relieve, (cartografía II), 16.

Flores Díaz, A. C., Bollo Manent, M., Hernández Santana, J. R., Montañó Salazar, R., Morales Manilla, L. M., Ortiz Rivera, A. & Silva Ramírez, D. (2017). Situación ambiental de la cuenca del Río Santiago-Guadalajara.

Frêne, C., & Oyarzún, C. (2014). Manejo Integrado de Cuencas Forestales. *Ecología Forestal: Bases para el Manejo Sustentable y Conservación de los Bosques Nativos de Chile*. Ediciones Universidad Austral de Chile, Ediciones Universidad Austral de Chile, 297-308.

Gobierno de Morelia, PPI, (2022). Programa de Prevención de Inundaciones 2022.

González, Sosa E. (2018). Propensión de las inundaciones históricas de los últimos 100 años en Querétaro. *DIGITAL CIENCIA @ UAQRO*, (11), 178-192.

Güitrón de los Reyes, A., Colorado Ruiz, G., & Cervantes Carretero, A. (2012). Nuevas tecnologías para prevención y análisis de inundaciones.

Güiza, F. y López, E., (2022). La ciudad de Morelia entre inundaciones y fallas geológicas: Impacto social, <https://www.ciga.unam.mx/index.php/publicaciones/item/358-rios-morelia-ejes-articuladores>

Hershfield, D. M. (1962). Extreme rainfall relationships. *Journal of the Hydraulics Division*, 88(6), 73-92.

He, M., & Hogue, T. S. (2012). Integrating hydrologic modeling and land use projections for evaluation of hydrologic response and regional water supply impacts in semi-arid environments. *Environmental Earth Sciences*, 65(6), 1671-1685.

INEGI (2014). Guía de interpretación de cartografía: edafología – Inegi.

Matías Ramírez, L. G., Oropeza Orozco, O., Lugo Hugo, J., Cortez Vázquez, M., & Jáuregui Ostos, E. (2007). Análisis de las principales causas de las inundaciones de septiembre de 2003 en el sur del estado de Guanajuato, México. *Investigaciones geográficas*, (64), 7-25.

OHMSTEDE, Antonio Escobar (2014). *Desastres agrícolas en México. Catálogo histórico, II: Siglo XIX (1822-1900)*. Fondo de Cultura Económica.

Olín Fabela, L. A. (2021). *Vulnerabilidad municipal por inundaciones en México*, 2015.

Oseguera, M. (2014), *Las inundaciones en la ciudad de Morelia 1986-1990*, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

PHR 2021-2024, CONAGUA, Programa Hídrico Regional 2021-2024 de la Región Hidrológica Administrativa VIII Lerma Santiago Pacífico.

Presidencia Municipal de Querétaro (2021). *Anuario Económico Municipal*, 7-20.

Rodríguez Vásquez, H. G. (2012). *Inundaciones en Zonas Urbanas, Medidas Preventivas y Correctivas, Acciones Estructurales y No Estructurales*. México: sn.

Serna, R. (2013). Jiménez, Blanca; Torregrosa, María Luisa; Aboites Aguilar, Luis (edits.), *El agua en México: cauces y encauces*. *Agua y Territorio/Water and Landscape*, (2), 128-129.

SEDATU, *Prevención de Riesgos* (2013). *Atlas de Riesgos del Municipio de Zinacantepec*.

SEDATU, (2013). *Atlas de riesgos Naturales de Zamora Michoacán*.

SEGURIDAD, CNPC y CENAPRED (2021). *Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos*, Serie: Atlas Nacional de Riesgos, 16-17.

Uribe-Alcántara, Edgar Misael, María Alejandrina Leticia Montes-León, and Efraín García-Celis, (2010). "Mapa Nacional de índice de inundación." *Tecnología y ciencias del agua* 1, no. 2, 73-85.

UNDRR (2021). *Desafíos para la reducción del riesgo de desastres y avances en el cumplimiento de las metas del Marco de Sendai en América Latina y el Caribe*. Informe (2021), 43-46

Verdin, K. L., & Verdin, J. P. (1999). A topological system for delineation and codification of the Earth's river basins. *Journal of Hydrology*, 218(1-2), 1-12.

Vázquez Piombo, P., Burbano González, D., Flores Elizondo, R., Pfannenstein, B., Coccia, L., Sevilla Villalobos, S., & Solórzano Gil, M. (2015). *Transiciones territoriales, ciudad y campo: Reflexiones teóricas sobre el espacio contemporáneo*.

Villanueva L. R. (2019), *Guadalajara, Jalisco: Vulnerabilidad a Inundaciones*, GEOCALLI.

REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

BANDAS (2021), *Bases de datos hidrométricas*, Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales, consultado en mayo del 2021, recuperado de: <https://app.conagua.gob.mx/bandas/>

Blake, E. (10/09/2013). Hurricane Cosme (EP032013). National Hurricane Center Tropical Cyclone Report. National Oceanic and Atmospheric Administration, recuperado de <https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/index.php?season=2013&basin=epac>

CENAPRED (2021). Datos abiertos, Peligro por inundaciones a Nivel Municipal, consultado en junio 2021, recuperado de: <https://datos.gob.mx/busca/dataset/peligro-por-inundaciones-a-nivel-municipal>

CENAPRED (2023). Infografía “Inundaciones Súbitas”, consultado en abril de 2023, recuperado de <https://www.gob.mx/cenapred/documentos/infografia-inundaciones-subitas>

CEM, INEGI, 2021. Relieve Continental, Continuo de Elevaciones Mexicano, consultado en agosto 2021, recuperado de: <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>

CONABIO (2021). Portal de Geoinformación 2021, consultado en octubre 2021, recuperado de: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>

Data México (2022). Zinacantepec, municipio del estado de México, consultado en agosto 2022, recuperado de: <https://datamexico.org/es/profile/geo/zinacantepec#:~:text=La%20poblaci%C3%B3n%20total%20de%20Zinacantepec,%25%20mujeres%20y%2048.8%25%20hombres.>

INEGI (2021). Geografía y Medio Ambiente, Mapas, consultado agosto 2021, recuperado de: <https://www.inegi.org.mx/temas/>

CONAPO (2022). Consejo Nacional de Población, INEGI, recuperado de: <https://www.gob.mx/conapo/documentos/proyecciones-de-la-poblacion-de-los-municipios-de-mexico-2015-2030>

Maciel Flores R., Cortes J., Echauri E., Granados O., Martínez M., Rodríguez J.O., Rodríguez L., Rojas O. & Toscano J., 2016, “Amenazas Naturales en Jalisco”, Documento consultado en junio de 2021, recuperado de: <http://siga.jalisco.gob.mx/moet/SubsistemaNatural/AmenazasNaturales/amejal.htm>

NOAA (2022). National Oceanic and atmospheric Administration, Hurricane Database, recuperado de: https://www.aoml.noaa.gov/hrd/hurdat/Data_Storm.html

OMS (2021), Acción sanitaria en la crisis humanitarias, Organización Mundial de la Salud, consultado en junio del 2021, recuperado de: <https://www.who.int/hac/techguidance/ems/floods/es/>

SMN (2021). Resúmenes Mensuales de Temperaturas y Lluvia, consultado en octubre 2021, recuperado de: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>

REFERENCIAS DE NOTAS PERIODÍSTICAS

ADN40., (19/06/2019). Lluvias dejan inundaciones en Metepec, adn40, <https://www.adn40.mx/noticia/mexico/notas/2019-06-19-20-06/lluvias-dejan-inundaciones-en-metepec>

Álvarez, X., (22/09/2013). Guanajuato pide declarar zona de desastre en Pénjamo, El Universal, <https://archivo.eluniversal.com.mx/estados/2013/guanajuato-pide-declarar-zona-de-desastre-en-penjam-952814.html>

Bañuelos, C., (29/08/2008). Cuatro muertos por lluvias en Aguascalientes y Chihuahua, La Jornada, <https://www.jornada.com.mx/2008/08/29/index.php?section=estados&article=038n1est>

Bañuelos C., (20/09/2018). Tromba azota Encarnación de Díaz, Jalisco, El Clarinete, <https://www.elclarinete.com.mx/tromba-azota-encarnacion-de-diaz-jalisco/>

Chávez, M., (12/06/2013). Inundaciones en Querétaro dejan al menos 830 afectados, La Jornada, <https://www.jornada.com.mx/2013/06/12/estados/031n2est>

Chávez, M., (02/10/2006). Desalojan a 80 familias en Querétaro, La Jornada, <https://www.jornada.com.mx/2006/10/02/index.php?section=estados&article=039n3est>

Chávez, S., (02/09/2018). Desborde del río Lerma afecta mil casas en San Mateo Atenco, La Jornada, <https://www.jornada.com.mx/2018/09/02/estados/027n1est>

CON TEXTO NN, (16/08/2020). Inundación del 73 marcó la historia de los Irapuatenses, CON TEXTO NN, <https://www.contextonn.com/2020/08/irapuato/inundacion-del-73-marco-la-historia-de-los-irapuatenses/>

El Clarinete., (21/06/2015). Fotogalería de inundación en Pabellón de Arteaga, Aguascalientes, El Clarinete, <https://www.elclarinete.com.mx/fotogaleria-de-inundacion-en-pabellon-de-arteaga-aguascalientes/>

El Informador., (02/09/2009). Lluvia genera inundación en zona de Plaza del Sol, El Informador, <https://www.informador.mx/Jalisco/Lluvia-genera-inundacion-en-zona-de-Plaza-del-Sol-20090902-0040.html>

El Informador. (19/09/2013). Los desastres históricos en Jalisco, El Informador, <https://www.informador.mx/Jalisco/Los-desastres-historicos-en-Jalisco-20130919-0024.html>

El Informador, (23/08/2008). Lluvia provoca inundaciones en poblados del municipio de Encarnación de Díaz, El Informador, <https://www.informador.mx/Jalisco/Lluvia-provoca-inundaciones-en-poblados-del-municipio-de-Encarnacion-de-Diaz-20080823-0137.html>

El Sol de Irapuato, (29/09/2018). Se cumplen 5 años de la inundación de Pénjamo, El Sol de Irapuato, <https://www.elsoldeirapuato.com.mx/local/se-cumplen-5-anos-de-la-inundacion-de-penjam-2033975.html>

El Sol de Michoacán, (09/09/2019). Vigila SSP zonas afectadas por lluvias en Zamora, El Sol de Michoacán, <https://www.elsoldemorelia.com.mx/local/vigila-ssp-zonas-afectadas-por-lluvias-en-zamora-4155608.html>

El Sol de Toluca, (02/09/2018). Granizada causa inundación en Zinacantepec, El Sol de Toluca, <https://www.elsoldetoluca.com.mx/local/granizada-causa-encharcamientos-en-zinacantepec-1963656.html>

El Sol de Toluca, (09/09/2018). Nuevamente se registran inundaciones en San Mateo Atenco, El Sol de Toluca, <https://www.elsoldetoluca.com.mx/local/nuevamente-se-registran-inundaciones-en-san-mateo-atenco-1982181.html>

El Sol de Toluca, (04/06/2019). Lluvia causa inundaciones en varios puntos del valle de Toluca, El Sol de Toluca, <https://www.elsoldetoluca.com.mx/local/lluvia-causa-inundaciones-en-varios-puntos-del-valle-de-toluca-3718451.html>

Escalante Jorge, (22/09/2013). Resientes inundaciones Guanajuato, v|lex, <https://vlex.com.mx/vid/resiente-inundaciones-guanajuato-462451878>

F. Atilano. (21/06/2008), Inundaciones se triplican en la metrópoli, El Informador, <https://www.informador.mx/jalisco/Inundaciones-se-triplican-en-la-metropoli-20180621-0038.html>

García, S., (10/07/2017). Y otra vez San Mateo Atenco..., v|lex, <https://vlex.com.mx/vid/vez-san-mateo-atenco-685586557>

Juárez, I., (16/03/2015). Estragos en Michoacán y Guerrero por aguaceros, La Jornada, <https://www.jornada.com.mx/2015/03/16/estados/027n1est>

LEÓN, AYUNTAMIENTO, Atiende Municipio problemas por lluvias, LEÓN AYUNTAMIENTO 2021-2024, <https://enterate.leon.gob.mx/atiende-municipio-problematicas-por-lluvias/>

La voz de Michoacán (21/07/2019), Intensas lluvias en Zamora provocan inundación en un Walmart (video), Regional, <https://www.lavozdemichoacan.com.mx/regional/intensas-lluvias-en-zamora-provocan-inundacion-en-un-walmart-video/>

LJA.MX, (30/09/2018), Tormenta atípica afectó 35 viviendas de colonias en calvillo Aguascalientes, LJA.MX, <https://www.lja.mx/2018/09/tormenta-atipica-afecto-35-viviendas-de-colonias-en-calvillo-aguascalientes/>

López Dóriga., (17/09/2018). Lluvias provocan inundaciones en Guadalajara y Zapopan, Nacional, <https://lopezdoriga.com/nacional/lluvias-provocan-inundaciones-en-guadalajara-y-zapopan/>

Morales, J., (04/03/2015). Lluvias inundan San Francisco del Rincón, Artículo 7, <http://articulo7.net/noticias/nota-roja/lluvias-inundan-san-francisco-del-rincon/>

Noticias de Irapuato, (11/07/2018). Lluvias en Irapuato deja inundaciones, daños y caídas de árboles, Noticias de Irapuato, https://www.ahorravueltas.com/ciudades/37/noticias/detalle/?f=11_07_2018

NTX, (04/09/2018). Tromba causa estragos en Angamacutiro, Michoacán, INFORMADOR.MX, <https://www.informador.mx/mexico/Tromba-causa-estragos-en-Angamacutiro-Michoacan-20180904-0131.html>

Paniagua, F., (04/09/2001). Inundan las lluvias agro en Querétaro, v|lex, <https://vlex.com.mx/vid/inundan-lluvias-agro-queretaro-81360496>

Paniagua, F., (24/08/2003). Deja caos lluvia en Querétaro, v|lex, <https://vlex.com.mx/vid/deja-caos-lluvia-queretaro-81985158>

Proceso, (18/09/2003). Inundaciones en Morelia por tromba, Proceso, <https://www.proceso.com.mx/nacional/2003/9/18/inundaciones-en-morelia-por-tromba-79122.html>

Ramos, L., (16/06/2013). Lluvias dejan 3 mil damnificados y 40 colonias inundadas en Coahuila, Desalojan familias en Jalisco, La Jornada, <https://www.jornada.com.mx/2013/06/16/estados/031n1est>

Reforma, (25/10/2015). Se desborda presa en Aguascalientes, Reforma, https://diario.mx/Nacional/2015-10-25_8a15b22f/se-desborda-presa-en-aguascalientes/

Roldán, N., (18/09/2015). Lluvia provoca inundaciones en Lerma, Metepec y San Mateo Atenco, Agenda Informativa de México, <http://agendainformativa.com.mx/2015/18/09/lluvia-provoca-inundaciones-en-lerma-metepec-y-san-mateo-atenco/>

Salinas, J., (07/09/2006). Afectan las lluvias del martes cuatro municipios del estado de México, La Jornada, <https://www.jornada.com.mx/2006/09/07/index.php?section=estados&article=039n1est>

SEPOMEX, (22/09/2015). Riesgo por inundaciones, Periódico Oficial del Estado de Aguascalientes, <http://www.rinconderomos.gob.mx/assets/programa-estatal.pdf>

SEPOMEX, (22/09/2014). Riesgo por inundaciones, Periódico Oficial del Estado de Aguascalientes, <http://www.rinconderomos.gob.mx/assets/programa-estatal.pdf>

W Radio. (11/08/2009). Reportan inundaciones en zona metropolitana de Guadalajara, W Radio, https://wradio.com.mx/radio/2009/08/11/judicial/1249999020_859529.html

W Radio. (24/07/2007). Deja "Dalia" 200 damnificados e inundaciones en Michoacán, W Radio, https://wradio.com.mx/radio/2007/07/24/nacional/1185299940_457750.html

Nuestra Visión Noticias, (31/08/2018). Lluvias provocan deslave e inundaciones en Zamora, Nuestra Visión Noticias, <https://www.nuestravision.com.mx/index.php/component/videoflow/play/83904-lluvias-provocan-deslaves-e-inundaciones-en-zamora>

ANEXO 1

Los fenómenos hidrometeorológicos se pueden observar a partir de la cantidad de lluvia que se presenta y del escurrimiento que produce. Dos de los parámetros de análisis de este escurrimiento son su dirección y velocidad que se relacionan con un coeficiente de rugosidad "n". Este coeficiente es un índice que determina la resistencia del flujo de agua en un canal y se relaciona con el uso y tipo de suelo. En cada cuenca de estudio se determinó el coeficiente de acuerdo a los coeficientes de rugosidad.

Tabla A. 1. Tabla de coeficientes de rugosidad en zonas inundables con características de canales naturales y canales fabricados. (Ven-Te-Chow, 1959).

A. Canales Naturales	Mínimo	Normal	Máximo
A.1 Cursos secundarios (ancho de la superficie libre en crecida < 30 m)	0.025	0.035	0.060
A.2 Cursos en planicies inundadas			
A.2.1 Zonas de pastos, sin arbustos			
Pasto corto	0.025	0.030	0.035
Pasto alto	0.030	0.035	0.050
A.2.2 Zonas cultivadas			
Sin cultivo	0.020	0.030	0.030
Cultivos sembrados en línea en fase de madurez fisiológica	0.025	0.035	0.045
Cultivos sembrados a voleo en fase de madurez fisiológica	0.030	0.040	0.050
A.2.3 Zonas arbustivas			
Escasos arbustos y pasto abundante	0.035	0.050	0.070
Pequeños árboles y arbustos sin follaje (parada invernal)	0.035	0.050	0.060
Pequeños árboles y arbustos con follaje (fase vegetativa)	0.040	0.060	0.080
Arbustos medianos a densos durante la parada invernal	0.045	0.070	0.110
Arbustos medianos a densos durante la fase vegetativa	0.070	0.100	0.160
A.2.4 Zonas arbóreas			
Sauces densos, temporal invernal	0.110	0.150	0.200
Terreno claro con ramas sin brotes	0.030	0.040	0.050
Terreno claro con ramas con gran crecimiento de brotes	0.050	0.060	0.080
Zonas de explotación maderera con árboles caídos, poco crecimiento en las zonas bajas y nivel de inundación por debajo de las ramas	0.080	0.100	0.120
Zonas de explotación maderera con árboles caídos, poco crecimiento en las zonas bajas y nivel de inundación que alcanza a las ramas	0.100	0.120	0.160
B. Canales fabricados	Mínimo	Normal	Máximo
Cemento Limpio en la superficie	0.011	0.012	0.014
Cemento corrugado	0.021	0.025	0.030

ANEXO 2

En la siguiente tabla se presentan los eventos y el estado de ellos para las fechas en donde coinciden con algunas de las inundaciones analizadas en la tesis.

Tabla A. 2. Tabla de eventos hidrometeorológicos extremos del Pacífico en las fechas de algunas inundaciones analizadas [Elaboración propia con información de la NOAA].

Fecha de inundación	Evento	Año	Mes	Día	Hora	Estado
03 de septiembre de 2001	Huracán Flossie	2001	9	2	00:00	Depresión Tropical
	Huracán Flossie	2001	9	2	06:00	Disipado
23 de agosto de 2003	Huracán Ignacio	2003	8	22	12:00	Depresión Tropical
	Huracán Ignacio	2003	8	22	18:00	Depresión Tropical
	Huracán Ignacio	2003	8	23	00:00	Tormenta Tropical
	Huracán Ignacio	2003	8	23	06:00	Tormenta Tropical
	Huracán Ignacio	2003	8	23	12:00	Tormenta Tropical
	Huracán Ignacio	2003	8	23	18:00	Tormenta Tropical
18 de septiembre de 2003	Huracán Linda	2003	9	17	00:00	Tormenta Tropical
	Huracán Linda	2003	9	17	06:00	Depresión Tropical
	Huracán Linda	2003	9	17	12:00	Depresión Tropical
	Huracán Linda	2003	9	17	18:00	Depresión Tropical
	Huracán Linda	2003	9	18	00:00	Remanente bajo
	Huracán Linda	2003	9	18	06:00	Remanente bajo
	Huracán Linda	2003	9	18	12:00	Remanente bajo
	Huracán Linda	2003	9	18	18:00	Remanente bajo
24 de julio de 2007	Huracán Cosme	2007	7	23	00:00	Remanente bajo
	Huracán Cosme	2007	7	23	06:00	Remanente bajo
	Huracán Cosme	2007	7	23	12:00	Remanente bajo
	Huracán Cosme	2007	7	23	18:00	Remanente bajo
	Huracán Cosme	2007	7	24	00:00	Remanente bajo
	Huracán Cosme	2007	7	24	06:00	Remanente bajo
	Huracán Cosme	2007	7	24	12:00	Remanente bajo
	Huracán Cosme	2007	7	24	18:00	Remanente bajo
10 de agosto de 2009	Huracán Felicia	2009	8	9	00:00	Huracán
	Huracán Felicia	2009	8	9	06:00	Huracán
	Huracán Felicia	2009	8	9	12:00	Tormenta Tropical
	Huracán Felicia	2009	8	9	18:00	Tormenta Tropical
	Huracán Felicia	2009	8	10	00:00	Tormenta Tropical
	Huracán Felicia	2009	8	10	06:00	Tormenta Tropical
	Huracán Felicia	2009	8	10	12:00	Tormenta Tropical
	Huracán Felicia	2009	8	10	18:00	Tormenta Tropical
02 de septiembre de 2009	Huracán Jimena	2009	9	1	00:00	Huracán
	Huracán Jimena	2009	9	1	06:00	Huracán
	Huracán Jimena	2009	9	1	12:00	Huracán
	Huracán Jimena	2009	9	1	18:00	Huracán
	Huracán Jimena	2009	9	2	00:00	Huracán

	Huracán Jimena	2009	9	2	06:00	Huracán
	Huracán Jimena	2009	9	2	12:00	Huracán
	Huracán Jimena	2009	9	2	18:00	Huracán
11 de agosto del 2013	Huracán Henriette	2013	8	10	00:00	Tormenta Tropical
	Huracán Henriette	2013	8	10	06:00	Tormenta Tropical
	Huracán Henriette	2013	8	10	12:00	Tormenta Tropical
	Huracán Henriette	2013	8	10	18:00	Tormenta Tropical
	Huracán Henriette	2013	8	11	00:00	Tormenta Tropical
	Huracán Henriette	2013	8	11	06:00	Tormenta Tropical
	Huracán Henriette	2013	8	11	12:00	Depresión Tropical
	Huracán Henriette	2013	8	11	18:00	bajo
10 de julio de 2017	Huracán Eugene	2017	7	9	00:00	Huracán
	Huracán Eugene	2017	7	9	06:00	Huracán
	Huracán Eugene	2017	7	9	12:00	Huracán
	Huracán Eugene	2017	7	9	18:00	Huracán
	Huracán Eugene	2017	7	10	00:00	Huracán
	Huracán Eugene	2017	7	10	06:00	Huracán
	Huracán Eugene	2017	7	10	12:00	Huracán
	Huracán Eugene	2017	7	10	18:00	Huracán
02 de septiembre de 2018	Huracán Miriam	2018	9	1	00:00	Huracán
	Huracán Miriam	2018	9	1	06:00	Huracán
	Huracán Miriam	2018	9	1	12:00	Huracán
	Huracán Miriam	2018	9	1	18:00	Tormenta Tropical
	Huracán Miriam	2018	9	2	00:00	Tormenta Tropical
	Huracán Miriam	2018	9	2	06:00	Tormenta Tropical
	Huracán Miriam	2018	9	2	12:00	Depresión Tropical
	Huracán Miriam	2018	9	2	18:00	bajo

ANEXO 3

Clasificación de la precipitación acumulada en 24 horas. Tabla elaborada por la Secretaría de la Marina con fuente del Servicio Meteorológico Nacional.

Nivel	Lluvia acumulada en 24 horas	Categoría
0	0.1 a 25 mm	Lluvia
1	25.1 a 50.0 mm	Lluvia fuerte
2	50.1 a 75.0 mm	Lluvia muy fuerte
3	75.1 a 150.0 mm	Lluvia intensa
4	150.1 a 250.0 mm	Lluvia Torrencial
5	> a 250.1 mm	Lluvia Extraordinaria



Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

ACTA DE EXAMEN DE GRADO

No. 00105
Matrícula: 2193801868

DETERMINACIÓN DE INUNDACIONES SÚBITAS EN LA REGIÓN HIDROLÓGICA NÚMERO 12 LERMA-SANTIAGO, MÉXICO.

En la Ciudad de México, se presentaron a las 12:00 horas del día 1 del mes de septiembre del año 2023 en la Unidad Iztapalapa de la Universidad Autónoma Metropolitana, los suscritos miembros del jurado:

DRA. LUCIA GUADALUPE MATIAS RAMIREZ
DR. OSCAR ARTURO FUENTES MARILES
DR. ANTONIO ZOILO MARQUEZ GARCIA

Bajo la Presidencia de la primera y con carácter de Secretario el último, se reunieron para proceder al Examen de Grado cuya denominación aparece al margen, para la obtención del grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS (ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE)

DE: ERIKA HERNANDEZ VIVAR

y de acuerdo con el artículo 78 fracción III del Reglamento de Estudios Superiores de la Universidad Autónoma Metropolitana, los miembros del jurado resolvieron:

Aprobar

Acto continuo, la presidenta del jurado comunicó a la interesada el resultado de la evaluación y, en caso aprobatorio, le fue tomada la protesta.



ERIKA HERNANDEZ VIVAR
ALUMNA

REVISÓ

MTRA. ROSALBA SERRANO DE LA PAZ
DIRECTORA DE SISTEMAS ESCOLARES

DIRECTOR DE LA DIVISIÓN DE CBI

Roman Linares Romero
DR. ROMAN LINARES ROMERO

PRESIDENTA

Lucia Guadalupe Matias Ramirez
DRA. LUCIA GUADALUPE MATIAS RAMIREZ

VOCAL

Oscar Arturo Fuentes Mariles
DR. OSCAR ARTURO FUENTES MARILES

SECRETARIO

Antonio Zoilo Marquez Garcia
DR. ANTONIO ZOILO MARQUEZ GARCIA