



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL-HIDRÁULICA

PREDICCIÓN DE INUNDACIONES EN ZONAS URBANAS BASADA EN
INFORMACIÓN DEL MODELO WRF

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
JOMAE LAH MORALES RAYO

TUTOR
M.I. JOSÉ MANUEL RODRÍGUEZ VARELA
INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA

JIUTEPEC, MORELOS. SEPTIEMBRE 2018

JURADO ASIGNADO:

Presidente: DR. FELIPE IGNACIO ARREGUÍN CORTÉS
Secretario: DR. ADRIÁN PEDROZO ACUÑA
Vocal: M. I. JOSÉ MANUEL RODRÍGUEZ VARELA
1 er. Suplente: DR. ALDO IVÁN RAMÍREZ OROZCO
2 do. Suplente: M. I. CLAUDIA ELIZABETH CERVANTES JAIMES

Lugar o lugares donde se realizó la tesis:
JIUTEPEC, MORELOS. UNAM, CAMPUS MORELOS

TUTOR DE TESIS:

M.I. JOSÉ MANUEL RODRÍGUEZ VARELA

FIRMA

Dedicatoria

A mi papá José Morales por sus enseñanzas y conocimiento compartido en esta vida.

A mi mamá Mary Rayo por su apoyo incondicional, sus enseñanzas y amor que ha tenido en cada etapa de mi vida.

A mis hermanos por su amistad, ejemplo y motivación para cumplir las metas que nos hemos propuesto.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca de estudio de maestría otorgada.

A la Universidad Autónoma Nacional de México por darme la oportunidad de desarrollarme académicamente en la disciplina de la hidráulica, al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua por la información proporcionada del modelo WRF, al Organismo de cuenca Frontera Sur de la Conagua por otorgar los registros de las EMAS e Hidrométricas disponibles en la zona de estudio y A Computational Hydraulics International por la licencia otorgada del programa PCSWMM®.

A mi tutor el M.I. José Manuel Rodríguez Varela por su capacitación, tiempo y la confianza depositada en mí para la realización del tema de tesis.

Al M.I. Oscar Llaguno, M.I. Elizabeth Cervantes, M.C. Olivia Rodríguez y M.I. Juan Fco. Gómez, por su conocimiento compartido, tiempo y el apoyo recibido para resolver dudas durante el desarrollo del trabajo realizado.

A mis sinodales Dr. Felipe I. Arreguín, Dr. Adrián Pedrozo y Dr. Aldo Iván por su tiempo dedicado y las valiosas aportaciones realizadas al trabajo.

A mis compañeros y profesores por su amistad durante la estancia en el posgrado de la UNAM Campus IMTA.

Resumen

La predicción de inundaciones en zonas urbanas a partir del modelo Weather Research and Forecasting en su versión 3.6.1 (WRF v3.6.1) utilizado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) es el enfoque principal de este trabajo de tesis. Se presenta la metodología para la asociación del modelo WRF v3.6.1 y de Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAS) en un modelo de simulación hidrológica-hidráulica 1D-2D con el cual se generan los siguientes resultados: mapas de peligro por inundación y zonas propensas a desbordamientos en el río principal, ambos necesarios en un sistema de alerta temprana ante un evento hidrometeorológico, que sirva como herramienta de toma de decisiones.

Dado que la precipitación es un proceso complejo con una alta variabilidad espacial y temporal, y es necesaria su correcta estimación para calcular de forma adecuada y dinámica los procesos hidrológicos y por ende los hidráulicos, se plantea su estimación a partir de la relación Reflectividad (dBZ) -Intensidad (mm/hr). La primera de ellas se calculó con el modelo WRF v3.6.1 y la segunda se obtuvo mediante los registros de datos de las Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAS) de la zona de estudio. Para asociar ambas variables, se obtuvieron factores de corrección sobre las celdas del modelo WRF v3.6.1.

Para la parte hidrológica-hidráulica se utilizó un modelo de simulación unidimensional (1D) que permite considerar la infraestructura pluvial existente. Posteriormente se realizó la calibración del modelo hidráulico hasta obtener datos de valor aproximado a los medidos por la estación hidrométrica del sitio y realizando su validación mediante la obtención del coeficiente de Nash-Sutcliffe. Calibrado el modelo hidráulico unidimensional (1D) se generó el modelo hidráulico bidimensional (2D) el cual permite visualizar los escurrimientos superficiales en una zona urbana y la identificación de los sitios que son propensos a daños ante un evento de lluvia.

El caso de estudio considerado para la aplicación de la metodología fue la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, que se encuentra dentro de la cuenca del río Sabinal y frecuentemente sufre daños a causa de inundaciones. Para su aplicación se requirió contar con un Modelo Digital de Elevación de alta resolución (3 x 3 m), la discretización de la cuenca mediante la generación de subcuencas y microcuencas de aportación incluyendo sus parámetros geomorfológicos, el sistema de drenaje pluvial existente y la generación de secciones transversales del cauce.

La evolución temporal de la lluvia se obtuvo mediante el modelo WRF v3.6.1 y registros de las EMAS. Se presentan hietogramas de lluvia en 33 celdas dentro de la cuenca del río Sabinal, mediante un Sistema de Información Geográfica (SIG).

Se simularon tres eventos significativos, con precipitaciones acumuladas de 141.7 mm, 123.3 mm, y 81.6 mm, y que son las máximas ocurridas en esta cuenca en los últimos años (2015-2017). Estas simulaciones permitieron obtener la respuesta del río Sabinal,

tanto en la zona alta de la cuenca, como en el centro y norte de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez. Para estos eventos se generaron los mapas de peligro por inundación (alto, medio y bajo) a partir de la combinación de las variables velocidad (m/s) y tirante (m).

Debido a que el modelo WRF v3.6.1 tiene un alcance de pronóstico para las siguientes 120 h, a partir de su corrida, su uso como un sistema de predicción de inundaciones en zonas urbanas es factible, al usarlo en conjunto con un modelo hidrológico-hidráulico 1D - 2D.

Con la herramienta de pronóstico de precipitación ligada al modelo lluvia - escurrimiento (hidrológico – hidráulico) y con el uso del modelo 1D–2D, se identifican los puntos de mayor afectación por inundación. Con estos resultados las autoridades correspondientes podrán priorizar las medidas pertinentes para la protección de las personas y bienes, así como para identificar las medidas inmediatas no estructurales para el control de avenidas.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	Generalidades.....	1
1.2	Planteamiento del problema.....	2
1.3	Justificación.....	3
1.4	Objetivo de la investigación.....	3
1.4.1	Objetivos específicos.....	3
1.5	Hipótesis.....	4
1.6	Antecedentes en la estimación de lluvia distribuida.....	4
1.7	Fundamentos en la predicción de inundaciones.....	6
2	REDES DE MONITOREO HIDROMETEOROLÓGICO.....	8
2.1	Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAS).....	8
2.2	Estaciones climatológicas convencionales.....	9
2.3	Estaciones hidrométricas.....	10
2.4	Imágenes satelitales.....	10
2.5	Radares meteorológicos.....	10
2.5.1	Funcionamiento de un radar meteorológico.....	12
2.5.2	Estimación de lluvia por radar.....	13
2.6	Relación Z-R.....	14
3	DATOS DE LLUVIA DISTRIBUIDA. CON INFORMACIÓN DEL MODELO WRF v3.6.1.....	15
3.1	Modelo Weather Research and Forecasting (WRF).....	15
3.1.1	Modelo WRF-EMS.....	15
3.1.2	Modelos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN).....	16
3.1.3	Modelo WRF v3.6.1.....	17
3.1.4	Observaciones del modelo.....	19
3.1.5	Uniformidad de las mallas.....	19
4	MODELACIÓN NUMÉRICA EN LA HIDROLOGÍA E HIDRÁULICA URBANA ...	20
4.1	Modelos hidráulicos unidimensionales 1D.....	20
4.2	Modelación bidimensional (2D).....	21
4.3	Simulación hidrológica.....	22
4.3.1	Simulación hidrológica a través del SWMM5©, PCSWMM5© y XPSWMM5©.....	23

4.4	Modelos matemáticos de simulación unidimensional (1D) y bidimensional (2D)	25
4.5	Simulación en el programa PCSWMM®	26
5	METODOLOGÍA PARA EL PRONÓSTICO DE LLUVIA CON INFORMACIÓN DEL MODELO WRF v3.6.1 Y EMAS	28
5.1	Análisis y procesamiento del modelo WRF v3.6.1 en un sistema de información geográfica (SIG)	29
5.2	Análisis de los datos de las Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAS)	30
5.3	Ajuste de los datos de reflectividad del modelo WRF v3.6.1	32
5.4	Asociación de los datos de las EMAS y Reflectividad del modelo WRF v3.6.1	34
5.5	Hietograma de lluvia en la malla del modelo WRF v3.6.1	35
5.5.1	Configuración para asociar los datos registrados de lluvia con las Estaciones Meteorológicas Automáticas en un SIG	36
5.5.2	Configuración para asociar los datos de lluvia y las celdas del modelo WRF v3.6.1 en un SIG	37
5.6	Asignación del hietograma a las subcuencas	38
5.7	Generación del modelo lluvia-escurrimiento a través del programa PCSWMM®	39
5.8	Calibración del modelo hidrológico-hidráulico utilizando la herramienta SRTC	40
5.9	Validación del modelo calibrado	41
5.9.1	Coeficiente de Nash-Sutcliffe	41
5.9.2	Raíz del error cuadrático medio (RMSE)	41
5.10	Generación de mapas de peligro	42
5.11	Criterio considerado para la generación de mapas de peligro para zonas urbanas	43
6	APLICACIÓN A UNA ZONA URBANA	45
6.1	Zona de estudio-Tuxtla Gutiérrez	45
6.1.1	Estación Meteorológica Automática (EMAS)	45
6.1.2	Área de influencia de cada Estación Meteorológica Automática (EMA)	47
6.2	Estaciones hidrométricas ubicadas en el río Sabinal	48
6.3	Modelo Digital de Elevaciones	48
6.4	Levantamiento LIDAR con resolución de 3 x 3 m	49
6.5	Planimetría de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez	50

6.6	Generación de subcuencas y microcuencas de aportación	51
6.7	Características geomorfológicas de la cuenca	53
6.7.1	Uso de suelo.....	53
6.7.2	Área de las subcuencas	55
6.7.3	Pendiente de las subcuencas.....	55
6.7.4	Impermeabilidad de las subcuencas y microcuencas.....	56
6.7.5	Coeficiente de rugosidad para las subcuencas y microcuencas de aportación	57
6.7.6	Pendiente media del cauce principal sobre la zona urbana.....	60
6.8	Modelo WRF v3.6.1 aplicado en la zona de la cuenca del río Sabinal.....	61
6.8.1	Área de influencia del modelo WRF v3.6.1 a partir de las EMAS	61
6.9	Factores de corrección (F.C.) del modelo WRF v3.6.1 para la cuenca del río Sabinal.....	63
6.10	Factor de corrección (F.C.) para el evento del 2 de septiembre del 2016 (Hora UTC)	63
6.11	Factor de corrección (F.C.) para el evento del 22 de junio del 2017 (Hora UTC)	64
6.12	Datos de lluvia del Modelo WRF v3.6.1	65
6.12.1	Hietograma de lluvia del modelo WRF v3.6.1 para el evento del 2 de septiembre del 2016	65
6.12.2	Hietograma de lluvia del modelo WRF v3.6.1 para el evento del 23 de junio del 2017	69
6.13	Asignación de eventos de lluvias a las subcuencas del río Sabinal.....	73
6.13.1	Evento del 2 de septiembre del 2016	73
6.13.2	Evento del 23 de junio del 2017	78
7	RESULTADOS	83
7.1	Generación del modelo lluvia-escurrimiento	83
7.1.1	Evento del 2 de septiembre del 2016	83
7.1.2	Evento del 23 de junio del 2017	87
7.2	Integración del modelo hidrológico -hidráulico unidimensional (1D)	90
7.2.1	Evento del 2 de septiembre del 2016	93
7.2.2	Evento del 23 de junio del 2017	94
7.3	Calibración del modelo hidráulico	94
7.3.1	Calibración manual.....	95

7.3.2	Calibración con la herramienta SRTC	97
7.4	Generación del modelo de simulación hidráulica 1D-2D.....	99
7.5	Mapas de peligro por inundación	102
7.6	Predicción de inundaciones en zonas urbanas	116
7.6.1	Predicción hidrológica.....	116
7.7	Análisis del modelo unidimensional 1D para los diferentes eventos	116
7.7.1	Distribución de la lluvia en el modelo 1D.....	117
7.7.2	El uso del modelo 1D y 2D en la predicción de inundaciones	124
7.7.3	Datos hidráulicos del modelo 1D	126
7.7.4	Zonas que presentan desbordamientos en el río Sabinal.....	133
7.8	Análisis del modelo bidimensional	149
7.9	El uso del modelo WRF v3.6.1 en la predicción de inundaciones.....	154
7.10	Difusión de la información.....	155
8	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	156
8.1	Conclusiones.....	156
8.2	Recomendaciones.....	158
9	BIBLIOGRAFÍA.....	160
10	Anexo A. Datos de lluvia asignados a las celdas del modelo WRF v3.6.1	165
11	Anexo B. Parámetros del método de Horton	182
12	Anexo C. Evento del mes de septiembre del 2016.....	183
13	Anexo D. Parámetros de las subcuencas antes de la calibración	189
14	Anexo E. Parámetros de las subcuencas calibrados con la herramienta SRTC	196
15	Anexo F. Parámetros de las subcuencas considerando el suelo húmedo	203

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1.1 Atlas Nacional de riesgo por inundación de la República Mexicana (Conagua, 2011)	1
Ilustración 1.2 Impactos económicos anuales de los desastres 2000-2015 (mdp) ³ . Fuente: (Cenapred, 2015)	2
Ilustración 2.1 Cobertura de la red de Estaciones Meteorológicas Automáticas en la República Mexicana. Fuente: elaboración propia con datos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN)	9
Ilustración 2.2 Cobertura de las estaciones climatológicas convencionales en la República Mexicana. Fuente: elaboración propia con datos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN)	9
Ilustración 2.3 Red de estaciones hidrométricas en las República Mexicana. Fuente: elaboración propia con datos del Bandas del IMTA	10
Ilustración 2.4 Radares meteorológicos en la República Mexicana. (http://smn.cna.gob.mx)	12
Ilustración 2.5. Estimación cuantitativa de precipitación, a) Información de radar, b) información de radar y satélite y c) información de pluviómetros, radar y satélite. Fuente: (MetEd, 2017)	13
Ilustración 3.1 Datos de lluvia con una proyección de 5 días del modelo WRF-EMS. Fuente: http://clima.inifap.gob.mx	16
Ilustración 3.2 Datos de reflectividad del modelo de pronóstico numérico del modelo WRF. Fuente: http://smn.cna.gob.mx	17
Ilustración 3.3 Datos de lluvia con una proyección de 5 días del modelo WRF v3.6.1. Fuente: http://galileo.imta.mx	18
Ilustración 3.4 Distribución típica de un conjunto de estaciones meteorológicas en el estado de Guerrero. Fuente: (IMTA, 2013)	19
Ilustración 4.1 Fenómeno de escorrentía en el programa SWMM (fuente: (Gómez V. M., 2006))	23
Ilustración 4.2 Tránsito de los escurrimientos generados en una zona urbana (EPA, 2009)	26
Ilustración 4.3 a) Sistema dual de drenaje y b) Comportamiento ante una inundación del sistema. (Llaguno G., 2014)	27
Ilustración 5.1 Metodología para la predicción de inundaciones a partir de un modelo de lluvia distribuida	28
Ilustración 5.2 Procesamiento de los datos de reflectividad del modelo WRF v3.6.1 en un Sistema de Información Geográfica	30
Ilustración 5.3 Generación de la malla en shapefile del modelo WRF v3.6.1	30

Ilustración 5.4 Área de influencia de las EMAS con respecto a las celdas del modelo WRF v3.6.1	33
Ilustración 5.5 Factores de corrección obtenidos-Hora 4:30 UTC. Evento del 2 de septiembre del 2016.....	34
Ilustración 5.6 Lluvia (mm/hr) a considerar a partir de la relación Intensidad (mm/hr)-Reflectividad (dBZ).....	35
Ilustración 5.7 Obtención del Hietograma a partir de los datos de Reflectividad (dBZ) e Intensidad (mm/hr)	36
Ilustración 5.8 Asociación de EMAS con registros de lluvia en formato Shapefile	37
Ilustración 5.9 Asociación de datos de lluvia de EMAS en un Sistema de Información Geográfica.....	37
Ilustración 5.10 Asociación de hietogramas de las celdas del modelo WRF v3.6.1 en formato Shapefile	38
Ilustración 5.11 Asociación de hietograma de las celdas del modelo WRF v3.6.1 en un SIG	38
Ilustración 5.12 Ponderación por área para la obtención del hietograma para las subcuencas del río Sabinal	39
Ilustración 6.1 Ubicación de la cuenca del río Sabinal y de la zona urbana de Tuxtla Gutiérrez.....	45
Ilustración 6.2 Estaciones meteorológicas automáticas en la cuenca del río Sabinal	46
Ilustración 6.3 Área de influencia (km ²) de las 11 EMAS sobre la cuenca del río Sabinal	47
Ilustración 6.4 Ubicación de las estaciones hidrométricas en el río Sabinal	48
Ilustración 6.5 Modelo digital de elevaciones con resolución de 15 x 15m	49
Ilustración 6.6 Modelo digital de elevaciones con resolución de 3 x 3 m e incluye la delimitación del río Sabinal.....	50
Ilustración 6.7 Planimetría de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez	51
Ilustración 6.8 Generación de microcuencas de aportación. Fuente: (IMTA, 2014 a)	52
Ilustración 6.9 Delimitación de la cuenca del río Sabinal	52
Ilustración 6.10 Subcuencas y microcuencas de aportación de la cuenca del río Sabinal	53
Ilustración 6.11 Uso de suelo de la cuenca del río Sabinal	54
Ilustración 6.12 Área de las subcuencas y microcuencas de aportación de la cuenca del río Sabinal	55
Ilustración 6.13 Pendiente (%) de las subcuencas y microcuencas de aportación de la cuenca del río Sabinal.....	56
Ilustración 6.14 Porcentaje de impermeabilidad sobre las subcuencas y microcuencas de aportación.....	57
Ilustración 6.15 Coeficiente de rugosidad asignado de acuerdo con el uso de suelo	58

Ilustración 6.16 Coeficiente de rugosidad obtenido para el área impermeable denominado como n Impermeable	59
Ilustración 6.17 Coeficiente de rugosidad obtenido para el área permeable denominado como n permeable.....	59
Ilustración 6.18 Ubicación del cauce principal de la cuenca del río Sabinal.....	60
Ilustración 6.19 Ubicación geoespacial del modelo WRF v3.6.1 sobre la cuenca del río Sabinal	61
Ilustración 6.20 Polígonos de Thiessen para el evento de 2 de septiembre del 2016 (Horario UTC).....	62
Ilustración 6.21 Polígonos de Thiessen para el evento de 23 de junio del 2017 (Horario UTC).....	63
Ilustración 6.22 F.C. obtenidos en diferentes intervalos de tiempo del evento 2 de septiembre del 2016 (Hora UTC)	64
Ilustración 6.23 F.C. obtenidos en diferentes intervalos de tiempo del evento 23 de junio del 2017 (Hora UTC)	65
Ilustración 6.24 Gráfica de comparación de los datos observados de las EMA “Club Campestre” contra los datos del modelo WRF v3.6.1 con F.C.....	66
Ilustración 6.25 Gráfica de comparación de los datos observados de las EMA “San Juan “contra los datos del modelo WRF v3.6.1 con F.C.	67
Ilustración 6.26 Hietogramas del evento 2 de septiembre del 2016 a) celdas con identificador ID y b) hietogramas del modelo WRF v3.6.1 sobre la cuenca del río Sabinal	68
Ilustración 6.27 Comparación de hietogramas del modelo WRF v3.6.1 a) celdas analizadas, b) hietograma de la celda 10 y b) hietograma de la celda 24.....	69
Ilustración 6.28 Gráfica de comparación de los datos observados de las EMA “San Juan “contra los datos del modelo WRF v3.6.1 con F.C.	70
Ilustración 6.29 Gráfica de comparación de los datos observados de las EMA “Modulo 5 “contra los datos del modelo WRF v3.6.1 con F.C.	70
Ilustración 6.30 Hietogramas del evento 23 de junio del 2017 a) celdas con identificador ID y b) hietogramas del modelo WRF v3.6.1 sobre la cuenca del río Sabinal.....	71
Ilustración 6.31 Comparación de hietogramas del modelo WRF v3.6.1 a) celdas analizadas, b) hietograma de la celda 9, b) hietograma de la celda 14 y d) hietograma de la celda 23.....	72
Ilustración 6.32 Asignación de hietogramas en el programa PCSWMM-2D. a) Subcuenca 6, b) ponderación de los hietogramas y c) hietograma asignado a la subcuenca 6.....	74
Ilustración 6.33 Asignación de hietogramas en el programa PCSWMM® a) Subcuenca 11, b) ponderación de los hietogramas y c) hietograma asignado a la subcuenca 11	79

Ilustración 7.1 Evolución de la lluvia en las subcuencas. Evento del 2 de septiembre del 2016 en hora UTC	83
Ilustración 7. 7.2 Evolución de la lluvia en las subcuencas. Evento del 2 de septiembre del 2016 en hora UTC (continuación).....	84
Ilustración 7.3 Hidrogramas generados en las 297 subcuencas	84
Ilustración 7.4 Datos de escurrimiento obtenidos en las subcuencas a) subcuenca c11(permeable) y b) hidrograma (m^3/s) a partir del hietograma (mm/hr) asignado ...	85
Ilustración 7.5 Datos de escurrimiento obtenidos a) subcuenca c272 y b) hidrograma (m^3/s) a partir del hietograma (mm/hr) asignado	86
Ilustración 7.6 Evolución de la lluvia en las subcuencas del evento del día 23 de junio del 2017 en hora UTC	87
Ilustración 7.7 Evolución de la lluvia en las subcuencas del evento del día 23 de junio del 2017 en hora UTC (continuación).....	88
Ilustración 7.8 Hidrogramas generados en las subcuencas para el evento del 23 de junio del 2017.....	88
Ilustración 7.9 Modelo lluvia-escurrimiento a) subcuenca c180 (permeable) y b) hidrograma generado	89
Ilustración 7.10 Modelo lluvia-escurrimiento a) subcuenca c217 (impermeable) y b) hidrograma generado	90
Ilustración 7.11 Colectores pluviales de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas	91
Ilustración 7.12 Infraestructura pluvial en Tuxtla Gutiérrez. a) sistema de drenaje pluvial y b) perfil del río Sabinal.....	92
Ilustración 7.13 Modelación hidráulica. a) tirante en el nodo J1, b) perfil del río Sabinal y c) sección ubicada en la estación hidrométrica Parque Oriente	93
Ilustración 7.14 Modelación hidráulica. a) tirante en el nodo J1, b) perfil del río Sabinal y c) sección ubicada en la estación hidrométrica Parque Oriente	94
Ilustración 7.15 Comparación de los datos medidos por el modelo vs los datos registrados por la estación hidrométrica Parque Oriente	95
Ilustración 7.16 Comparación del modelo calibrado manualmente vs los datos registrados por la estación hidrométrica Parque Oriente	96
Ilustración 7.17 Parámetros ingresados para la calibración del modelo.....	97
Ilustración 7.18 Parámetros modificados para la calibración con la herramienta STRC	98
Ilustración 7.19 Comparación del modelo calibrado SRTC(J1) vs los datos registrado (J1 obs) por la estación hidrométrica Parque Oriente. Evento del 2 de septiembre del 2016	99
Ilustración 7.20 Comparación del modelo calibrado SRTC(J1) vs los datos registrado (J1 obs) por la estación hidrométrica Parque Oriente. Evento del mes de junio del 2017	99

Ilustración 7.21 Malla generada en la zona urbana de Tuxtla Gutiérrez para la modelación 2D (32.61 km ²)	100
Ilustración 7.22 Integración del modelo 1D-2D a) Generación de la malla rectangular de 15 m x 15 m, b) sistema de drenaje pluvial mayor (río Sabinal) y sistema de drenaje pluvial menor (colectores)	101
Ilustración 7.23 Tirantes máximos alcanzados en la zona urbana de Tuxtla Gutiérrez. Evento del 12 agosto del 2015	104
Ilustración 7.24 Tirantes máximos alcanzados considerando el suelo húmedo ajustando los parámetros de infiltración. Evento del 12 de agosto del 2015	105
Ilustración 7.25 Tirantes máximos alcanzados en la zona urbana de Tuxtla Gutiérrez indicado el sistema de drenaje pluvial ID. Evento del 2 de septiembre del 2016	106
Ilustración 7.26 Tirantes máximos alcanzados considerando el suelo húmedo ajustando los parámetros de infiltración. Evento del 2 de septiembre del 2016	107
Ilustración 7.27 Tirantes máximos alcanzados en la zona urbana de Tuxtla Gutiérrez indicado el sistema de drenaje pluvial ID. Evento del 23 de junio del 2017	108
Ilustración 7.28 Tirantes máximos alcanzados considerando el suelo húmedo ajustando los parámetros de infiltración. Evento del 23 de junio del 2017	109
Ilustración 7.29 Mapa de peligro asociado a un periodo de retorno de 31 años. Evento del 12 de agosto del 2015	110
Ilustración 7.30 Mapa de peligro asociado a un periodo de retorno de 31 años. Evento del 12 de agosto del 2015-Suelo húmedo	111
Ilustración 7.31 Mapa de peligro asociado a un periodo de retorno de 243 años. Evento del 2 de septiembre del 2016	112
Ilustración 7.32 Mapa de peligro asociado a un periodo de retorno de 243 años. Evento del 2 de septiembre del 2016- suelo húmedo.....	113
Ilustración 7.33 Mapa de peligro asociado a un periodo de retorno de 92 años. Evento del 23 de junio del 2017	114
Ilustración 7.34 Mapa de peligro asociado a un periodo de retorno de 92 años. Evento del 23 de junio del 2017-suelo húmedo.....	115
Ilustración 7.35 Intervalo donde se presentó la mayor precipitación en horario UTC a)19:20, b 19:40, c) 20:00 y d)	118
Ilustración 7.36 Máxima y mínima precipitación registrada en la cuenca del río Sabina. Evento del 12 de agosto del 2015	119
Ilustración 7.37 Intervalo donde se presentó la mayor precipitación en horario UTC a)1:10, b 1:40, c) 2:00 y d) 2:10	120
Ilustración 7.38 Precipitación máxima y mínima en la cuenca del río Sabinal. Evento del 2 de septiembre del 2016	121
Ilustración 7.39 Colonias donde se registró la máxima y mínima precipitación para el evento del 2 de septiembre del 2016	121

Ilustración 7.40 Intervalo donde se presentó la mayor precipitación en horario UTC a)23:40, b) 23:50, c)00:20 y d) 00:40	122
Ilustración 7.41 Precipitación máxima y mínima en la cuenca del río Sabinal. Evento del 23 de junio del 2017	123
Ilustración 7.42 Colonias donde se registró la máxima precipitación para el evento del 23 de junio del 2017	124
Ilustración 7.43 Flujo del sistema de calles en una tubería parcialmente llena, retomado de Mark et. al, (2004)	125
Ilustración 7.44 Datos hidráulicos - gastos y capacidad máxima en colectores pluviales: a) modelo calibrado, b) considerando el suelo húmedo y c) comparación de gastos. Evento del 12 de agosto del 2015	131
Ilustración 7.45 Datos hidráulicos - gastos y capacidad máxima en colectores pluviales: a) modelo calibrado, b) considerando el suelo húmedo y c) comparación de gastos. Evento del 2 de septiembre del 2016	132
Ilustración 7.46 Datos hidráulicos - gastos y capacidad máxima en colectores pluviales: a) modelo calibrado, b) considerando el suelo húmedo y c) comparación de gastos. Evento del 23 de junio del 2017	133
Ilustración 7.47 Gastos y tirantes obtenidos en las estaciones hidrométricas. Evento del 12 de agosto del 2016	134
Ilustración 7.48 Zonas de desbordamiento en el río Sabinal. Evento del 12 de agosto del 2015	135
Ilustración 7.49 Sitios que presentan desbordamiento en el río Sabinal-Suelo húmedo- Evento del 12 de agosto del 2015	136
Ilustración 7.50 Gastos y tirantes obtenidos en las estaciones hidrométricas. Evento del 2 de septiembre del 2016	137
Ilustración 7.51 Zonas de desbordamiento en el río Sabinal. Evento del 2 de septiembre del 2016.....	138
Ilustración 7.52 Sitios que presentan desbordamiento en el río Sabinal-Suelo húmedo- Evento del 2 de septiembre del 2016	139
Ilustración 7.53 Gastos y tirantes obtenidos en las estaciones hidrométricas. Evento del 23 de junio del 2017	140
Ilustración 7.54 Zonas de desbordamiento en el río Sabinal. Evento del 23 de junio del 2017	141
Ilustración 7.55 Sitios que presentan desbordamiento en el río Sabinal-Suelo húmedo- Evento del 23 de junio del 2017	142
Ilustración 7.56 Sitios propensos a desbordamientos sobre el río Sabinal. Evento del 12 de agosto del 2015.....	143
Ilustración 7.57 Sitios propensos a desbordamientos sobre el río Sabinal. - Suelo húmedo- Evento del 12 de agosto del 2015.....	144

Ilustración 7.58 Sitios propensos a desbordamientos sobre el río Sabinal. Evento del 2 de septiembre del 2016	145
Ilustración 7.59 Sitios propensos a desbordamientos sobre el río Sabinal. - Suelo húmedo- Evento del 2 de septiembre del 2016	146
Ilustración 7.60 Sitios propensos a desbordamientos sobre el río Sabinal. Evento del 23 de junio del 2017	147
Ilustración 7.61 Sitios propensos a desbordamientos sobre el río Sabinal. - Suelo húmedo- Evento del 23 de junio del 2017	148
Ilustración 7.62 Sitios afectados a partir de la modelación bidimensional realizada. Evento del 12 de agosto del 2015	151
Ilustración 7.63 Sitios afectados a partir de la modelación bidimensional realizada. Evento del 2 de septiembre del 2016	152
Ilustración 7.64 Sitios afectados a partir de la modelación bidimensional realizada. Evento del 23 de junio del 2017	153
Ilustración 7.65 Dependencias que participan en la difusión de la información para la predicción de inundación en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez	155

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1 Métodos de infiltración en los programas SWMM5© y PCSWMM5© (Fuente: adaptado de (IMTA, 2015))	24
Tabla 4.2 Programas de cómputo para análisis y tránsito de escurrimientos en zonas urbanas (adaptado de Llaguno G. (2014))	25
Tabla 5.1 Precipitación registrada del 2 de septiembre del 2016 en cada estación meteorológica automática. Hora UTC	31
Tabla 5.2 Precipitación registrada del 23 de junio del 2017 en cada estación meteorológica automática. Hora UTC	32
Tabla 5.3 Valores para el Criterio Nash-Sutcliffe. (Molnar, 2011)	41
Tabla 5.4 Valores establecidos para la generación de mapas de peligro. Fuente: (IMTA, 2015)	43
Tabla 6.1 EMAS de la cuenca del río Sabinal	46
Tabla 6.2 Información de las estaciones hidrométricas ubicadas en el río Sabinal... ..	48
Tabla 6.3 Porcentajes de impermeabilidad en zonas urbanas. (Fuente: Campos A.2015).....	56
Tabla 6.4 Coeficientes de rugosidad en flujo superficial. Fuente: (EPA, 2015).....	58
Tabla 6.5 Precipitación asignada a las subcuencas para el evento del mes de septiembre del 2016.....	74
Tabla 6.6 Datos de precipitación registrados por las EMAS del evento analizado....	77
Tabla 6.7 Precipitación asignada a cada subcuenca para el evento del mes de junio del 2017	79
Tabla 6.8 Datos de precipitación registrados por las EMAS del evento analizado....	82
Tabla 7.1 Características físicas de los colectores pluviales de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez.....	91
Tabla 7.2 incertidumbre (%) considerada en los parámetros de las subcuencas-calibración manual	95
Tabla 7.3 Incertidumbre consideradas para las subcuencas adaptado de: (James, 2005)	97
Tabla 7.4 Valores establecidos para la generación de mapas de peligro por inundación. Adaptado de (IMTA, 2015)	103
Tabla 7.5 Fases y ciclos de vigilancia y previsión inundaciones. Retomado de: (Aldana V., 2015):.....	116
Tabla 7.6 Curvas de Precipitación (hp mm) – Duración (d min) – Periodo de retorno (Tr años) para la cuenca del Sabinal. Fuente: (IMTA, 2015)	117
Tabla 7.7 Colonias donde se presentó la máxima precipitación (81.65 mm). Evento del 23 de junio del 2017	123
Tabla 7.8 Comparación de un modelo unidimensional vs bidimensional, fuente: (Cenapred, 2013)	124

Tabla 7.9 Tiempo requerido para la simulación 1D y 2D de los eventos.....	125
Tabla 7.10 Datos hidráulicos obtenidos - Precipitación promedio: 50.5 mm	126
Tabla 7.11 Datos hidráulicos obtenidos (considerando suelo húmedo) - Precipitación promedio: 50.5 mm	127
Tabla 7.12 Datos hidráulicos obtenidos - Precipitación promedio: 81.5 mm	127
Tabla 7.13 Datos hidráulicos obtenidos (considerando suelo húmedo) - Precipitación promedio: 81.5 mm	128
Tabla 7.14 Datos hidráulicos obtenidos - Precipitación promedio: 67.5 mm	129
Tabla 7.15 Datos hidráulicos obtenidos (considerando suelo húmedo) - Precipitación promedio: 67.5 mm	129
Tabla 7.16 Datos hidráulicos en las estaciones hidrométricas del río Sabinal. Evento del 12 de agosto del 2015	133
Tabla 7.17 Sitios que presentan desbordamiento en el río Sabinal. Evento del 12 de agosto del 2015.....	134
Tabla 7.18 Sitios que presentan desbordamiento considerando el suelo húmedo. Evento del 12 de agosto del 2015	135
Tabla 7.19 Datos hidráulicos en las estaciones hidrométricas del río Sabinal. Evento del 2 de septiembre del 2016	136
Tabla 7.20 Sitios que presentan desbordamiento en el río Sabinal. Evento del 2 de septiembre del 2016.....	137
Tabla 7.21 Sitios que presentan desbordamiento considerando el suelo húmedo. Evento del 2 de septiembre del 2016	138
Tabla 7.22 Datos hidráulicos en las estaciones hidrométricas del río Sabinal. Evento del 23 de junio del 2017	139
Tabla 7.23 Sitios que presentan desbordamiento en el río Sabinal. Evento del 23 de junio del 2017	140
Tabla 7.24 Sitios que presentan desbordamiento considerando el suelo húmedo. Evento del 23 de junio del 2017	140
Tabla 7.25 Sitios y colonias afectadas para el evento del 12 de agosto del 2015. Fuente: (El Universal, El Universal, 2015).....	149
Tabla 7.26 Sitios y colonias afectadas para el evento del 2 de septiembre del 2016. Fuente: (sinembargo.mx, 2016)	149
Tabla 7.27 Sitios y colonias afectadas para el evento del 23 de agosto del 2017. Fuente: (El Universal, 2017).....	150
Tabla 7.28 Tiempos requeridos para realizar la predicción de inundaciones en Tuxtla Gutiérrez Utilizando el Modelo WRF v3.6.1 y el modelo numérico de simulación 1D-2D en el programa PCSWMM®	154

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades

En la actualidad la República Mexicana está sujeta a diversas amenazas naturales que afectan a la sociedad y por ende tienen un impacto socioeconómico, entre los fenómenos hidrometeorológicos que más afectan se encuentra la sequía, temperatura extrema, ciclones y precipitaciones extremas.

Dentro de los principales problemas que generan los fenómenos meteorológicos con intensidad inusual, están las precipitaciones extremas, producto de huracanes, tormentas y depresiones tropicales, así como fenómenos convectivos. Dichas precipitaciones generan inundaciones que suelen producir severos daños a la población, vías de comunicación, a la infraestructura urbana, hidroagrícola, fauna, así como a diversas actividades económicas e incluso pueden ocasionar pérdidas de vidas humanas (IMTA, 2015) . De acuerdo con el Atlas Nacional de riesgo por inundación de la República Mexicana, el 8.24 % de la extensión territorial del país está sujeto a problemas por riesgo de inundaciones que en algunos casos coinciden con la ubicación de los grandes asentamientos urbanos en el territorio nacional (ver Ilustración 1.1).

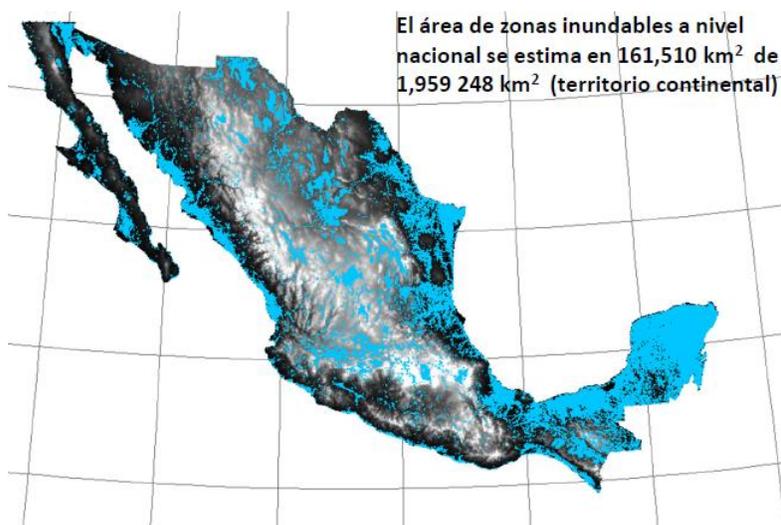


Ilustración 1.1 Atlas Nacional de riesgo por inundación de la República Mexicana (Conagua, 2011)

Las inundaciones también pueden ser provocadas por el desbordamiento de ríos, ascenso del nivel medio del mar, por la rotura de bordos, diques, presas o por las descargas de agua de los embalses. En épocas recientes se puede mencionar, como ejemplo de lo antes mencionado, el huracán Gilberto, que con intensas lluvias generó grandes avenidas en la zona Noreste del país, principalmente en el estado de Nuevo León (septiembre de 1988); el huracán Paulina que descargó más de 400 mm en aproximadamente 24 horas, en la Costa Grande de Guerrero y parte de Oaxaca (Octubre de 1997); la precipitaciones intensas y continuas de 1998 en la costa de Chiapas, generaron inundaciones, deslaves y arrastre de sedimentos, provocando el

mayor daño en las últimas décadas de dicha zona, afectando principalmente las cuencas de Coatán, Huehuetán, Huixtla, y Despoblado y por ende a toda la planicie costera, las principales ciudades y comunidades de la zona; el huracán Stan en 2005, ocasionó nuevamente inundaciones en el estado de Chiapas, en este suceso la Conagua y el Gobierno del Estado de Chiapas con recursos del Fondo Nacional de Desastres Naturales (Fonden), realizaron obras de infraestructura de protección en la márgenes del río Coatán, a la altura de la Ciudad de Tapachula y hasta la inmediaciones del poblado de Álvaro Obregón. Con estas obras, estas localidades han quedado protegidas ante eventos de esta naturaleza, hasta periodos de retorno de 100 años. Otros eventos importantes de mencionar son: la gran inundación en el estado de Tabasco del año 2007, y las inundaciones en diversos puntos del estado de Veracruz presentadas en el año 2010 (IMTA, 2015).

De acuerdo con un análisis exhaustivo de información recopilada por Centro Nacional de Prevención de Desastres (Cenapred) la Ilustración 1.2 muestra el impacto económico anual de desastres del 2000-2015 en la República Mexicana.

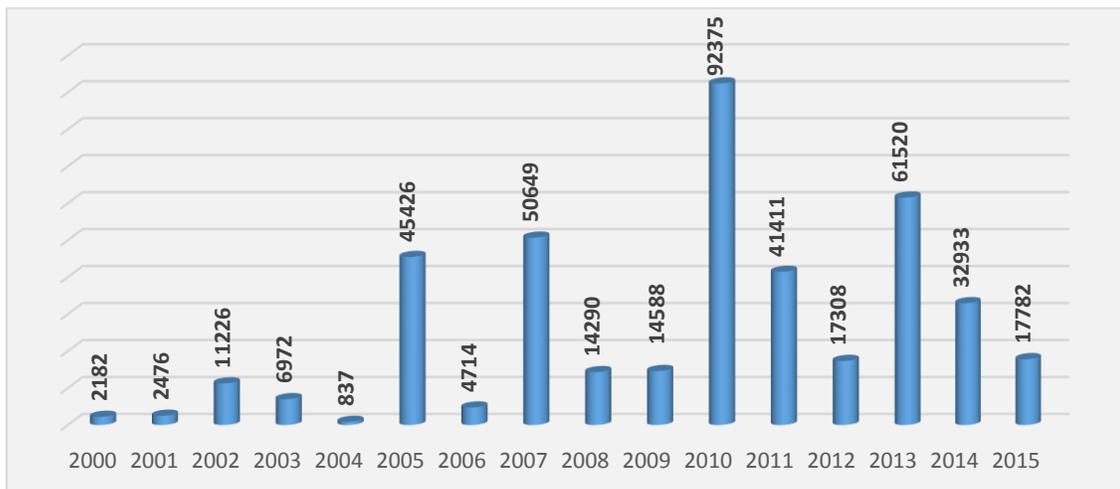


Ilustración 1.2 Impactos económicos anuales de los desastres 2000-2015 (mdp)³. Fuente: (Cenapred, 2015)

1.2 Planteamiento del problema

Los fenómenos hidrometeorológicos, específicamente aquellos con intensidades inusuales como lo son las precipitaciones extremas han provocado un gran problema a la sociedad, siendo las inundaciones las que ocasionan los desbordamientos en ríos, capas temporales de lámina de lluvia sobre superficies urbanizadas han generado tanto pérdidas económicas como vidas humanas.

La precipitación es un proceso complejo, con una alta variabilidad espacial y temporal. Estimar correctamente la evolución espacial y temporal de la precipitación es fundamental para poder estimar de forma acertada la dinámica de los procesos hidrológicos (Ivanov et. al, 2004).

Debido a estos problemas y a la baja densidad de las redes de medición en los que se ve afectada la población, existe la necesidad de contar con modelos numéricos que consideren una mejor representación espacial y temporal de la lluvia para el análisis hidrológico de una cuenca y su posterior uso en una simulación hidráulica 1D-2D aplicado a zonas urbanas que ayuden a la mitigación de daños producidos por precipitaciones extremas.

1.3 Justificación

Debido a la escasez de información espacial de los parámetros hidrológicos sobre las cuencas, tradicionalmente se han utilizado en México los modelos de parámetros concentrado que simplifican los procesos que ocurren dentro de la cuenca, al suponer la respuesta de ésta como lineal y promediando los parámetros más importantes. Lo anterior tiene la desventaja de tener poco fundamento físico y de generar información sobre la respuesta de la cuenca sólo hasta la salida, sin tomar en cuenta lo que ocurre en su interior, como el comportamiento espacial de la tormenta y su interrelación con las características de las distintas zonas de la cuenca (Baldemar M, 2005).

Actualmente en México el uso del modelo de predicción numérica del tiempo Weather Research and Forecasting (WRF) no ha sido empleado con fines hidrológicos. La utilización de la información de las variables (reflectividad, lluvia, humedad, etc.) del modelo WRF junto con los datos de lluvia medidos desde la superficie servirán para desarrollar un modelo de simulación hidráulica lluvia - escurrimiento 1D-2D que permitirá generar mapas de peligro por inundación en una zona urbana, éstos servirán como herramientas de toma de decisión de las autoridades competentes como lo es protección civil, para alertar a la población de los sitios más propensos a inundaciones y con esto prevenir daños que pudieran ser irreparables para la sociedad.

1.4 Objetivo de la investigación

Generar un modelo de simulación hidráulica 1D-2D para la predicción de inundaciones en zonas urbanas a partir del modelo Weather Research and Forecasting (WRF) y de Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAS) disponibles en el sitio de estudio.

1.4.1 Objetivos específicos

- I. Generar un modelo hidrológico, a partir de lluvia proveniente del modelo WRF v3.6.1 y de EMAS.

- II. Generar el modelo de simulación hidráulica unidimensional (1D) y calibración del mismo a partir de datos medidos por la estación hidrométrica Parque Oriente.

- III. Generar mapas de peligro por inundación a partir de un modelo de simulación hidráulica bidimensional (2D) los cuales puedan ser utilizados por los organismos encargados de la seguridad de la población, esto con el apoyo de herramientas de predicción de inundaciones ante un evento hidrometeorológico extremo como son: las precipitaciones generadas por tormentas, ondas tropicales o huracanes.

1.5 Hipótesis

La integración de lluvia distribuida producto del modelo WRF v3.6.1 con un modelo de simulación hidráulico 1D-2D para la generación de mapas de peligro por inundación en zonas urbanas, es un complemento para mejorar la estimación de la precipitación y con esto contribuir a la prevención y mitigación de daños a la población que se encuentre en riesgo ante un evento hidrometeorológico extremo.

1.6 Antecedentes en la estimación de lluvia distribuida

La Comisión Nacional del Agua (Conagua) a través del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) implementó una red de 13 radares meteorológicos para la medición y seguimientos atmosféricos constituidos por agua sobre la República Mexicana. Estos radares han sido utilizados principalmente por los meteorólogos y de acuerdo con la Conagua la red proporciona una cobertura del 70 % del territorio nacional, Actualmente, dos de los 13 radares, Sabancuy y El Mozotal, poseen la capacidad de doble polaridad, tecnología que permite obtener información de mejor resolución gráfica, disminuir la atenuación de la señal por problemas de potencia en fenómenos intensos y lograr datos más precisos del tipo de partículas, volumen y distribución espacial, con lo cual se pueda emitir un pronóstico más certero a corto plazo (SMN, 2017). En México el radar cerro la Catedral y el Mozotal han sido utilizados en el campo de la hidrología.

Baldemar M. (2005) hizo uso del radar cerro la Catedral para implementar una metodología que utilizó datos de precipitación estimados con radar para su empleo en un modelo hidrológico de parámetros distribuidos. Consideró eventos que contarán con datos de pluviógrafos y radar, para la calibración de los datos de radar, para esto utilizó la ecuación de Marshall-Palmer $z=200R^{1.6}$. Con el fin de determinar la relación Z-R y compararla con las diferentes ecuaciones que se utilizan actualmente como es la de Marshall-Palmer $Z=200 R^{1.6}$, propuso varios métodos de calibración basándose en los diferentes criterios propuestos en la literatura como lo es la calibración puntual, calibración de vecindad y calibración con retraso (Battan, 1973; Doviak, 1984; Calheiros, 1987; Rosenfeld, 1994; Collier, 1996; Atlas, 1997). Finalmente obtuvo las ecuaciones para lluvias convectivas ($z= 0.024 Z^{0.714}$) y lluvias estratiformes ($R=0.077 Z^{0.625}$) correspondiente a la cuenca del río Mixcoac de la cuenca del valle de México.

Realizó una modelación lluvia-escorrentamiento con un modelo de parámetros distribuidos y concluyó que los radares detectan áreas de precipitación que no siempre son registrados por los pluviógrafos debido a que los radares no necesitan de interpolación ni extrapolación espacial para proporcionar campos de lluvia.

Becerra Soriano, (2009) realizó la estimación de lluvia a partir de un análisis geoestadístico en la Ciudad de México utilizando datos de pluviógrafos y de radar meteorológico. Evaluó el método Krigeado para estimar precipitación combinando mediciones de radar y pluviógrafo. El Krigeado es un método que con frecuencia está asociado con el acrónimo BLUE término que designa al mejor estimador lineal insesgado por sus siglas en inglés Best Linear Unbiased Estimator (Kitanidis, 1997).

Acosta C. & Pérez H., (2011) hacen mención de los beneficios de utilizar el radar meteorológico como herramienta para la medición de precipitación espacialmente distribuida y cómo puede implementarse esa información en una modelación de una cuenca hidrológica utilizando el software HEC-HMS.

Campillo Díaz, (2009) realizó una modelación hidrológica a partir de datos de lluvia distribuidos en el software Hydrologic Modeling System (HEC-HMS). Utilizando la aplicación GeoHMS que permite la introducción de datos distribuidos de precipitación y características del terreno. El modelo del hidrograma unitario de Clark modificado para datos distribuidos denominado ModClark fue el utilizado, donde se requiere de tres parámetros para la determinación del hidrograma de la cuenca los cuales son el tiempo de concentración t_c , un coeficiente de atenuación por almacenamiento R y un histograma tiempo-área. Hicieron una comparación de un modelo distribuido y un modelo puntual aplicado en la cuenca Noguera Pallaresa ubicada al noroeste de la península ibérica en España, dentro de los resultados obtenidos fue que existe una gran diferencia debido a la falta de precisión de la toma de datos con pluviómetros de registro. La calidad de los datos de precipitación para el caso clásico es totalmente dependiente del lugar en el que este colocado el pluviómetro. Menciona que el trabajar con una modelación distribuida es una ventaja frente al trabajo con la modelación clásica en la que al haber una globalización de parámetros no se reflejan tan bien las características de la cuenca ni de la precipitación.

Russo et. al, (2017) muestra el desarrollo de un sistema de alerta temprana (SAT) para inundaciones urbanas (aplicado en la cuenca del arroyo de la represa y del río Huelo en la localidad de Marbella, España) que enlaza estimaciones de lluvia a corto plazo (nowcasting) en base a radar meteorológico con un modelo numérico de drenaje dual que permite la simulación conjunta del flujo unidimensional en alcantarillado y del flujo en superficie en dos dimensiones en tiempo real. El proyecto denominado PEARL (Preparing for extreme and Rare Events in Coastal regions) utiliza el modelo InfoWorks ICM de Innovyze el cual se calibró a través de una serie de sensores de nivel instalados. El modelo permite elaborar mapas de inundación y de peligrosidad para circulación de peatones y vehículos.

1.7 Fundamentos en la predicción de inundaciones

La modelación de las inundaciones es un proceso complejo donde intervienen múltiples factores tanto naturales como sociales. De ahí que el tratamiento o estudio que es necesario realizar y las acciones a emprender, para el desarrollo de la herramienta involucran elementos como el tratamiento de datos en tiempo real y diferido en diferentes frecuencias, información espacial y modelación matemática, todo ello integrado de una manera coherente. Disponer de forma confiable de los datos asociados a estos eventos es un aspecto esencial en el planteamiento de soluciones que atenúen los efectos de estos sucesos, de ahí que el tratamiento del dato primario medido en las instalaciones de campo y su procesamiento se encuentre dentro de las primeras etapas del desarrollo de los sistemas automáticos de alerta temprana (Garrido, 2012).

Un sistema de alerta temprana completo y efectivo se compone de elementos interrelacionados abarcando desde el conocimiento de los riesgos que se enfrentan hasta la preparación y la capacidad de respuesta, reforzados por mecanismos de comunicación efectivos. La falla de una de las partes puede conducir a la falla de todo el sistema (Cenapred, 2016).

Hoy en día, se posee una amplia variedad de modelos de simulación lluvia-escurrencimiento, algunos de ellos utilizan un enfoque en 1D y en 2D, y también existen otros que integran ambos modelos 1D-2D. La tecnología ha avanzado a un nivel en el que algunos programas presentan una imagen realista de la zona que se están investigando, ofreciendo una mejor perspectiva de las áreas que pueden ser inundadas. La calidad del simulador de inundaciones depende de su capacidad para describir el sistema físico, a partir de datos topográficos. Los modelos numéricos de predicción del tiempo son abstracciones de representaciones del mundo real aplicadas al tratamiento predictivo, que discretizan áreas o cuerpos en dos o tres dimensiones respectivamente, aplicando funciones aproximadas del comportamiento de las propiedades que se quieren estudiar y juegan un papel clave en el proceso de la predicción del tiempo (Alexander et. al, 2015).

Actualmente en México al referirnos a información de precipitación se cuenta con redes de monitoreo hidrometeorológico como lo son las EMAS, Estación Sinóptica Meteorológica (ESIME), estaciones climatológicas convencionales, Radares Meteorológicos, imágenes de satélite GOES y modelos de predicción numérica del tiempo como lo es el WRF. En muchas ocasiones para fines hidrológicos, se utiliza la información de las EMAS, ESIME y estaciones convencionales con lo cual queda descartado la información de imágenes satelitales y modelos de predicción numérica del tiempo que proporciona datos de lluvia de manera distribuida necesaria para la generación de un modelo de simulación hidrológica.

Un modelo numérico de pronóstico del tiempo consiste en cinco componentes principales (Alexander et. al, 2015):

- 1) Recopilación de datos (estaciones meteorológicas de superficie, boyas marítimas, datos de satélites, etc.).
- 2) Asimilación de datos (se realiza en cada institución meteorológica del mundo).
- 3) Predicción numérica del tiempo (a través de los modelos matemáticos de pronóstico).
- 4) Post-procesamiento de modelos de salida (intervención humana).
- 5) Presentación del pronóstico al usuario final (páginas web, difusión en los medios, etc.).

2 REDES DE MONITOREO HIDROMETEOROLÓGICO

El Servicio Meteorológico Nacional (SMN) es la dependencia del gobierno encargada de pronosticar, vigilar e informar acerca de los fenómenos meteorológicos que ocurren en los alrededores o en la superficie del país que pudieran afectar su estabilidad ante eventos extremos.

Su visión es “Vigilar la evolución de fenómenos meteorológicos e hidrológicos que pudieran incidir en los sitios ya vulnerados; asegurarse de que las redes de medición climatológica, hidrométrica y meteorológica continúen generando información útil para la toma de decisiones, realizar el pronóstico de precipitación y crecientes para anticipar las acciones en la atención a la emergencia” (Conagua, 2011).

El SMN recopila la información de las estaciones climatológicas del país para que se atiendan las solicitudes de diagnósticos climatológicos para el uso de los recursos con que cuenta la Dirección General para la Gestión de Riesgos del Fondo de Desastres Naturales (Fonden) para prevenir y atender un evento que pongan en riesgo a la ciudadanía.

2.1 Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAS)

La Estación Meteorológica Automática (EMA) está conformada por un grupo de sensores que registran y transmiten información meteorológica de forma automática de los sitios donde están estratégicamente colocadas. Su función principal es la recopilación y monitoreo de algunas Variables Meteorológicas para generar archivos del promedio de cada 10 minutos de todas las variables, esta información es enviada vía satélite en intervalos de 1 ó 3 horas por estación (SMN, 2017).

Dentro de las variables que registran las EMAS se encuentra la humedad relativa (%), la precipitación (mm), radiación solar (W/m^2), velocidad del viento (km/h), temperatura del aire ($^{\circ}C$) y presión atmosférica, esta información es medida desde la superficie de la tierra, siendo la precipitación (mm) la variable que permite determinar la cantidad de lluvia registrada ante un evento que se desea analizar. La Ilustración 2.1 muestra la cobertura de la red de las Estaciones Meteorológicas Automáticas de la República Mexicana.



Ilustración 2.1 Cobertura de la red de Estaciones Meteorológicas Automáticas en la República Mexicana.
Fuente: elaboración propia con datos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

2.2 Estaciones climatológicas convencionales

Las estaciones climatológicas convencionales son aquellas que transmiten y recopilan información de ciertas variables como lo son la precipitación (mm), temperatura (°C), unidades de calor (°D) y evaporación (mm). Dicha información se registra cada 24 hrs. Actualmente en la República Mexicana se cuenta con 5 500 estaciones climatológicas (Ilustración 2.2), de acuerdo con el Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2017).



Ilustración 2.2 Cobertura de las estaciones climatológicas convencionales en la República Mexicana.
Fuente: elaboración propia con datos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

2.3 Estaciones hidrométricas

La red de estaciones hidrométricas de la república mexicana está conformada de 1126 estaciones con datos desde 1997, esta información se puede obtener del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (Bandas) del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) a través del sitio web www.imta.gob.mx. La Ilustración 2.3 muestra la red de estaciones hidrométricas sobre la cobertura de la República Mexicana.



Ilustración 2.3 Red de estaciones hidrométricas en las República Mexicana. Fuente: elaboración propia con datos del Bandas del IMTA

2.4 Imágenes satelitales

Una imagen satelital o imagen de satélite se puede definir como la representación visual de la información capturada por un sensor montado en un satélite artificial. Estos sensores recogen la información reflejada por la superficie de la Tierra que luego es enviada de regreso a ésta y que, procesada convenientemente, entrega información sobre las características de la zona representada (SMN, 2017).

El Servicio Meteorológico Nacional en su sitio web smn.cna.gob.mx muestra dos tipos de imágenes de satélite, el GOES este y GOES Oeste.

2.5 Radares meteorológicos

El sistema RADAR cuyas siglas vienen de **R**adio **D**etection **A**nd **R**anging, y que se define como "Sistema de Radiodeterminación basado en la comparación entre señales radioeléctricas reflejadas o retransmitidas desde la posición a determinar", en otras palabras, el principio de funcionamiento de un Radar es la transmisión de una

determinada señal de Radiofrecuencia que incide en un objeto llamado "blanco", el cual refleja la señal en varias direcciones, una porción de esta señal "eco" es captada por un receptor, que puede ser la misma antena de transmisión, que se encarga de filtrar la señal de un cierto ruido "clutter", amplificarla y procesarla para obtener información del "blanco". Al medir el tiempo entre la señal transmitida y la recibida, así como por la posición de la antena, en elevación y azimut, se puede determinar la posición exacta del "blanco". El nivel de señal recibida proporciona la intensidad de reflectividad y por tanto el tipo del "blanco". (Conagua, 2017).

La red de radares meteorológicos con los que cuenta la República Mexicana (ver Ilustración 2.4): son los siguientes

- Radar Cerro Catedral (ubicado en el Estado de México, con un alcance máximo de 299 km)
- Radar del Servicio a la Navegación en el Espacio Aéreo Mexicano (Ubicado en el Estado de México, con un alcance máximo de 250 km)
- Radar CDMX (Ubicado en la ciudad de México, con un alcance máximo de 60 km)
- Radar Acapulco (Ubicado en el Estado de Guerrero, con un alcance máximo de 240 km)
- Radar el Mozotal (Ubicado en el Estado de Chiapas, con un alcance máximo de 240 km)
- Radar Sabancuy (Ubicado en el Estado de Campeche, con un alcance máximo de 299 km)
- Radar Querétaro (Ubicado en el Estado de Querétaro, con un alcance máximo de 200 km)
- Radar Guanajuato (Ubicado en el Estado de Guanajuato)
- Radar Puerto Ángel (Ubicado en el Estado de Oaxaca, con un alcance máximo de 299 km)

Actualmente los radares Cerro Catedral, Servicio a la Navegación en el Espacio Aéreo Mexicano, Radar CDMX, y el Mozotal se encuentran funcionando.

En el 2018 inició la operación del radar CDMX las imágenes de reflectividad pueden ser consultadas en tiempo real en las páginas del SACMEX y de Protección Civil capitalina (Cdmx, 2018).

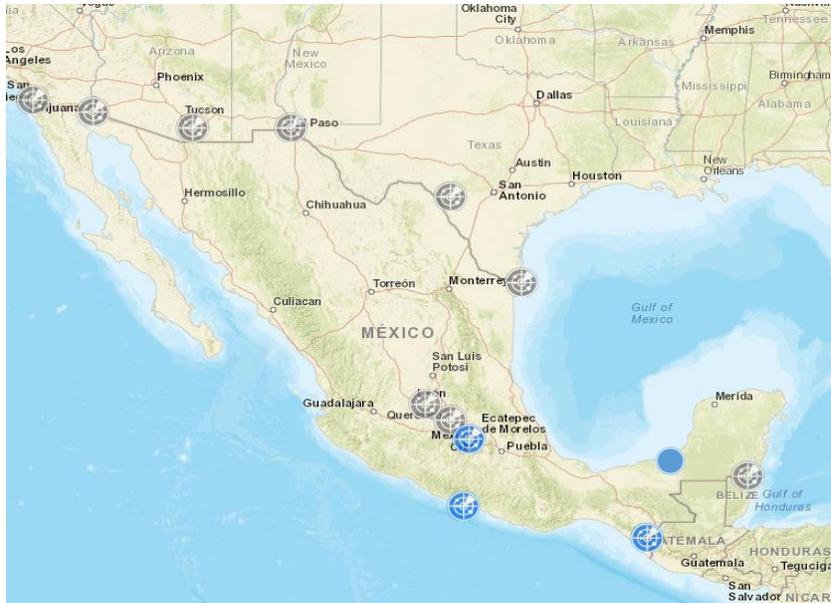


Ilustración 2.4 Radares meteorológicos en la República Mexicana. (<http://smn.cna.gob.mx>)

2.5.1 Funcionamiento de un radar meteorológico

El radar permite realizar la estimación cuantitativa de la precipitación (ECP) en un área (km^2) delimitada, este término se refiere a las precipitaciones observadas, (en inglés Quantitative Precipitation Estimation, QPE).

Siendo el radar una herramienta de percepción remota con una excelente resolución espacial y temporal, se aplica a la estimación cuantitativa de la precipitación. Sin embargo, la cobertura del radar puede diferir de un lugar a otro y según la naturaleza de cada tormenta individual (MetEd, 2017). Existen diferentes métodos y herramientas para la estimación cuantitativa de la precipitación (ECP), como lo son, estimación con datos pluviométricos, con radares meteorológicos y con información de satélite (Ilustración 2.5).



a)

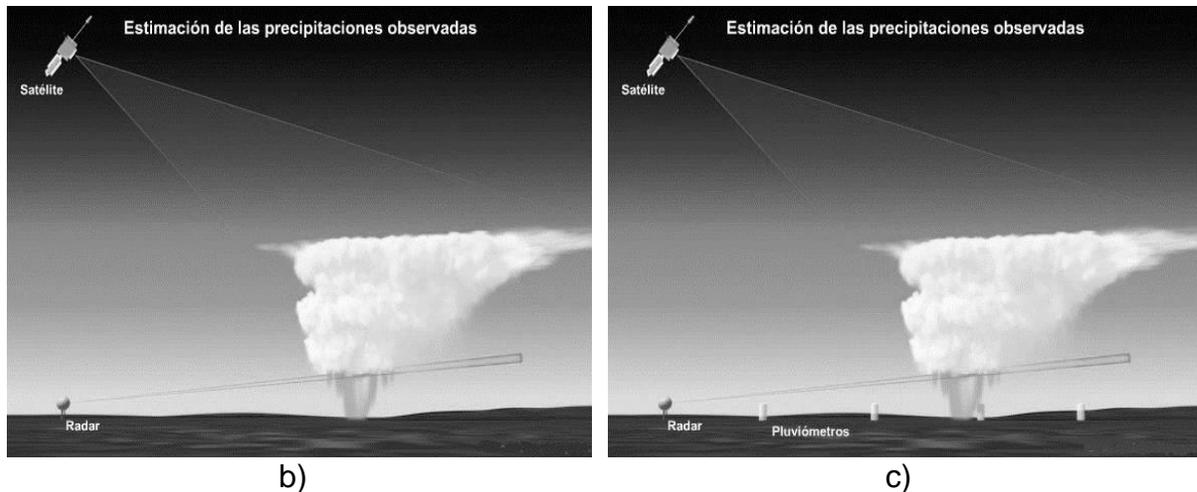


Ilustración 2.5. Estimación cuantitativa de precipitación, a) Información de radar, b) información de radar y satélite y c) información de pluviómetros, radar y satélite. Fuente: (MetEd, 2017)

2.5.2 Estimación de lluvia por radar

La utilización de radares meteorológicos en hidrología requiere la validación de sus datos, ya que el radar no mide directamente la lluvia y para su estimación se vale de la relación entre la reflectividad Z , medida a partir de la potencia recibida, que está relacionada con la distribución de tamaños de gotas en el volumen de muestreo, y la intensidad de la lluvia R medida en los pluviógrafos (Méndez, et. al, 2006).

La reflectividad Z se define como la suma de los diámetros a la sexta potencia de las gotas contenidas en el interior de un volumen, es decir, (UPC, 2017).

Ecuación 1

$$Z = \int_0^{\infty} N(D)D^6 dD$$

Donde:

Z = factor de reflectividad

D = diámetro de las gotas

$N(D)$ = número de gotas dado de un diámetro por metro cubico

El empleo del radar meteorológico para la estimación cuantitativa de la precipitación ha tenido un gran desarrollo en poco más de medio siglo. Quizás la aportación más importante fue la de Marshall y Palmer (1948), quienes caracterizaron la distribución de tamaños de gotas como una función simple de la intensidad de la lluvia y obtuvieron una relación entre la reflectividad del radar Z (mm^6/m^3) y la intensidad de lluvia R (mm/h) (Atlas et. al, 1997).

Ecuación 2

$$Z = 200R^{1.6} \quad (\text{Marshall y Palmer, 1948})$$

Intervalos de reflectividad

A causa de las variaciones que se producen en los valores de reflectividad como cuando ocurre una lluvia, o cuando simplemente hay nubes pero no generan lluvia (variaciones de reflectividad de 10^{-5} y 10), se emplea una escala logarítmica en decibelios de Z (dBZ) lo cual permite que su interpretación sea más fácil.

Ecuación 3

$$dBZ = 10 \log_{10} \frac{Z}{1mm^6/m^3}$$

De acuerdo con MetEd, (2017) la escala suele abarcar de -28 a +28 dBZ en modo aire claro y de 0 a 75 dBZ en modo de precipitación.

2.6 Relación Z-R

La reflectividad expresada en dBZ permite calcular la intensidad de lluvia R (mm/h) mediante la relación Z-R, con lo cual se obtiene la correlación de la reflectividad con la intensidad de lluvia dentro de un volumen de muestreo a partir de la siguiente ecuación:

Ecuación 4

$$Z = AR^b$$

Baldemar M. (2005) menciona que los valores de A y b son constantes empíricas, obtenidas a través de diversos ajustes del conjunto de pares de puntos de la relación Z-R para diferentes tormentas. Existen diferentes relaciones propuestas, pero dentro de las más conocidas se encuentran las de Marshall-Palmer (1948), Blanchard, (1953) y Jones (1956).

$Z = 200R^{1.6}$	Marshall y Palmer, 1948
$Z = 31R^{1.71}$	Blanchard, 1953
$Z = 486R^{1.37}$	Jones, 1956

3 DATOS DE LLUVIA DISTRIBUIDA. CON INFORMACIÓN DEL MODELO WRF v3.6.1

3.1 Modelo Weather Research and Forecasting (WRF)

El WRF es un modelo de predicción numérica del tiempo, diseñado para la investigación y para aplicaciones operativas. Diversas instituciones contribuyen a su desarrollo, con el firme objetivo de construir el modelo de pronóstico numérico de mesoescala de la siguiente generación, para lograr un avance en el entendimiento de los procesos atmosféricos y en la predicción de tiempo.

El modelo WRF ha sido diseñado principalmente por el National Center for Atmospheric Research (NCAR), la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), el National Center for Environmental Prediction (NCEP), el Earth System Research Laboratory (ESRL), la Air Force Weather Agency (AFWA), el Naval Research Laboratory (NLR) el Center for Analysis and Prediction Storms (CAPS) y la Federal Aviation Administration (FAA). El código del modelo está abierto a la comunidad y ha sido optimizado de manera que puede ser adaptado tanto en supercomputadoras que trabajan en paralelo como en computadoras portátiles de reciente generación. El modelo es versátil, y se puede usar en una gran diversidad de aplicaciones, tales como simulaciones ideales, simulaciones reales (predicción numérica del tiempo real), modelación de la calidad del aire y estudios de interacción océano-atmósfera mediante el acoplamiento con modelos oceánicos (Océano-Atmósfera-CCA-UNAM, 2018).

3.1.1 Modelo WRF-EMS

Actualmente en la República Mexicana el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias desarrolló su pronóstico numérico con el modelo WRF-EMS (versión 3.2) con una proyección de 5 días y resolución de 13 km (INIFAP, 2018).

Se inicializa todos los días a las 6:00 a.m. hora del centro. Como condiciones iniciales y de frontera se utiliza el pronóstico de las 0000 UTC del modelo global GFS (Global Forecast System). Estas simulaciones se encuentran en fase experimental y en proceso de validación, se ejecuta en un clúster compuesto por 2 servidores IBM. El pronóstico se actualiza diariamente alrededor de las 9:00 a.m. (INIFAP, 2018). La Ilustración 3.1 muestra los datos de lluvia para la República con este modelo.

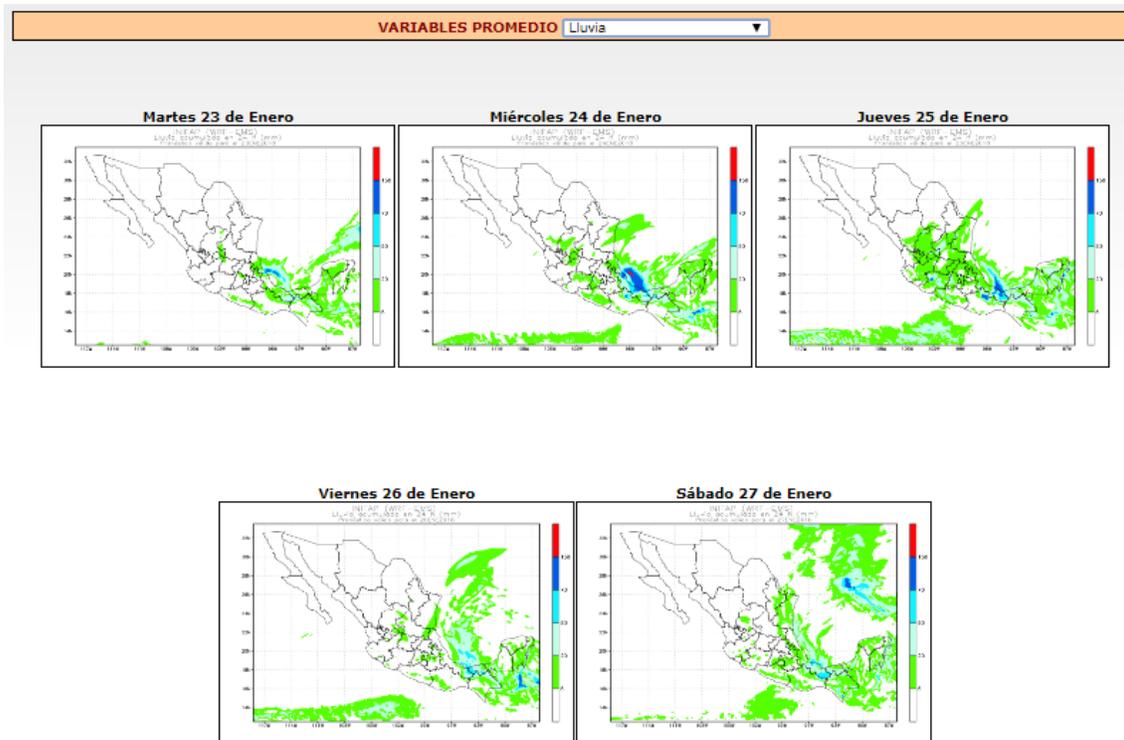


Ilustración 3.1 Datos de lluvia con una proyección de 5 días del modelo WRF-EMS. Fuente: <http://clima.inifap.gob.mx>

3.1.2 Modelos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

El Servicio Meteorológico Nacional cuenta con modelos de pronóstico numérico como lo son el Global Forecast System (GFS), European Center for Medium Range Weather Forecasting (ECMWF), Weather Research and Forecasting a 16, 8 y 4 km (WRF) y el Rapid Precision Mesoscale a 12 km (RPM) (Cenapred, 2016).

En el sitio web del SMN se pueden observar datos sobre la República Mexicana de los modelos GFS y WRF los cuales cuentan con diferentes variables como: la precipitación, precipitación acumulada, reflectividad, temperatura, líneas de flujo y humedad relativa, entre otras.

La Ilustración 3.2 muestra los datos de reflectividad del modelo WRF del SMN en horario UTC también llamado horario Z.

Modelos de Pronóstico Numérico

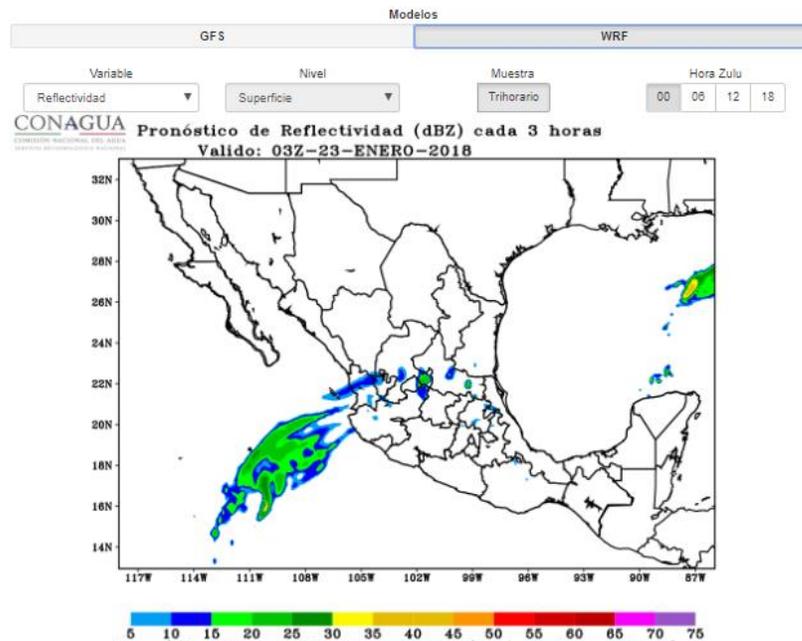


Ilustración 3.2 Datos de reflectividad del modelo de pronóstico numérico del modelo WRF. Fuente: <http://smn.cna.gob.mx>

3.1.3 Modelo WRF v3.6.1

El Instituto Mexicano de Tecnología del Agua cuenta con un modelo numérico de predicción del tiempo conocido como modelo WRF v3.6.1. Este modelo ha sido utilizado en diversos proyectos realizados por el IMTA para otras dependencias de gobierno.

Dentro de los proyectos generados se encuentra el Estudio Hidrológico para el pronóstico en ríos en cuencas del Organismo de Cuenca Pacífico Sur TH-1440.3. (IMTA, 2014 b), Servicios de asistencia especializada de cartas meteorológicas por ensamble del modelo Weather Research and Forecasting (WRF) y análisis hidrometeorológico TH-1631.3 (IMTA, 2016 b) e Implementación del modelo acoplado WRF-Hydro en una cuenca piloto de México TH-1613.1 (IMTA, 2016 a).

El modelo está conformado por un conjunto de celdas de diferente resolución en km, en las cuales cada celda contiene datos de la variable analizada como lo puede ser lluvia (mm) o reflectividad (dBZ). Abarca distintas regiones de la República Mexicana como lo son Estados y cuencas, así mismo se pueden establecer regiones definidas las cuales pueden analizar con una resolución mínima de 4 km en cada celda. La proyección del pronóstico del tiempo lo realiza hasta 120 horas, esto de acuerdo con su sitio web <http://galileo.imta.mx> (ver Ilustración 3.3).

La información del modelo WRF v3.6.1 se encuentra disponible en el sitio web donde se muestran las siguientes variables:

- Precipitación acumulada diaria
- Humedad relativa promedio a 2 m
- Temperatura de punto de rocío promedio
- Temperatura máxima en 24 horas
- Temperatura mínima en 24 horas
- Velocidad del viento promedio a 10 metros

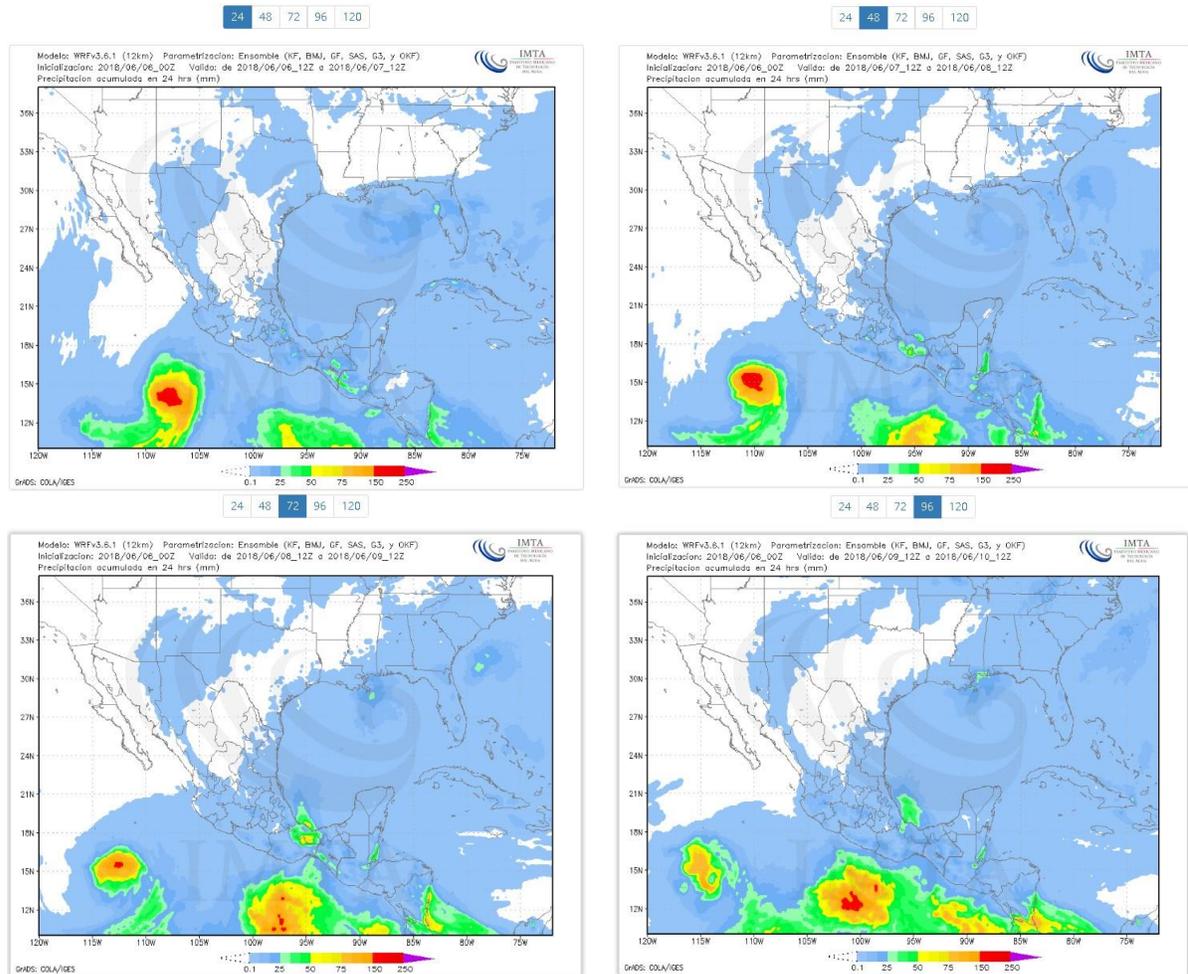


Ilustración 3.3 Datos de lluvia con una proyección de 5 días del modelo WRF v3.6.1. Fuente: <http://galileo.imta.mx>

Datos arrojados por el modelo

Cada parametrización representa una ejecución del modelo que tendrá como salida un conjunto de datos correspondientes a diversas variables definidas sobre una malla, típicamente rectangular uniformemente espaciada a un valor determinado en grados o en distancia. Usualmente estos datos se entregan en algún formato adecuado como el formato netCDF (IMTA, 2013). Para procesar los datos en un Sistema de Información Geográfica se requiere que la información esté en formato ASCII.

3.1.4 Observaciones del modelo

Las observaciones corresponden a un conjunto de estaciones distribuidas de manera irregular sobre la República Mexicana. Por ejemplo, la Ilustración 3.4 muestra la distribución de un conjunto de estas estaciones sobre el estado de Guerrero. Generalmente, las estaciones sólo reportan algunas de las variables que considera el modelo, tales como la precipitación acumulada por día y las temperaturas mínima y máxima ocurridas durante un día (IMTA, 2013).

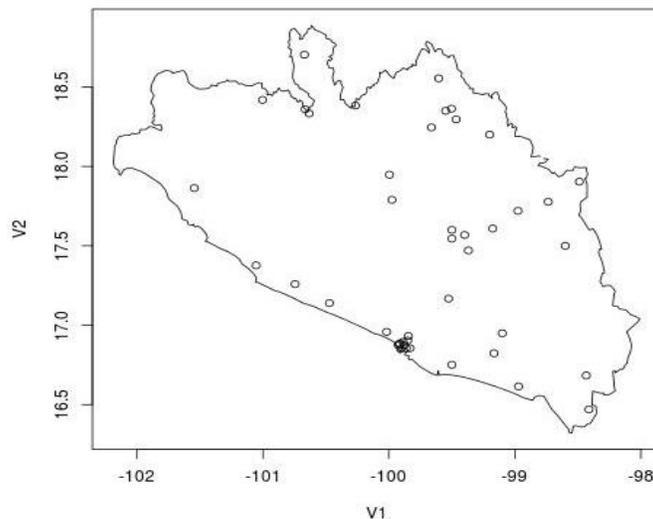


Ilustración 3.4 Distribución típica de un conjunto de estaciones meteorológicas en el estado de Guerrero. Fuente: (IMTA, 2013)

3.1.5 Uniformidad de las mallas

Para considerar los datos de las mallas en un análisis es necesario compararlos con datos medidos desde la superficie, es decir se requiere contar con datos de la malla y datos puntuales. En el capítulo 5 se explica el procedimiento que se llevó a cabo para la consideración de los datos del modelo WRF v3.6.1.

4 MODELACIÓN NUMÉRICA EN LA HIDROLOGÍA E HIDRÁULICA URBANA

4.1 Modelos hidráulicos unidimensionales 1D

Para definir un modelo unidimensional (1D), es necesario considerar que un flujo unidimensional es aquel que no considera variaciones o cambios en la velocidad, presión, etc., transversales a la dirección del flujo principal. Las condiciones en una sección transversal se expresan en términos de valores promedio de velocidad, densidad y otras propiedades (Streeter L & E, 1994).

En los modelos unidimensionales 1D se asume que una de las dimensiones prevalece sobre las otras dos. Esta dimensión es longitudinal a lo largo del eje de un río o canal. La información topográfica e hidráulica se introduce mediante secciones transversales, en las cuales se calculan el tirante y velocidad promedios en toda la sección transversal. Es decir, toda la sección es representada por un único valor medio de velocidad, no considerándose variaciones en la distribución de velocidades tanto horizontal como verticalmente. Asume por defecto que el flujo es perpendicular a la sección transversal, lo cual es una de sus limitaciones. Estos modelos son aplicables en tramos de ríos y canales muy largos, y cuando se busca principalmente determinar el máximo nivel de agua (Rodríguez V., 2012).

De acuerdo con IMTA (2015), la modelación del escurrimiento a superficie libre como son: en un canal o en una red de cauces, colectores pluviales y sanitarios, se basa en la resolución numérica del sistema de ecuaciones de Barré de Saint Venant. Este sistema está fundamentalmente constituido por las ecuaciones de conservación de masa (Ecuación 5) y de conservación de la cantidad de movimiento (Ecuación 6) que describen el flujo en una dimensión (1D).

Ecuación 5

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q$$

Ecuación 6

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} + gA\bar{h} \right) = gA(S_0 - S_f)$$

Siendo:

- Q , gasto (m^3/s)
- q , gasto de entrada o salida por unidad de longitud ($\text{m}^3/\text{s m}$)
- S_0 , pendiente del fondo del canal (m/m)

S_f , pendiente de fricción
 \bar{h} , centro de gravedad de la sección transversal (m)

Este sistema de ecuaciones es el que se utiliza en los software comerciales. Dicho sistema es resuelto numéricamente aplicando un esquema numérico de diferencias finitas (esquema de cuatro o seis puntos) de primer orden. El sistema es resuelto a través de diferentes técnicas entre las que destacan la de doble barrido que permite evaluar simultáneamente los valores de gasto y de tirante para un punto de discretización espacial (j+1) y temporal (k+1) (IMTA, 2015).

4.2 Modelación bidimensional (2D)

Para describir un modelo bidimensional (2D), es necesario definir que es un flujo bidimensional; este supone que todas las partículas fluyen en planos paralelos a lo largo de trayectorias idénticas en cada uno de estos planos, de aquí que no haya cambios en el flujo normal a estos planos (Wylie & Streeter, 1994).

Las ecuaciones de Saint-Venant para dos dimensiones (conocidas como 2D *shallow water equations* o ecuaciones de aguas poco profundas son obtenidas integrando en la dirección del tirante y promediando las velocidades en las coordenadas x, y, (Gómez L., 2007).

El mismo principio de las ecuaciones de Saint Venant 1D se utiliza en las ecuaciones en 2D, que son derivadas a partir de las ecuaciones de continuidad y de Navier Stokes. Tomando en cuenta las siguientes hipótesis: se considera que las fuerzas que actúan son la gravedad en el sentido vertical y la fuerza de Coriolis, la curvatura que tienen las líneas de corriente es pequeña, por lo que también se considera una distribución hidrostática y el movimiento principal de las partículas ocurre en los planos horizontales (Llaguno G., 2014). Las ecuaciones de conservación de masa y de momento para los modelos bidimensionales se definen de la siguiente manera:

Ecuación 7

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial x} = 0$$

Ecuación 8

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(hu^2 + \frac{1}{2}gh^2 \right) + \frac{\partial(hv)}{\partial x} = Cvh + \frac{\tau_{sx}}{\rho} + gh(S_{ox} - S_{fx}) + S_{t1}$$

Ecuación 9

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(hv^2 + \frac{1}{2}gh^2 \right) + \frac{\partial(hv)}{\partial x} = Cuh + \frac{\tau_{sy}}{\rho} + gh(S_{oy} - S_{fy}) + S_{t2}$$

siendo:

h ,	tirante
uv ,	componentes del vector velocidad en x, y
g ,	aceleración de la gravedad
c ,	efecto de la fuerza de Coriolis, τ_{sx} y τ_{sy} están asociados con el efecto del viento en la superficie del fluido
S_{ox}, S_{oy} ,	pendiente del terreno en las direcciones x, y
S_{fx}, S_{fy} ,	efecto de fricción del fluido con el terreno
S_{t1}, S_{t2} ,	flujos turbulentos del fluido

4.3 Simulación hidrológica

Es común que no se cuente con registros adecuados de escurrimiento en el sitio de interés para determinar los parámetros necesarios para el diseño y operación de obras hidráulicas. En general, los registros de precipitación son más abundantes que los de escurrimiento y, además, no se afectan por cambios en la cuenca, como construcción de obras de almacenamiento y derivación, talas, urbanización, etc. Por ello, es conveniente contar con métodos que permitan determinar el escurrimiento en una cuenca mediante las características de la misma y la precipitación (Aparicio Mijares, 1992).

De acuerdo con Aparicio Mijares (1992), los principales parámetros que intervienen en el proceso de conversión de lluvia a escurrimiento son los siguientes:

1. Área de la cuenca
2. Altura total de precipitación
3. Características generales o promedio de la cuenca (forma, pendiente, vegetación, etc.)
4. Distribución de la lluvia en el tiempo
5. Distribución en el espacio de la lluvia y de las características de la cuenca.

Una vez obtenidos estos parámetros de las cuencas para el análisis lluvia-escurrimiento, estos deben ser ingresados al programa de cómputo que se haya considerado para la simulación hidrológica.

Para el cálculo de las avenidas para los diferentes periodos de retorno existen 2 criterios (IMTA, 2015):

- a) Mediante un análisis hidrométrico. Para este análisis se debe contar con información suficiente de escurrimientos, específicamente de avenidas,
- b) Mediante la modelación del proceso lluvia-escurrimiento. Este criterio se aplica cuanto se tiene poca o nula información hidrométrica, y consiste en

determinar las avenidas para los diferentes periodos de retorno a partir de la información de la precipitación y de las características fisiográficas de la cuenca.

El criterio a utilizar depende de la información con la que se cuente en el sitio de estudio.

4.3.1 Simulación hidrológica a través del SWMM5©, PCSWMM5© y XPSWMM5©

SWMM5©, PCSWMM5© y XPSWMM5© simulan este proceso a través de un *modelo no lineal de depósito sencillo (SWMM)* creado exclusivamente para estos programas. Este modelo es considerado a veces de tipo onda cinemática, aunque en realidad se puede definir como una formulación mixta entre modelo de depósito y de onda cinemática (García Salas, 2007).

Cada una de las cuencas se trata como un depósito no lineal. Los aportes de caudal provienen de los diferentes tipos de precipitación (lluvia, nieve) y de cualquier otra cuenca situada aguas arriba. Existen diferentes caudales de salida tales como la infiltración, la evaporación y la escorrentía superficial. La capacidad de este “depósito” es el valor máximo de un parámetro denominado almacenamiento en depresión, que corresponde con el máximo almacenamiento en superficie debido a la inundación del terreno, el mojado superficial de la superficie del suelo y los caudales interceptados en la escorrentía superficial por las irregularidades del terreno. La escorrentía superficial por unidad de área, Q , se produce únicamente cuando la profundidad del agua en este “depósito” excede el valor del máximo almacenamiento en depresión, h_o , en cuyo caso el caudal de salida se obtiene por aplicación de la ecuación de Manning (ver Ilustración 4.1). La profundidad en la cuenca (H expresado en m) se actualiza continuamente en cada uno de los instantes de cálculo (con el tiempo expresado en segundos) mediante la resolución numérica del balance de caudales en la cuenca (EPA, 2015).

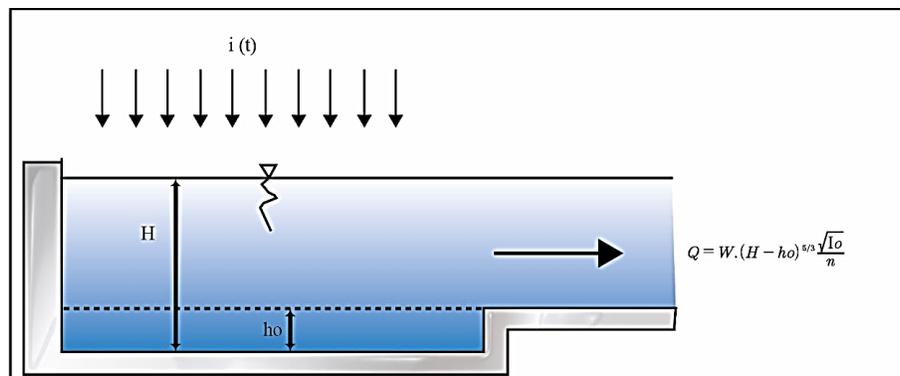
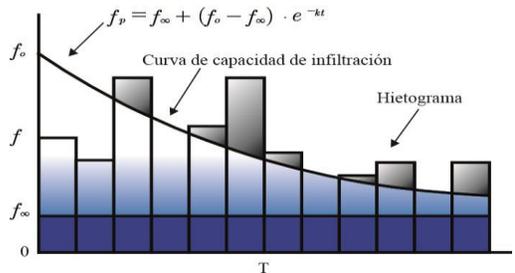
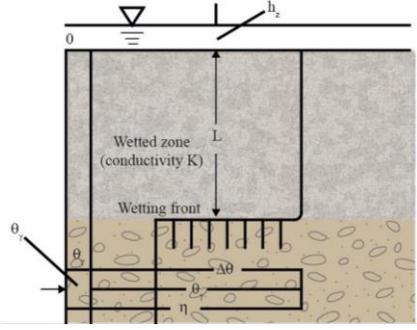


Ilustración 4.1 Fenómeno de escorrentía en el programa SWMM (fuente: (Gómez V. M., 2006))

Estimación de pérdidas en SWMM5© y PCSWMM5©

La infiltración es el fenómeno por el cual el agua de lluvia penetra la superficie del terreno de los suelos no saturados de las áreas permeables de la cuenca, (EPA, 2015). Los programas SWMM5© y PCSWMM5© contemplan 5 modelos para el cálculo de infiltración en la cuenca, la Tabla 4.1 muestra la definición de cada uno de ellos.

Tabla 4.1 Métodos de infiltración en los programas SWMM5© y PCSWMM5© (Fuente: adaptado de (IMTA, 2015))

Modelo de infiltración	Descripción	Esquema
Horton	Se basa en que la variación de la capacidad de infiltración en cualquier momento, es proporcional a la diferencia entre la capacidad actual de infiltración en el terreno y la capacidad límite asintótica de infiltración que presenta dicho terreno.	 <p>fuente: (Gómez V. M., 2006)</p>
Horton modificado	Esta es una versión modificada del método clásico de Horton que utiliza la infiltración acumulada en exceso de la tasa mínima como su variable de estado (en lugar de tiempo a lo largo de la curva de Horton), proporcionando una estimación de infiltración más precisa cuando ocurren intensidades de baja precipitación. Utiliza los mismos parámetros de entrada como lo hace el método tradicional de Horton. (EPA, 2015)	
Green-Ampt.	Considera la succión capilar media, la conductividad hidráulica del suelo en condiciones saturadas y el déficit inicial de la humedad. Este modelo considera la frontera entre el suelo húmedo y seco lo que conlleva a considerar el déficit de humedad del suelo.	 <p>fuente: (Brevnova E., 2001)</p>

Modelo de infiltración	Descripción	Esquema
Green Ampt. Modificado	Supone que existe un frente de mojado agudo en la columna del suelo, separando el suelo con un poco de humedad inicial debajo del suelo saturado arriba. La entrada de los parámetros requeridos son el déficit inicial de humedad del suelo, la conductividad hidráulica del suelo y la carga de succión en el frente húmedo. La tasa de recuperación del déficit de humedad durante los periodos secos está empíricamente relacionada con la conductividad hidráulica. (EPA, 2015)	
Número de curva	Emplea el concepto de máxima retención y relaciona las pérdidas acumuladas después de iniciada la tormenta con la capacidad máxima de retención de la cuenca. Este modelo clasifica las superficies asignándoles un número entre 0 y 100, al que denomina número de curva CN.	

4.4 Modelos matemáticos de simulación unidimensional (1D) y bidimensional (2D)

Actualmente existe una gran variedad de software para la modelación matemática del proceso lluvia-escorrentamiento y varios de ellos ofrecen la modelación 1D y 2D. Rodríguez V, (2012) menciona que todo modelo matemático es una simplificación de la realidad y que las ecuaciones que describen el comportamiento del flujo no permanente tienen limitaciones por si solas, es de vital importancia que, en el proceso de la modelación, la herramienta informática seleccionada sea familiar y se ajuste a las cantidad y calidad de la información técnica existente y disponible.

La Tabla 4.2 muestra diferentes programas de cómputo que ofrecen modelación unidimensional (1D) y bidimensional (2D), especialmente al análisis y tránsito de avenidas que provocan inundaciones y para la reducción de las mismas.

Tabla 4.2 Programas de cómputo para análisis y tránsito de escurrimientos en zonas urbanas (adaptado de Llaguno G. (2014))

TELEMAC-2D	(Aplicado en problemas fluviales para un gran número de ríos), es aplicado para simular flujo a superficie libre en dos dimensiones, para cada punto de la malla el programa calcula la altura del agua y los dos componentes de velocidad. Resolviendo las ecuaciones de Saint Venant con los métodos de elemento finito y volumen finito, realizando una malla triangular (Telemac-Mascaret, 2013).
------------	---

XPSWMM 2D	Es un programa que utiliza ecuaciones en dos dimensiones para flujo superficial, con esto le da la capacidad de poder analizar y predecir las inundaciones. Cuenta con la interacción de los sistemas de aguas superficiales y subterráneas, con un acoplamiento para la modelación 1D/2D. Este programa también es útil para simular mareas, roturas de presas y en las tuberías de la red de alcantarillado (XP Solutions, 2011).
FLO-2D	Es un programa que permite simular el flujo en canales, flujo confinado y el flujo en calles bajo una compleja topografía, permite realizar simulaciones considerando los sedimentos. La resolución espacial y temporal depende del tamaño de celda considerada, además considera un criterio de la FEMA modificado (Flo-2d, 2018).
PCSWMM®	Integra el concepto dinámico del modelo unidimensional y su enfoque principal es entorno a la superficie de flujos en dos dimensiones, usa las ecuaciones convencionales de Saint Venant para fluidos homogéneos, ecuación de continuidad y ecuación de conservación (Computational Hydraulics International, 2017).
IBER	Es un modelo hidrodinámico bidimensional para la simulación de flujo de superficie libre, morfodinámica y procesos de transporte en ríos y estuarios. El módulo hidrodinámico resuelve las ecuaciones de agua superficial (SWE) bidimensionales promediadas en profundidad, también conocidas como ecuaciones en 2D de Saint Venant (Iber, 2018).

A partir del análisis y tránsito de los escurrimientos superficiales generados en una zona urbana, estos programas permiten manejar un sistema dual (combinado), es decir, parte de los escurrimientos superficiales ingresan al sistema pluvial y la otra parte transita por las calles (ver Ilustración 4.2).

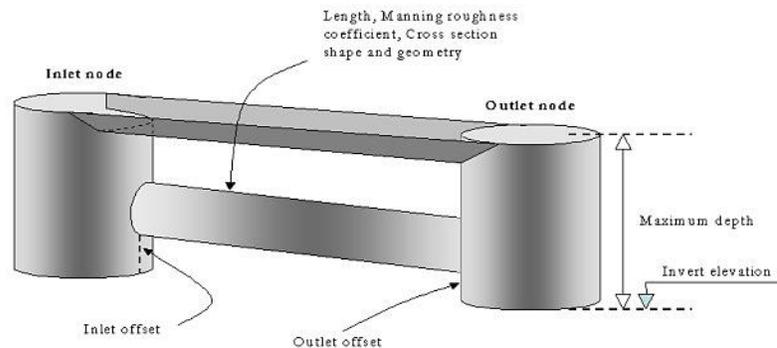


Ilustración 4.2 Tránsito de los escurrimientos generados en una zona urbana (EPA, 2009)

4.5 Simulación en el programa PCSWMM®

Para la solución de las ecuaciones convencionales de Saint Venant para flujos homogéneos el programa trabaja usando ecuaciones de diferencias finitas y métodos sucesivos de aproximación, bajo métodos de relajación. El programa lo que hace es discretizar el dominio en diferentes representaciones de la malla (cuadrada, hexagonal o variable), y asigna una elevación media del nivel del terreno dentro de cada celda. Trabaja con la solución de la onda dinámica, su uso es conservador ya que aminora o ignora los términos inerciales (Llaguno G., 2014), ver Ilustración 4.3.

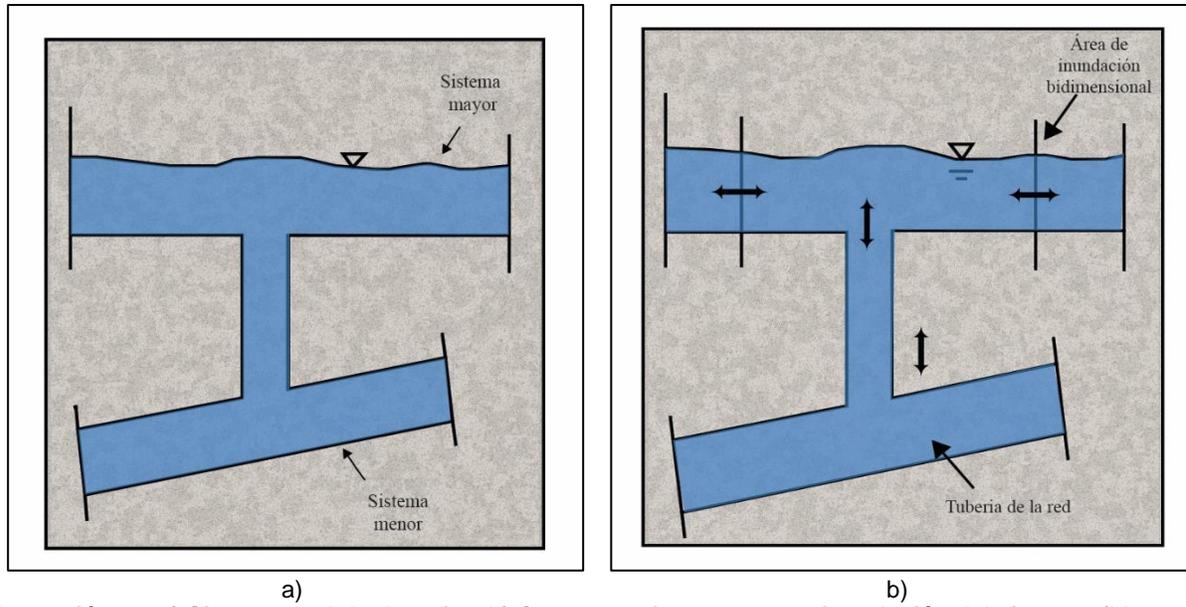


Ilustración 4.3 a) Sistema dual de drenaje y b) Comportamiento ante una inundación del sistema. (Llaguno G., 2014)

5 METODOLOGÍA PARA EL PRONÓSTICO DE LLUVIA CON INFORMACIÓN DEL MODELO WRF v3.6.1 Y EMAS

Para la predicción de inundaciones en zonas urbanas a partir del modelo WRF v3.6.1 y de EMAS en un modelo de simulación hidráulica 1D-2D se aplicó la siguiente metodología (ver Ilustración 5.1):

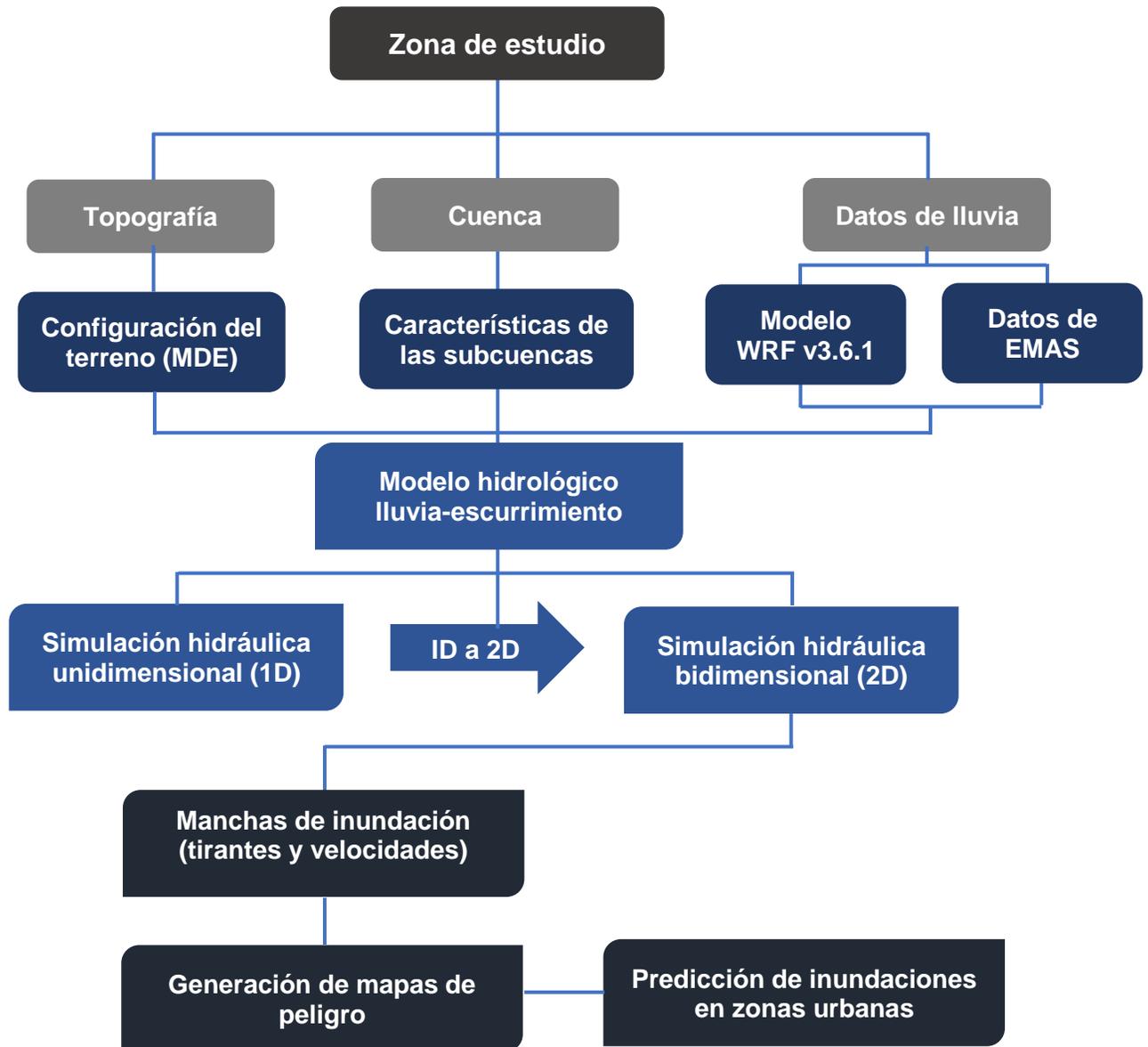


Ilustración 5.1 Metodología para la predicción de inundaciones a partir de un modelo de lluvia distribuida

5.1 Análisis y procesamiento del modelo WRF v3.6.1 en un sistema de información geográfica (SIG)

Los datos de lluvia que se consideraron para la generación del modelo lluvia-escurrimiento se obtuvieron de la asociación del modelo numérico WRF v3.6.1 y de las EMAS. La reflectividad es la variable que se consideró del modelo WRF con el propósito de visualizar la evolución de la tormenta en un intervalo de tiempo. El siguiente procedimiento puede ser aplicado tanto en radares meteorológicos como en el modelo WRF, sin embargo, se ha considerado el modelo de predicción numérica del tiempo debido a que la información está disponible en toda la cobertura de la República Mexicana, lo cual permite definir un área o región de interés.

Los datos de reflectividad medidos por el modelo WRF v3.6.1 fueron procesados en un Sistema de Información Geográfica (SIG), se generó un ráster que representa la cobertura (zona de interés) del modelo WRF v3.6.1 en forma de cuadrícula. Para la obtención de la cuadrícula en formato Shapefile se realizó el siguiente procedimiento:

1. Obtención de los datos de reflectividad (dBZ) en formato ASCII
2. Depuración de los datos que no se encuentren en la zona de estudio con la finalidad de evitar archivos innecesarios
3. Procesamiento de los datos depurados del formato ASCII en formato ráster mediante un Sistema de Información Geográfica (SIG)
4. Obtención del ráster de reflectividad representado en cuadrícula de 4 x 4 km georreferenciado de acuerdo con las coordenadas que contiene el archivo ASCII para cada celda
5. Conversión de ráster a archivo Shapefile (* .shp) que representa las celdas en forma de polígonos que contienen la información de reflectividad correspondiente a cada celda

Esta metodología permite obtener la ubicación geoespacial de cada celda perteneciente a la zona de interés con los datos de reflectividad para cada intervalo de tiempo considerado para el evento (ver Ilustración 5.2). El intervalo de tiempo considerado fue de 10 min, esto de acuerdo con los datos registrados por el modelo WRF v3.6.1 y las EMAS. Una vez obtenida la ubicación geoespacial de la malla en un SIG los datos de todo el evento pueden ser procesados en un archivo *.xls debido a que el archivo original de ASCII contiene la información de todas las celdas y mediante la georreferenciación se identifican las celdas que abarcan la zona de estudio a partir de lo cual se realiza la depuración de los datos.

Las celdas que abarcan la zona de estudio tienen un identificador ID para mayor facilidad en el manejo de los datos que corresponden a cada una (ver Ilustración 5.3).

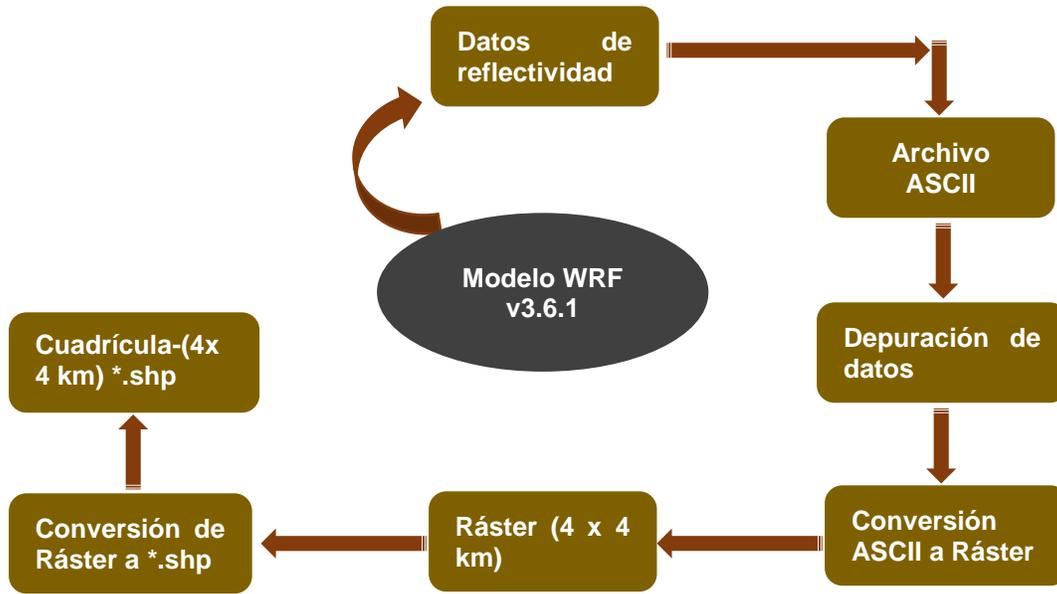


Ilustración 5.2 Procesamiento de los datos de reflectividad del modelo WRF v3.6.1 en un Sistema de Información Geográfica

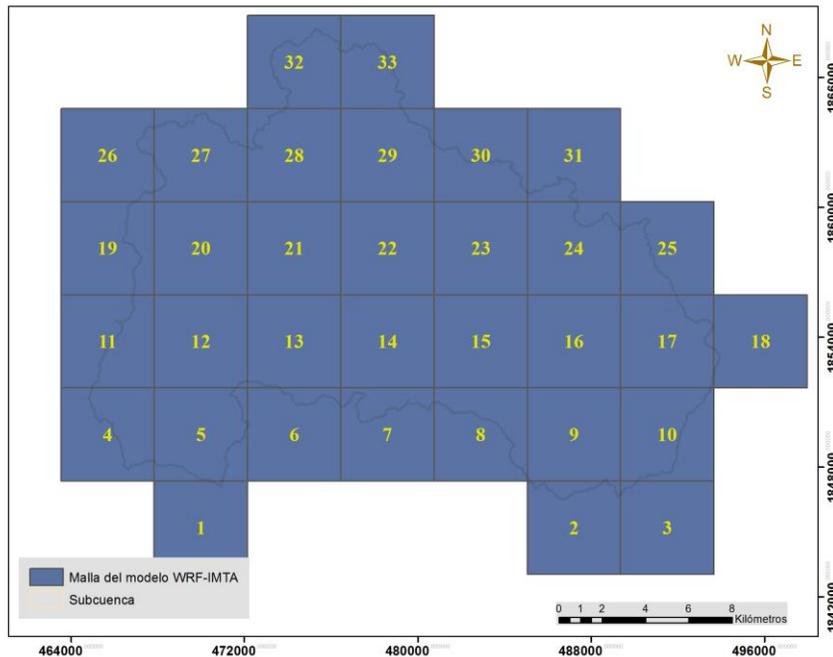


Ilustración 5.3 Generación de la malla en shapefile del modelo WRF v3.6.1

5.2 Análisis de los datos de las Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAS)

La cuenca del río Sabinal cuenta con 19 estaciones meteorológicas automáticas de las cuales 11 se ubican sobre la zona urbana de Tuxtla Gutiérrez y son las que

actualmente se encuentran activas. Las EMAS permiten monitorear la precipitación sobre la cuenca y pertenecen al sistema de alerta temprana del río Sabinal del Organismo de Cuencas Frontera Sur (Ocfs) de la Comisión Nacional del Agua (Conagua).

Se recopilaron los registros de precipitación con duración de 10 min de las 19 estaciones a partir de las cuales se seleccionaron los eventos de interés, la información de los registros fue proporcionada por el Centro Hidrometeorológico Regional Tuxtla Gutiérrez del Ocfs de la Conagua. Sobre la zona urbana se contó con registros del año 2014 al 2017 y sobre la zona de la cuenca alta con registros 2011-2014.

De los registros de las EMAS se consideraron dos eventos los cuales provocaron inundaciones en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez siendo estos:

- *Evento del 2 de septiembre del 2016*
- *Evento del 23 de junio del 2017*

La Tabla 5.1 y la Tabla 5.2 muestran los registros de precipitación de las EMAS para los eventos considerados en Horario UTC. Las siglas UTC significan "Tiempo Universal Coordinado" (en inglés, "Universal Time Coordinated"), que antiguamente fue llamada "la hora en el meridiano de Greenwich" ("GMT") o el "tiempo Zulu" ("Z"). Esta es la hora local en el Meridiano Primario (i.e., aquel cuya longitud es 0°) dada en horas y minutos en el reloj de 24 horas. Por ejemplo, consideramos la hora 1350 UTC que significa 13 horas y 50 minutos después de la medianoche, o 1:50 pm en el Meridiano Primario (NOAA, 2018).

Tabla 5.1 Precipitación registrada del 2 de septiembre del 2016 en cada estación meteorológica automática. Hora UTC

ID	Estación	Empezó	Terminó	Duración (min)	Precipitación (mm)
1	Centro 2a Poniente	01:10	04:30	200	82.2
2	Club campestre	01:50	04:50	180	44.4
3	Cristal	01:40	04:30	170	75.4
4	Módulo 5	01:10	04:10	180	72.4
5	Much	01:00	04:20	200	76.6
6	Parque Oriente.	01:00	04:00	180	89
7	San Juan seminario	01:10	04:30	200	112.5
9	Trabajo Social	01:10	04:10	180	89.7
10	Unicach	01:10	04:20	190	104
11	Xamaipac	01:30	04:20	170	84

Tabla 5.2 Precipitación registrada del 23 de junio del 2017 en cada estación meteorológica automática. Hora UTC

ID	Estación	Empezó	Terminó	Duración (min)	Precipitación (mm)
4	Módulo 5	23:40	04:50	300	59.9
5	Much	23:40	04:20	280	74.3
6	Parque Oriente	23:40	04:20	280	88.6
7	San Juan	23:40	04:50	310	50.2
8	Secundaria Técnica Cruz Casitas	23:40	04:50	310	74.7
9	Trabajo Social	23:50	04:50	300	43.3
10	Unicach	23:40	04:50	310	73.6

5.3 Ajuste de los datos de reflectividad del modelo WRF v3.6.1

El modelo WRF v3.6.1 permite procesar la información mediante diferentes variables como lo puede ser la lluvia, si este fuera el caso los datos de lluvia medidos por el modelo requieren un ajuste para ser considerados en el modelo hidrológico. Se requiere ajustar esta información con los datos registrados por las Estaciones Meteorológicas Automáticas. Ese ajuste se conoce como sesgo el cual no es más que dividir la precipitación total medida por las estaciones automáticas entre la precipitación total medida por el radar, de acuerdo con la siguiente ecuación (Computational Hydraulics International, 2017).

$$sesgo = \frac{\text{precipitación total de EMAS}}{\text{precipitación total de radar}}$$

Una vez obtenido ese factor de corrección se podrá considerar la lluvia distribuida medida por el modelo WRF v3.6.1 para el análisis hidrológico. La información del modelo WRF en valores de reflectividad, como se explicó anteriormente permite ver como es el comportamiento de la lluvia, es decir, se pueden identificar las zonas donde se representa la mayor cantidad de lluvia en intensidad (mm/hr) de un evento analizado sin embargo, para asociar esta información con datos de lluvia medida desde la superficie se requiere ajustar los mismos mediante un sesgo el cual no es más que un factor de ajuste asignado para cada celda de la malla analizada. El procedimiento que se consideró para el sesgo o factor de ajuste del modelo WRF a partir de los datos de reflectividad que contiene cada celda fue ubicar de manera geoespacial las EMAS sobre la malla del modelo georreferenciado, con lo cual se generaron los polígonos de Thiessen de las estaciones con la finalidad de obtener el área de influencia de las mismas con respecto a las celdas del modelo WRF v3.6.1. Fue necesario colocar un identificador ID para cada EMA (ver Ilustración 5.4).

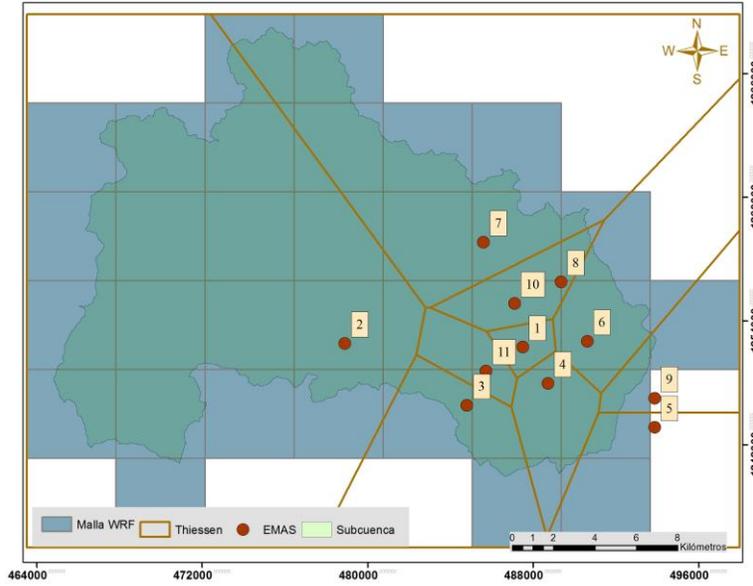


Ilustración 5.4 Área de influencia de las EMAS con respecto a las celdas del modelo WRF v3.6.1

La celda donde se ubica la EMAS se consideró como aquella que contiene el dato real, con lo cual procede a realizar el cálculo del sesgo o factor de corrección de los valores de reflectividad de cada celda para los diferentes intervalos de tiempo que dura el evento. El factor de corrección (FC) se obtuvo de la siguiente manera:

$$F.C. = \frac{\text{Reflectividad de la celda analizada}}{\text{Reflectividad de la celda donde se ubica la EMA}}$$

Para cada celda se obtuvo el factor de corrección de acuerdo con el área de influencia de las EMAS en el modelo WRF v3.6.1 (ver Ilustración 5.5). La malla del modelo está compuesta de 33 celdas cada una con datos de reflectividad en intervalos de 10 min, esto de acuerdo con la evolución de la tormenta en el evento analizado. Los factores de corrección (F.C.) permiten asociar las variables *reflectividad* (dBZ) la cual es medida por el modelo WRF y la *intensidad* (mm/hr) medida por la EMAS.

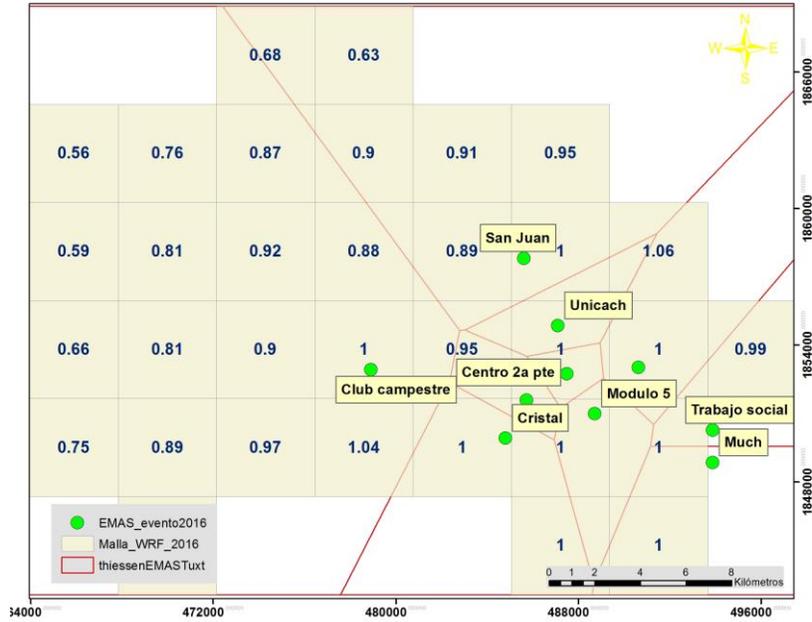


Ilustración 5.5 Factores de corrección obtenidos-Hora 4:30 UTC. Evento del 2 de septiembre del 2016

Realizando el ajuste de los valores de reflectividad (dBZ) en cada celda para los diferentes intervalos de tiempo en que se esté analizando el evento, los factores de corrección o sesgo se pueden expresar a partir de la siguiente ecuación:

Ecuación 10

$$FC_i = \frac{Z_c}{Z_e}$$

Siendo:

- FC_i = Factor de corrección en la celda (i)
- Z_c = Reflectividad en la celda analizada
- Z_e = Reflectividad en donde se ubica la EMA de influencia

5.4 Asociación de los datos de las EMAS y Reflectividad del modelo WRF v3.6.1

Los datos de lluvia para la generación del modelo lluvia-escurrimiento se obtuvo a partir de la relación intensidad (mm/hr)-reflectividad (dBZ), siendo la intensidad medida por las EMAS y la reflectividad medida por el modelo WRF V3.6.1. El ajuste de los datos de reflectividad en la malla permitió la obtención de factores de corrección en cada una de las celdas. Estos factores varían de acuerdo con la duración del evento cada 10 minutos.

La asociación permite visualizar la evolución de la tormenta al considerar la lluvia de las EMAS ajustándola por una F.C. obtenido a partir de la reflectividad registrada del evento.

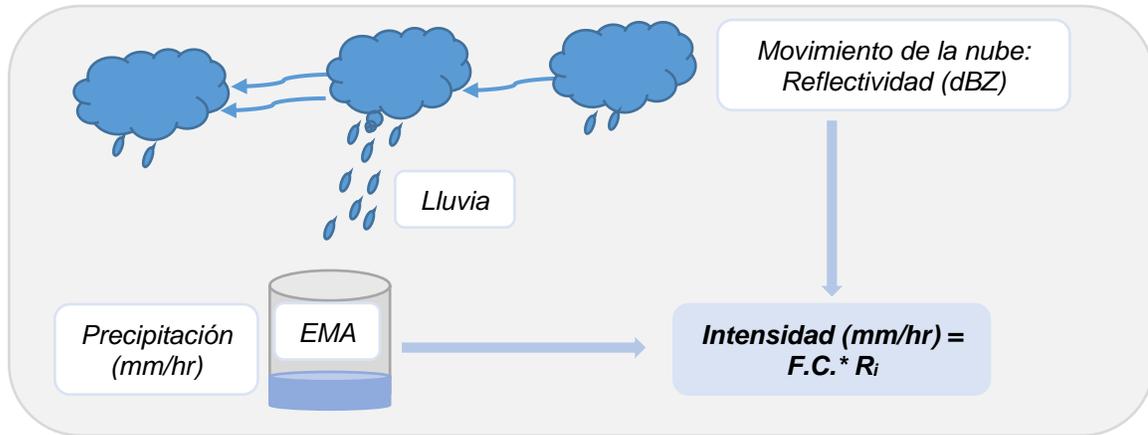


Ilustración 5.6 Lluvia (mm/hr) a considerar a partir de la relación Intensidad (mm/hr)-Reflectividad (dBZ)

Esta asociación puede ser expresada para un intervalo de tiempo (t) de la siguiente manera:

Ecuación 11

$$I_{ci(t)} = FC_i * R_i$$

Donde:

- $I_{ci(t)}$ = Intensidad de la celda (i) analizada en un intervalo de tiempo (t)
- FC_i = Factor de corrección en la celda (i)
- R_i = Precipitación (mm/hr) registrada por la EMA (i)

5.5 Hietograma de lluvia en la malla del modelo WRF v3.6.1

Del modelo WRF v3.6.1 se obtuvieron 33 celdas con resolución de 4 x 4 km siendo esta la más pequeña que puede considerar el modelo, se obtuvieron sus respectivos hietogramas en cada celda. Una vez obtenido el F.C. correspondiente a cada celda (i) en periodos de 10 minutos y de acuerdo con la duración del evento se obtuvo el hietograma en cada celda (H_{p_p}) a partir de la siguiente ecuación:

Ecuación 12

$$H_{p_p} = \sum_{i=1}^n FC_i(R_i)$$

Siendo:

- Hp_p = Hietograma de precipitación de la celda analizada del modelo WRF V3.6.1
 FC_i = Factor de corrección en la celda (i)
 R_i = Precipitación (mm/hr) registrada por la EMA (i)

El Hietograma asignado a cada celda del modelo WRF corresponde a la lluvia del evento registrada por la Estación Meteorológica Automática que influye en ella de acuerdo con los polígonos de Thiessen, realizando el ajuste de los registrados a partir del factor de corrección obtenido de los datos de reflectividad proporcionados por el modelo. La Ilustración 5.7 muestra el mapa conceptual para la obtención de los hietogramas en la malla del modelo.

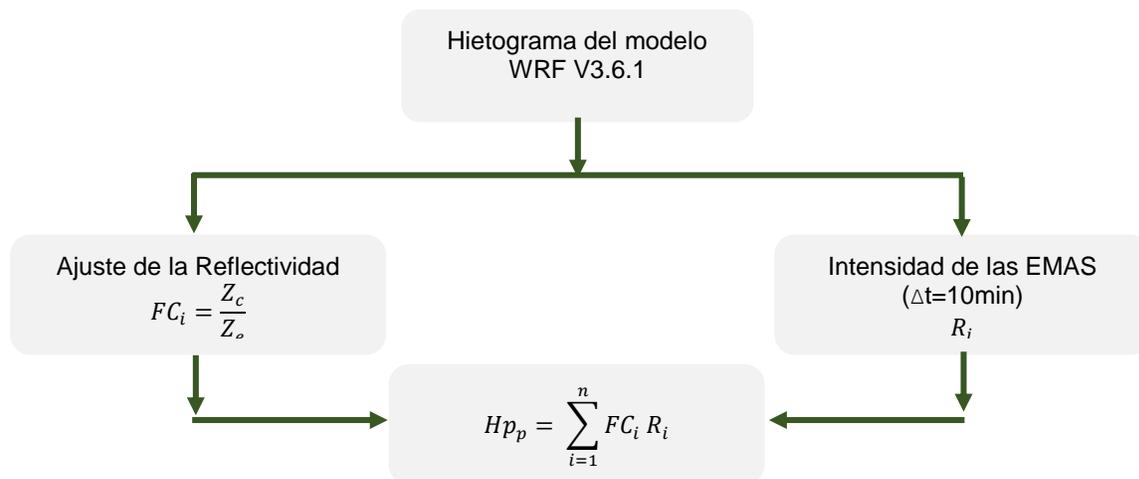


Ilustración 5.7 Obtención del Hietograma a partir de los datos de Reflectividad (dBZ) e Intensidad (mm/hr)

5.5.1 Configuración para asociar los datos registrados de lluvia con las Estaciones Meteorológicas Automáticas en un SIG

Para la relación de los datos de lluvia registrados por el modelo WRF v3.6.1 y datos de lluvia medidos por las EMAS, es necesario que las estaciones proyectadas en un Sistema de Información Geográfica (SIG) estén asociadas a las series temporales registradas en cada uno de ellas.

La asociación de los datos se realizó en el programa PCSWMM®, donde se requirió que los registros de las estaciones automáticas estuvieran en formato Timeseries Files (*.tsf) y posteriormente en un formato Binary Timeseries Files (*.tsb). Para la creación del archivo *.tsf fue necesario que los registros de lluvia de cada EMA estén separados por medio de columnas asignándole el identificador (IDs) que le corresponde a cada una de ellas. Este proceso se realizó desde un archivo de Excel en formato *.xlsx. Una vez colocado de esa manera, los registros se copian y pegan en un bloc de notas y se guarda como un formato *.tsf. el cual es necesario que el nombre del archivo sea el mismo que el Shapefile de la ubicación de las Estaciones Meteorológicas Automáticas consideradas para permitir la asociación entre los registros y el Shapefile. La

Ilustración 5.8 muestra la metodología utilizada para la asociación del Shapefile de EMAS con sus respectivos registros de lluvia.

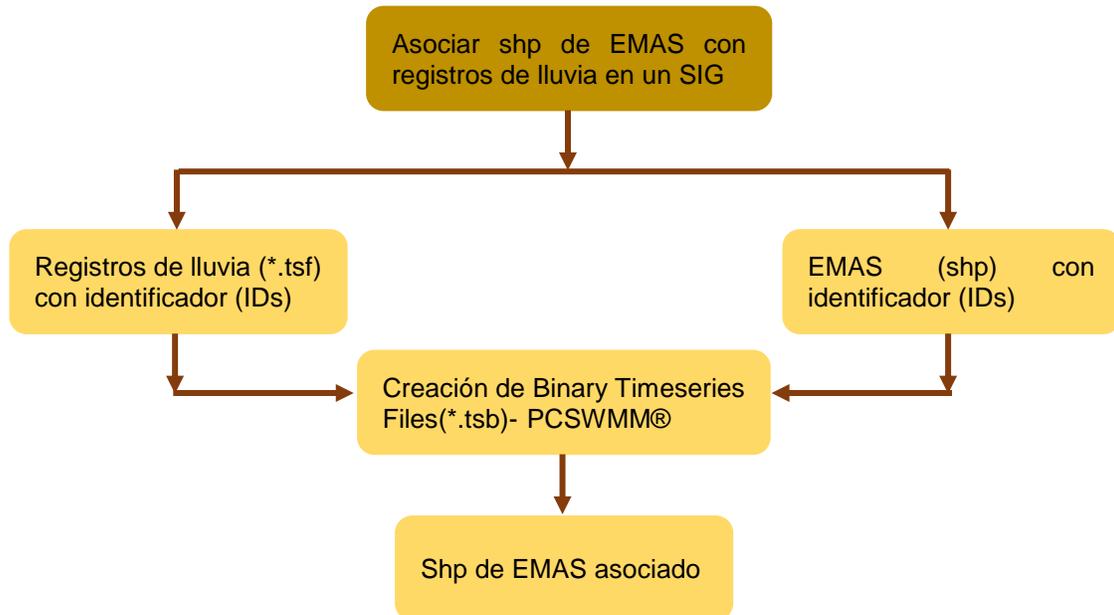


Ilustración 5.8 Asociación de EMAS con registros de lluvia en formato Shapefile

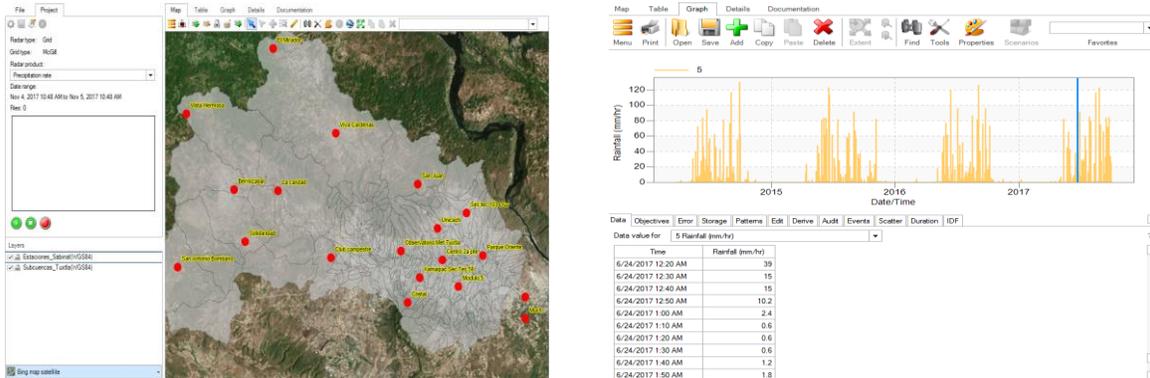


Ilustración 5.9 Asociación de datos de lluvia de EMAS en un Sistema de Información Geográfica

5.5.2 Configuración para asociar los datos de lluvia y las celdas del modelo WRF v3.6.1 en un SIG

De manera similar a lo realizado con los datos de las Estaciones Meteorológicas Automáticas, fue necesario asociar los hietogramas obtenidos (mm/hr) de cada celda en un Shapefile que representa la cobertura de la celda (km²) en un Sistema de Información Geográfica. Se creó un archivo *.tsf el cual contenía los datos de lluvia en cada celda del cual posteriormente en el programa PCSWMM®, se creó el archivo Binary Timeseries Files (*.tsb). La Ilustración 5.10 muestra el método de asociación realizado para las celdas del modelo con sus respectivos hietogramas que comprenden el área de influencia de la cuenca del río Sabinal. La Ilustración 5.11

muestra la visualización de la asociación en un Sistema de Información Geográfica (SIG).

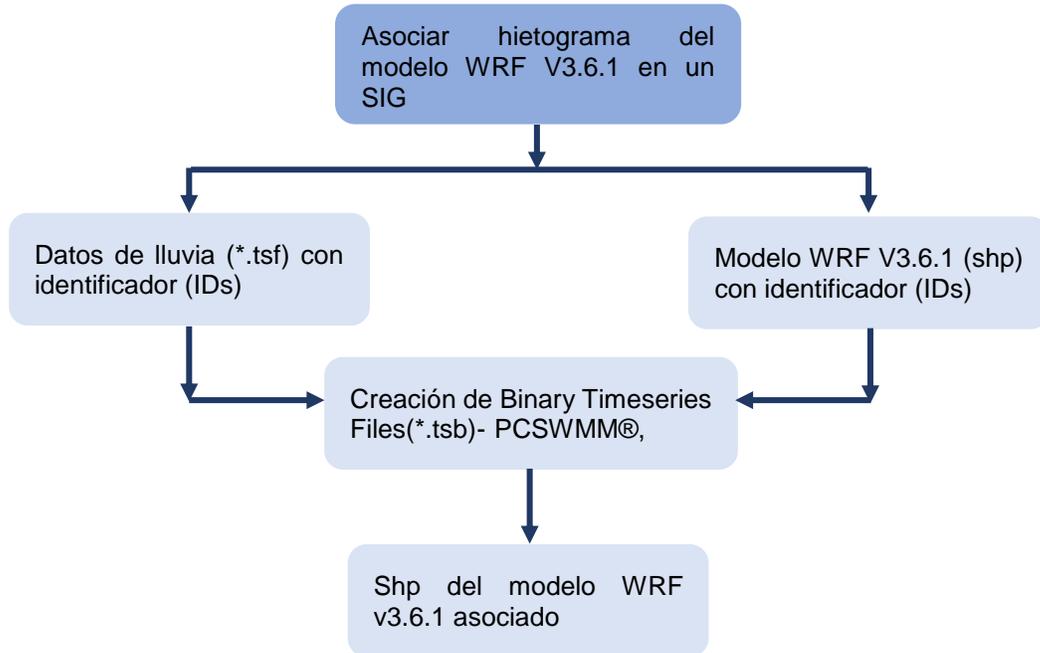


Ilustración 5.10 Asociación de hietogramas de las celdas del modelo WRF v3.6.1 en formato Shapefile

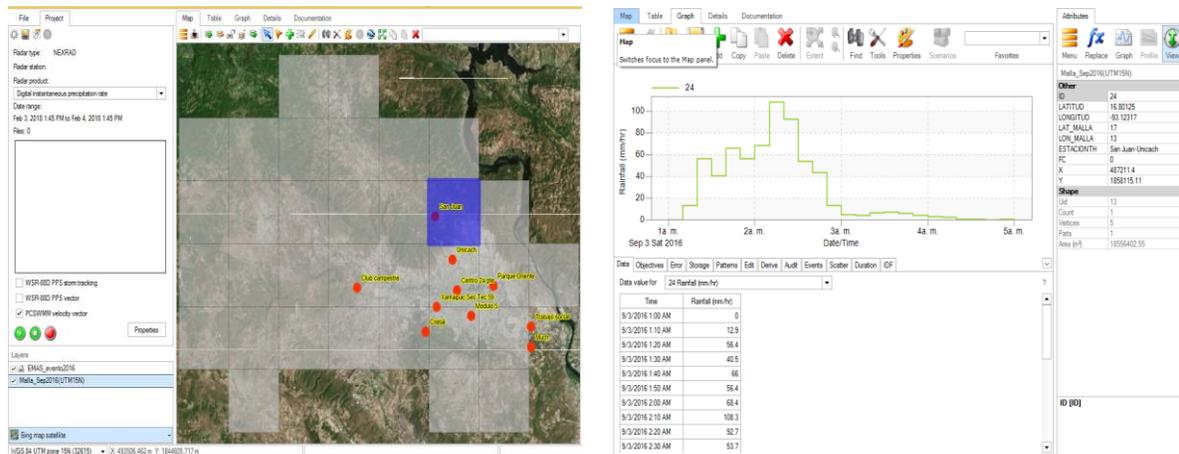


Ilustración 5.11 Asociación de hietograma de las celdas del modelo WRF v3.6.1 en un SIG

5.6 Asignación del hietograma a las subcuencas

Para la asignación de los hietogramas que corresponden a las subcuencas se realizó una ponderación por área correspondiente para cada subcuenca a partir de las celdas del modelo WRF v3.6.1 (Ecuación 13).

Ecuación 13

$$\bar{H}p_p = \sum_{i=1}^n \frac{Hp_p a_i}{\sum_i^n a_i}$$

Siendo:

- $\bar{H}p_p$ = hietograma de precipitación promedio en subcuenca
- Hp_p = hietograma de precipitación de la celda del modelo WRF v3.6.1
- a_i = área de la subcuenca

Con esta ponderación se obtiene el hietograma promedio para cada subcuenca a partir de los diferentes hietogramas que influyen sobre la misma. Esta ponderación se realizó en el programa PCSWMM®, sin embargo, se puede realizar desde una hoja de cálculo en un archivo *.xlsx. La Ilustración 5.12 muestra la ponderación por área para la obtención del hietograma promedio para cada subcuenca perteneciente a la cuenca del río Sabinal.

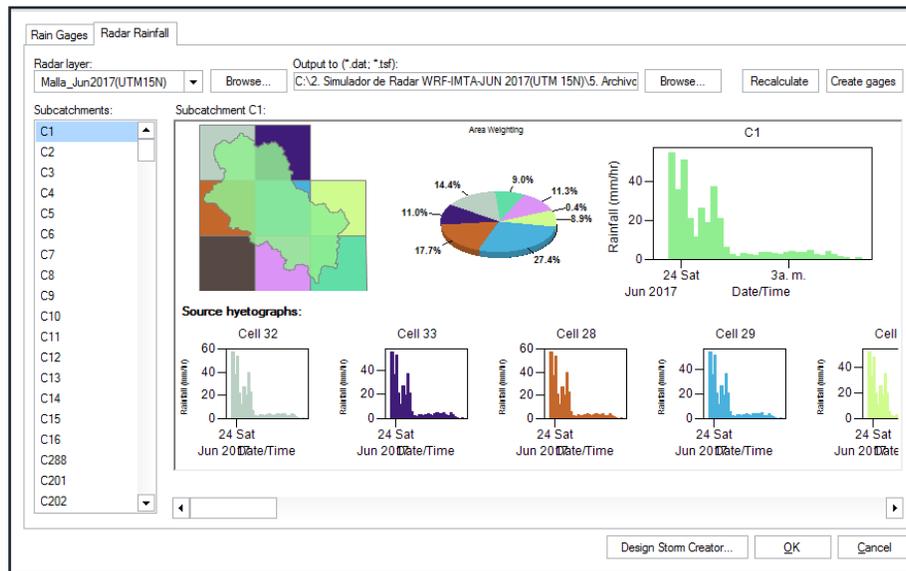


Ilustración 5.12 Ponderación por área para la obtención del hietograma para las subcuencas del río Sabinal

El hietograma en las subcuencas representa la cantidad de precipitación (mm/hr) y la forma de la lluvia del evento analizado obtenido a partir de la relación intensidad (mm/hr)-reflectividad (dBZ).

5.7 Generación del modelo lluvia-escorrimento a través del programa PCSWMM®

Para la generación del modelo lluvia-escorrimento es necesario que las subcuencas cuenten con sus características geomorfológicas para la obtención del hidrograma, siendo este el volumen de agua (m³) que transita sobre la subcuenca a través de un intervalo de tiempo y el cual por lo general se representa a la salida de la subcuenca en el punto más bajo de la misma.

Existen diferentes métodos empíricos para la generación del hidrograma en una subcuenca, el más utilizado es el método racional, sin embargo, (MAPAS, 2015) se hace mención que el método racional, así como muchos otros, permiten estimar un gasto “pico”, en función de la curva *i-d-Tr*, sin embargo el hidrograma de diseño que resulta de aplicar este método no caracteriza la variación de la precipitación a lo largo del tiempo.

Debido a ello, la obtención del hidrograma de las subcuencas se obtuvo a partir de un modelo numérico comercial como lo es el programa PCSWMM®, el cual a su vez se utilizó para la generación del modelo bidimensional (2D) en la zona de estudio.

5.8 Calibración del modelo hidrológico-hidráulico utilizando la herramienta SRTC

La calibración del modelo consiste en ajustar los valores de los parámetros, lo anterior con el objetivo de obtener una coincidencia satisfactoria entre los valores de las variables producto de las simulaciones del modelo con los medidos en el sistema real (Alcocer Yamanaka, 2007).

Para la calibración del modelo se contó con datos medidos por las estaciones hidrométricas instaladas en el río Sabinal, la herramienta Sensitivity-based Radio Tuning Calibration (SRTC) del programa PCSWMM® permite calibrar el modelo a partir de datos observados.

La herramienta SRTC requiere estimaciones de incertidumbre para todos los atributos y parámetros a calibrar. Para generar gradientes de sensibilidad para cada parámetro, SWMM5 se ejecuta utilizando los valores del rango alto y bajo de sensibilidad especificado (Computational Hydraulics International, 2017).

El parámetro a calibrar es la escorrentía superficial de las subcuencas con lo cual fue necesario establecer los atributos de las subcuencas que permitirán realizar la calibración. Los atributos seleccionados se manejan una incertidumbre (%) la cual se establece en un rango especificado.

PCSWMM® calcula el parámetro entre los valores extremos (bajo y alto) para una incertidumbre especificada a partir de las siguientes ecuaciones (Computational Hydraulics International, 2017):

Ecuación 14

$$P_{bajo} = P_{actual} \left(\frac{1}{1 + \frac{U}{100}} \right)$$

Ecuación 15

$$P_{alto} = P_{actual} \left(1 + \frac{U}{100} \right)$$

donde:

- P_{bajo} = Valor del parámetro para el límite inferior del rango de incertidumbre
- P_{alto} = Valor del parámetro para el límite superior del rango de incertidumbre
- P_{actual} = Valor del parámetro actual
- U = Incertidumbre asignada (%)

5.9 Validación del modelo calibrado

5.9.1 Coeficiente de Nash-Sutcliffe

Una vez calibrado el modelo es necesario realizar la validación del mismo. Magaña et. al, (2013) menciona que un modelo puede ser validado a partir del coeficiente de Eficiencia de Nash-Sutcliffe, (1970) a partir de la Ecuación 16:

Ecuación 16

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{ci} - Q_{oi})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{ci} - \bar{Q}_o)^2}$$

Siendo E el coeficiente adimensional, Q_{ci} el caudal calculado en el día i (m^3/s), Q_{oi} el caudal observado (m^3/s) y \bar{Q}_o el promedio de los caudales observados. Este coeficiente establece la relación entre el comportamiento real y el modelado. El dominio matemático del valor del coeficiente E es de $-\infty$ a 1, donde la unidad representa la simulación perfecta (Magaña et. al, 2013). La Tabla 5.3 muestra el rango de valores para el criterio establecido por Nash-Sutcliffe, de acuerdo con Molnar, 2011.

Tabla 5.3 Valores para el Criterio Nash-Sutcliffe. (Molnar, 2011)

Indicador	Ajuste de Nash-Sutcliffe
Excelente	>0.8
Muy Bueno	0.6-0.8
Bueno	0.4-0.6
Satisfactorio	0.2-0.4
Insuficiente	<0.2

5.9.2 Raíz del error cuadrático medio (RMSE)

El root mean square error (RMSE), se utiliza como una medida de diferencia entre datos simulados y datos observados, estas diferencias individuales son llamadas residuos, el RMSE es la raíz cuadrada que permite la magnitud promedio del error, en

donde el valor de 0 significa un ajuste perfecto. Se obtiene de la siguiente ecuación (Albuja S. & Tenelanda P., 2014).

Ecuación 17

$$RMSE = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{si})^2}{n}$$

Siendo Q_{oi} el gasto simulado, Q_{si} el gasto medido y n el número de puntos en consideración.

5.10 Generación de mapas de peligro

El peligro se define como la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente destructivo en un lapso dado. La capacidad del peligro se mide por su intensidad y su periodo de retorno (Cenapred, 2014).

De acuerdo con Federal Emergency Management Agency (FEMA, 2009) la visión de un mapa de peligro: “es proporcionar datos de calidad que incrementen la confianza del público y les permita tomar acciones que reduzcan los daños en vidas y propiedades. Los mapas de peligro por inundación se generan a partir de la modelización de inundaciones con ayuda de algún software”.

IMTA, (2015) menciona que se cuenta con diversos criterios para la generación de mapas de peligro por inundación, dentro de los más conocidos se encuentran los siguientes:

- I. Criterio de la Office Fédéral de l'Économie Des Eaux (OFEE). Oficina del gobierno de suiza dependiente del departamento del medio ambiente. El criterio de peligro lo define en bajo, medio y alto considerando el tirante y la relación velocidad x tirante ($v \cdot h$) como las variables que determinan el nivel de peligro.
- II. Criterio de la Federal Emergency Management Agency (FEMA). Relaciona la profundidad máxima o tirante máximo h (m) con la velocidad máxima del agua. Sus rangos de peligro son nivel bajo, zona de amenaza moderada y zona de alto nivel de amenaza.
- III. Criterio aplicado en la ciudad de Dórrigo, Australia. En la ciudad de Dórrigo, Australia se generaron mapas de peligro con base en el criterio de profundidad y velocidad, en el que se definen cinco rangos de peligro: Bajo, medio, alto, muy alto y máximo, (Fuentes Mariles, 2011).

5.11 Criterio considerado para la generación de mapas de peligro para zonas urbanas

Para la generación de los mapas de peligro se retomó lo realizado por IMTA, (2015) el criterio se basa en investigaciones realizadas por Alcocer-Yamanaka et. al, (2012) para el manejo integral de aguas pluviales en zonas urbanas el cual lo define en cuatro componentes:

1. **Identificación de la problemática de las inundaciones** (hundimientos de terreno, topografía del terreno, lluvias extraordinarias)
2. **Análisis hidrológico e hidrográfico** (Identificación de lluvias que generaran inundaciones, generación de curvas IDT, configuración de subcuencas e identificación de uso de suelo)
3. **Herramientas de cálculo para la generación del modelo de simulación** (MDE, uso de SIG en la modelación, construcción del modelo de simulación de escurrimiento en calles para la generación de mapas de riesgo)
4. **Generación de los escenarios para la mitigación de los riesgos por inundación** (generación de mapas de inundación para diferentes lluvias, evaluación de los costos generados por los defectos de inundación, costos de implementar acciones estructurales y no estructurales para disminuir los riesgos de la inundación)

La Tabla 5.4 muestra los valores considerados para la generación de mapas de peligro por inundación en la cual se consideran las variables de tirante (y) y velocidad (m/s), volcamiento (m^2/s) y deslizamiento (m^3/s^2).

Tabla 5.4 Valores establecidos para la generación de mapas de peligro. Fuente: (IMTA, 2015)

Nivel de peligro	Altura (m)	Volcamiento (m^2/s)	Deslizamiento (m^3/s)
Nulo	$h < 0.3$	$vh < 0.3$	$v^2h < 0.3$
Bajo	$0.3 \geq h < 0.5$	$0.3 \geq vh < 0.5$	$0.3 \geq v^2h < 0.5$
Medio	$0.5 \geq h < 1.5$	$0.5 \geq vh < 1.5$	$0.5 \geq v^2h < 1.23$
Alto	$h \geq 1.5$	$vh \geq 1.5$	$v^2h \geq 1.23$

Los valores de las variables propuestas en la Tabla 5.4 se establecen con los criterios siguientes: el tirante de 0.3 m se considera con un nivel de peligro nulo debido a que éste no alcanza a rebasar el nivel de banquetta promedio, por lo que el agua no llegaría a entrar en los hogares. En los rangos de 0.3 m a 0.5 m, el nivel de peligro se considera bajo, es decir, el daño a la estructura de la casa, así como al menaje, no es considerable. En tirantes de 0.5 m a 1.5 m, el nivel de peligro es medio, debido a que el daño a muebles y estructura del hogar tiende a ser elevado. Cuando el nivel del

agua alcanza 1.5 m de altura, el peligro se cataloga como alto (Alcocer-Yamanaka et. al, 2016).

Alcocer-Yamanaka et. al, (2016) hace mención que el máximo deslizamiento considerado de 1.23 m³/s, se obtuvo a partir de un modelo teórico experimental realizado por Nanía (1999), en el estudio se consideró la estabilidad al deslizamiento de las personas ante la fuerza de arrastre que ejerce el flujo sobre ellas cuando es necesario cruzar las calles. La estabilidad al deslizamiento está definida por la siguiente ecuación:

Ecuación 18

$$F = \frac{1}{2} C_d \rho A V^2$$

Siendo:

- $F =$ fuerza de arrastre
- $C_d =$ coeficiente de arrastre, que depende básicamente de la forma de la superficie contra la cual choca el fluido (adimensional)
- $\rho =$ densidad del fluido (kg/m³)
- $A =$ proyección frontal del área en donde actúa la fuerza del agua, que es igual a y (b), siendo este el producto del tirante por el ancho de la persona, en este caso de las piernas (m²)
- $V =$ velocidad del fluido (m/s)

Considerando que el coeficiente de arrastre para un cilindro de altura infinita es igual a 1.2 (Streeter & Wylie, 1979), la densidad del agua es de 1 000 kg/m³, el ancho de las piernas $b = 0.1 \text{ m} \times 2 = 0.2 \text{ m}$; el peso de la persona de 60 kgf, y el coeficiente de fricción entre el caucho y el concreto húmedo igual a 0.50 (Gieck, 1981), con un coeficiente de seguridad de 2, para incluir el efecto del empuje y la posible variación de los parámetros considerados, la condición de estabilidad está dada por la siguiente desigualdad (Alcocer-Yamanaka et. al, 2016):

$$v^2 h = \frac{2\mu P1}{C_d \rho B2} = \frac{2(0.5)(60)(9.81)}{1.2(2)(1000)(0.2)} \frac{m^3}{s^2} = 1.23 \frac{m^3}{s^2}$$

6 APLICACIÓN A UNA ZONA URBANA

6.1 Zona de estudio-Tuxtla Gutiérrez

Tuxtla Gutiérrez, capital del estado de Chiapas se encuentra dentro de la cuenca del río Sabinal la cual tiene un área aproximada de 362 km², mientras que la zona urbana es de 122 km². El cauce del río Sabinal que atraviesa la ciudad tiene una longitud total de 19.40 km.

El número de habitantes del municipio de Tuxtla Gutiérrez en el año 2015 fue de 598 710 de acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2018).

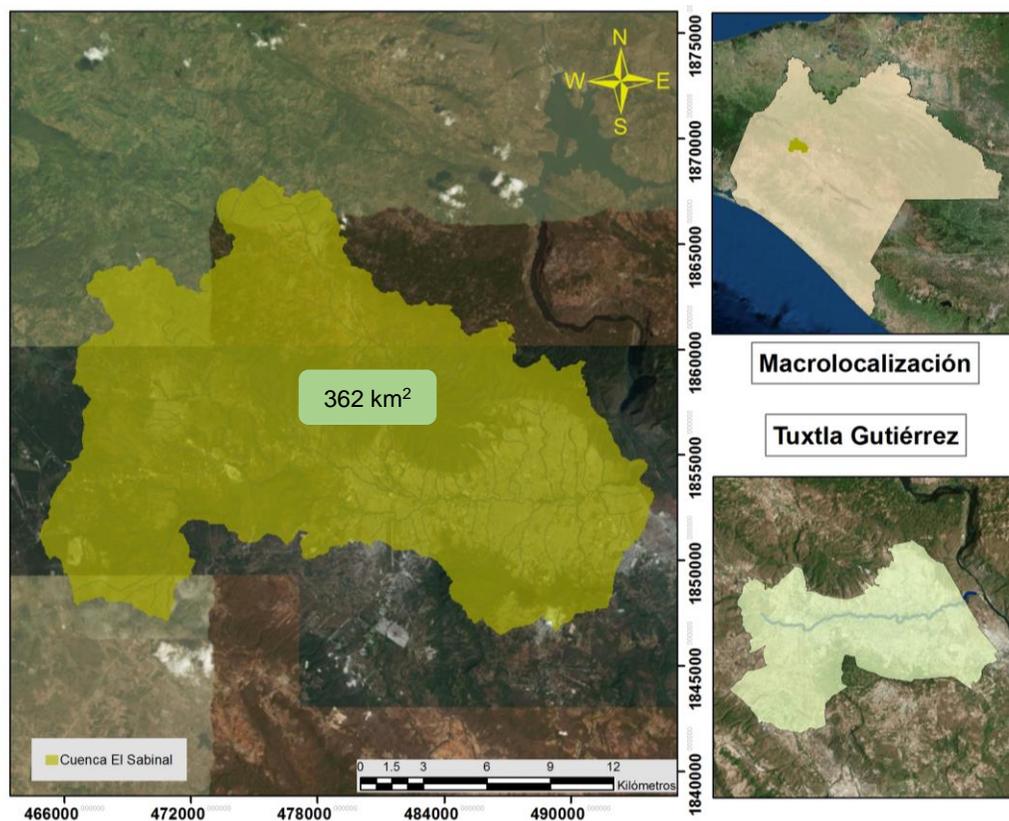


Ilustración 6.1 Ubicación de la cuenca del río Sabinal y de la zona urbana de Tuxtla Gutiérrez

6.1.1 Estación Meteorológica Automática (EMAS)

Se cuenta con 19 estaciones meteorológicas automáticas, 8 de ellas instaladas por Cenapred en la zona alta de la cuenca y los 11 restantes en la zona urbana de Tuxtla Gutiérrez instaladas en el año 2014, la Ilustración 6.2 muestra la ubicación de las estaciones.

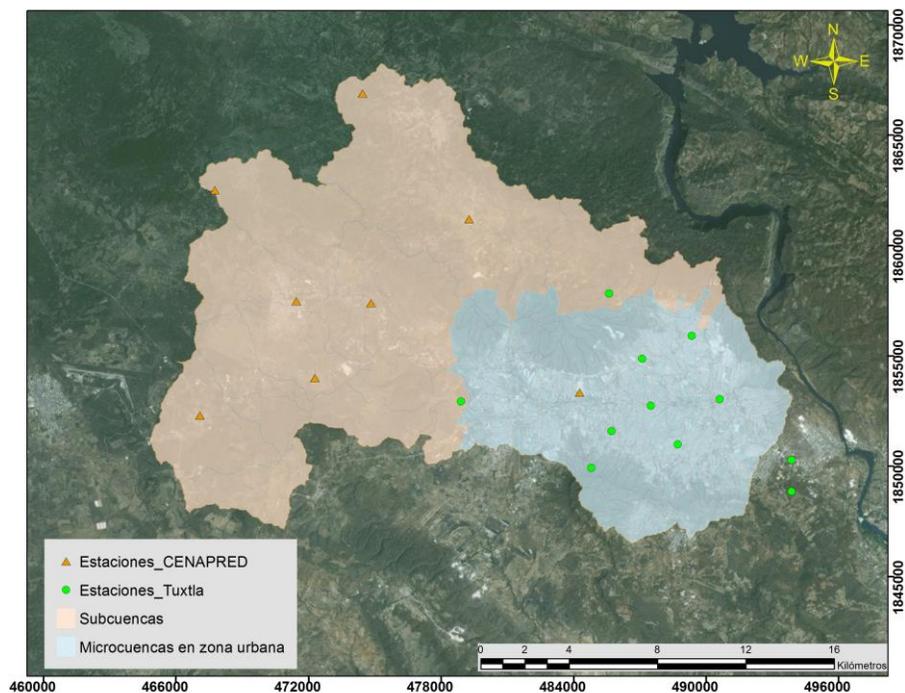


Ilustración 6.2 Estaciones meteorológicas automáticas en la cuenca del río Sabinal

La Tabla 6.1 muestra la información de las EMAS de la cuenca del río Sabinal.

Tabla 6.1 EMAS de la cuenca del río Sabinal

Estación Meteorológica Automática		Latitud	Longitud	Administrador	Estado actual
Estación	Municipio				
Mirador	San Fernando	16°53'7.50"	93°14'23.10"	Cenapred	Inactiva
Vista Hermosa	Berriozábal	16°50'44.70"	93°18'9.20"	Cenapred	Inactiva
Berriozábal	Berriozábal	16°48'1.10"	93°16'4.10"	Cenapred	Inactiva
Solidaridad	Berriozábal	16°46'7.20"	93°15'53.60"	Cenapred D	Inactiva
A. Bombano	Berriozábal	16°45'12.50"	93°18'31.40"	Cenapred D	Inactiva
Caridad	Berriozábal	16°47'58.40"	93°14'9.80"	Cenapred	Inactiva
Viva Cárdenas	San Fernando	16°50'2.70"	93°11'40.10"	Cenapred	Inactiva
Tuxtla Gtz. O. M.	Tuxtla Gtz.	16°45'47.00"	93°8'50.80"	Cenapred	Inactiva
Centro 2a Pte.	Tuxtla Gtz.	16°45'27.64"	93°7'2.11"	Ocfs	Activa
Club campestre	Tuxtla Gtz.	16°45'33.35"	93°11'52.35"	Ocfs	Activa
Cristal	Tuxtla Gtz.	16°43'55.53"	93°8'33.00"	Ocfs	Activa
Módulo 5	Tuxtla Gtz.	16°44'30.52"	93°6'20.74"	Ocfs	Activa
Much	Tuxtla Gtz.	16°43'21.05"	93°3'26.55"	Ocfs	Activa
Parque Oriente	Tuxtla Gtz.	16°45'37.10"	93°5'16.60"	Ocfs	Activa
San Juan	Tuxtla Gtz.	16°48'12.82"	93°8'6.06"	Ocfs	Activa
Sec. Técnica 59	Tuxtla Gtz.	16°44'50.03"	93°8'1.89"	Ocfs	Activa

Estación Meteorológica Automática		Latitud	Longitud	Administrador	Estado actual
Estación	Municipio				
Trabajo social	Tuxtla Gtz.	16°44'7.26"	93°3'26.55"	Ocfs	Activa
Unicach	Tuxtla Gtz.	16°46'36.41"	93°7'15.47"	Ocfs	Activa
Xamaipac	Tuxtla Gtz.	16°47'10.44"	93°5'59.58"	Ocfs	Activa

6.1.2 Área de influencia de cada Estación Meteorológica Automática (EMA)

El método consiste en colocar en un mapa las estaciones pluviométricas y el área o cuenca para la que se realiza el análisis, en seguida se forman triángulos con las estaciones más próximas entre ellas y posteriormente se trazan las mediatrices o bisectrices perpendiculares a cada lado de los triángulos formados definiéndose unos polígonos alrededor de cada estación pluviométrica (Campos A, 1992).

Las estaciones implementadas en un inicio por Cenapred estuvieron en función del año **2008 al 2015**, esto de acuerdo con los registros proporcionados por el Organismo Cuenca Frontera Sur de la Conagua (Ocfs), con lo cual las 11 EMAS ubicadas en la zona urbana de Tuxtla Gutiérrez que entraron en funcionamiento desde año 2014 hasta la fecha y son las únicas que están en funcionamiento. La Ilustración 6.3 muestra el área de influencia de las 11 estaciones que se encuentran en función actualmente, esto de acuerdo con los polígonos de Thiessen.

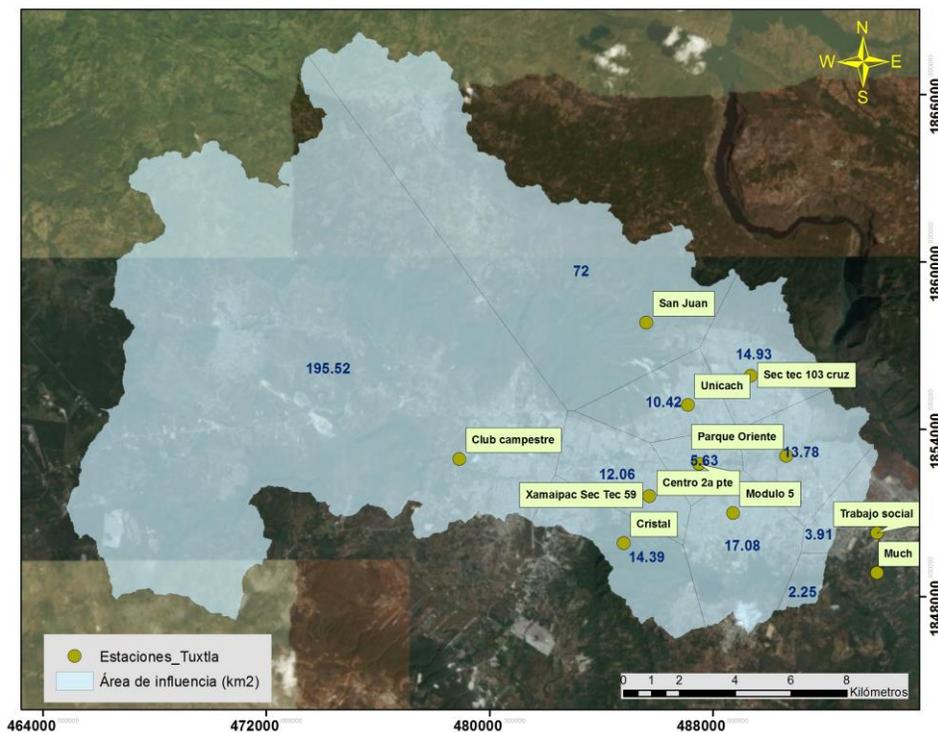


Ilustración 6.3 Área de influencia (km²) de las 11 EMAS sobre la cuenca del río Sabinal

6.2 Estaciones hidrométricas ubicadas en el río Sabinal

Actualmente se cuenta con 8 estaciones hidrométricas con registros de nivel (msnm); de éstas se recopiló información de los registros del año 2015-2017 proporcionados por el Organismo de Cuenca Frontera Sur (Ocfs) de la Comisión Nacional del Agua (Conagua). La Ilustración 6.14 muestra la ubicación de las estaciones y la Tabla 6.2 muestra su información de localización.

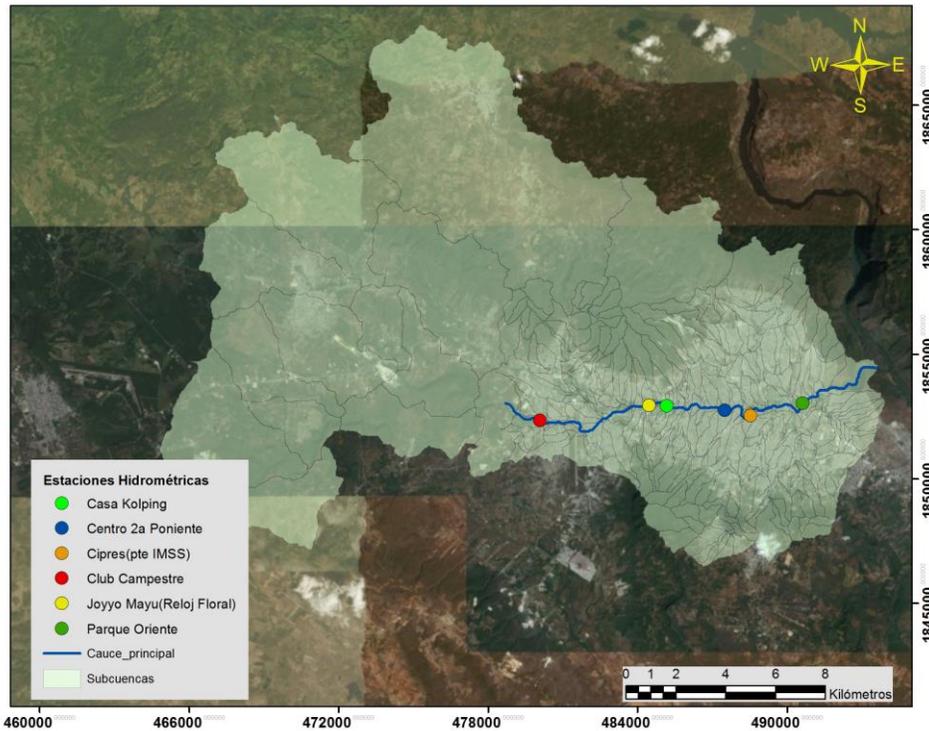


Ilustración 6.4 Ubicación de las estaciones hidrométricas en el río Sabinal

Tabla 6.2 Información de las estaciones hidrométricas ubicadas en el río Sabinal

Hidrométricas		Latitud	Longitud	Administrador	Estado actual
Estación	Municipio				
Club Campestre	Tuxtla Gtz.	16°45'14.40"	93°11'12.50"	Ocfs	Activa
Casa Kolping	Tuxtla Gtz.	16°45'33.74"	93°8'20.93"	Ocfs	Activa
Reloj Floral	Tuxtla Gtz.	16°45'34.00"	93°8'44.80"	Ocfs	Activa
Puente IMSS	Tuxtla Gtz.	16°45'21.06"	93°6'27.57"	Ocfs	Activa
Parque Oriente	Tuxtla Gtz.	16°45'37.10"	93°5'16.60"	Ocfs	Activa
Centro 2a poniente	Tuxtla Gtz.	16°45'27.64"	93°7'2.11"	Ocfs	Activa

6.3 Modelo Digital de Elevaciones

Un modelo digital de elevación es una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las

formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo (INEGI, 2017). En México se pueden descargar a partir de diferente resolución, la descarga se realiza desde el sitio web <http://www.inegi.org.mx> del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (ver Ilustración 6.5).

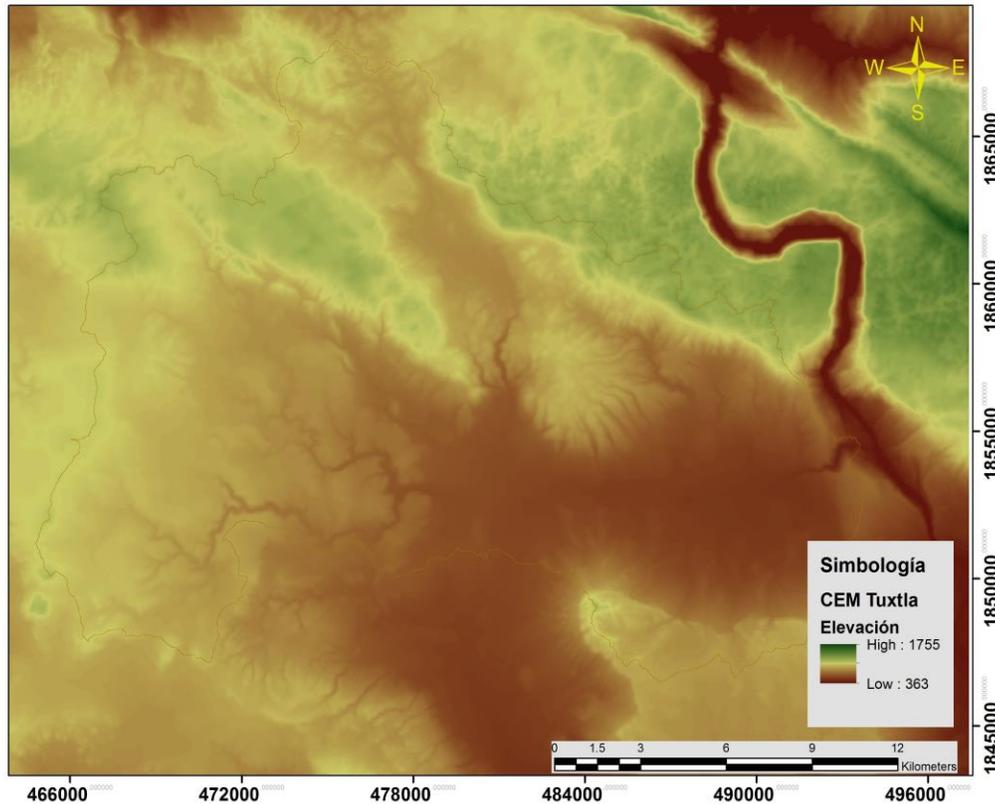


Ilustración 6.5 Modelo digital de elevaciones con resolución de 15 x 15m

6.4 Levantamiento LIDAR con resolución de 3 x 3 m

Un levantamiento LIDAR, es un levantamiento con mayor precisión en comparación con el continuo mexicano de elevaciones (CEM), a partir de la navegación aérea apoyada en láser se envía una señal donde se indica la altura de la zona. Estos levantamientos proporcionan una base topográfica con mayor precisión que permitirá generar las subcuencas y microcuencas de aportación de manera más detallada indicando las líneas de corriente de las mismas lo cual resulta de gran importancia a la hora de generar un modelo hidrológico en zonas urbanas. La Ilustración 6.6 se muestra el modelo Light Detection and Ranging (LIDAR) de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez el cual tiene una resolución de 3 x 3 m y el cual tiene de manera delimitada el río Sabinal.

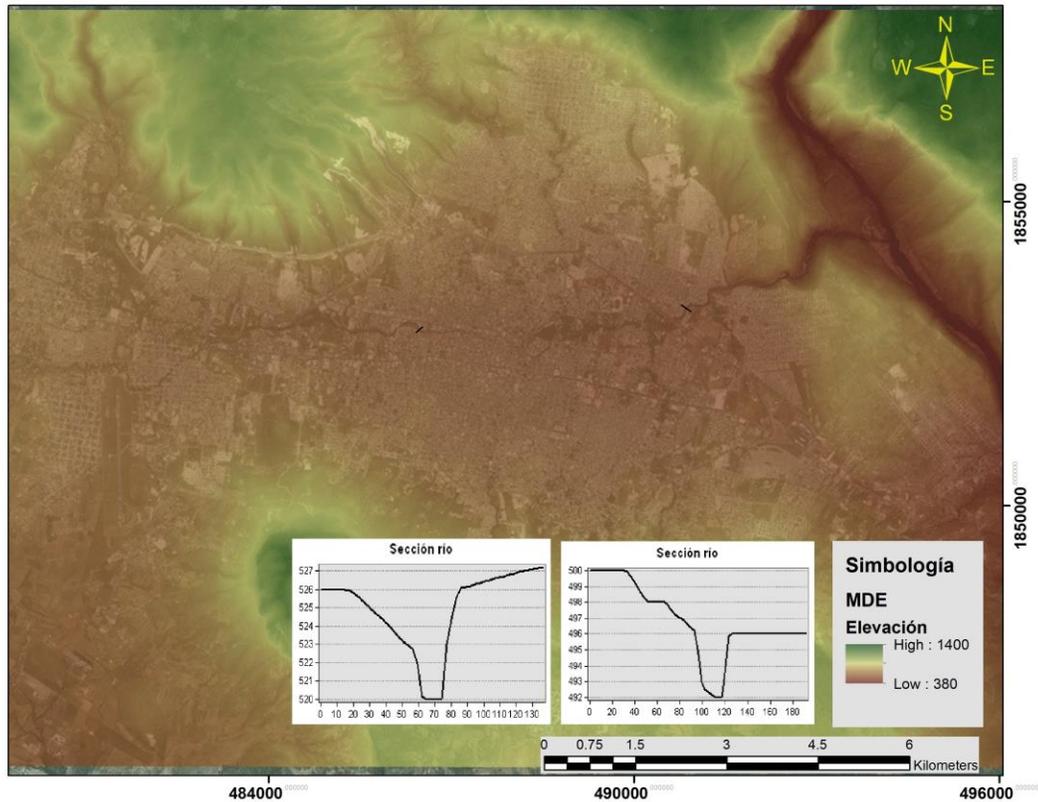


Ilustración 6.6 Modelo digital de elevaciones con resolución de 3 x 3 m e incluye la delimitación del río Sabinal

6.5 Planimetría de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez

La planimetría de la ciudad es la representación de la infraestructura que se encuentra sobre una superficie de terreno en el cual se puede observar los sitios más importantes del lugar como son las escuelas, plazas, parques entre otros.

Con el apoyo de la base de datos del área geostadística básica (AGEB) del INEGI se obtuvieron las manzanas en formato Shapefile de la zona urbanas de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, sin embargo, fue necesario depurar el archivo debido a que se consideran extensiones de áreas verdes como si fueran asentamientos humanos para lo cual se requirió hacer una delimitación detallada de las manzanas pertenecientes a la zona urbana de la ciudad (Ilustración 6.7).

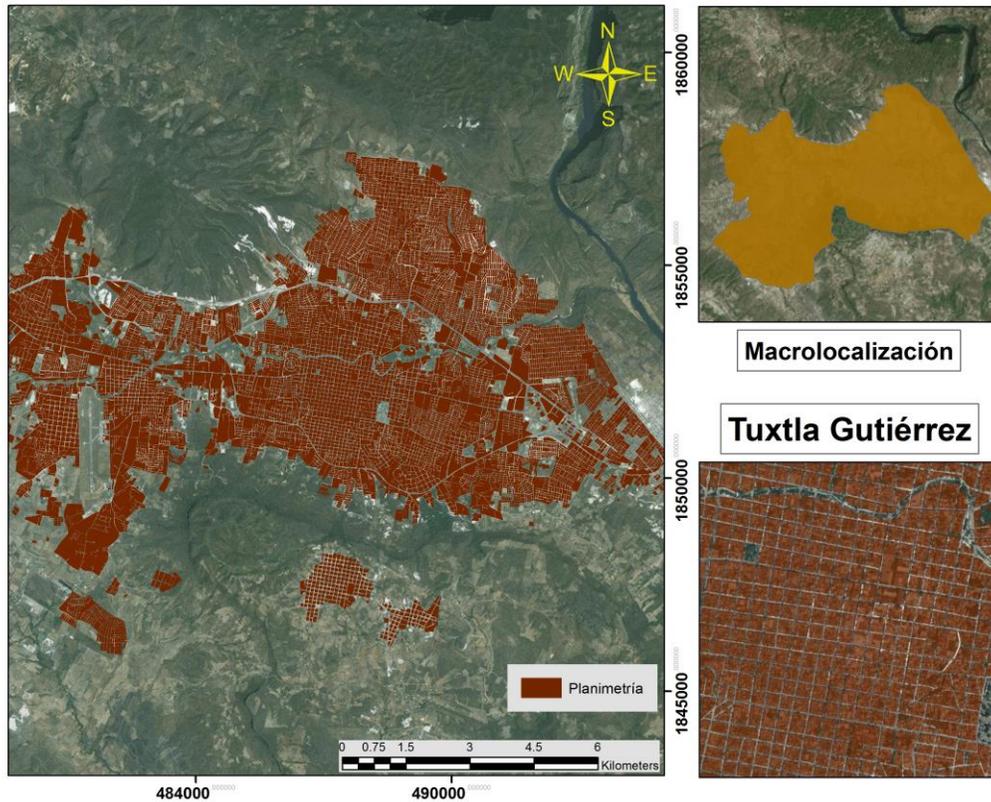


Ilustración 6.7 Planimetría de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez

6.6 Generación de subcuencas y microcuencas de aportación

Para la delimitación de la cuenca del río Sabinal y la generación de las subcuencas de aportación se utilizó el Modelo Digital de Elevaciones proporcionado por el INEGI, y para la generación de las microcuencas de aportación en la zona urbana se hizo uso del levantamiento LIDAR el cual como se mencionó anteriormente permite tener una mayor precisión al momento de generar las líneas de corriente y las microcuencas lo cual resulta de gran importancia en la obtención del gasto que transita a la salida de la misma.

Con el uso de un sistema de información geográfica (SIG) se delimitó la cuenca del río Sabinal y se generaron las subcuencas y microcuencas de aportación. La Ilustración 6.8 muestra el diagrama para la generación de las microcuencas de aportación.

A partir del proceso realizado para la generación de las subcuencas y microcuencas de aportación, la Ilustración 6.9 muestra delimitación de la cuenca del río Sabinal y las líneas de corriente sobre la misma.

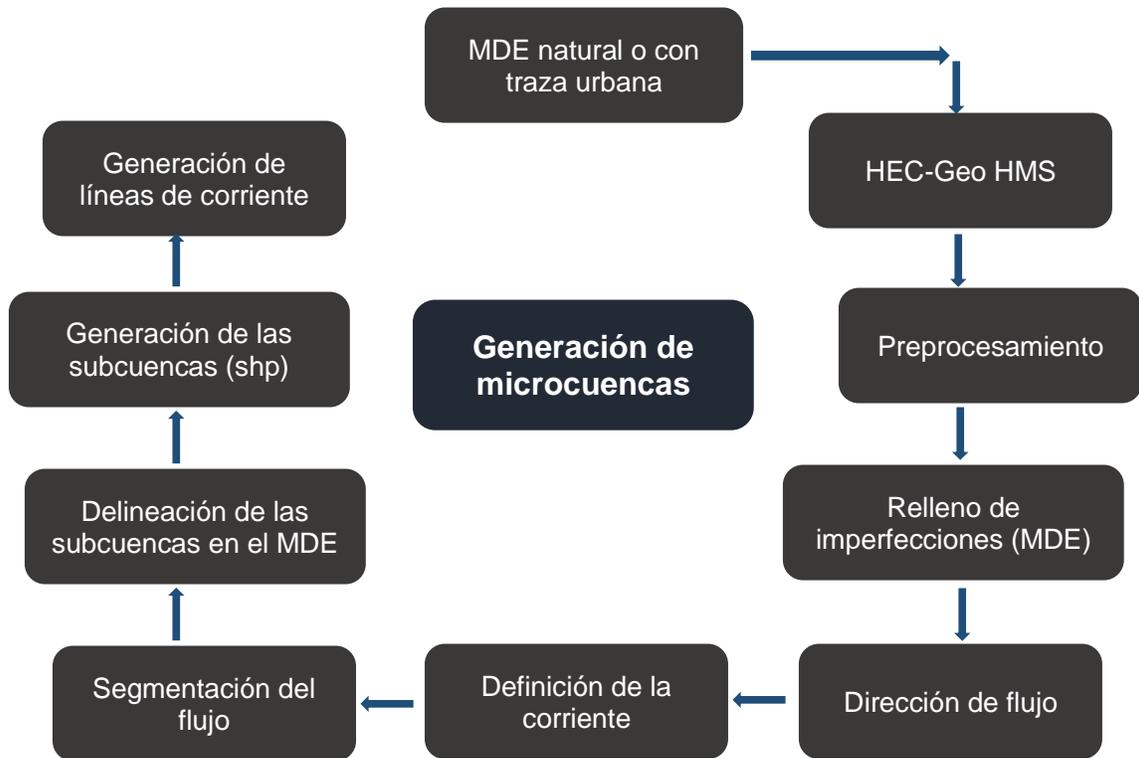


Ilustración 6.8 Generación de microcuencas de aportación. Fuente: (IMTA, 2014 a)

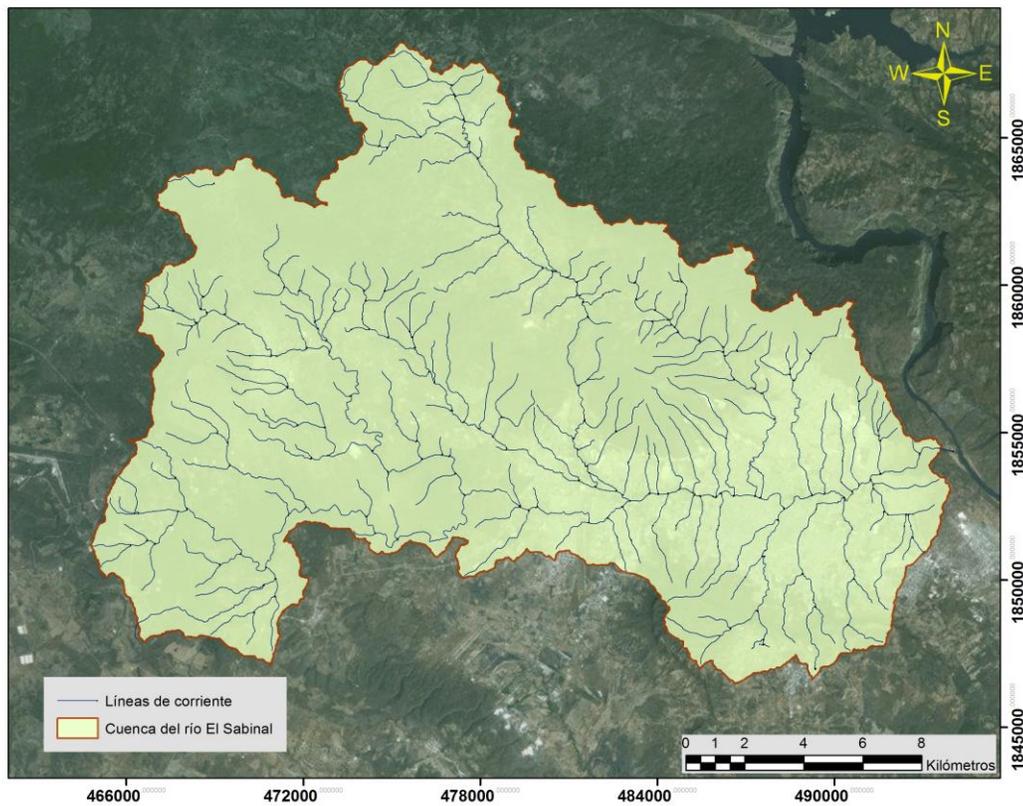


Ilustración 6.9 Delimitación de la cuenca del río Sabinal

Delimitada la cuenca del río Sabinal, se generaron las subcuencas (16) y las microcuencas de aportación (281), la Ilustración 6.10 muestra la ubicación geoespacial de las mismas.

El primer factor que determina la localización y número de las subcuencas es la variabilidad de los procesos hidrometeorológicos y de las condiciones fisiográficas de la cuenca, pues con cada subcuenca se intenta representar y adoptar áreas de cuenca con las mismas propiedades hidrológicas y/o hidráulicas (Campos A., 2015).

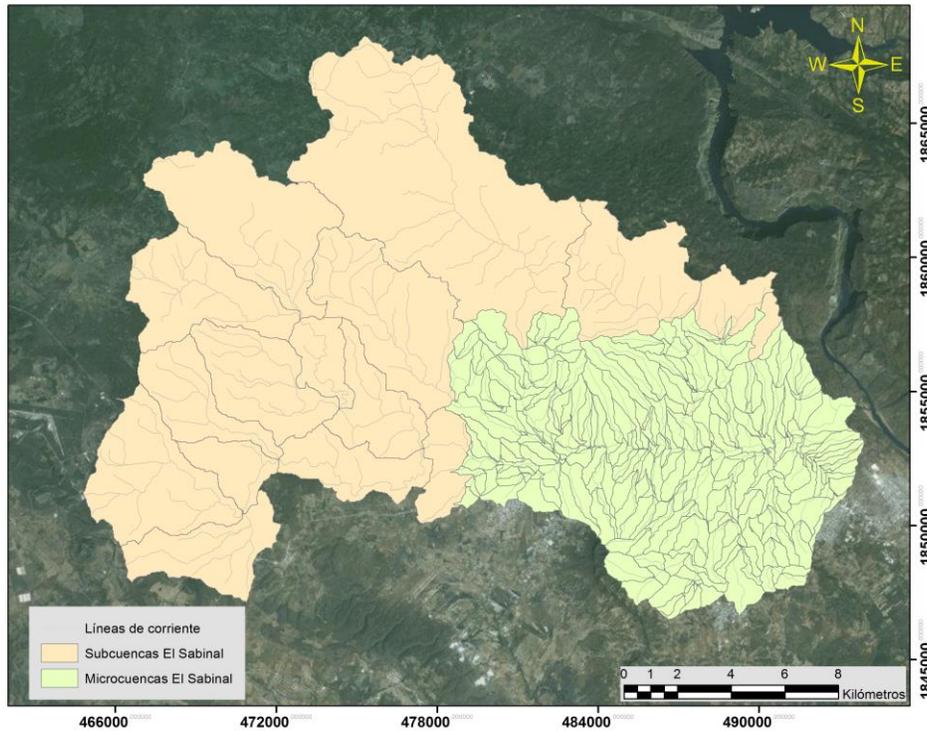


Ilustración 6.10 Subcuencas y microcuencas de aportación de la cuenca del río Sabinal

6.7 Características geomorfológicas de la cuenca

Una vez delimitadas las subcuencas y microcuencas de aportación sobre la zona de estudio, se realizó la generación de los parámetros geomorfológicos como lo es el uso de suelo, el área y la pendiente. Con ayuda de las herramientas con las que cuenta un sistema de información geográfica (SIG) se obtuvieron los parámetros.

6.7.1 Uso de suelo

Las cartas de uso del terreno del INEGI en escala 1:50,000 proporcionadas por el INEGI contienen información importante para la caracterización de cuencas de aportación de dimensiones mayores a 5 km²; estas permitieron obtener el uso de suelo en las subcuencas de aportación, sin embargo, a partir de que se generaron microcuencas en la zona urbana esto con la finalidad de tener un análisis más

detallado se realizó la elaboración del uso del terreno con la ayuda del programa informático gratuito Google Earth el cual permite la visualización de la cartografía usando como base la imagen satelital, con él se realizó el trazo de las áreas permeables y posteriormente su procesamiento en un SIG para la identificación del tipo de uso de suelo en la zona de análisis (ver Ilustración 6.11).

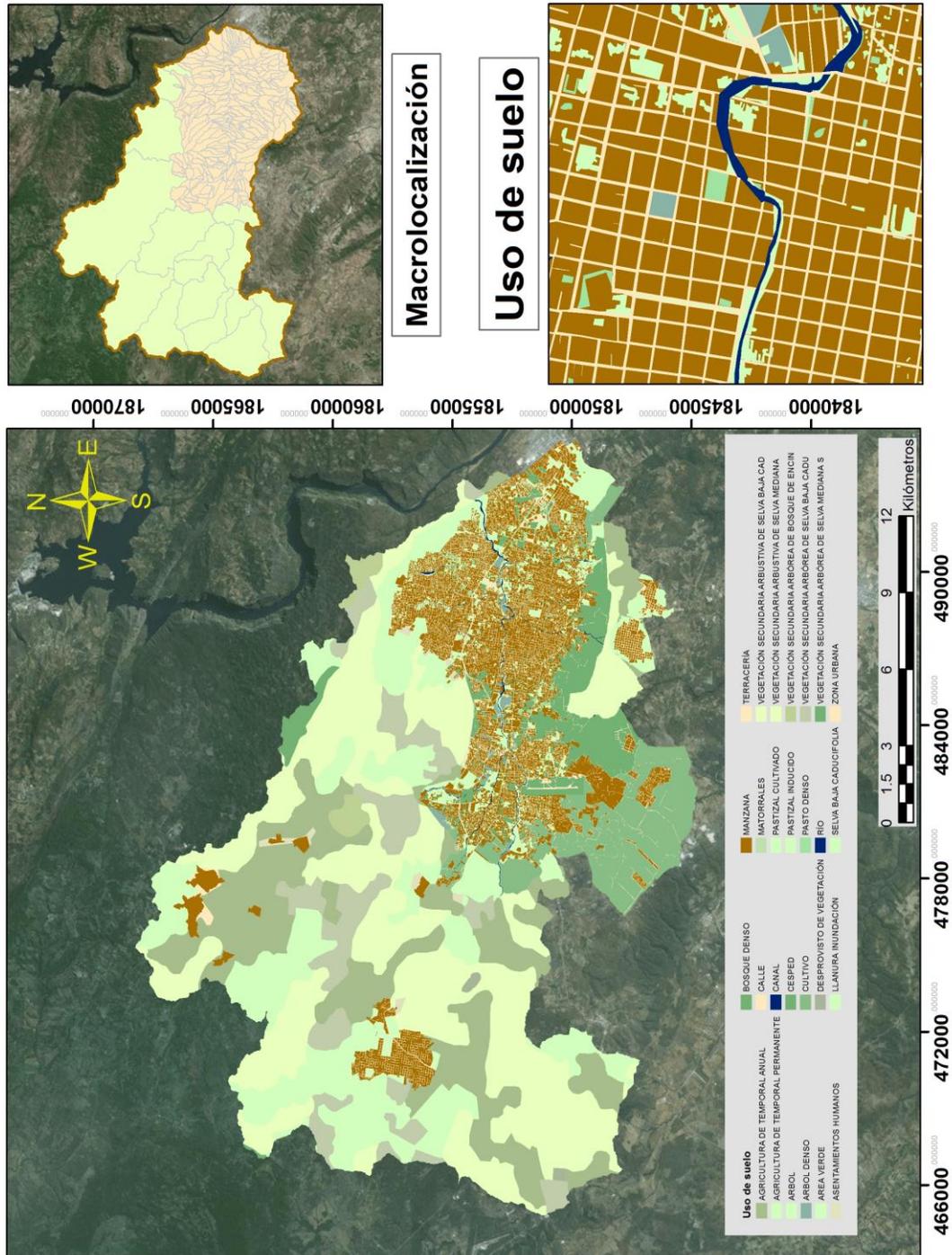


Ilustración 6.11 Uso de suelo de la cuenca del río Sabinal

6.7.2 Área de las subcuencas

Se generaron un total de 297 subcuencas y microcuencas de aportación sobre la cuenca del río Sabinal a partir de lo cual se obtuvo el área de cada una, las cuales varían de los 1.33 Ha a 6369.75 Ha. En las microcuencas generadas el rango varía de 1.33 Ha a 188.06 Ha, estas áreas permiten tener un análisis más detallado de los escurrimientos que se generan sobre la zona urbana (ver Ilustración 6.12).

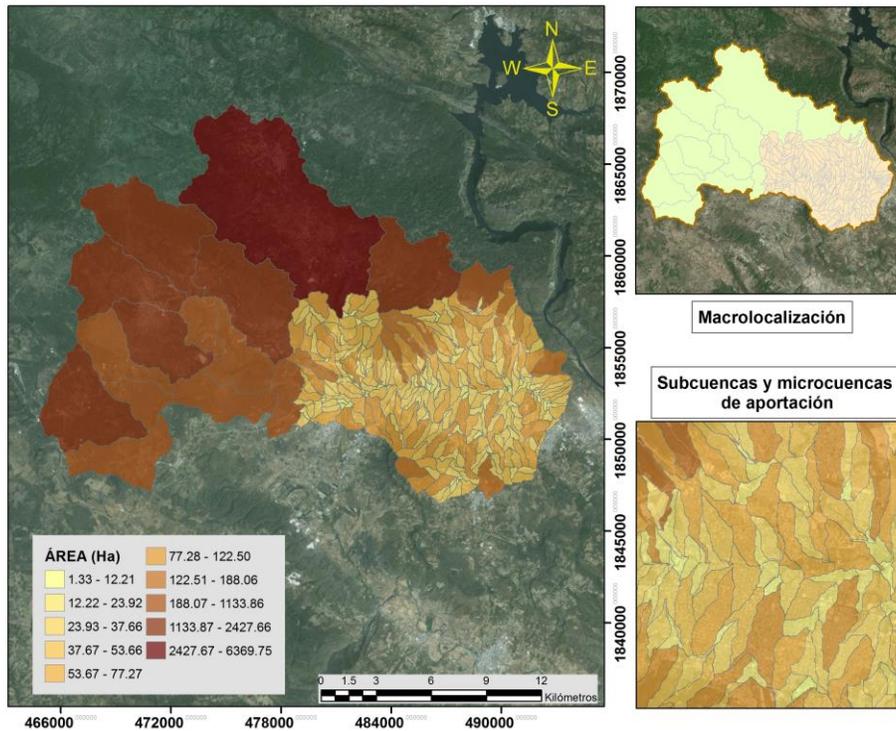


Ilustración 6.12 Área de las subcuencas y microcuencas de aportación de la cuenca del río Sabinal

6.7.3 Pendiente de las subcuencas

Con el modelo digital de elevaciones y las líneas de corriente las cuales representan el cauce en cada una de ellas se obtuvo la pendiente en cada una de las subcuencas y microcuencas (ver Ilustración 6.13).

$$S = \frac{(Elev\ mayor - Elev\ menor)}{longitud\ del\ cauce} \times 100 = \%$$

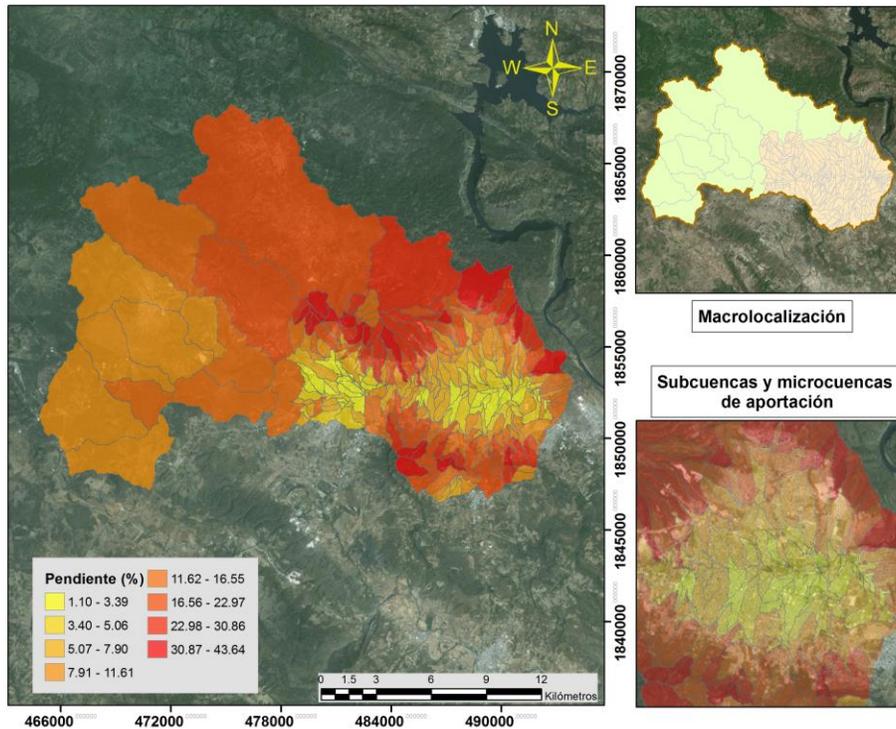


Ilustración 6.13 Pendiente (%) de las subcuencas y microcuencas de aportación de la cuenca del río Sabinal

6.7.4 Impermeabilidad de las subcuencas y microcuencas

Una superficie impermeable impide que existan infiltraciones sobre el suelo por parte de los escurrimientos generados a partir de un evento de lluvia, dentro de estas superficies se encuentran las calles pavimentadas, avenidas y paseos, techos y azoteas, sin embargo, existen tablas en donde se recomienda considerar un porcentaje de área impermeable aun en el césped tal como se muestra en la Tabla 6.3.

Tabla 6.3 Porcentajes de impermeabilidad en zonas urbanas. (Fuente: Campos A.2015)

Uso de terreno	% de área impermeable
Comercial	95
Alrededor de zonas comerciales	70
Residencial de familias individuales	50
Edificios de apartamentos (separados)	50
Edificios de apartamentos (juntos)	70
1/2 campo edificado o más	45
Apartamentos	70
Industrial (disperso)	80
Industrial (denso)	90
Parques y cementerios	7
Campos de juego	13

Uso de terreno	% de área impermeable
Escuelas	50
Patios de ferrocarril	20
Calles pavimentadas	100
Calles empedradas	40
Avenidas y paseos	96
Techos o azoteas	90
Césped en suelos arenosos	2
Césped en suelos arcillosos	2

El porcentaje del área impermeable se realizó a partir de una ponderación para cada una de las subcuencas, La Ilustración 6.14 muestra los porcentajes de impermeabilidad sobre las subcuencas y microcuencas de aportación de la cuenca del río Sabinal considerando los porcentajes recomendados de la tabla anterior.

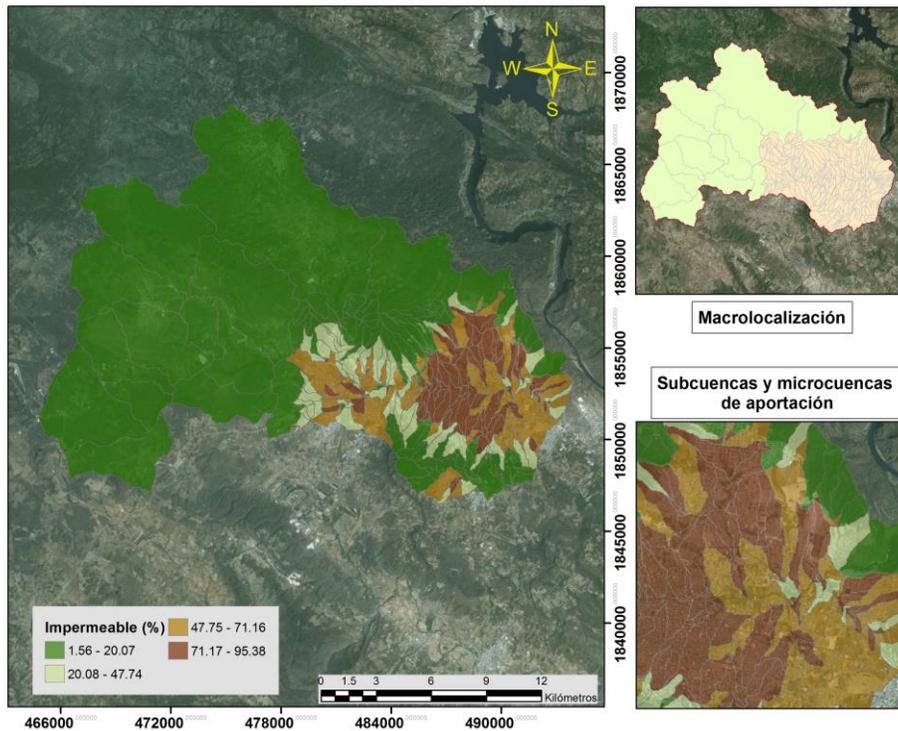


Ilustración 6.14 Porcentaje de impermeabilidad sobre las subcuencas y microcuencas de aportación

6.7.5 Coeficiente de rugosidad para las subcuencas y microcuencas de aportación

El coeficiente de rugosidad es un valor adimensional el cual se utiliza en diferentes ecuaciones de la hidráulica, permite obtener el gasto en cauce a partir de las características de la superficie donde transita el mismo. En el caso de las subcuencas y microcuencas es necesario obtener el coeficiente de rugosidad ponderado en cada una. Los coeficientes de rugosidad considerados se muestran en la Tabla 6.4 y la

Ilustración 6.15 muestra su asignación al uso del suelo de la cuenca del río Sabinas. Para cada subcuenca y microcuenca de aportación se calcularon promedios pesados y se obtuvo el coeficiente de rugosidad para el área impermeable (ver Ilustración 6.16) y para el área permeable (ver Ilustración 6.17).

Tabla 6.4 Coeficientes de rugosidad en flujo superficial. Fuente: (EPA, 2015)

Superficie	n
Asfalto suave	0.011
Concreto suave	0.012
Terracería	0.024
Superficie de escombros de cemento	0.024
Terreno improductivo (sin residuos)	0.05
Suelos cultivados	
Cubierta de residuos < 20%	0.06
Natural	0.13
Césped	
Corto, pradera	0.15
Denso	0.24
Césped bermuda	0.41
Bosque	
Maleza	0.40
Bosque denso	0.80

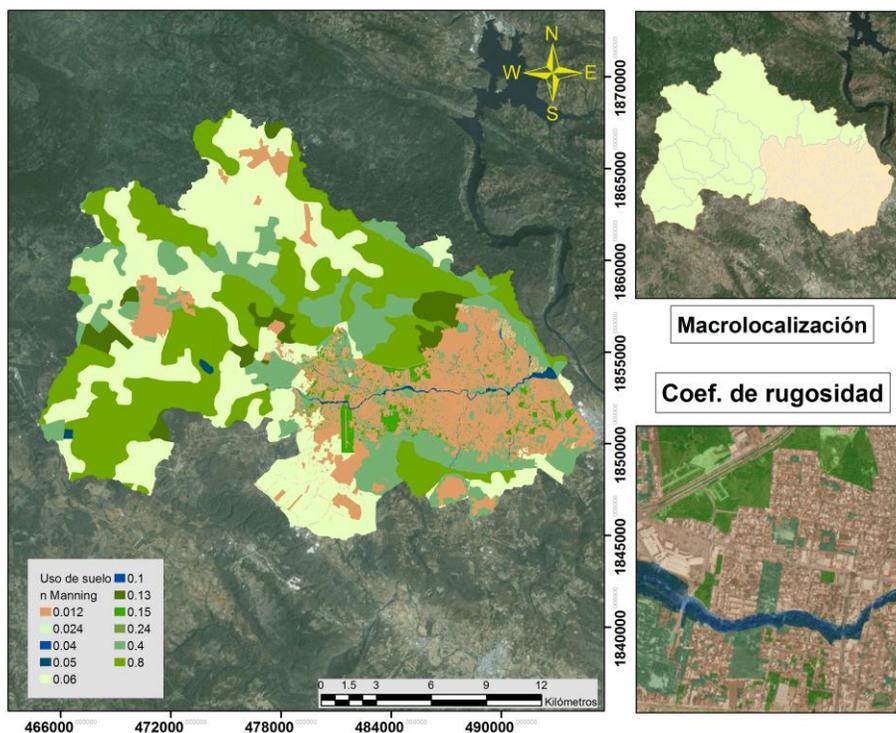


Ilustración 6.15 Coeficiente de rugosidad asignado de acuerdo con el uso de suelo

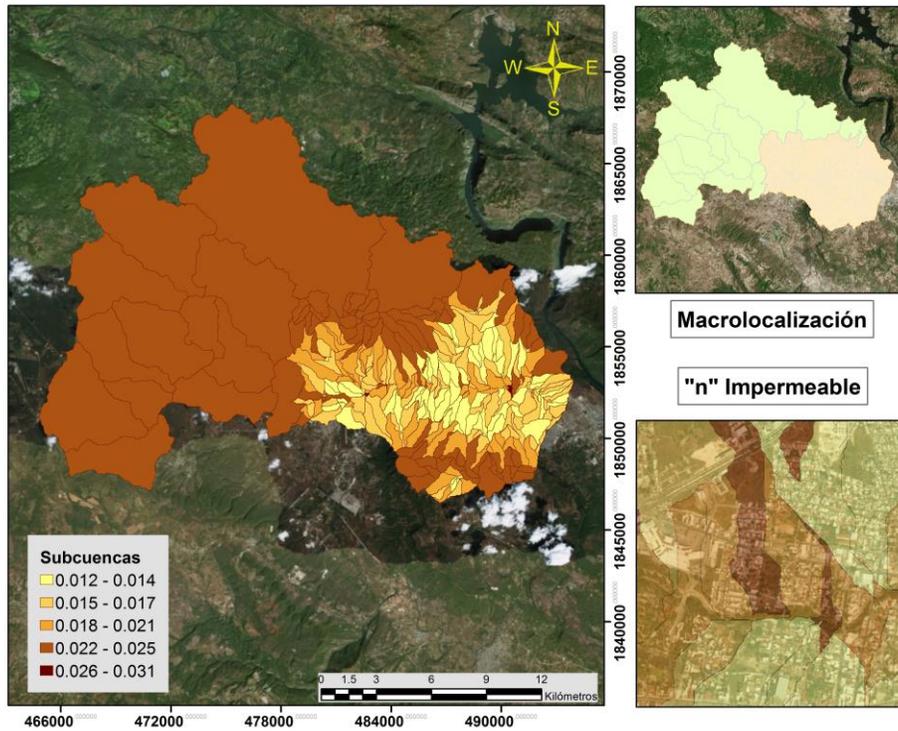


Ilustración 6.16 Coeficiente de rugosidad obtenido para el área impermeable denominado como n Impermeable

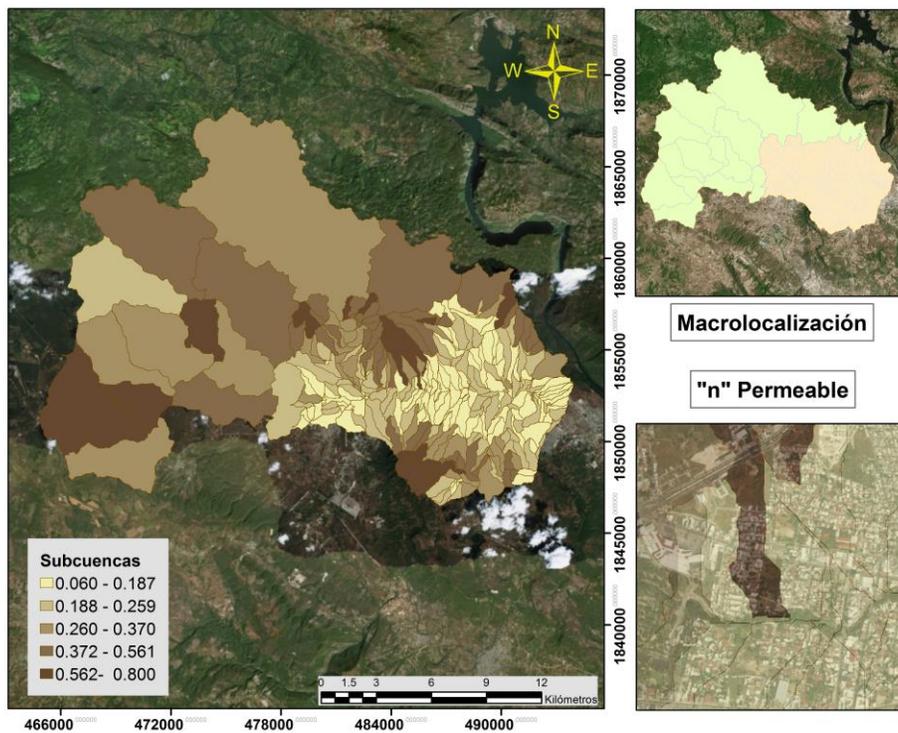


Ilustración 6.17 Coeficiente de rugosidad obtenido para el área permeable denominado como n permeable

6.7.6 Pendiente media del cauce principal sobre la zona urbana

La pendiente media del cauce principal sobre la zona urbana de Tuxtla Gutiérrez se obtuvo a partir del criterio de Taylor-Schwarz el cual establece la siguiente ecuación:

Ecuación 19

$$S = \left[\frac{L}{\frac{l_1}{\sqrt{S_1}} + \frac{l_2}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{l_n}{\sqrt{S_n}}} \right]^2$$

- S= pendiente media del cauce principal
 n= número de segmentos en que se divide el cauce principal
 L= longitud horizontal del cauce

Este dato se obtuvo utilizando el modelo digital de elevaciones con resolución de 3 x 3 m y procesando la información en un sistema de información geográfica (SIG). La longitud del cauce principal es de aproximadamente 19.40 km, aplicando la fórmula de Taylor-Schwarz se obtuvo una pendiente de 0.00605. Para el cálculo del tiempo de concentración se empleó la ecuación de Kirpich (Conagua, 1987). La Ilustración 6.18 la ubicación geoespacial del cauce principal.

$$T_c = 0.0003245 \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.77} = 0.0003245 \left(\frac{19389.03}{\sqrt{0.00605}} \right)^{0.77} = 4.64 \text{ hr}$$

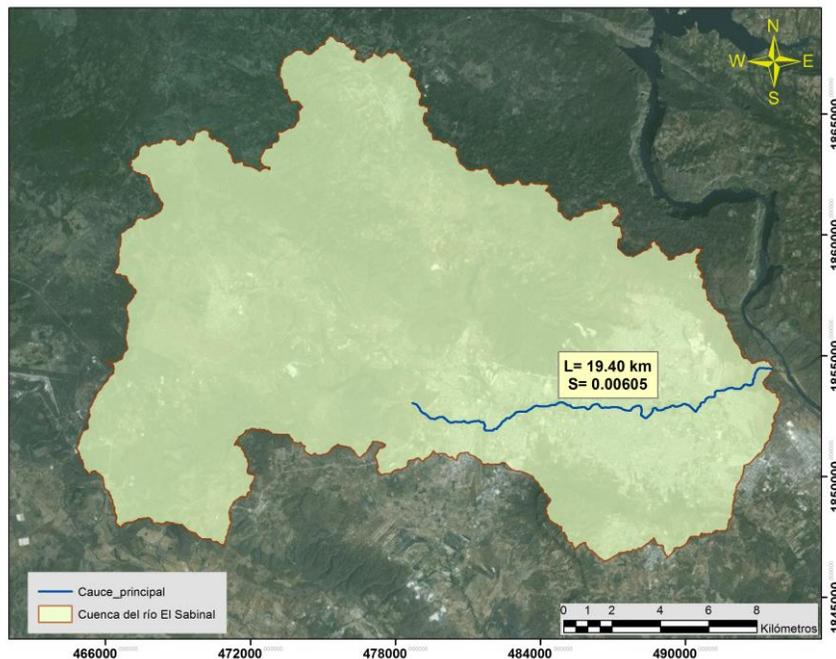


Ilustración 6.18 Ubicación del cauce principal de la cuenca del río Sabinal

6.8 Modelo WRF v3.6.1 aplicado en la zona de la cuenca del río Sabinal

Para la modelación hidrológica en la cuenca del río Sabinal se consideraron los datos de reflectividad del modelo numérico WRF v3.6.1 utilizando una resolución de la malla de 4 x 4 km. Esta resolución es la más pequeña que puede considerar este modelo, con lo cual la cuadrícula estuvo compuesta de 33 celdas las cuales abarcaron la cuenca del río Sabinal.

A partir del procesamiento de los datos de reflectividad del modelo WRF v3.6.1 en un Sistema de Información Geográfica, la Ilustración 6.19 muestra la ubicación geoespacial de la cuadrícula sobre la zona de estudio. La metodología que se aplicó para el procesamiento de la información del modelo WRF v3.6.1 y de los datos de las Estaciones Meteorológicas Automáticas es la que se explica en el capítulo 5.

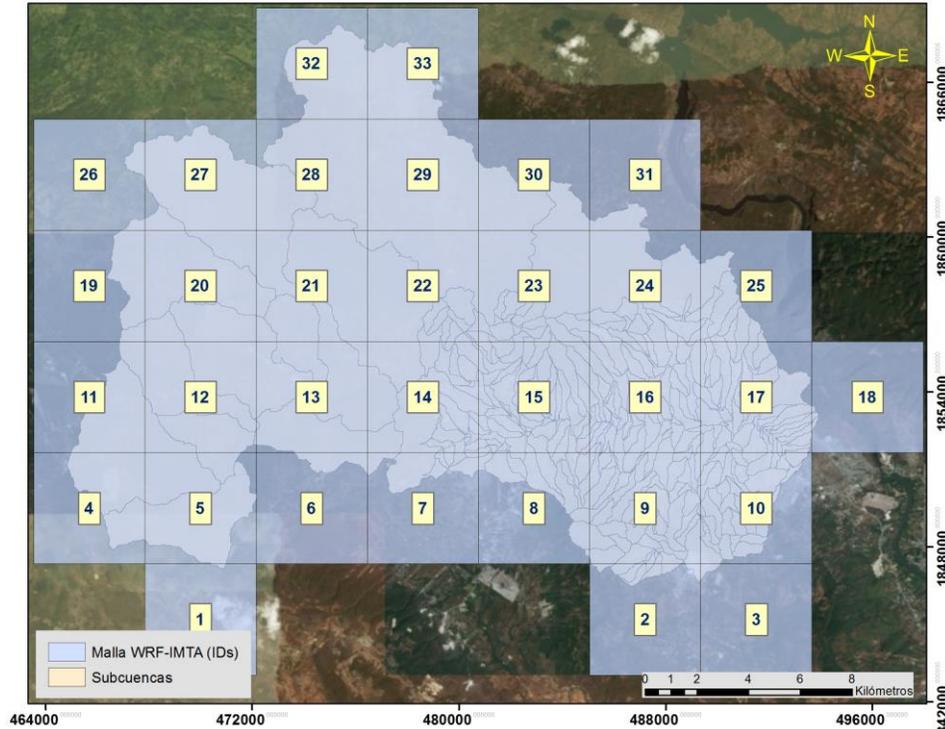


Ilustración 6.19 Ubicación geoespacial del modelo WRF v3.6.1 sobre la cuenca del río Sabinal

6.8.1 Área de influencia del modelo WRF v3.6.1 a partir de las EMAS

El área de influencia de cada celda considerada sobre las subcuencas se determinó a partir de los polígonos de Thiessen generados sobre las EMAS consideradas en el análisis.

Para la generación de los polígonos de Thiessen en cada evento se descartaron las EMAS que contaban con *datos incorrectos*, esto de acuerdo con lo visualizado en la

asociación de las estaciones en un Sistema de Información Geográfica SIG (ver Ilustración 5.9).

Evento del mes de septiembre del 2016

Se consideró el evento del día 2 de septiembre del 2016 de las 20:00 h a las 23:50 h en horario local, para relacionar los datos del modelo y de las EMAS fue necesario considerar los datos en horario UTC siendo este de la 1:00 a la 4:50 UTC.

La Ilustración 6.20 muestra el área de influencia de las 10 Estaciones Meteorológicas Automáticas sobre las celdas del Modelo WRF v3.6.1.

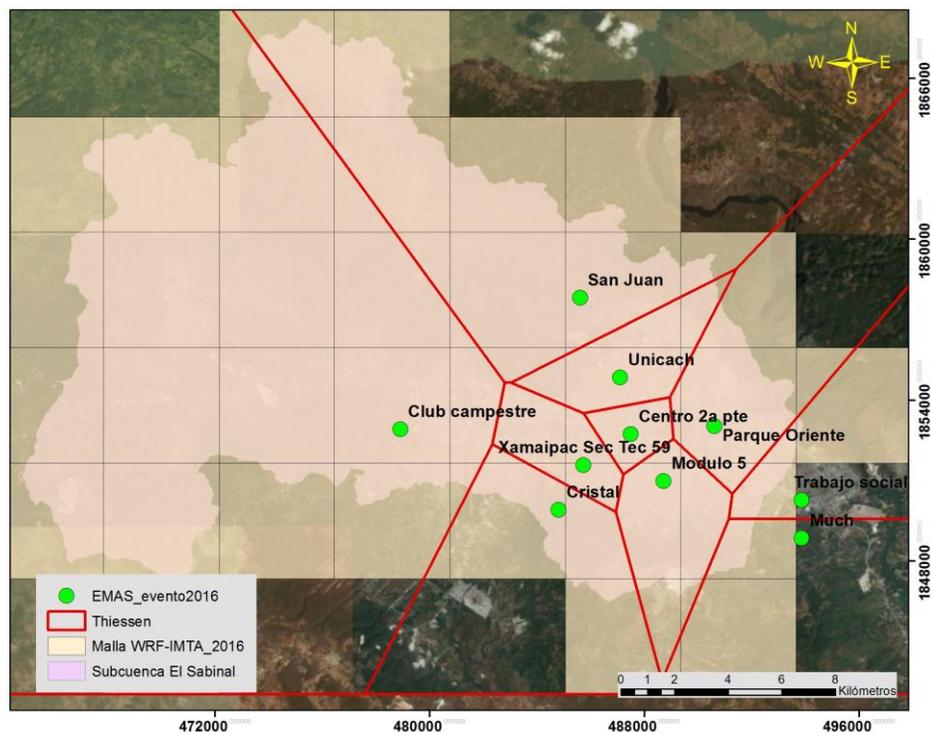


Ilustración 6.20 Polígonos de Thiessen para el evento de 2 de septiembre del 2016 (Horario UTC)

Evento del mes de junio del 2017

El evento se registró el día 23 de junio del 2017 iniciando a la 18:30 h y terminó a las 23:50 h en horario local. Similar al evento anterior se consideró de las 23:30 h a las 4:50 h en horario UTC. La Ilustración 6.21 muestra el área de influencia de las 7 Estaciones Meteorológicas Automáticas sobre las celdas del Modelo WRF v3.6.1.

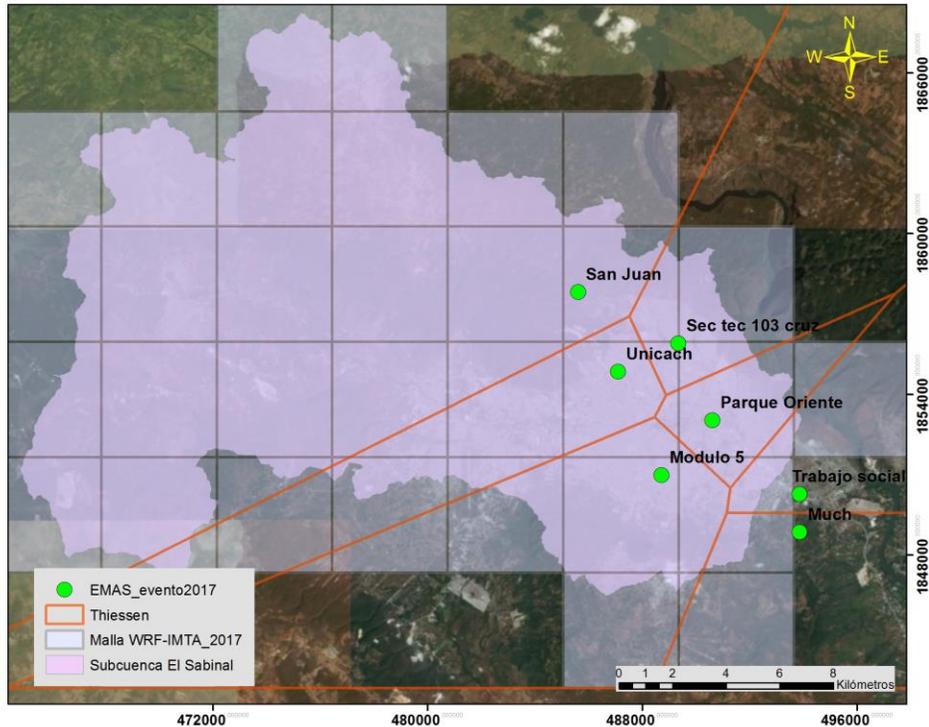


Ilustración 6.21 Polígonos de Thiessen para el evento de 23 de junio del 2017 (Horario UTC)

6.9 Factores de corrección (F.C.) del modelo WRF v3.6.1 para la cuenca del río Sabinal

Como se explicó en el capítulo 5, el ajuste de los datos de reflectividad provenientes del modelo WRF v3.6.1 se obtuvo a partir de la Ecuación 10:

Ecuación 10

$$FC_i = \frac{Z_c}{Z_e}$$

Con esto se obtuvo el factor de corrección o sesgo para cada celda en intervalos de 10 min para los eventos considerados como se ha explicado anteriormente. Se ha considerado el F.C.= 1 en aquellas celdas en las cuales se ubica una o más Estaciones Meteorológicas Automáticas.

6.10 Factor de corrección (F.C.) para el evento del 2 de septiembre del 2016 (Hora UTC)

El evento se consideró de la 1:00 a las 4:40 hora UTC, con lo cual se obtuvieron 24 factores de corrección para cada celda en intervalos de 10 minutos. La Ilustración 6.22 muestra los F.C. obtenidos en diferentes intervalos de tiempo del evento, así mismo la ubicación de las EMAS consideradas con su identificador (ID).

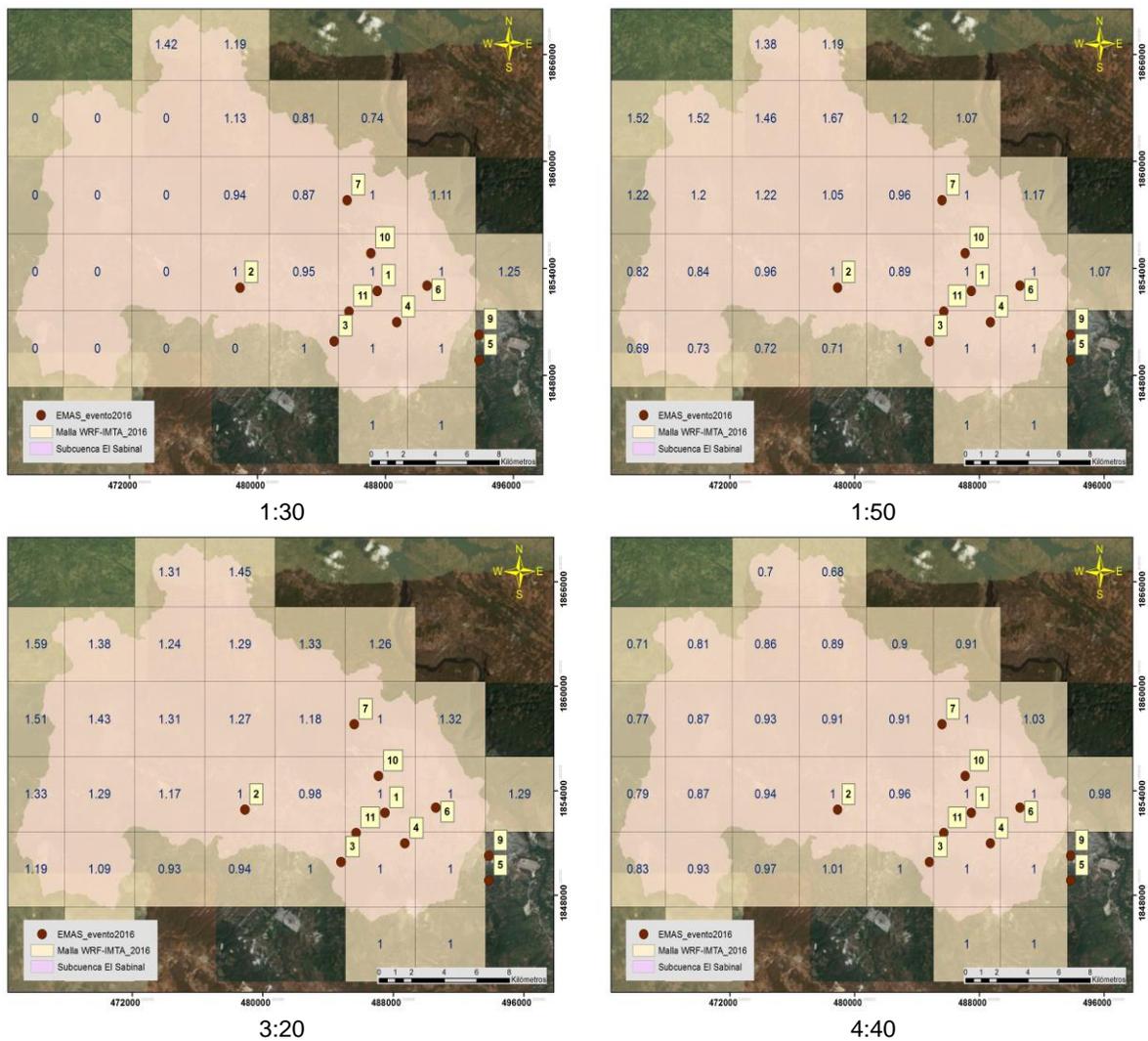


Ilustración 6.22 F.C. obtenidos en diferentes intervalos de tiempo del evento 2 de septiembre del 2016 (Hora UTC)

6.11 Factor de corrección (F.C.) para el evento del 22 de junio del 2017 (Hora UTC)

Se consideró el evento de las 23:40 a las 4:50 hora UTC, se obtuvieron 32 factores de corrección para las 33 celdas del modelo WRF v3.6.1, cada dato se registró en intervalos de 10 minutos abarcando todo el evento. Similar a lo realizado para el evento anterior la Ilustración 6.23 muestra los F.C. obtenidos, así mismo la ubicación de las 7 Estaciones Meteorológicas Automáticas consideradas con su identificador (ID).

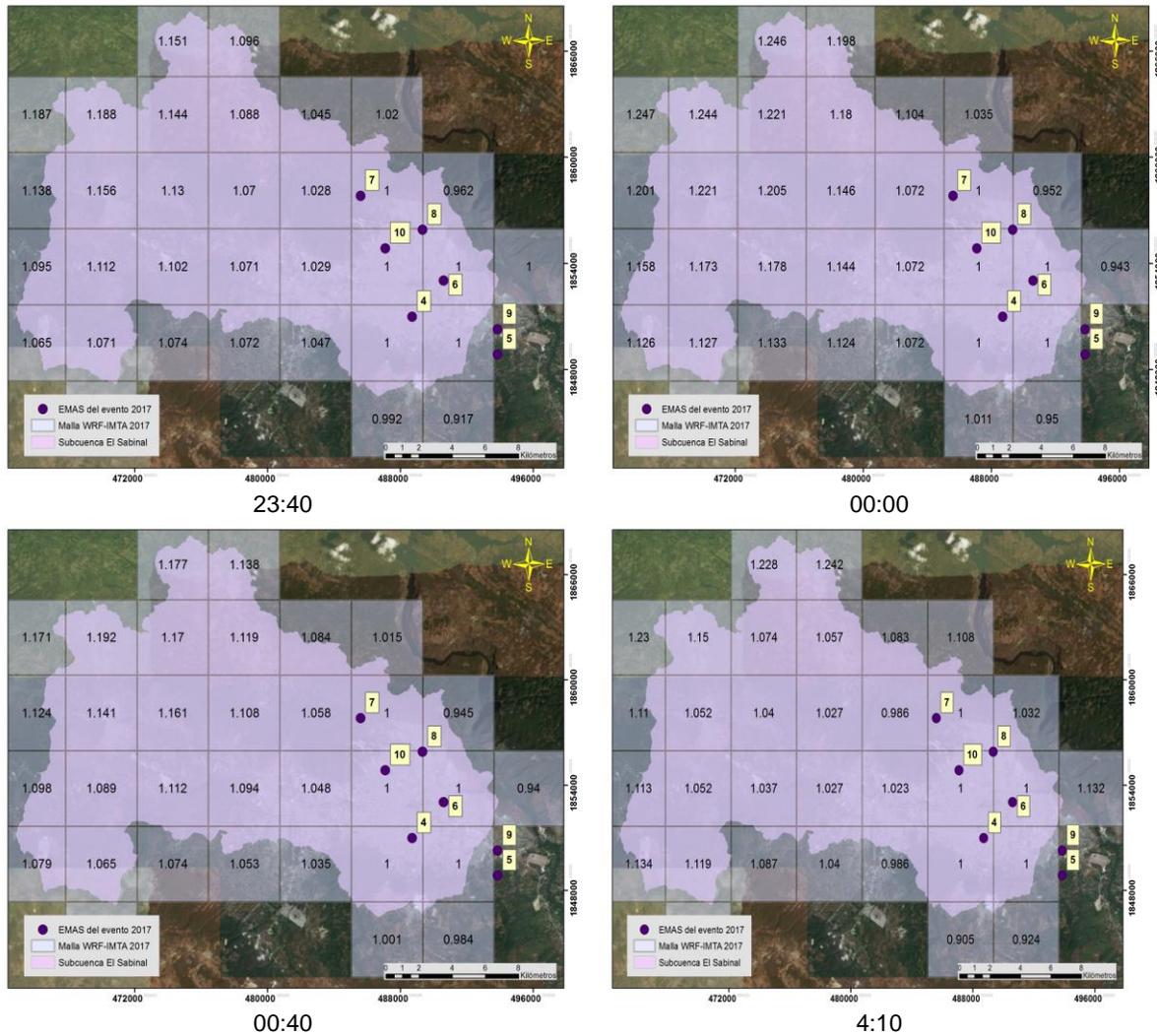


Ilustración 6.23 F.C. obtenidos en diferentes intervalos de tiempo del evento 23 de junio del 2017 (Hora UTC)

6.12 Datos de lluvia del Modelo WRF v3.6.1

Realizado el ajuste de los factores de corrección de las celdas pertenecientes al modelo WRF v3.6.1 para los eventos considerados y de los registros de las Estaciones Meteorológicas Automáticas se obtuvo la intensidad de la lluvia (mm/hr) tal como se explicó en el capítulo 5 en cuanto a la asociación de la relación intensidad-reflectividad.

6.12.1 Hietograma de lluvia del modelo WRF v3.6.1 para el evento del 2 de septiembre del 2016

Una vez obtenidos los F.C., el hietograma de lluvia en cada celda se obtiene a partir de la Ecuación 12 establecida en la metodología como:

Ecuación 12

$$Hp_p = \sum_{i=1}^n FC_i * R_i$$

Esta relación se estableció en la metodología, la cual se aplicó para el modelo WRF v3.6.1, como se mencionó anteriormente cada celda del modelo contiene un identificador (ID) tal como se muestra en la Ilustración 6.19, esto permite conocer la ubicación geoespacial de cada una y poder identificar y asignar el registro de la Estación Meteorológica Automática que influye en cada una. La tabla de los datos de lluvia asignados para cada celda del modelo WRF v3.6.1 se encuentra en el anexo A. La Ilustración 6.24 muestra la comparación de los datos observados por la Estación Meteorológica Automática “Club Campestre” y las celdas del modelo que tienen influencia de la EMA. Se consideró presentar esta grafica debido a que la estación Club Campestre es una de las que más influye en las celdas para el evento analizado, esto de acuerdo con el área de influencia obtenida a partir de los polígonos de Thiessen.

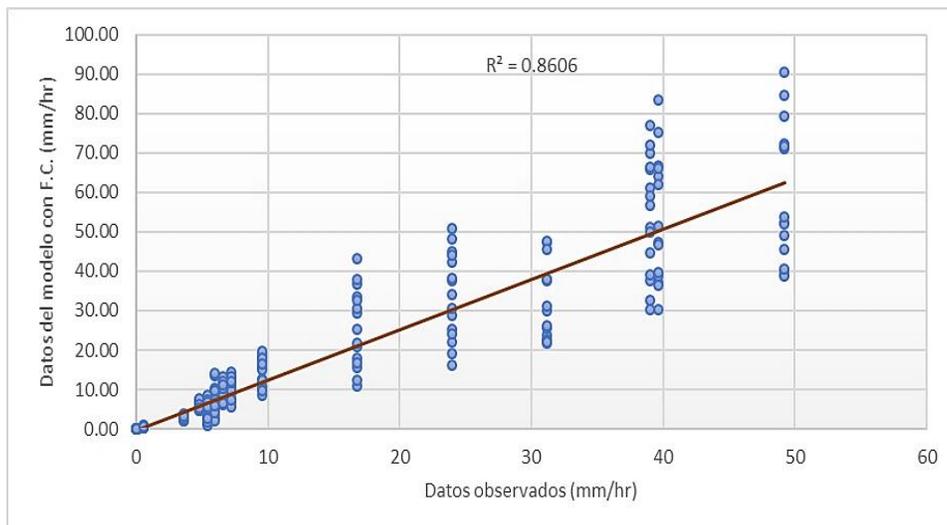


Ilustración 6.24 Gráfica de comparación de los datos observados de las EMA “Club Campestre” contra los datos del modelo WRF v3.6.1 con F.C.

De la gráfica se puede observar que existe un grado de correlación aceptable, siendo el error cuadrático $R^2 = 0.86$. De manera similar la Ilustración 6.25 muestra la comparación de los datos observados por la Estación Meteorológica Automática “San Juan” contra los datos del modelo WRF V3.6.1 con F.C. sobre las celdas que influye la estación.

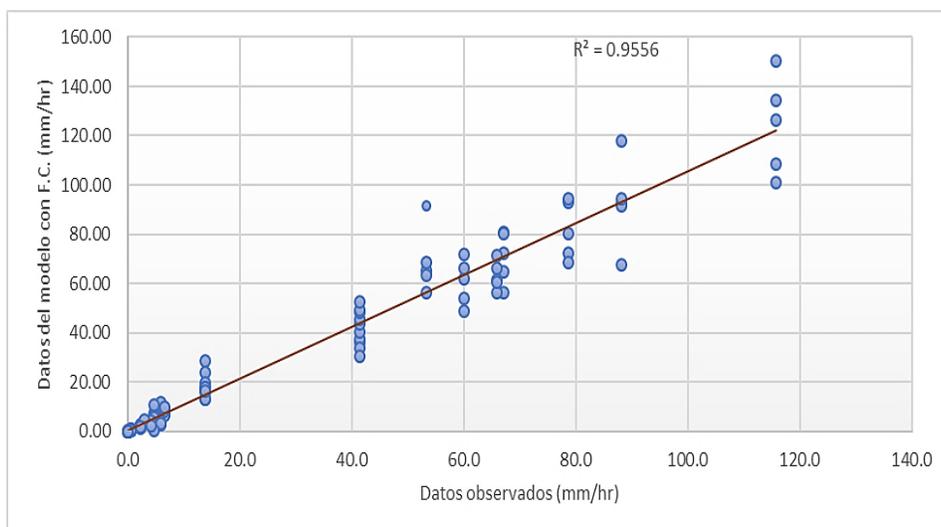
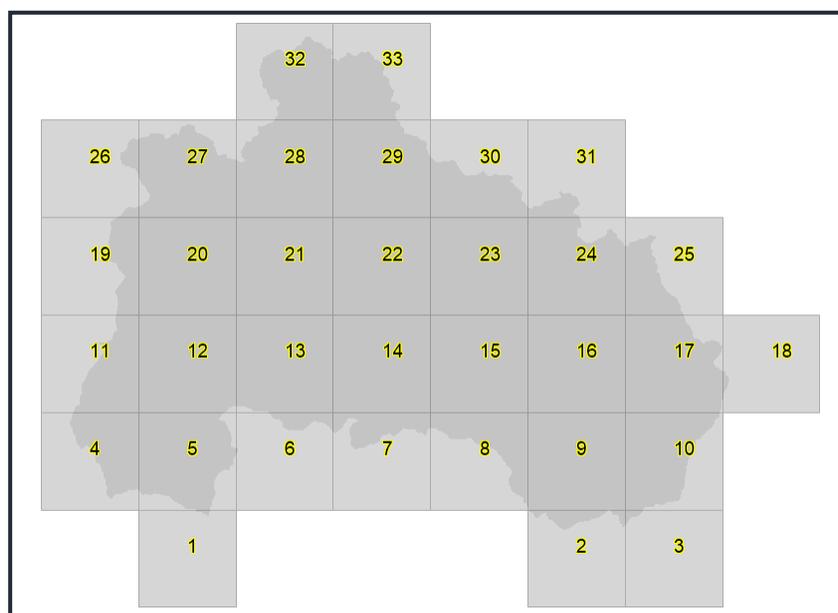
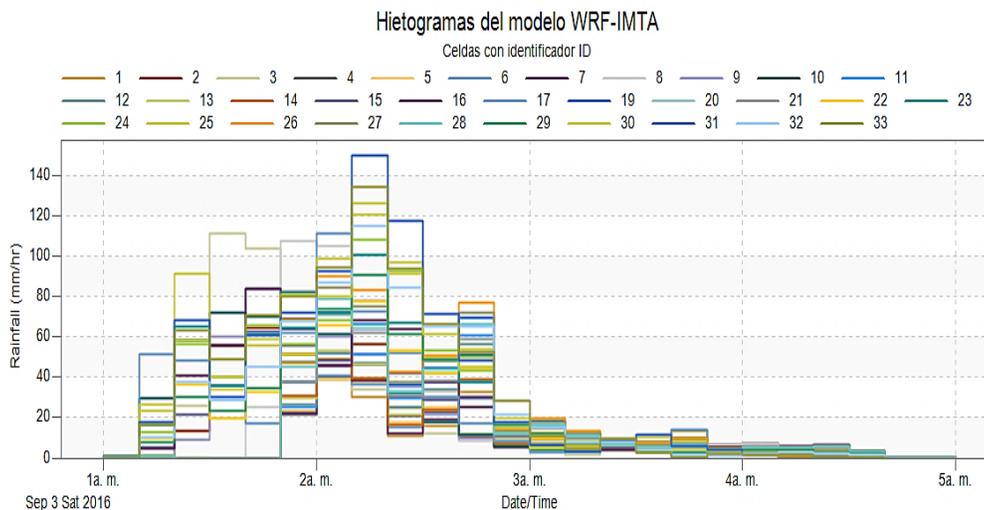


Ilustración 6.25 Gráfica de comparación de los datos observados de las EMA "San Juan" contra los datos del modelo WRF v3.6.1 con F.C.

De la gráfica de correlación lineal se apreció que el error cuadrático es $R^2 = 0.95$, lo cual se considera como aceptable. En comparación con los datos de la EMA de la gráfica anterior el error es menor debido a que la EMA "San Juan" se ubicó más cerca de las celdas en las cuales influye. La Ilustración 6.26 muestra los hietogramas generados para el modelo WRF v3.6.1 sobre la cuenca del río Sabinal para el evento del 2 de septiembre del 2016.



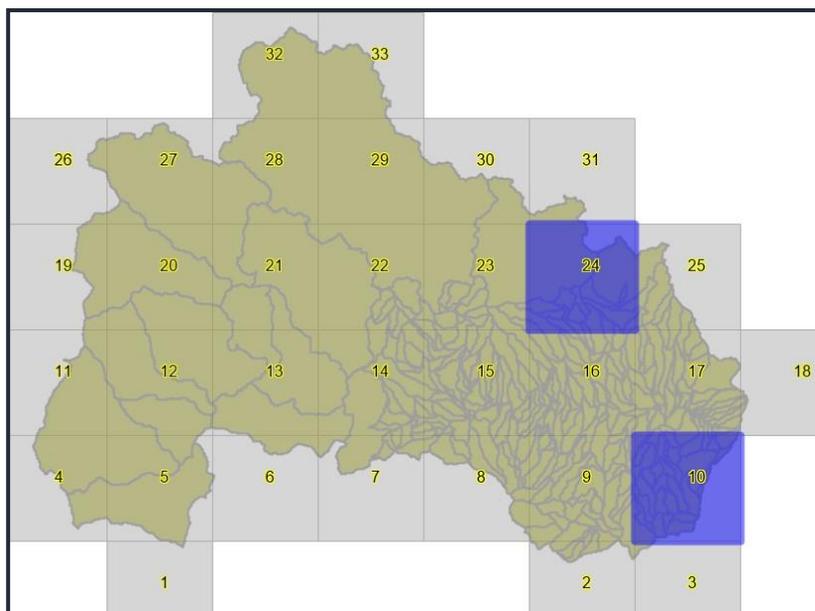
a)



b)

Ilustración 6.26 Hietogramas del evento 2 de septiembre del 2016 a) celdas con identificador ID y b) hietogramas del modelo WRF v3.6.1 sobre la cuenca del río Sabinal

A partir de los hietogramas obtenidos se visualizó que existe variación tanto de la forma como en la cantidad de precipitación ésto de acuerdo con los datos medidos desde la superficie y a la evolución de la lluvia medida por la reflectividad del modelo WRF v3.6.1. La Ilustración 6.27 muestra los hietogramas asignados a dos celdas del modelo WRF V3.6.1. La celda 24 registra una precipitación máxima de 108.3 (mm/hr) a las 2:10 am en horario UTC mientras que la celda 10 de 72.1 (mm/hr) a la 1:30 hora UTC, las celdas del modelo WRF v3.6.1 permiten visualizar que existe variación de lluvia de un sitio a otro dentro de la zona urbana de Tuxtla Gutiérrez.



a)

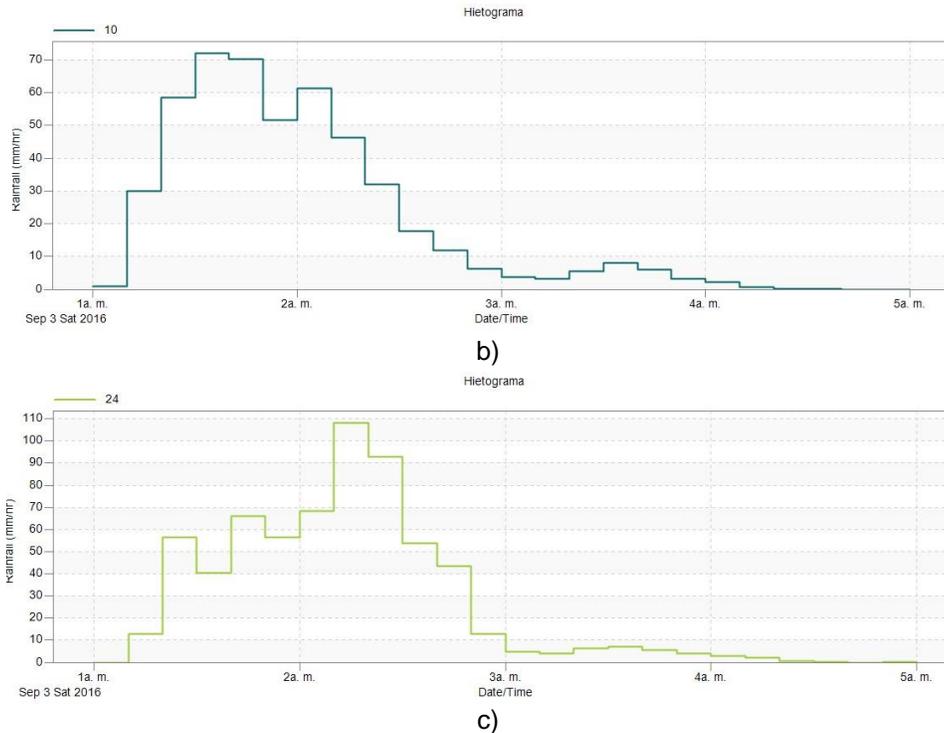


Ilustración 6.27 Comparación de hietogramas del modelo WRF v3.6.1 a) celdas analizadas, b) hietograma de la celda 10 y b) hietograma de la celda 24

6.12.2 Hietograma de lluvia del modelo WRF v3.6.1 para el evento del 23 de junio del 2017

Para el evento registrado el día 23 de junio del 2017 y de acuerdo a la relación de los F.C. con los datos registrados en las EMAS que se consideraron. La tabla de los datos de lluvia asignados para cada celda del modelo WRF v3.6.1 se encuentra en el anexo A. La Ilustración 6.28 muestra la comparación de los datos observados por la Estación Meteorológica Automática “San Juan” y las celdas del modelo que tienen influencia de la EMA. Se observa que el error cuadrático es $R^2 = 0.995$.

La Ilustración 6.29 muestra la comparación de los datos observados por la Estación Meteorológica Automática “Modulo 5” y las celdas del modelo que tienen influencia de la EMA, siendo el error cuadrático $R^2 = 0.998$

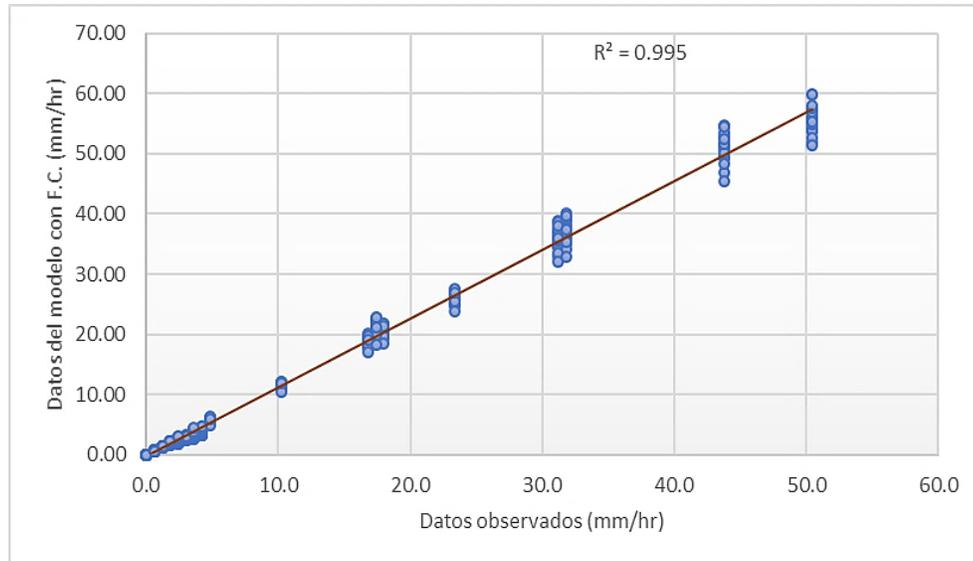


Ilustración 6.28 Gráfica de comparación de los datos observados de las EMA "San Juan" contra los datos del modelo WRF v3.6.1 con F.C.

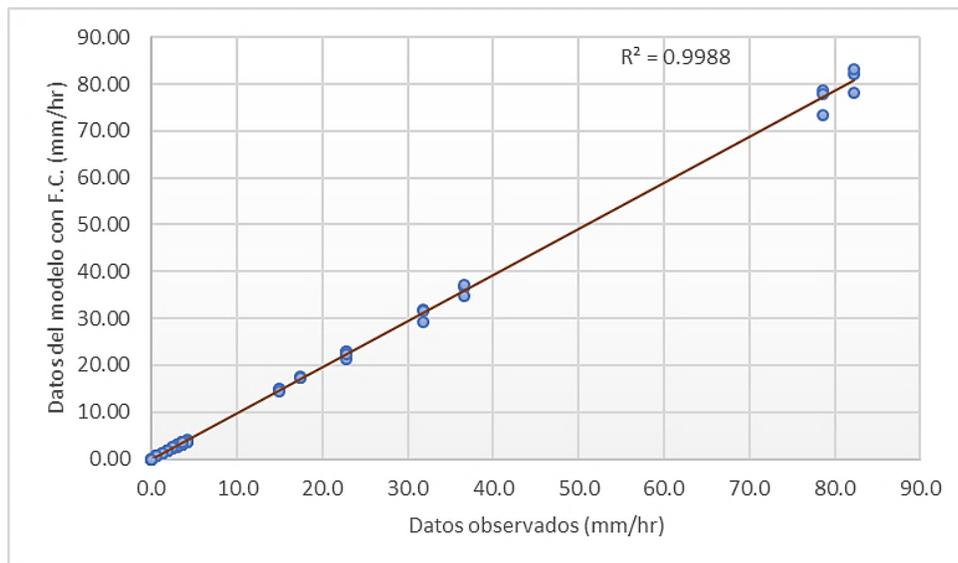
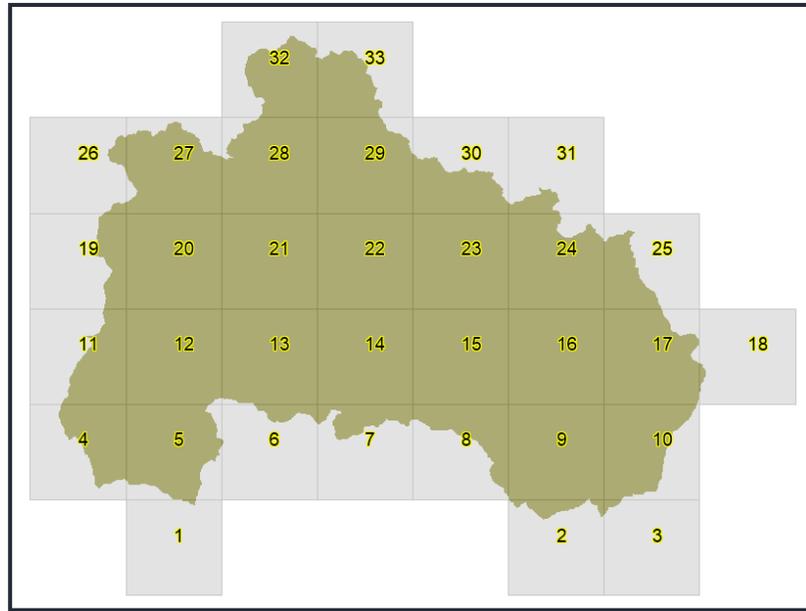


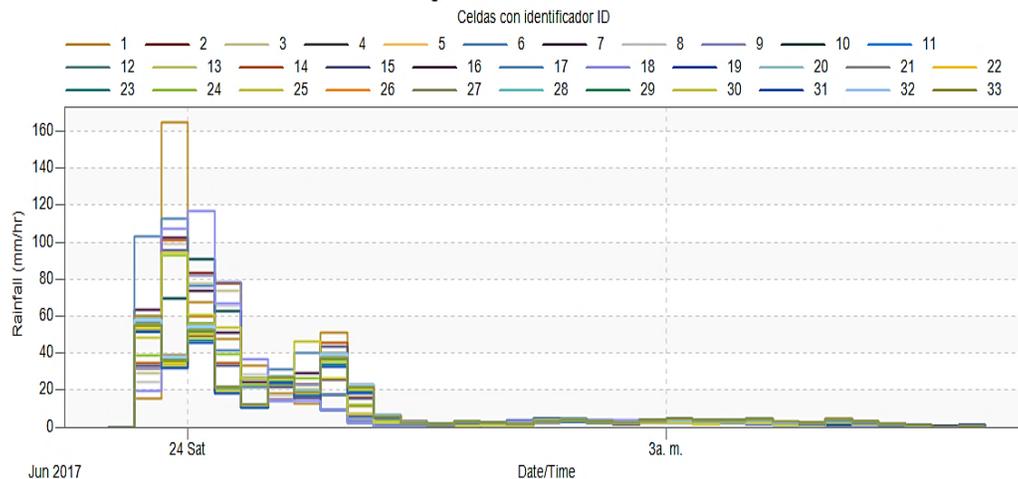
Ilustración 6.29 Gráfica de comparación de los datos observados de las EMA "Modulo 5" contra los datos del modelo WRF v3.6.1 con F.C.

La Ilustración 6.30 muestra los 33 hietogramas generados para el modelo WRF v3.6.1 sobre la cuenca del río Sabinal para el evento del 23 de junio del 2017.



a)

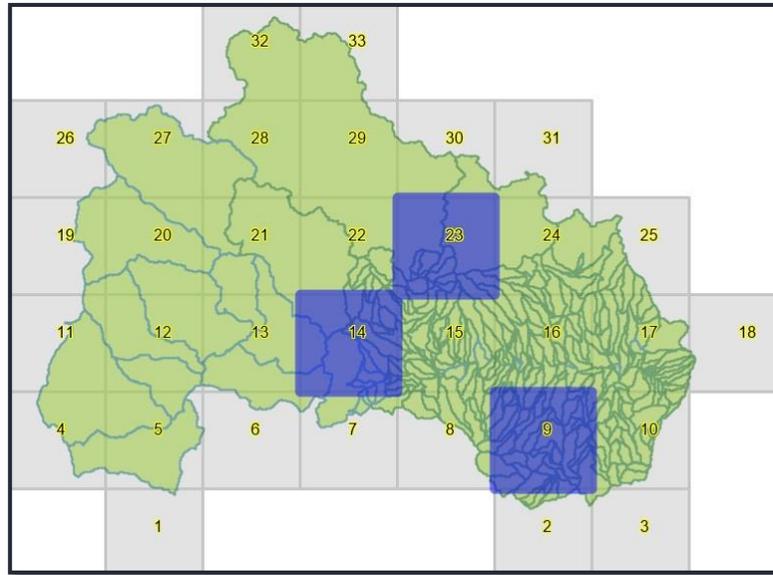
Hietogramas del modelo WRF-IMTA



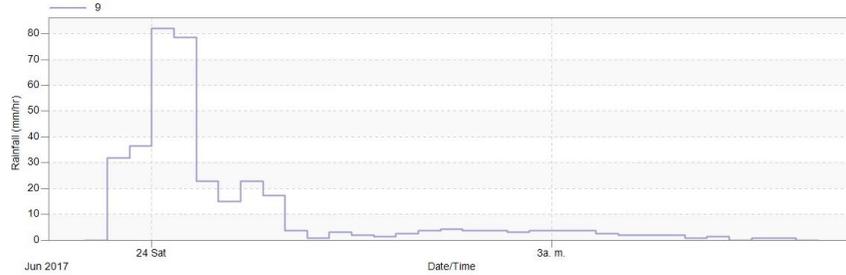
b)

Ilustración 6.30 Hietogramas del evento 23 de junio del 2017 a) celdas con identificador ID y b) hietogramas del modelo WRF v3.6.1 sobre la cuenca del río Sabinal

De manera similar a lo realizado en el evento 2016 se puede visualizar que existe variación en los hietogramas al momento de registrar la intensidad máxima, es decir, cada uno registra su mayor intensidad en horario diferente, lo cual se muestra en la Ilustración 6.31. Se realizó la comparación de las celdas 9, 14 y 23 las cuales se ubicaron en la zona urbana de Tuxtla Gutiérrez. Para la celda 9 la precipitación máxima de 82.2 (mm/hr) a las 12:00 am, para la celda de 14 de 101.0 (mm/hr) a las 11:50 pm y para la celda 23 de 52.8 (mm/hr) a las 11:40 pm. De los hietogramas se observa que el horario donde se registró la intensidad máxima es muy similar, sin embargo, los datos varían de acuerdo con lo registrado y lo observado por el modelo WRF v3.6.1.



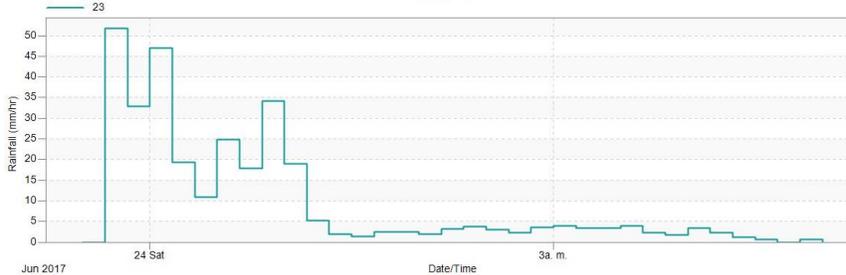
a)



b)



c)



d)

Ilustración 6.31 Comparación de hietogramas del modelo WRF v3.6.1 a) celdas analizadas, b) hietograma de la celda 9, b) hietograma de la celda 14 y d) hietograma de la celda 23

6.13 Asignación de eventos de lluvias a las subcuencas del río Sabinal

Para la asignación de la lluvia que le corresponde a cada subcuenca a partir de los hietogramas del modelo WRF v3.6.1 se realizó a partir de la Ecuación 13 establecida en el capítulo 5 como:

Ecuación 13

$$\bar{H}p_p = \sum_{i=1}^n \frac{Hp_p a_i}{\sum_i^n a_i}$$

Siendo:

- $\bar{H}p_p$ = hietograma de precipitación promedio en subcuenca
- Hp_p = hietograma de precipitación de la celda del modelo WRF v3.6.1
- a_i = área de la subcuenca

Tal como se explicó en el capítulo 5 en el subtema “Asignación del hietograma a las subcuencas”, se consideró un hietograma promedio a partir de las celdas del modelo WRF V3.6.1 que tenían influencia sobre una subcuenca, es decir, se realizó una ponderación por área.

La ponderación se realizó utilizando en el programa PCSWMM® en el cual se asignó el hietograma a las 16 subcuencas de aportación y a las 281 microcuencas consideradas en la zona urbana de Tuxtla Gutiérrez.

6.13.1 Evento del 2 de septiembre del 2016

El programa computacional PCSWMM® reconoce los hietogramas asignados a la malla del modelo WRF v3.6.1 que previamente se asoció a un SIG y se ha integrado al programa mediante un archivo Shapefile.

Como ejemplo, la Ilustración 6.32 muestra la asignación realizada para la subcuenca 6 donde los hietogramas de las celdas del modelo WRF v3.6.1 con identificador ID: 13, 14, 21, 22 y 28 son las que generan el hietograma para la subcuenca. Cada subcuenca obtiene su hietograma representando la cantidad y forma de la lluvia en intensidad (mm/hr).

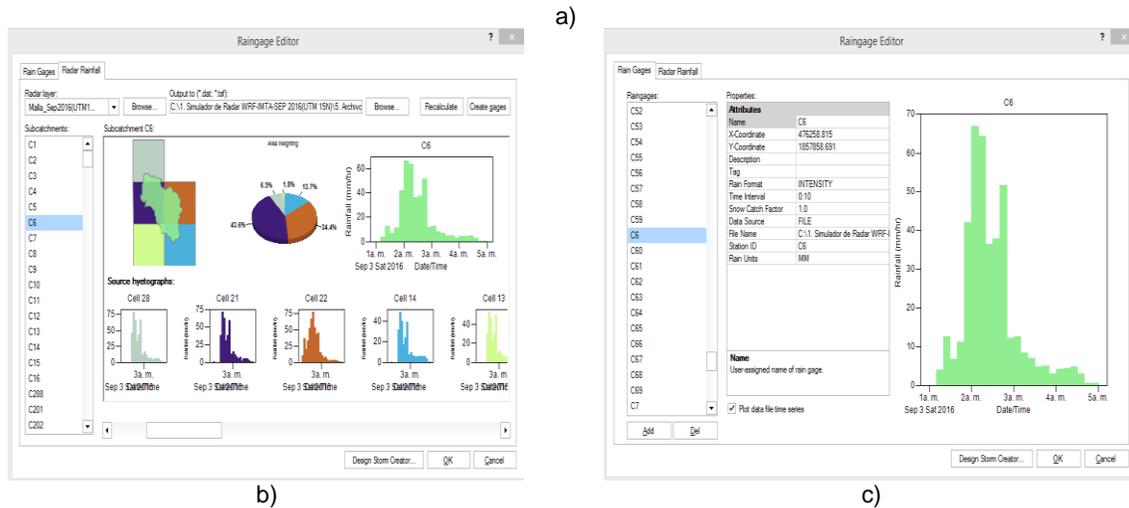
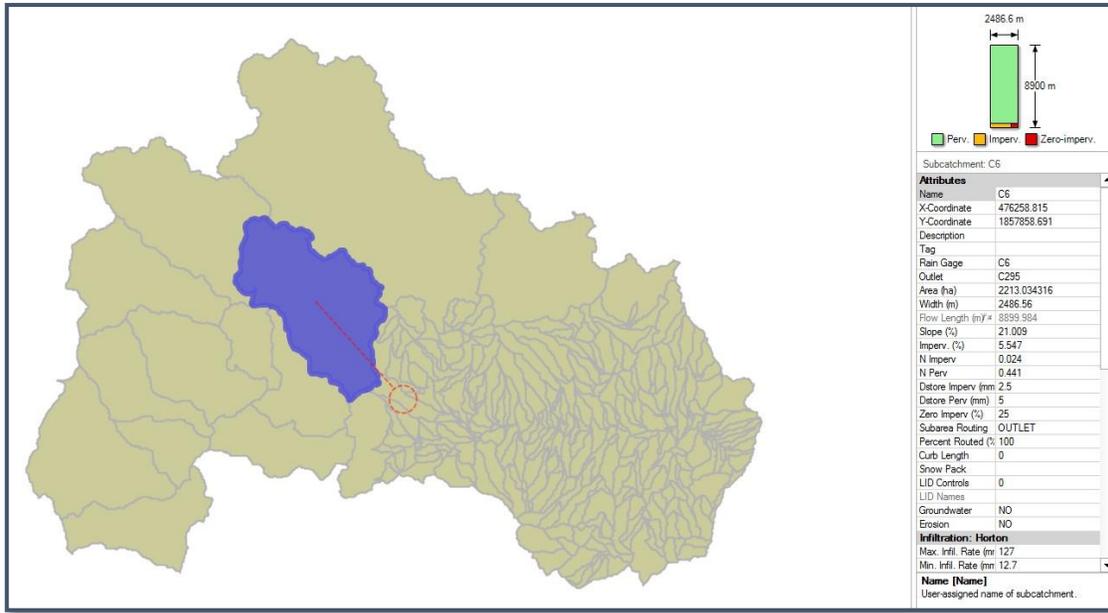


Ilustración 6.32 Asignación de hietogramas en el programa PCSWMM-2D. a) Subcuenca 6, b) ponderación de los hietogramas y c) hietograma asignado a la subcuenca 6

Los datos de precipitación para las 297 subcuencas consideradas para la cuenca del río Sabinal se muestran en la Tabla 6.5. Los registros de lluvia de las EMAS se muestran en la Tabla 6.6. La precipitación promedio asignada a las subcuencas a partir del modelo WRF v3.6.1 es de 81.5 mm y de las 10 EMAS es de 83.0 mm. Para la simulación en el programa computacional PCSWMM® se han considerado los datos de lluvia generados del modelo WRF v3.6.1 por considerar la distribución espacial de la lluvia para la generación del modelo lluvia-escurrimiento.

Tabla 6.5 Precipitación asignada a las subcuencas para el evento del mes de septiembre del 2016

Nombre	Área (ha)	Prec. (mm)	Nombre	Área (ha)	Prec. (mm)	Nombre	Área (ha)	Prec. (mm)
C1	6369.8	98.8	C140	31.5	73.2	C182	41.6	82
C10	581.7	42.9	C141	31.5	79.3	C183	41.6	75.5
C100	26.8	90.1	C142	31.5	77.3	C184	41.8	77.3

Nombre	Área (ha)	Prec. (mm)	Nombre	Área (ha)	Prec. (mm)	Nombre	Área (ha)	Prec. (mm)
C101	27.1	74	C143	32.1	81.9	C185	42.2	92.2
C102	27.1	77.4	C144	32.3	77.3	C186	42.6	94.5
C103	27.2	56.8	C145	32.6	77.3	C187	42.7	82
C104	27.4	90.1	C146	33.5	77.3	C188	43.3	77.3
C105	27.5	82	C147	33.5	90.1	C189	43.6	44.5
C106	27.5	77.3	C148	33.6	90.1	C19	3.2	90.1
C107	27.7	100.5	C149	34.0	77.3	C190	43.6	102
C108	27.8	89.1	C15	1856.4	49.4	C191	43.7	89.5
C109	27.8	89.7	C150	34.7	82.1	C192	43.7	77.3
C11	491.9	112.6	C151	34.8	82.2	C193	44.2	90.1
C110	27.9	73.2	C152	34.8	79.4	C194	44.7	83.8
C111	28.3	82.1	C153	34.9	85.9	C195	45.0	73.2
C112	28.3	90.1	C154	35.2	74.8	C196	45.3	73.2
C113	28.6	57.7	C155	35.2	63.8	C197	45.4	108.9
C114	28.6	73.7	C156	35.7	92.1	C198	45.7	123.3
C115	28.8	54.1	C157	35.8	89.1	C199	46.4	76
C116	28.8	77.3	C158	35.8	42.4	C2	2427.7	71.3
C117	28.9	74.2	C159	36.2	108.3	C20	3.5	73.2
C118	28.9	108.3	C16	1133.9	43.9	C200	47.5	73.2
C119	28.9	62.6	C160	36.2	44.5	C201	48.3	102.9
C12	1007.4	55.3	C161	36.4	81.9	C202	48.4	108.3
C120	29.0	90.1	C162	36.5	89.2	C203	48.5	73.2
C121	29.1	102.9	C163	36.6	89.1	C204	48.6	90.1
C122	29.5	73.2	C164	37.5	75.5	C205	48.6	89.1
C123	29.8	77.7	C165	37.7	90.1	C206	48.8	73.2
C124	29.9	77.3	C166	37.7	89.1	C207	48.0	71.9
C125	30.0	90.1	C167	37.9	89.1	C208	49.0	74.1
C126	30.0	81.7	C168	38.1	82	C209	50.2	83.4
C127	30.0	82	C169	38.2	92.4	C21	3.5	77.3
C128	30.1	73.2	C17	1.3	73.2	C210	49.2	77.3
C129	30.4	84.2	C170	38.2	90.1	C211	49.9	98
C13	546.3	50.3	C171	38.3	72.7	C212	50.0	85.3
C130	30.6	90.1	C172	38.5	91.6	C213	50.0	77.3
C131	30.6	77.3	C173	38.9	114	C214	50.1	83.7
C132	30.6	89.3	C174	39.7	88.5	C215	50.2	73.2
C133	30.7	102.9	C175	39.8	73.2	C216	50.6	73.3
C134	30.8	82	C176	40.1	78.5	C217	51.2	90.1
C135	31.0	81.3	C177	40.2	108.3	C218	51.2	90.2
C136	31.2	40.1	C178	40.2	82	C219	51.5	87
C137	31.3	73.2	C179	40.5	77.3	C22	3.6	44.5
C138	31.3	82	C18	2.8	89.1	C220	51.5	82
C139	31.4	77.3	C180	40.8	82	C221	52.0	79.6

Nombre	Área (ha)	Prec. (mm)	Nombre	Área (ha)	Prec. (mm)	Nombre	Área (ha)	Prec. (mm)
C14	930.0	47.7	C181	40.9	89.1	C222	52.1	82.1
C223	53.0	102.9	C265	82.2	89.1	C39	7.8	89.1
C224	53.7	73.2	C266	83.8	84.4	C4	533.0	58.1
C225	54.9	95.5	C267	84.9	113.5	C40	7.9	89.1
C226	55.2	77.3	C268	85.2	73.2	C41	7.9	89.1
C227	55.2	90.1	C269	85.7	56.9	C42	8.2	102.9
C228	55.3	82	C27	5.2	90.1	C43	8.3	102.9
C229	55.9	44.5	C270	86.8	75.5	C44	8.5	90.1
C23	3.6	108.3	C271	88.2	44.5	C45	9.5	73.2
C230	56.0	77.3	C272	90.1	90.6	C46	10.1	108.3
C231	56.1	90.1	C273	90.5	77.3	C47	10.1	90.1
C232	56.7	76.2	C274	91.7	76.7	C48	10.3	79.7
C233	56.8	89.1	C275	92.4	76.3	C49	10.6	77.3
C234	57.4	90.1	C276	94.4	109	C5	1788.9	111.9
C235	57.7	82	C277	97.4	94.5	C50	10.8	89.1
C236	58.3	73.8	C278	99.6	81.1	C51	10.8	89.1
C237	58.7	74.6	C279	100.4	73.2	C52	11.0	102.9
C238	59.2	108.3	C28	4.7	44.5	C53	11.5	77.3
C239	59.4	44.5	C280	102.9	75.4	C54	11.8	73.2
C24	3.9	73.2	C281	103.8	77.3	C55	12.2	88.2
C240	59.7	78.3	C282	104.8	99.6	C56	12.7	90.1
C241	60.0	89.1	C283	107.5	93.2	C57	13.0	90.1
C242	59.9	81.5	C284	109.4	57.8	C58	13.1	89.1
C243	62.4	81.9	C285	111.6	80.3	C59	13.7	90.1
C244	62.2	102.9	C286	113.4	75.3	C6	2213.0	67.3
C245	62.8	83.1	C287	117.8	77.3	C60	13.9	108.3
C246	63.4	89.9	C288	118.3	82.1	C61	14.1	78.6
C247	63.5	102.9	C289	119.5	74.7	C62	14.2	73.2
C248	65.0	118.3	C29	4.7	89.1	C63	14.3	73.2
C249	66.0	83.6	C290	122.5	82	C64	15.4	76.1
C25	4.4	44.5	C291	133.8	76.3	C65	16.7	90.1
C250	66.2	107.2	C292	143.4	74.5	C66	17.2	89.1
C251	66.4	59.5	C293	162.8	90.8	C67	17.2	77.3
C252	66.5	77.4	C294	167.0	99.4	C68	16.7	90.1
C253	67.1	90.1	C295	177.5	47.6	C69	17.7	89.1
C254	67.6	106.2	C296	185.3	77.7	C7	1396.1	56.3
C255	69.0	90.1	C297	188.1	89.1	C70	17.9	90.1
C256	69.1	90.1	C3	1627.8	67.1	C71	18.4	40.8
C257	69.5	89.3	C30	4.8	89.1	C72	18.4	82
C258	72.0	82	C31	5.1	73.2	C73	18.5	89.7
C259	73.7	77.5	C32	5.5	73.2	C74	18.7	90.1
C26	4.5	89.1	C33	5.8	108.3	C75	19.3	89.5

Nombre	Área (ha)	Prec. (mm)	Nombre	Área (ha)	Prec. (mm)	Nombre	Área (ha)	Prec. (mm)
C260	75.1	83.9	C34	6.6	89.1	C76	20.3	89.1
C261	75.5	45.1	C35	6.7	73.2	C77	20.8	88.8
C262	77.3	50.1	C36	6.8	89.1	C78	21.0	82
C263	80.8	77	C37	7.2	77.3	C79	22.3	89.6
C264	81.0	87	C38	7.7	73.3	C8	145.0	123.3

Nombre	Área (ha)	Precipitación (mm)
C80	22.9	90.1
C81	23.0	82
C82	23.0	89.1
C83	23.6	90.1
C84	23.9	80.2
C85	24.5	83.5
C86	22.7	73.2
C87	24.9	89.1
C88	25.0	73.2
C89	25.1	73.2
C9	942.1	50.4
C90	25.1	77.3
C91	25.3	44.5
C92	25.3	77.3
C93	25.4	82
C94	25.7	41.8
C95	26.3	102.9
C96	26.3	73.2
C97	26.3	73.2
C98	26.4	94.6
C99	26.7	82

*Precipitación promedio en la
cuenca del río Sabinal
81.5 mm*

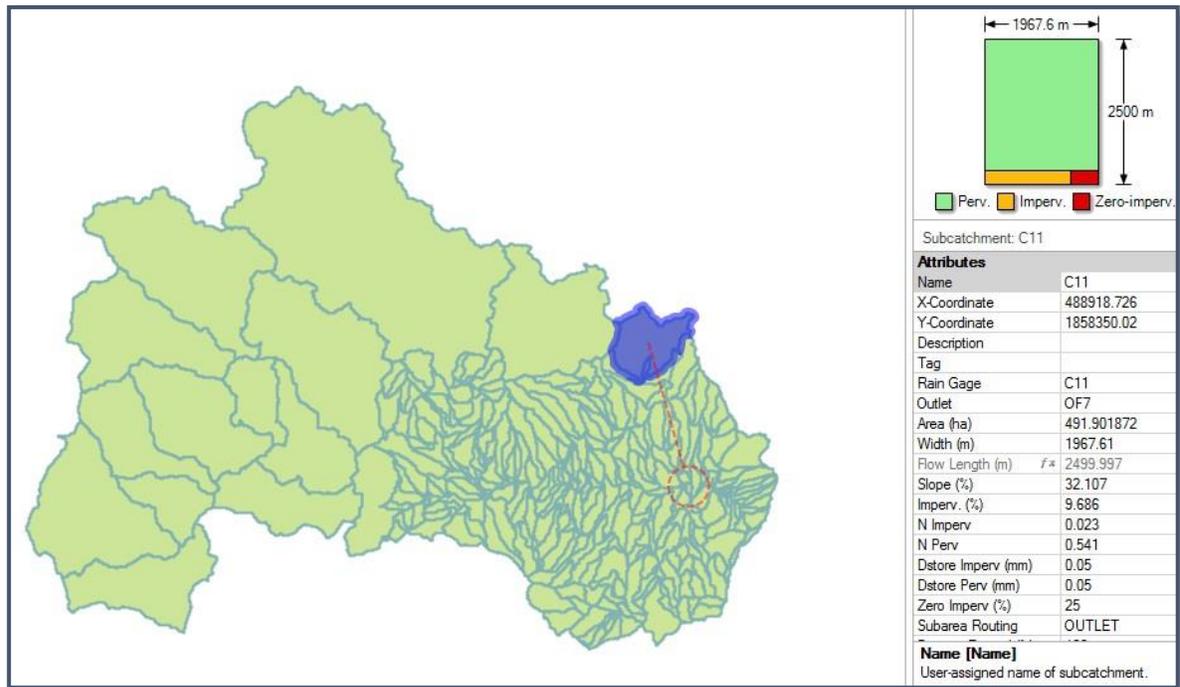
Tabla 6.6 Datos de precipitación registrados por las EMAS del evento analizado

IDs	Estación	Día	Mes	Año	Precipitación (mm)
1	Centro 2a Poniente	3	Septiembre	2016	82.2
2	Club campestre	3	Septiembre	2016	44.4
3	Cristal	3	Septiembre	2016	75.4
4	Módulo 5	3	Septiembre	2016	72.4
5	Much	3	Septiembre	2016	76.6
6	Parque Oriente.	3	Septiembre	2016	89
7	San Juan seminario	3	Septiembre	2016	112.5

IDs	Estación	Día	Mes	Año	Precipitación (mm)
9	Trabajo Social	3	Septiembre	2016	89.7
10	Unicach	3	Septiembre	2016	104
11	Xamaipac	3	Septiembre	2016	84
Promedio					83.0

6.13.2 Evento del 23 de junio del 2017

De manera similar a lo realizado en el evento anterior, se asignaron los hietogramas a las 297 subcuencas a partir de la influencia que tuvo la cuadrícula sobre cada una. Como ejemplo, la Ilustración 6.33 muestra la asignación realizada para la subcuenca 11 donde los hietogramas de las celdas del modelo WRF v3.6.1 con identificador ID: 24 y 25 son las que generan el hietograma para la subcuenca a partir de la ponderación por área que le corresponde.



a)

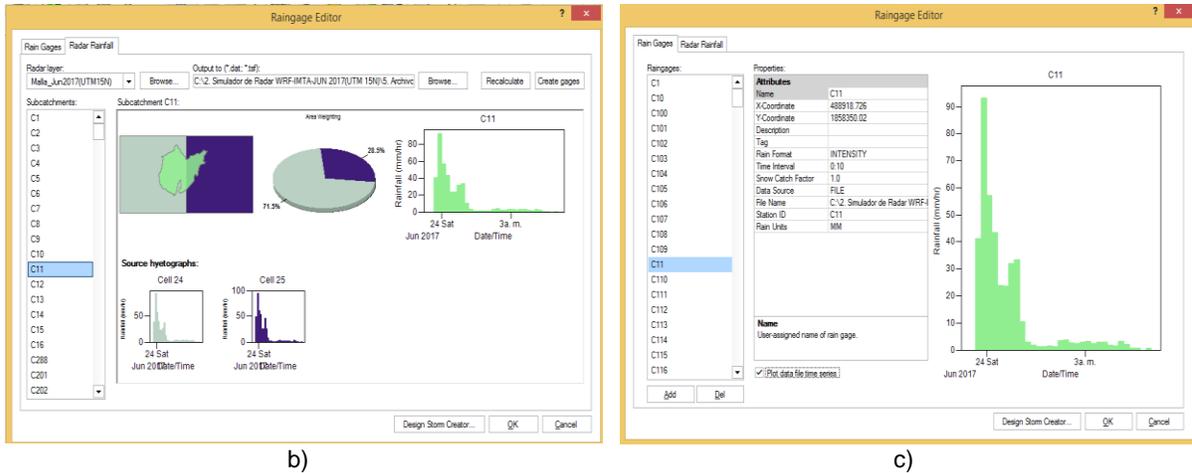


Ilustración 6.33 Asignación de hietogramas en el programa PCSWMM® a) Subcuenca 11, b) ponderación de los hietogramas y c) hietograma asignado a la subcuenca 11

La Tabla 6.7 muestra la precipitación total asignada a las 277 subcuencas, para este evento la precipitación promedio para la cuenca del río Sabinal con los datos del modelo WRF v3.6.1 es de **67.5 mm** y la precipitación registrada por las EMAS es de 66.37 mm. Con esta información se puede observar que la variación entre los datos de lluvia del modelo WRF v3.6.1 y las EMAS es mínima, sin embargo, se han utilizado los datos del modelo por considerar la forma de la lluvia, es decir, la distribución de la misma.

Tabla 6.7 Precipitación asignada a cada subcuenca para el evento del mes de junio del 2017

Nombre	Área (ha)	Prec. (mm)	Nombre	Área (ha)	Prec. (mm)	Nombre	Área (ha)	Prec. (mm)
C1	6369.8	56.8	C140	31.5	64.9	C182	41.6	66.5
C10	581.7	62.7	C141	31.5	62.2	C183	41.6	69.9
C100	26.8	74.2	C142	31.5	59.9	C184	41.8	59.9
C101	27.1	59.4	C143	32.1	66.4	C185	42.2	73.3
C102	27.1	60	C144	32.3	59.9	C186	42.6	53.7
C103	27.2	66.7	C145	32.6	59.9	C187	42.7	66.5
C104	27.4	74.2	C146	33.5	59.9	C188	43.3	59.9
C105	27.5	66.5	C147	33.5	74.2	C189	43.6	68
C106	27.5	59.9	C148	33.6	74.2	C19	3.2	74.2
C107	27.7	69.6	C149	34.0	59.9	C190	43.6	68.9
C108	27.8	81.7	C15	1856.4	54.1	C191	43.7	79.1
C109	27.8	81.3	C150	34.7	55.1	C192	43.7	59.9
C11	491.9	67.7	C151	34.8	67.1	C193	44.2	74.2
C110	27.9	64.9	C152	34.8	68.3	C194	44.7	70.5
C111	28.3	55.1	C153	34.9	72.1	C195	45.0	64.9
C112	28.3	74.2	C154	35.2	59.5	C196	45.3	64.9
C113	28.6	62.8	C155	35.2	65.9	C197	45.4	75.9
C114	28.6	65.2	C156	35.7	80.8	C198	45.7	71.6
C115	28.8	66.9	C157	35.8	81.7	C199	46.4	59.7

Nombre	Área (ha)	Prec. (mm)
C116	28.8	59.9
C117	28.9	59.4
C118	28.9	66.2
C119	28.9	66.1
C12	1007.4	55.5
C120	29.0	74.2
C121	29.1	52.7
C122	29.5	64.9
C123	29.8	56.6
C124	29.9	59.9
C125	30.0	74.2
C126	30.0	69.6
C127	30.0	66.5
C128	30.1	64.9
C129	30.4	71.3
C13	546.3	54.8
C130	30.6	74.2
C131	30.6	59.9
C132	30.6	81.5
C133	30.7	52.7
C134	30.8	66.5
C135	31.0	65.6
C136	31.2	53.5
C137	31.3	64.9
C138	31.3	66.5
C139	31.4	59.9
C14	930.0	56.8
C223	53.0	52.7
C224	53.7	64.9
C225	54.9	79.8
C226	55.2	59.9
C227	55.2	74.2
C228	55.3	66.5
C229	55.9	68
C23	3.6	66.2
C230	56.0	59.9
C231	56.1	74.2
C232	56.7	66.1
C233	56.8	81.7
C234	57.4	74.2

Nombre	Área (ha)	Prec. (mm)
C158	35.8	61.1
C159	36.2	66.2
C16	1133.9	53.6
C160	36.2	68
C161	36.4	66.5
C162	36.5	73.2
C163	36.6	81.7
C164	37.5	70
C165	37.7	74.2
C166	37.7	81.7
C167	37.9	81.7
C168	38.1	66.5
C169	38.2	79.8
C17	1.3	64.9
C170	38.2	74.2
C171	38.3	58.3
C172	38.5	80.3
C173	38.9	69.8
C174	39.7	80.3
C175	39.8	64.9
C176	40.1	62.7
C177	40.2	66.2
C178	40.2	66.5
C179	40.5	59.9
C18	2.8	81.7
C180	40.8	66.5
C181	40.9	81.7
C265	82.2	81.7
C266	83.8	72
C267	84.9	74.5
C268	85.2	64.9
C269	85.7	65.1
C27	5.2	74.2
C270	86.8	70
C271	88.2	68
C272	90.1	76.6
C273	90.5	59.9
C274	91.7	60.4
C275	92.4	59.7
C276	94.4	66.5

Nombre	Área (ha)	Prec. (mm)
C2	2427.7	58.8
C20	3.5	64.9
C200	47.5	64.9
C201	48.3	52.7
C202	48.4	66.2
C203	48.5	64.9
C204	48.6	74.2
C205	48.6	81.7
C206	48.8	64.9
C207	48.0	64.2
C208	49.0	66.8
C209	50.2	59
C21	3.5	59.9
C210	49.2	59.9
C211	49.9	70.7
C212	50.0	68.8
C213	50.0	59.9
C214	50.1	67
C215	50.2	64.9
C216	50.6	65.2
C217	51.2	74.2
C218	51.2	74.2
C219	51.5	77.1
C22	3.6	68
C220	51.5	66.5
C221	52.0	62.3
C222	52.1	55.1
C39	7.8	81.7
C4	533.0	56.6
C40	7.9	81.7
C41	7.9	81.7
C42	8.2	52.7
C43	8.3	52.7
C44	8.5	74.2
C45	9.5	64.9
C46	10.1	66.2
C47	10.1	74.2
C48	10.3	63.2
C49	10.6	59.9
C5	1788.9	58.1

Nombre	Área (ha)	Prec. (mm)
C235	57.7	61.3
C236	58.3	66.1
C237	58.7	68
C238	59.2	66.2
C239	59.4	68
C24	3.9	64.9
C240	59.7	67.7
C241	60.0	81.7
C242	59.9	65.9
C243	62.4	66.5
C244	62.2	52.7
C245	62.8	60.9
C246	63.4	81.2
C247	63.5	52.7
C248	65.0	69.8
C249	66.0	70
C25	4.4	68
C250	66.2	63.4
C251	66.4	66.4
C252	66.5	68.9
C253	67.1	74.2
C254	67.6	76.6
C255	69.0	74.2
C256	69.1	74.2
C257	69.5	80.2
C258	72.0	66.5
C259	73.7	65.2
C26	4.5	81.7
C260	75.1	67.3
C261	75.5	67.7
C262	77.3	58.1
C263	80.8	61.5
C264	81.0	77.2

Nombre	Área (ha)	Prec. (mm)
C277	97.4	68.1
C278	99.6	64.2
C279	100.4	64.9
C28	4.7	68
C280	102.9	69.8
C281	103.8	59.9
C282	104.8	70
C283	107.5	80.4
C284	109.4	63.4
C285	111.6	68.8
C286	113.4	69.4
C287	117.8	59.9
C288	118.3	55.1
C289	119.5	68.1
C29	4.7	81.7
C290	122.5	66.5
C291	133.8	65.4
C292	143.4	64.4
C293	162.8	63.5
C294	167.0	64.5
C295	177.5	67.6
C296	185.3	61.5
C297	188.1	81.7
C3	1627.8	57.4
C30	4.8	81.7
C31	5.1	64.9
C32	5.5	64.9
C33	5.8	66.2
C34	6.6	81.7
C35	6.7	64.9
C36	6.8	81.7
C37	7.2	59.9
C38	7.7	65.2

Nombre	Área (ha)	Prec. (mm)
C50	10.8	81.7
C51	10.8	81.7
C52	11.0	52.7
C53	11.5	59.9
C54	11.8	64.9
C55	12.2	79.7
C56	12.7	74.2
C57	13.0	74.2
C58	13.1	81.7
C59	13.7	74.2
C6	2213.0	58.1
C60	13.9	66.2
C61	14.1	61.4
C62	14.2	64.9
C63	14.3	64.9
C64	15.4	59.7
C65	16.7	74.2
C66	17.2	81.7
C67	17.2	59.9
C68	16.7	74.2
C69	17.7	81.7
C7	1396.1	56
C70	17.9	74.2
C71	18.4	55.8
C72	18.4	66.5
C73	18.5	73.8
C74	18.7	74.2
C75	19.3	78.6
C76	20.3	81.7
C77	20.8	81.1
C78	21.0	66.7
C79	22.3	74.7
C8	145.0	71.6

Nombre	Área (ha)	Precipitación (mm)
C80	22.9	74.2
C81	23.0	66.5
C82	23.0	81.7
C83	23.6	74.2
C84	23.9	63.1
C85	24.5	69.8
C86	22.7	64.9
C87	24.9	81.7
C88	25.0	64.9
C89	25.1	64.9
C9	942.1	58.8
C90	25.1	59.9
C91	25.3	68
C92	25.3	59.9
C93	25.4	66.5
C94	25.7	59.3
C95	26.3	52.7
C96	26.3	64.9
C97	26.3	64.9
C98	26.4	72.2
C99	26.7	66.5

*Precipitación promedio en la cuenca del río Sabinas
67.5 mm*

Tabla 6.8 Datos de precipitación registrados por las EMAS del evento analizado

IDs	Estación	Día	Mes	Año	Precipitación (mm)
4	Módulo 5	23	6	2017	59.9
5	Much	23	6	2017	74.3
6	Parque Oriente	23	6	2017	88.6
7	San Juan	23	6	2017	50.2
8	Sec Tec Cruz Casitas	23	6	2017	74.7
9	Trabajo Social	23	6	2017	43.3
10	Unicach	23	6	2017	73.6
				promedio	66.3

7 RESULTADOS

7.1 Generación del modelo lluvia-escorrentamiento

La simulación hidrológica para la generación del modelo lluvia-escorrentamiento se realizó a través del programa computacional PCSWMM®, el cual como se explicó anteriormente simula este proceso a través de un “*modelo no lineal de depósito sencillo*”. Para la estimación de las pérdidas por infiltración se consideró el método de Horton, el anexo B muestra los parámetros iniciales del método.

7.1.1 Evento del 2 de septiembre del 2016

Los hietogramas asignados permiten visualizar la evolución de la lluvia en las subcuencas de acuerdo con la duración del evento (Ilustración 7.1 e Ilustración 7.). Para el evento del 2 de septiembre del 2016 el rango de precipitación oscila entre 123.3 mm (color rojo) y 40.0 mm (color azul claro).

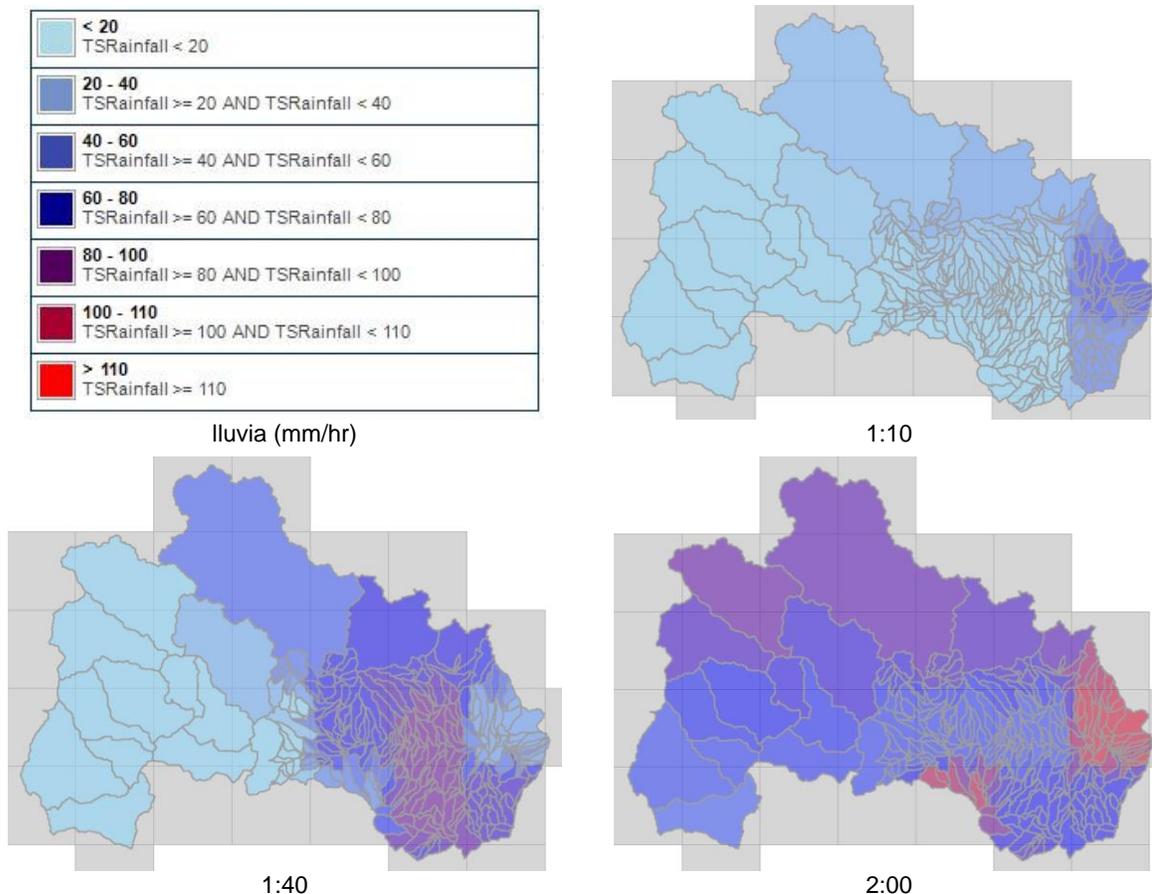


Ilustración 7.1 Evolución de la lluvia en las subcuencas. Evento del 2 de septiembre del 2016 en hora UTC

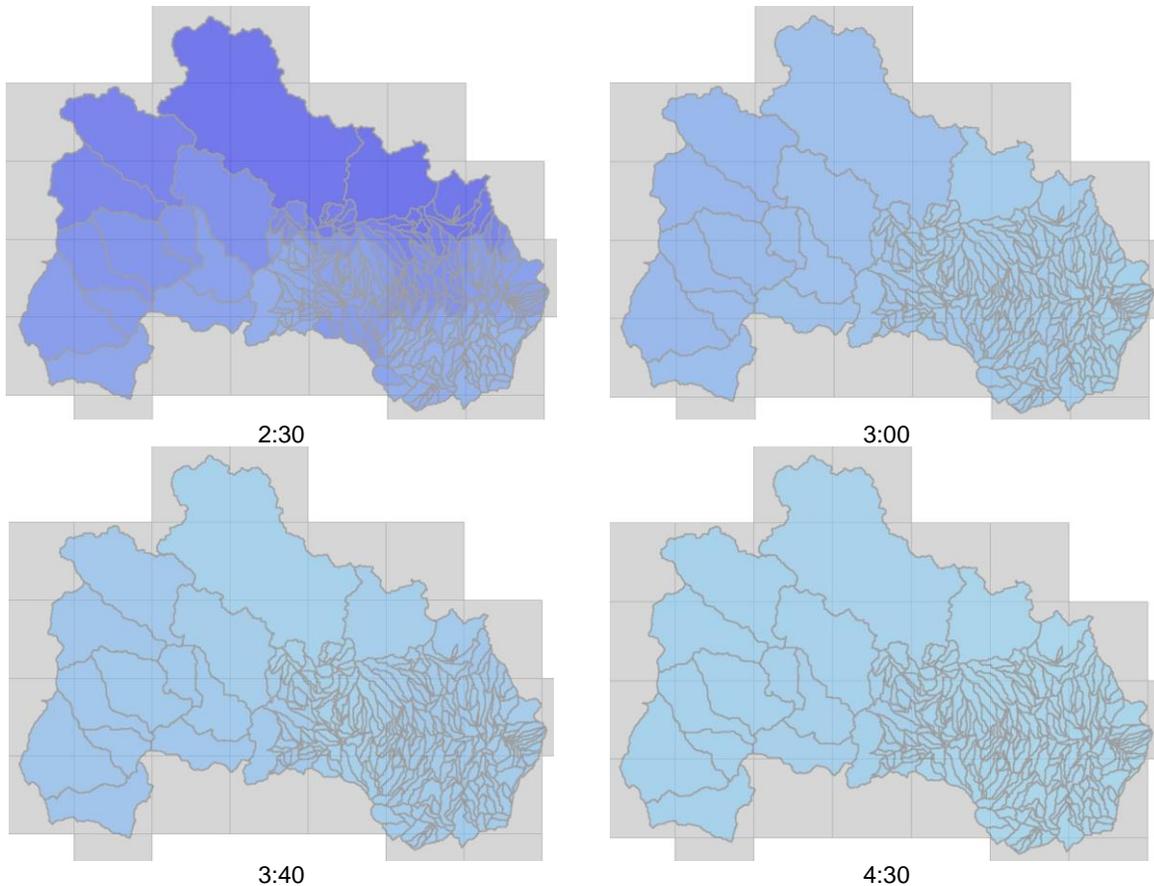


Ilustración 7. 7.2 Evolución de la lluvia en las subcuencas. Evento del 2 de septiembre del 2016 en hora UTC (continuación)

Cada subcuenca (297) genera un hidrograma (m^3/s) a partir del hietograma asignado del modelo WRF v3.6.1. (Ilustración 7.3). Los gastos obtenidos de las subcuencas se muestran en el anexo C apartado 1.

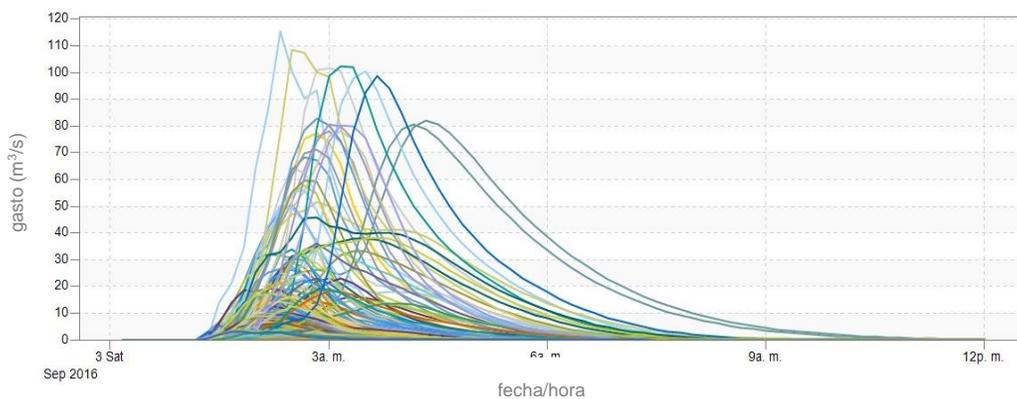
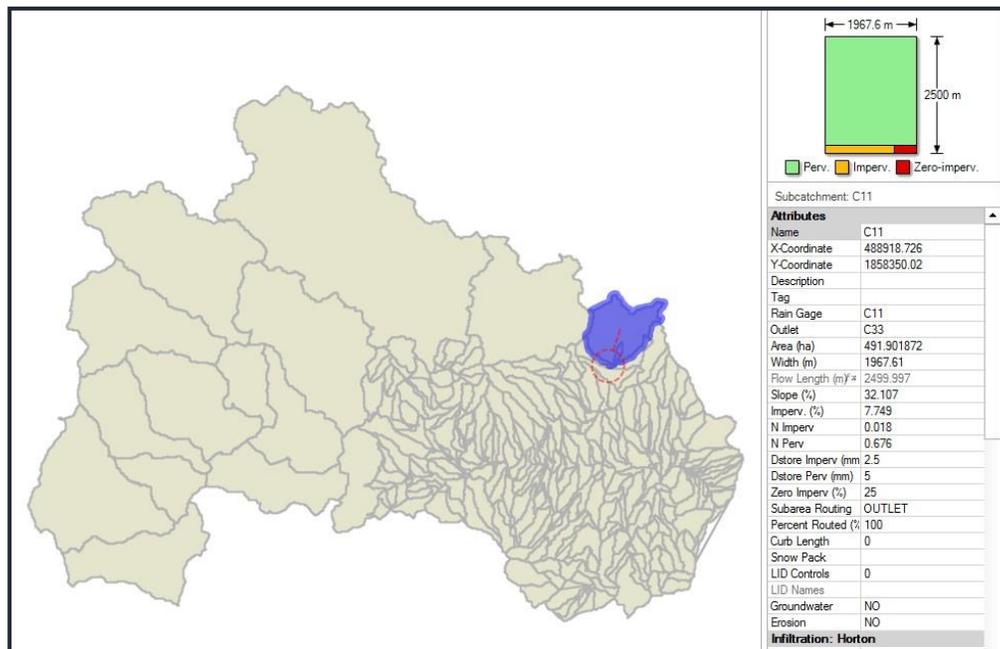
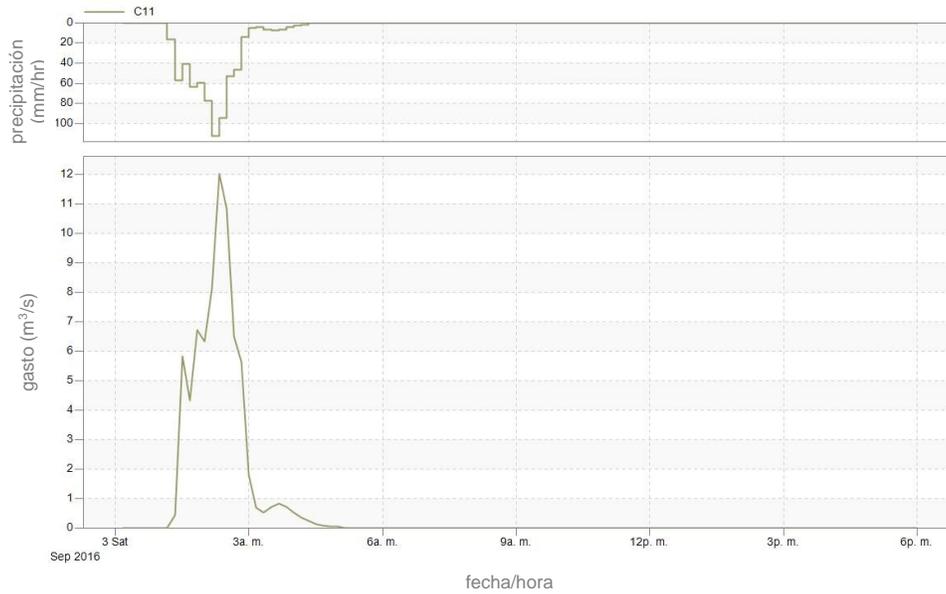


Ilustración 7.3 Hidrogramas generados en las 297 subcuencas

Del análisis de simulación hidrológica generado, de manera visual la Ilustración 7.4 presenta el hidrograma generado en una subcuenca permeable (90.3%) y la Ilustración 7.5 una subcuenca no permeable (86.9%).

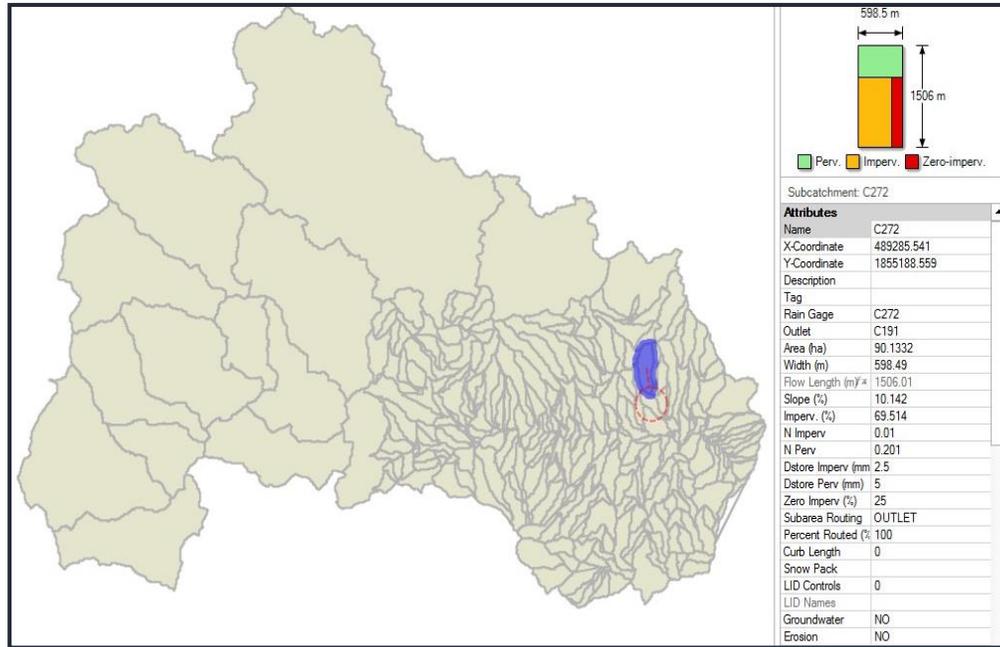


a)

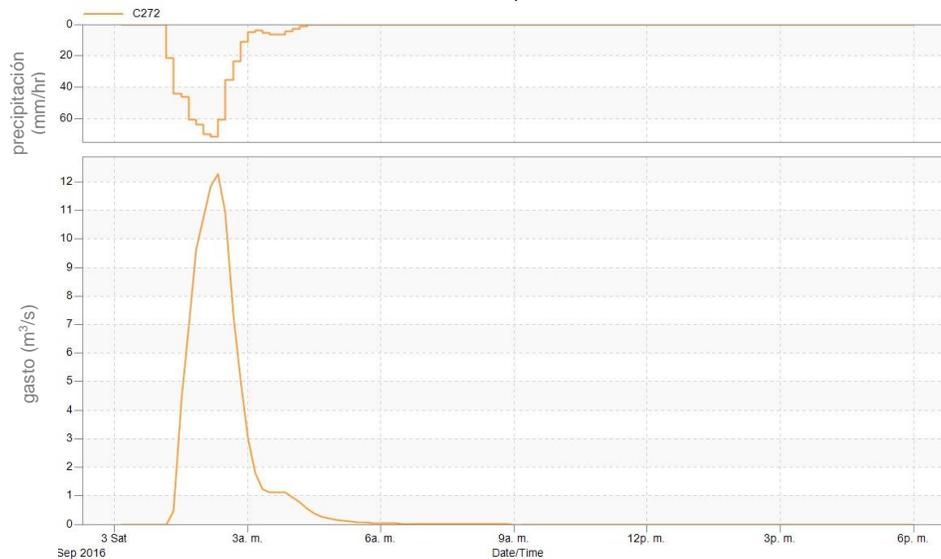


b)

Ilustración 7.4 Datos de escurrimiento obtenidos en las subcuencas a) subcuenca c11(permeable) y b) hidrograma (m³/s) a partir del hietograma (mm/hr) asignado



a)



b)

Ilustración 7.5 Datos de escurrimiento obtenidos a) subcuenca c272 y b) hidrograma (m^3/s) a partir del hietograma (mm/hr) asignado

Autores como Masch, F. (1985) y Campos, A. (2015) menciona que los efectos de urbanización en una cuenca se traducen en gastos pico mayores e hidrogramas de respuesta más esbeltos, debido a una mejor eficiencia hidráulica del área impermeable para generar y conducir el escurrimiento que produce la lluvia.

7.1.2 Evento del 23 de junio del 2017

Asignados los hietogramas a las subcuencas tanto a las de aportación como a las ubicadas en la zona urbana de Tuxtla Gutiérrez se procedió a generar el modelo de simulación lluvia-escorrentía para el evento del 23 de junio del 2017.

El evento generó una lluvia intensa en los primeros 60 minutos la cual fue disminuyendo a medida que transcurría el mismo. El rango de precipitación oscila entre 81.6 mm (color rojo) y 52.6 mm (color azul claro).

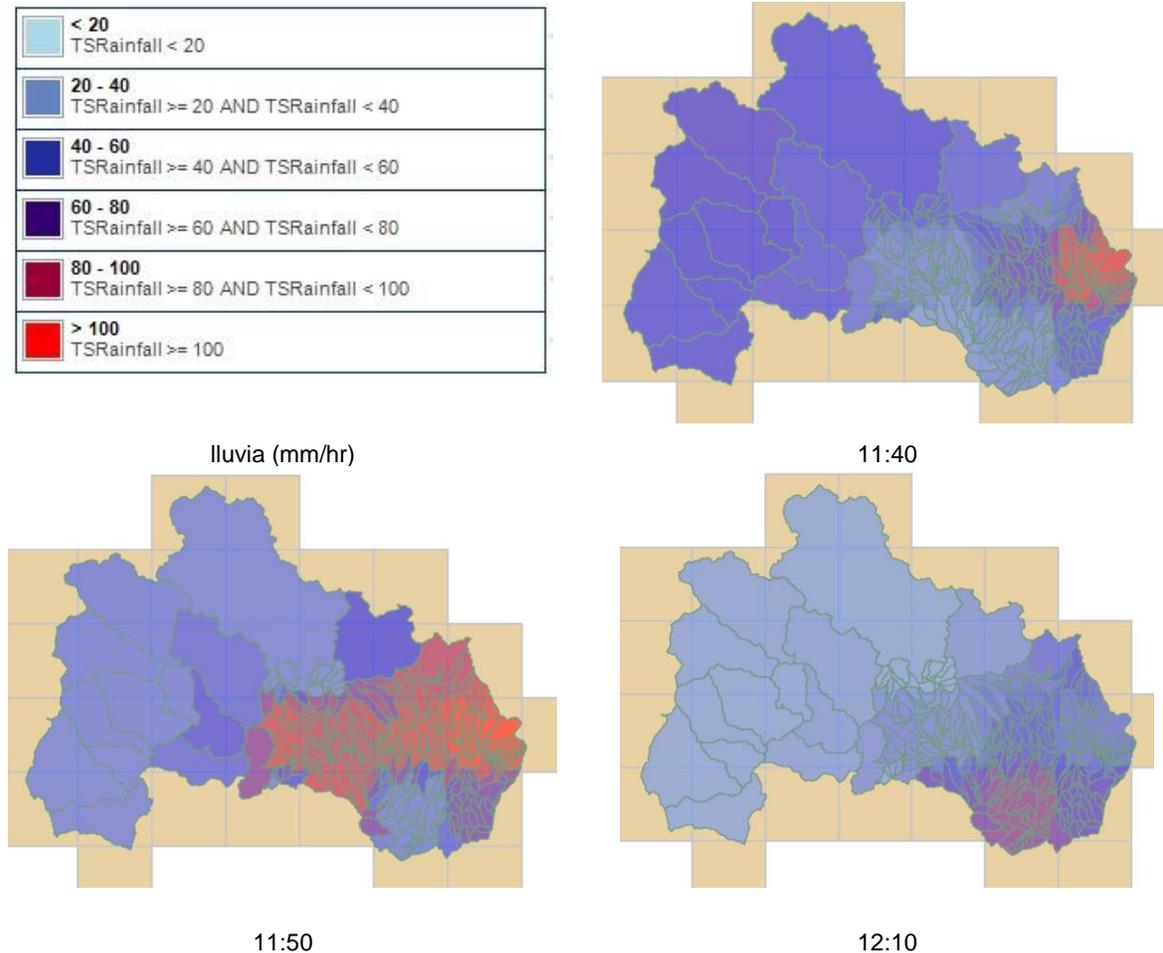


Ilustración 7.6 Evolución de la lluvia en las subcuencas del evento del día 23 de junio del 2017 en hora UTC

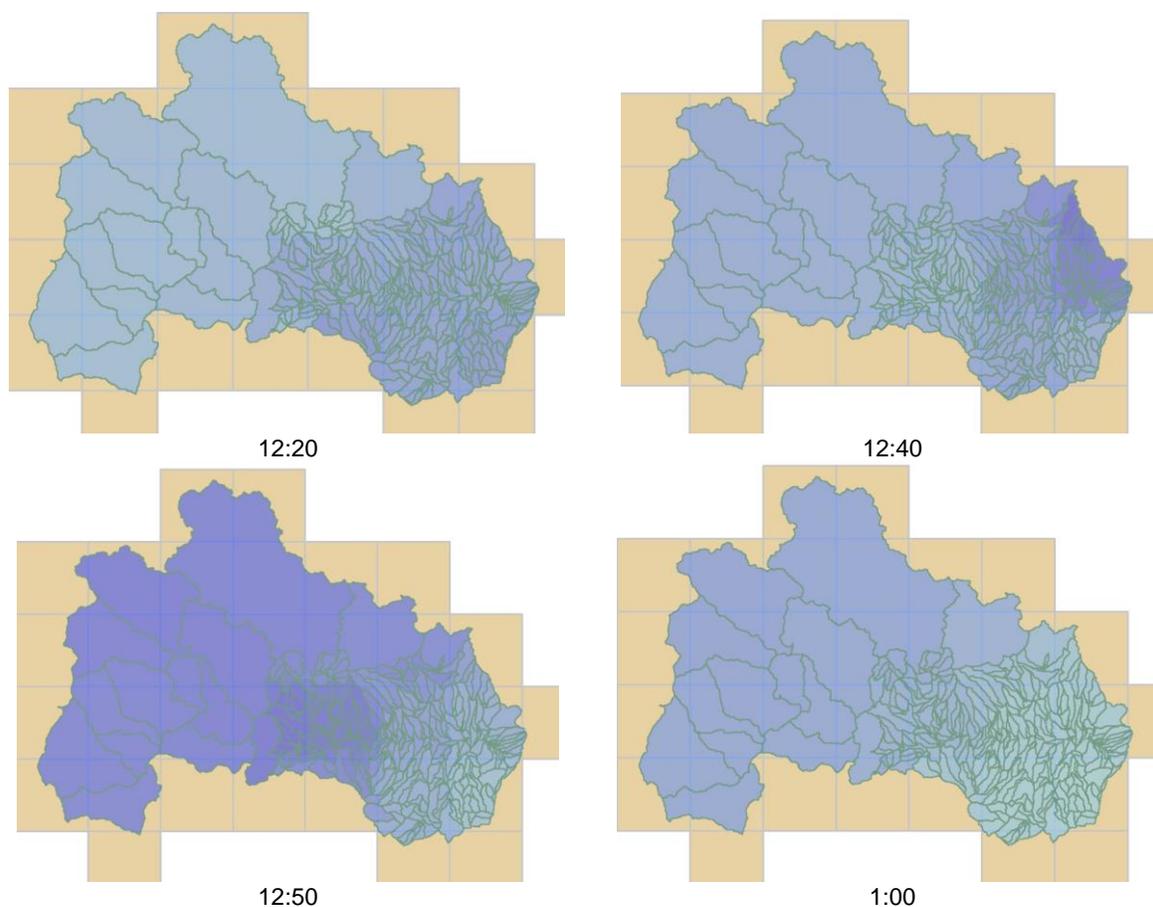


Ilustración 7.7 Evolución de la lluvia en las subcuencas del evento del día 23 de junio del 2017 en hora UTC (continuación)

Los hidrogramas generados para las 297 subcuencas se muestran de manera visual en la Ilustración 7.8, los gastos obtenidos de las subcuencas se muestran en el anexo C apartado 2.

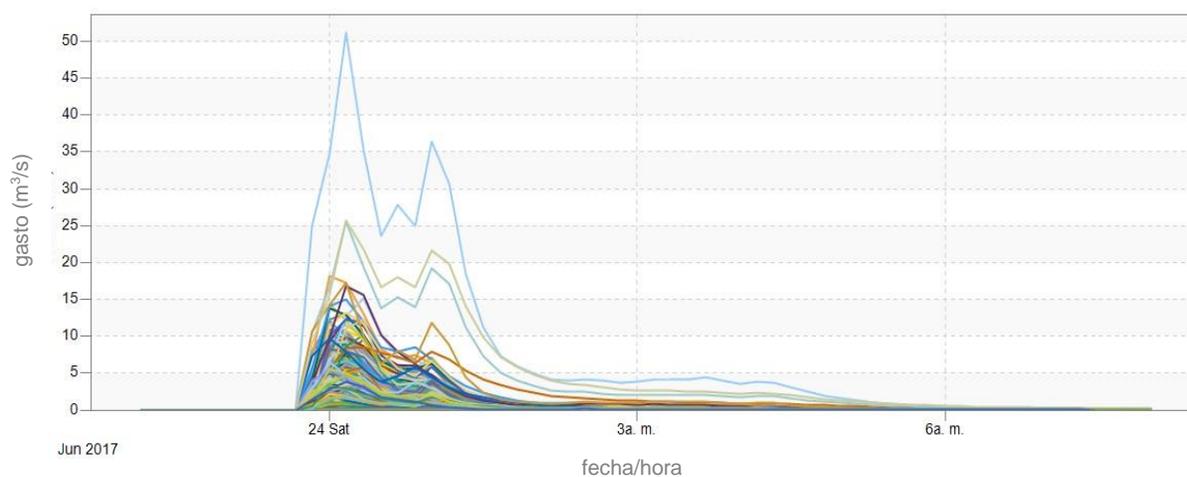
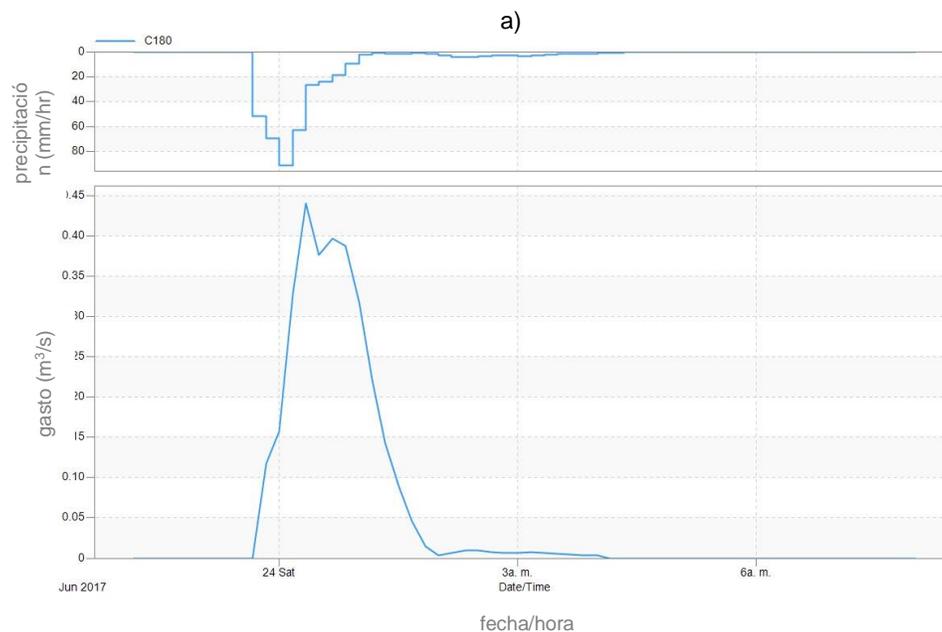
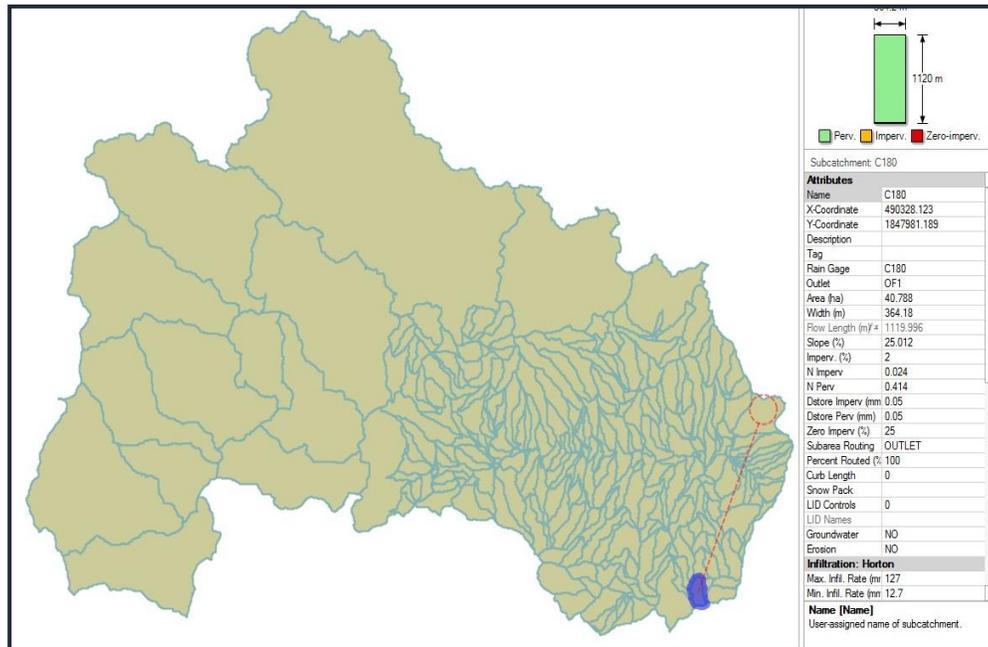


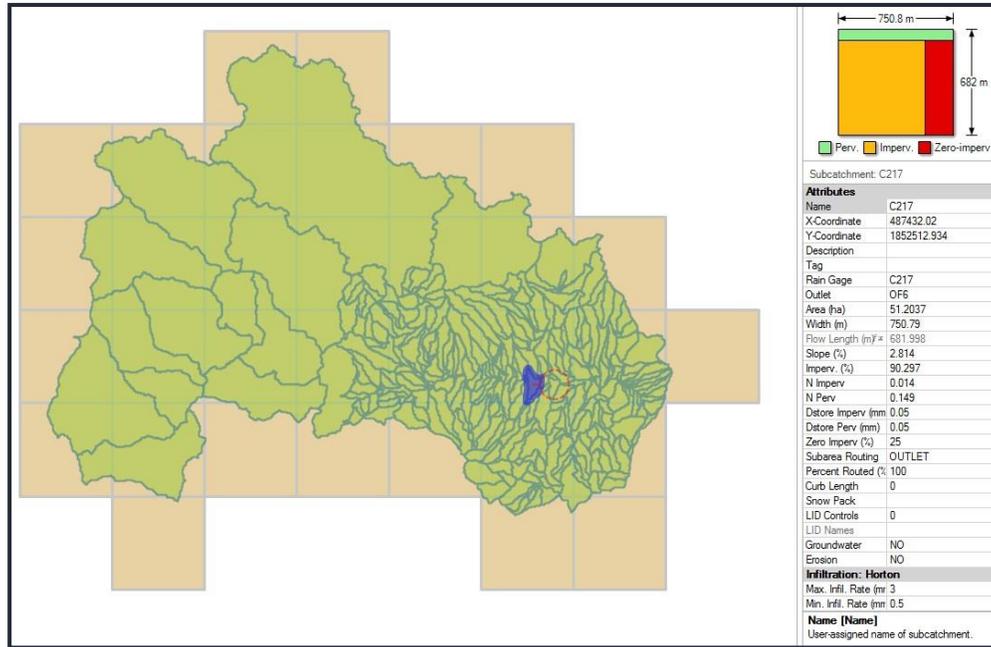
Ilustración 7.8 Hidrogramas generados en las subcuencas para el evento del 23 de junio del 2017

La Ilustración 7.9 muestra el hidrograma generado en la subcuenca c180 (98% permeable) y la Ilustración 7.10 en la subcuenca c217 (90.3 % impermeable). De acuerdo a lo mencionado por Campos, A. (2015) se observa que existe variación entre los hidrogramas, esto se refleja por la cantidad de precipitación (mm/hr) y las características de cada subcuenca (permeable o impermeable).

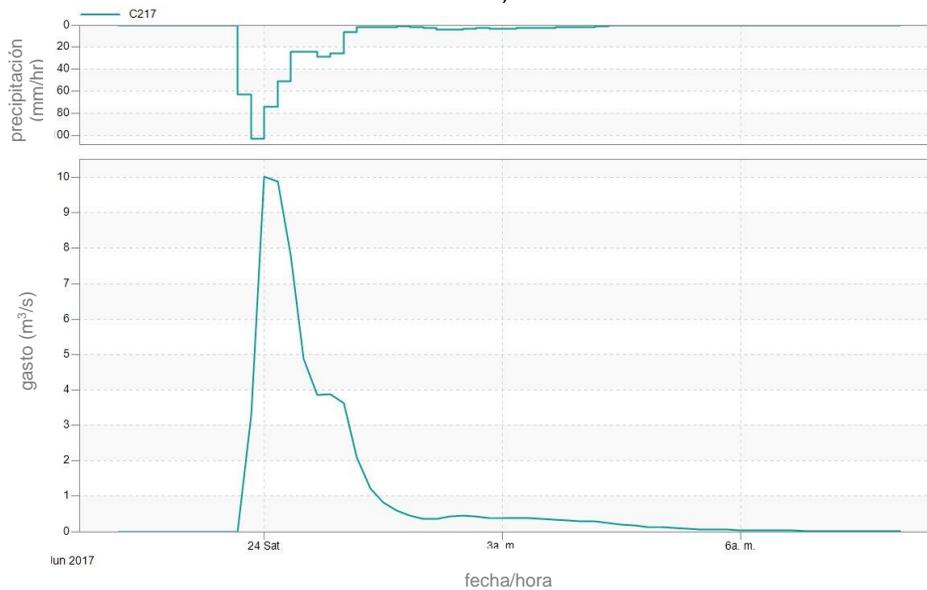


b)

Ilustración 7.9 Modelo lluvia-escorrentía a) subcuenca c180 (permeable) y b) hidrograma generado



a)



b)

Ilustración 7.10 Modelo lluvia-escorrentía a) subcuenca c217 (impermeable) y b) hidrograma generado

7.2 Integración del modelo hidrológico -hidráulico unidimensional (1D)

Para la integración del modelo de simulación hidrológico-hidráulico 1D se consideraron los principales colectores pluviales de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, (Ilustración 7.11), sus características físicas se presentan en la Tabla 7.1.

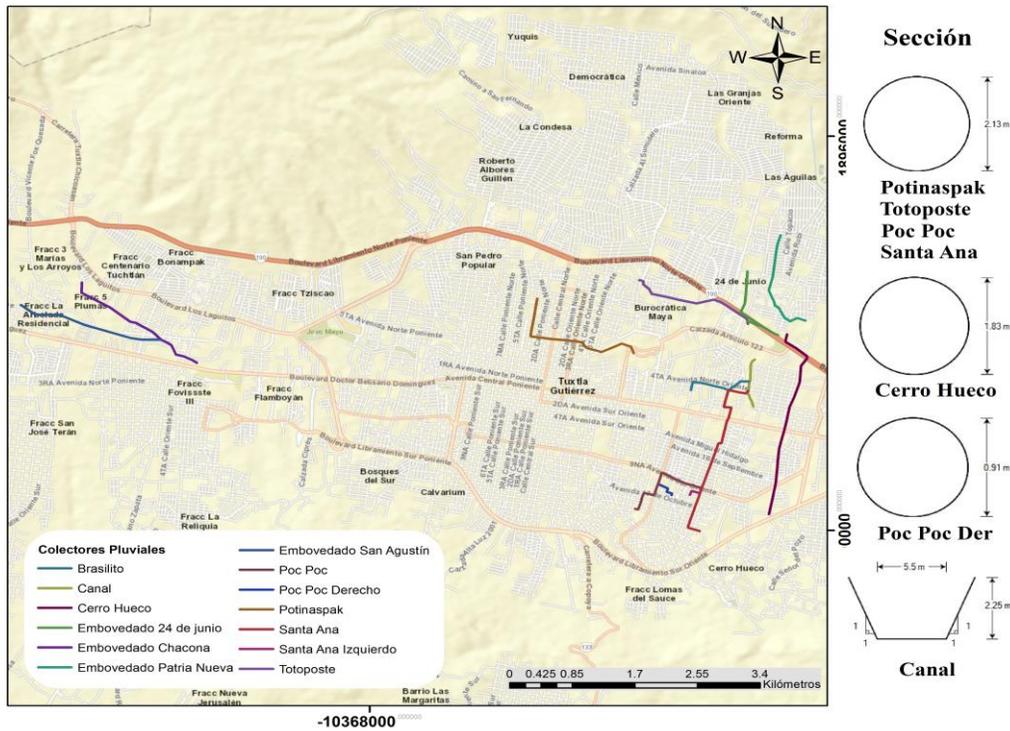


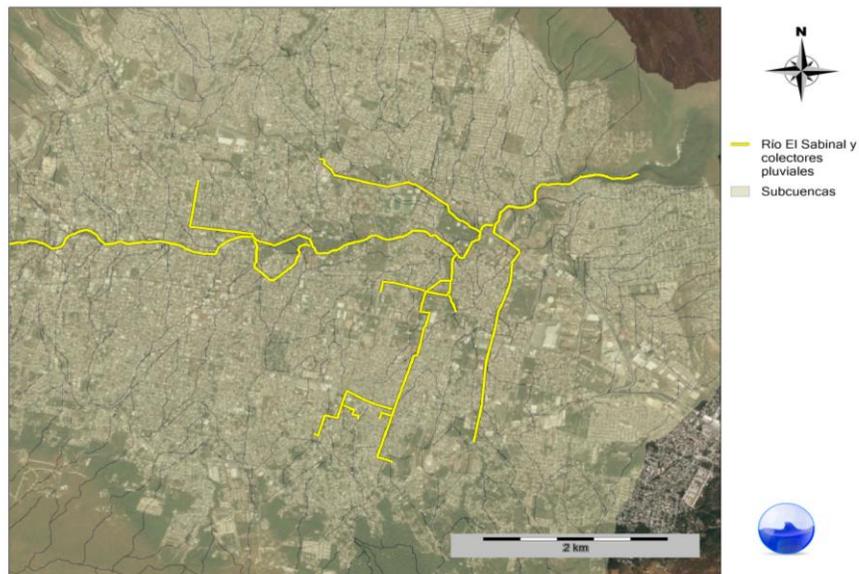
Ilustración 7.11 Colectores pluviales de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas

Tabla 7.1 Características físicas de los colectores pluviales de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez

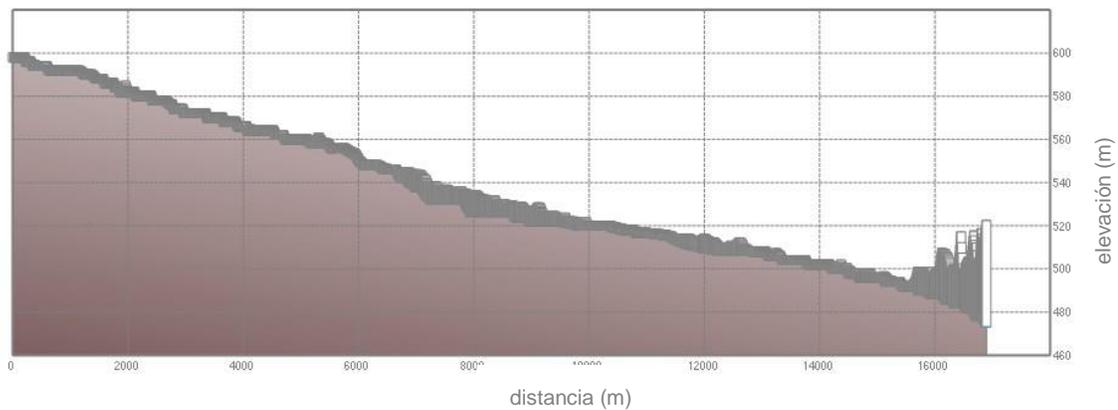
Colector	Sección	Dimensiones (m)	Longitud (m)
Embovedado Patria Nueva	Rectangular	1.5 x 2.5	1580
Embovedado 24 de junio	Rectangular	3.0 x 1.5	1190
Embovedado Chacona	Rectangular	4.5 x 2.2	2000
Embovedado San Agustín	Rectangular	6.0 x 1.0	1540
	Rectangular	2.5 x 2.0	390
Interceptor Potinaspak	Circular	2.13	2040
Interceptor Totoposte	Circular	2.13	1700
Interceptor Cerro Hueco	Circular	1.83	2540
	Circular	2.13	270
Poc Poc	Circular	2.13	1310
Poc Poc Derecho	Circular	1.22	150
	Circular	0.91	130
Santa Ana Izquierdo	Circular	0.61	170
Santa Ana	Circular	1.52	760
	Circular	2.13	1850
	Rectangular	2.5 x 3.28	8.6
Brasilito	Circular	1.52	60
	Circular	1.22	50

Colector	Sección	Dimensiones (m)	Longitud (m)
	Circular	1.52	220
	Circular	1.83	550
	Rectangular	3.0 x 2.0	20
Canal	Trapezoidal	4.5 x 2.25 Talud 1:1	710

Para la consideración del río Sabinal se generaron secciones transversales a lo largo de 16.9 km, las cuales se importaron al programa PCSWMM®, para su integración al modelo de simulación hidrológico-hidráulico 1D (ver Ilustración 7.12).



a)



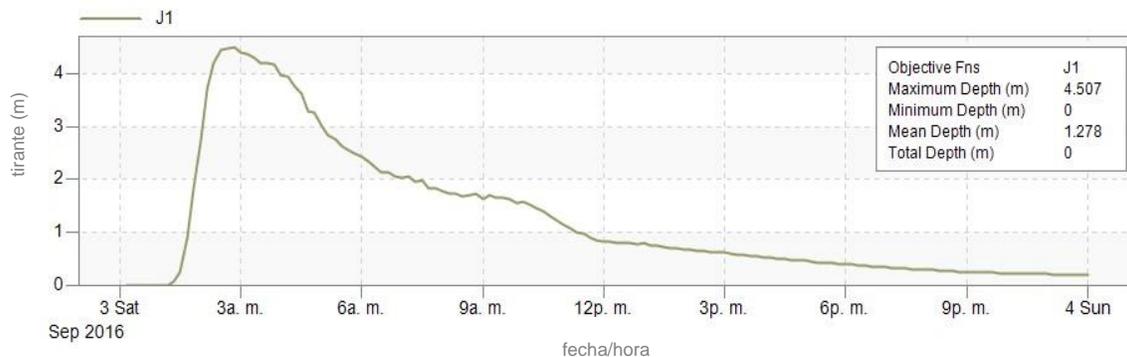
b)

Ilustración 7.12 Infraestructura pluvial en Tuxtla Gutiérrez. a) sistema de drenaje pluvial y b) perfil del río Sabinal

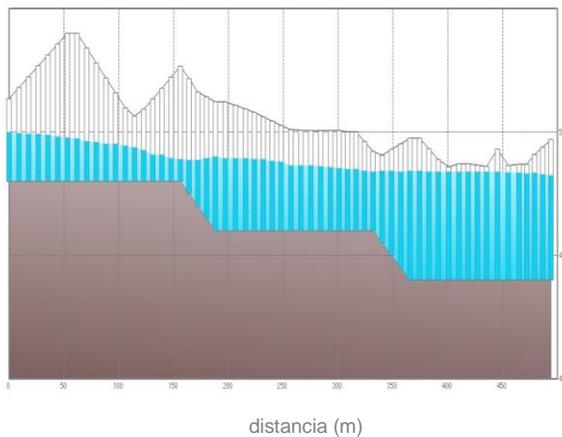
Integrado el sistema de drenaje pluvial al modelo, se realizó la simulación hidráulica unidimensional obteniéndose gastos (m^3/s), velocidades (m/s) y tirantes (m) sobre el sistema de drenaje pluvial.

7.2.1 Evento del 2 de septiembre del 2016

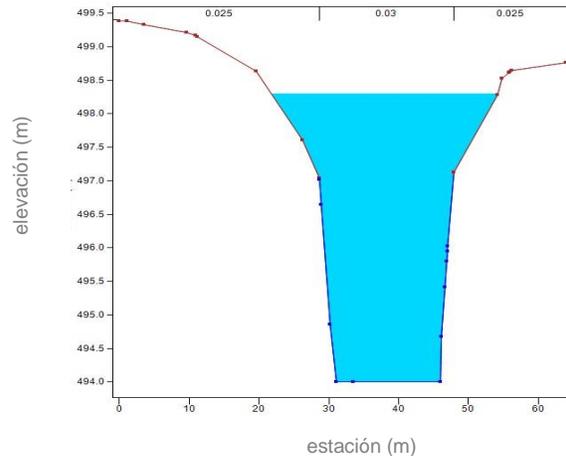
El análisis de los escurrimientos se realizó mediante el modelo 1D representando al río Sabinal y a los colectores pluviales como conductos que transportan el flujo de acuerdo con los hidrogramas obtenidos. La Ilustración 7.13 muestra el tirante de 4.50 m alcanzado en el nodo J1 (el cual representa la ubicación de la estación hidrométrica Parque Oriente en el modelo), incluyendo el perfil de 500 m del río Sabinal en ese tramo.



a)



b)



c)

Ilustración 7.13 Modelación hidráulica. a) tirante en el nodo J1, b) perfil del río Sabinal y c) sección ubicada en la estación hidrométrica Parque Oriente

Los datos de nivel del espejo del agua de la estación hidrométrica Parque Oriente permitieron realizar la comparación con el modelo de simulación numérica en el nodo J1, esto permitió conocer si los parámetros considerados (características de las subcuencas y datos de lluvia) fueron los más cercanos a lo ocurrido en el evento del 3 de septiembre del 2016. En el **inciso 7.3** se explica el **proceso calibración de los parámetros de las subcuencas** con la herramienta Sensitivity-based Radio Tuning Calibration (SRTC) en el programa PCSWMM®.

7.2.2 Evento del 23 de junio del 2017

Realizada la modelación para el evento del 23 de junio del 2017, se obtuvieron los datos hidráulicos sobre el sistema de drenaje pluvial. La Ilustración 7.14 muestra el limnigrama en el nodo J1 (tirante máximo de 3.88 m) y el perfil del río Sabinal en ese tramo.

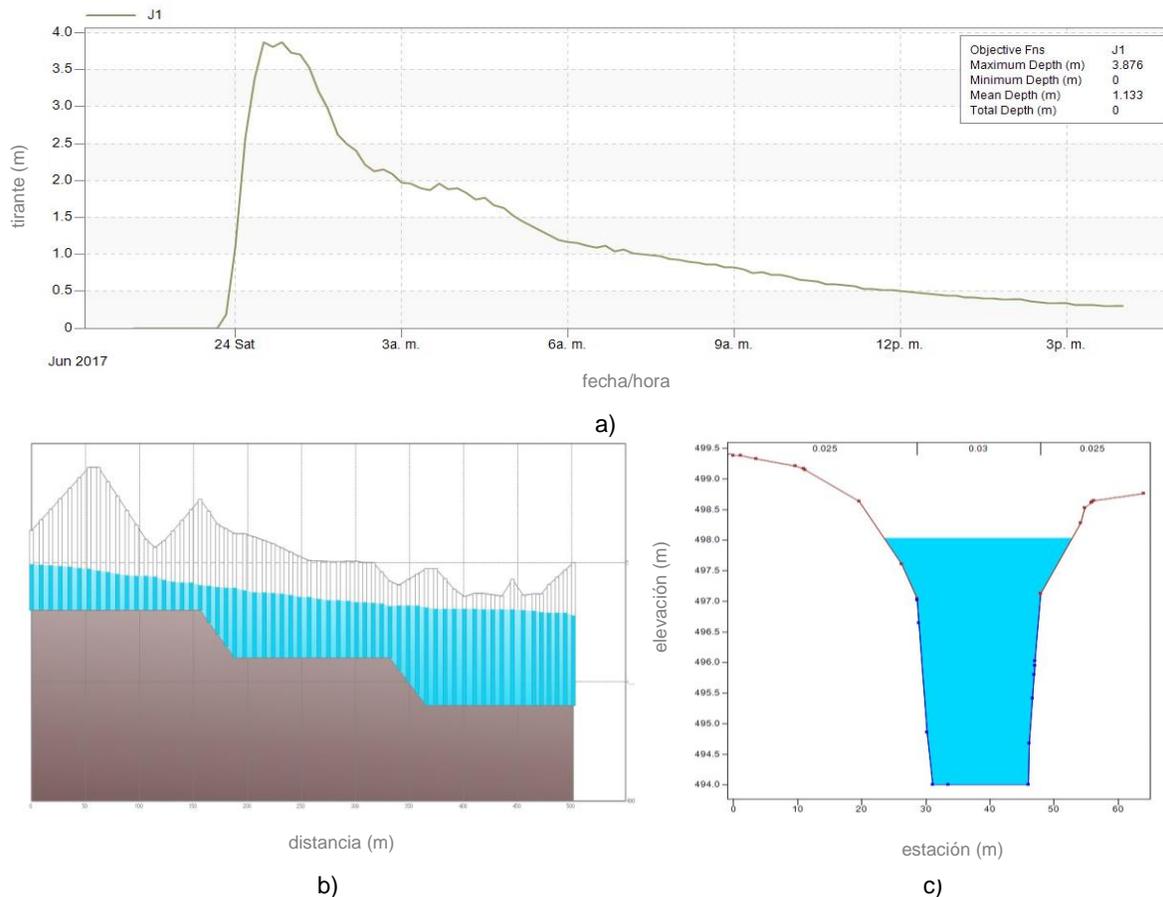


Ilustración 7.14 Modelación hidráulica. a) tirante en el nodo J1, b) perfil del río Sabinal y c) sección ubicada en la estación hidrométrica Parque Oriente

7.3 Calibración del modelo hidráulico

Para conocer la respuesta del río Sabinal se llevó a cabo la comparación de tirantes generados por el modelo de simulación en el nodo J1 (representando la ubicación de la estación hidrométrica Parque Oriente) y los registrados por la estación (J1 obs) la cual se encuentra a 3 km en la salida de la cuenca.

Para el evento del 2 de septiembre del 2016, la Ilustración 7.15 presenta el resultado del tirante máximo (m) medido en el nodo (J1), siendo de 4.5 m y el registrado por la estación hidrométrica (J1 obs) de 4.3 m, teniendo una diferencia de 20 cm en ambos. Sin embargo, la variación entre ellos se observó en el punto de inflexión del limnigrama J1, siendo necesario realizar la calibración.

En la actualidad se cuenta con dos formas de calibrar un modelo de simulación, en primer lugar está la calibración manual la cual se basa principalmente en la experiencia del modelador en el ajuste de los parámetros del modelo y la calibración automática basada en algoritmos matemáticos que tiene como fin encontrar una función objetivo que ajusta la similitud de los resultados del modelo con los datos observado (Vargas G., 2016). En el presente trabajo se realizaron las dos calibraciones con la finalidad de ajustarse lo más posible a lo registrado en los eventos analizados.

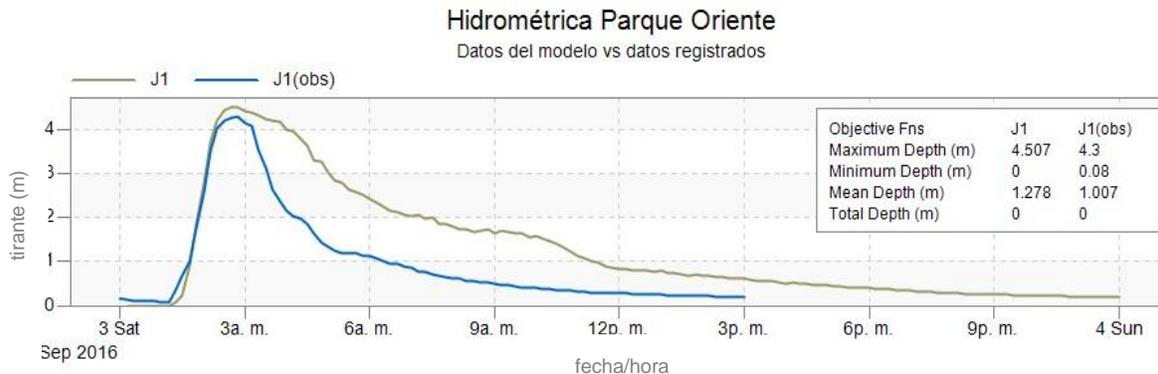


Ilustración 7.15 Comparación de los datos medidos por el modelo vs los datos registrados por la estación hidrométrica Parque Oriente

7.3.1 Calibración manual

Los archivos de calibración contienen medidas de un solo parámetro en uno o varios puntos que pueden ser comparados con los resultados de simulación en un gráfico de evolución temporal, (EPA, 2015). Siendo el escurrimiento superficial el parámetro a calibrar, se identificaron los atributos de las subcuencas que intervienen en él tal como se muestra en la Tabla 7.3.

Los parámetros considerados inicialmente para las subcuencas (ancho, % de impermeabilidad, n permeable e impermeable, máxima y mínima infiltración, etc.) se muestran en el anexo D, para la calibración manual se realizó un ajuste en los parámetros de las subcuencas considerando una incertidumbre de los mismos (ver Tabla 7.2), posteriormente se generó la simulación del modelo numérico para la comparación del tirante registrado (J1 obs) y del modelo (J1), tal como se muestra en la Ilustración 7.16.

Tabla 7.2 incertidumbre (%) considerada en los parámetros de las subcuencas- calibración manual

Parámetros	(%)
Imperv.	20
N Imperv	-20
N Perv	20
Max. Infil. Rate (mm/hr)	30

Parámetros	(%)
Min. Infil. Rate (mm/hr)	40

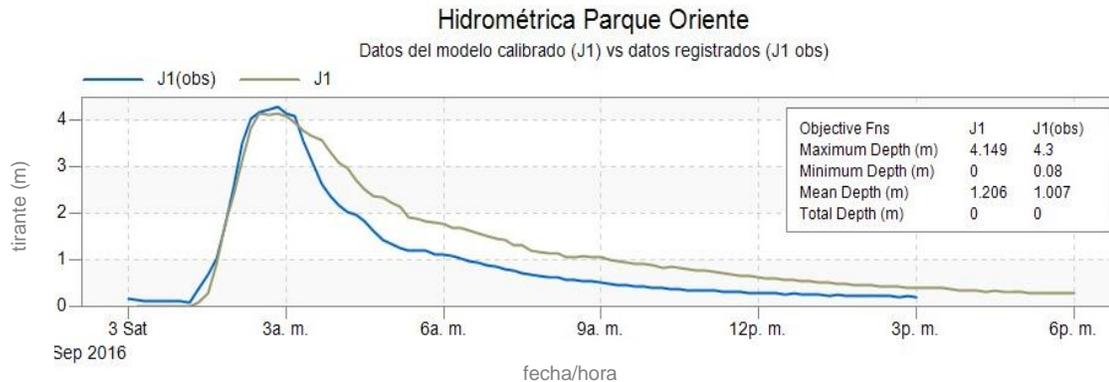


Ilustración 7.16 Comparación del modelo calibrado manualmente vs los datos registrados por la estación hidrométrica Parque Oriente

De la calibración manual se obtuvo un tirante en el nodo (J1) de 4.15 m dando como resultado que los datos del modelo con los datos registrados por la hidrométrica tuvieran similitudes (0.15 m de diferencia).

James, (2005) menciona que un modelo puede o no ser considerado suficientemente calibrado, esta restricción depende del enfoque y objetivo del tipo de información que el modelador desee obtener en el modelo, como ejemplo, puede ser con fines de planeación o de operación. Para algunos usuarios una precisión de 25% es adecuada, y otros insisten en un 10%.

Los tres resultados que se analizan del hidrograma estadístico que normalmente se analizan en la calibración son los siguientes, (James, 2005):

- I. Volumen. variable que llega a ser predominante, cuando se considera la retención del agua
- II. Gasto pico. Considerado para el dimensionamiento de conductos y la estimación de la capacidad disponible de los sistemas pluviales existentes.
- III. Tiempo pico Si el tiempo pico no se evalúa, podrían tener gran impacto en la descarga máxima total aguas abajo

El tirante es la variable que se consideró para realizar la comparación con los datos registrados por la estación hidrométrica, siendo la que se utilizó para la calibración manual y para la calibración por medio de la herramienta Sensitivity-based Radio Tuning Calibration (SRTC) del PCSWMM.

7.3.2 Calibración con la herramienta SRTC

A pesar de los datos muy similares del modelo de simulación hidrológico-hidráulico calibrado manualmente y el registrado por la estación hidrométrica Parque Oriente se procedió a realizar la calibración del modelo con la herramienta Sensitivity-based Radio Tuning Calibration (SRTC), esto con la finalidad de ajustarse más a lo sucedido en los eventos. Como se indicó anteriormente, la escorrentía superficial de las subcuencas es el parámetro a calibrar para lo cual fue necesario establecer la incertidumbre (%) en las características físicas de las subcuencas (ver Tabla 7.3).

Tabla 7.3 Incertidumbre consideradas para las subcuencas adaptado de: (James, 2005)

Parámetro de la subcuenca	Incertidumbre (%)
Width	50-100
Imperv	25-50
N Imperv	10-25
N Perv	50-100
Dstore Imperv	25-50
Dstore Perv	50-100
Zero Imperv	50-100
Max. Inf Rate	50-100
Min Inf Rate	50-100
Decay constant	50-100
Drying Time	25-50

Eventos simulados

Establecidos los parámetros de incertidumbre se ingresaron al programa PCSWMM®, (ver Ilustración 7.17) y se realizó la calibración con la herramienta SRTC a partir de los valores extremos (alto y bajo) de los parámetros considerados (ver Ilustración 7.18).

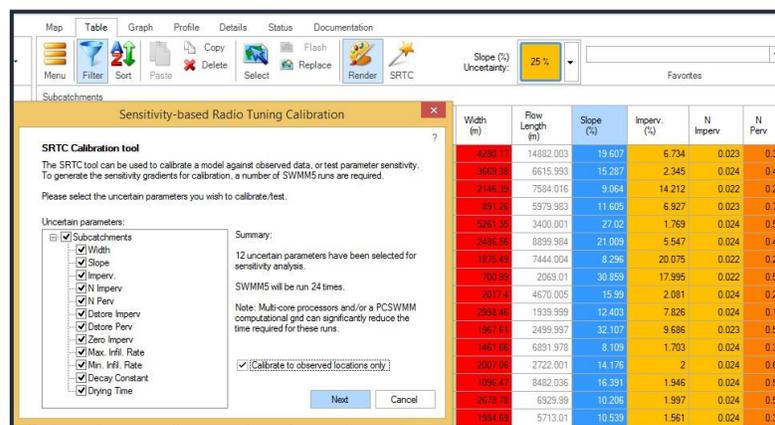


Ilustración 7.17 Parámetros ingresados para la calibración del modelo

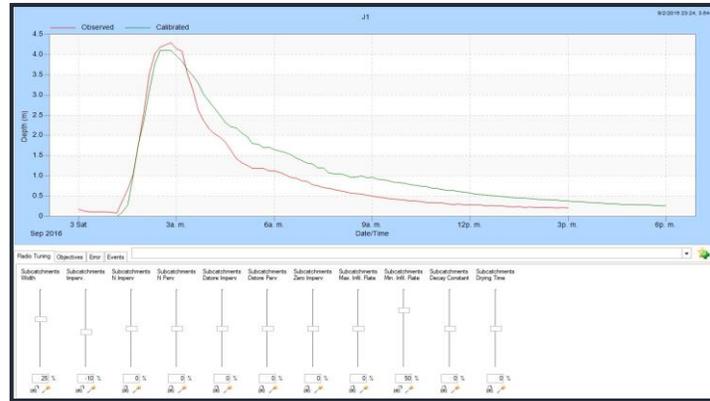


Ilustración 7.18 Parámetros modificados para la calibración con la herramienta STRC

Los parámetros más sensibles de la calibración fueron el ancho de la cuenca con un +25%, el porcentaje impermeable con un - 10% y la tasa de infiltración mínima con un +50%. Estos porcentajes se obtuvieron a partir de la incertidumbre especificada en la Ecuación 14 y Ecuación 15. Como ejemplo para la subcuenca C1 inicialmente tenía un ancho de 4280.17 m, considerado una incertidumbre del 50% y aplicando las ecuaciones mencionadas resultó lo siguiente:

$$P_{bajo} = P_{acutal} \left(\frac{1}{1 + \frac{U}{100}} \right) = 4280.17 \left(\frac{1}{1 + \frac{50}{100}} \right) = 2853.44 \text{ m} \quad Ec. 14$$

$$P_{alto} = P_{acutal} \times \left(1 + \frac{U}{100} \right) = 4280.17 \left(1 + \frac{50}{100} \right) = 6420.25 \text{ m} \quad Ec. 15$$

Establecidos los valores extremos y realizando la calibración del ancho de la subcuenca en este caso de + 25 % resultó lo siguiente:

$$P_{calibrado} \text{ C1} = P_{alto} (0.75\%) = 4815.18 \text{ m}$$

Este ajuste en los parámetros permitió que el limnigrama del modelo calibrado se ajustará a los datos observados (ver Ilustración 7.19) el tirante máximo en el nodo J1 fue de 4.30 m, resultando similar al medido por la estación hidrométrica (J1 obs).

La validación del modelo se realizó obteniendo el valor del coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE), tal como se mencionó anteriormente establece la relación entre el comportamiento real y el modelado. El coeficiente NSE fue de 0.87 siendo excelente de acuerdo con el rango de indicadores de la Tabla 5.3. El valor de la raíz del error cuadrático medio (RMSE) se obtuvo de 3.55 y el coeficiente correlación lineal (R^2) de 0.95. En el anexo F se muestran los parámetros calibrados de las subcuencas con la herramienta STRC.

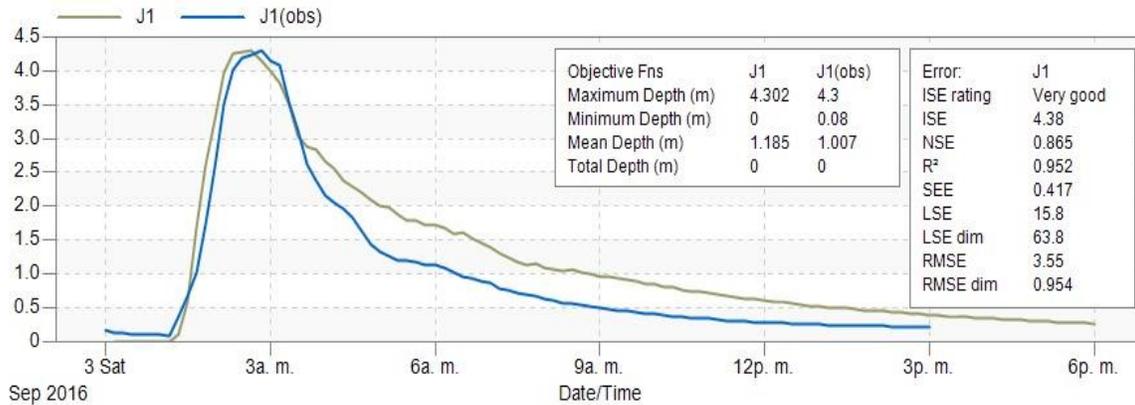


Ilustración 7.19 Comparación del modelo calibrado SRTC(J1) vs los datos registrado (J1 obs) por la estación hidrométrica Parque Oriente. Evento del 2 de septiembre del 2016

Obtenidos los parámetros calibrados del modelo con la herramienta SRTC se realizó la simulación del modelo para el evento del 23 de junio del 2017, el tirante máximo presentado en el nodo (J1) fue de 3.87 m y el observado fue de 3.81 m, teniendo una diferencia de 1.57% entre ellos (Ilustración 7.20).

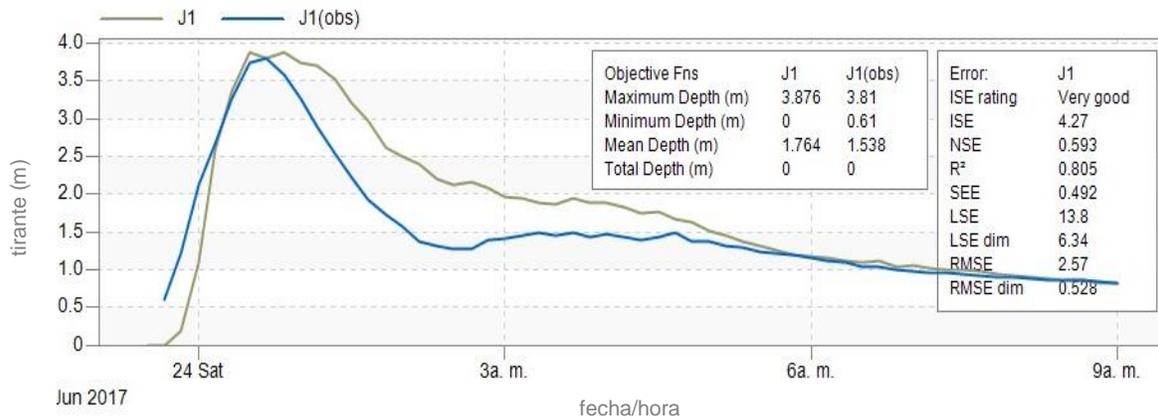


Ilustración 7.20 Comparación del modelo calibrado SRTC(J1) vs los datos registrado (J1 obs) por la estación hidrométrica Parque Oriente. Evento del mes de junio del 2017

El valor del coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) fue de 0.59 siendo *bueno* de acuerdo con el indicador de la Tabla 5.3. El valor de la raíz del error cuadrático medio (RMSE) se obtuvo de 2.53 y el coeficiente correlación lineal (R²) de 0.80.

De acuerdo a las recomendaciones de James, (2005) en cuanto a la precisión del modelo se puede considerar como aceptable la variación que existe entre el modelo hidráulico calibrado y los registrados en los eventos considerados.

7.4 Generación del modelo de simulación hidráulica 1D-2D

El modelo de simulación unidimensional-bidimensional (1D-2D) comprende lo siguiente:

- Modelo de simulación lluvia-escorrentamiento generado a partir de la distribución espacial de la lluvia obtenida del modelo WRF v3.6.1 y de las EMAS.
- Modelo de simulación unidimensional del sistema de drenaje pluvial mayor (río Sabinal) y menor (arroyos y colectores pluviales)
- Traza urbana de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez
- Escorrentamiento superficial sobre calles, áreas y arroyos a partir del mallado generado

Los modelos 2D consideran variaciones en las dos dimensiones en el plano horizontal y requiere de resolver ecuaciones diferenciales y por lo tanto una discretización más fina para lo cual se generan mallas, con este método se proporciona un detalle y precisión con el que es posible determinar las variaciones de velocidad en dos sentidos (Llaguno G., 2014).

El programa computacional PCSWMM®, considera 4 tipos de mallas (hexagonal, rectangular, direccional y optativa). La malla rectangular a menudo se utiliza para representar carreteras y corredores (Computational Hydraulics International, 2017).

Para la simulación de los escurrimientos superficiales generados sobre las calles y sobre áreas delimitadas se generó una malla rectangular de 15 x 15 m en el modelo 2D con lo cual se contó con un área de modelación de 32.61 km²(ver Ilustración 7.21). Los atributos que contiene cada celda de la malla son la elevación (m), el área (m²), el tirante máximo (m) y la velocidad máxima (m/s). La topografía del mallado se obtuvo a partir del Modelo Digital de Elevaciones con resolución de 3 x 3 m.

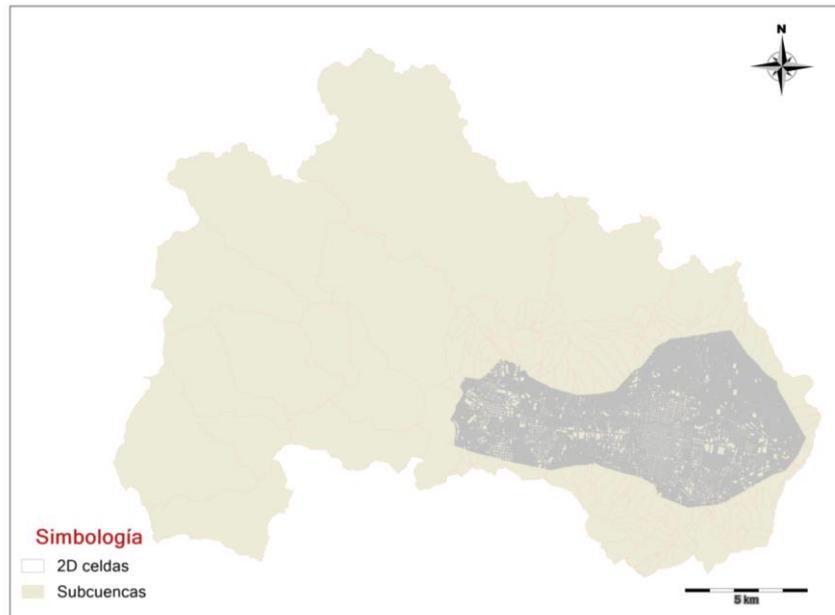
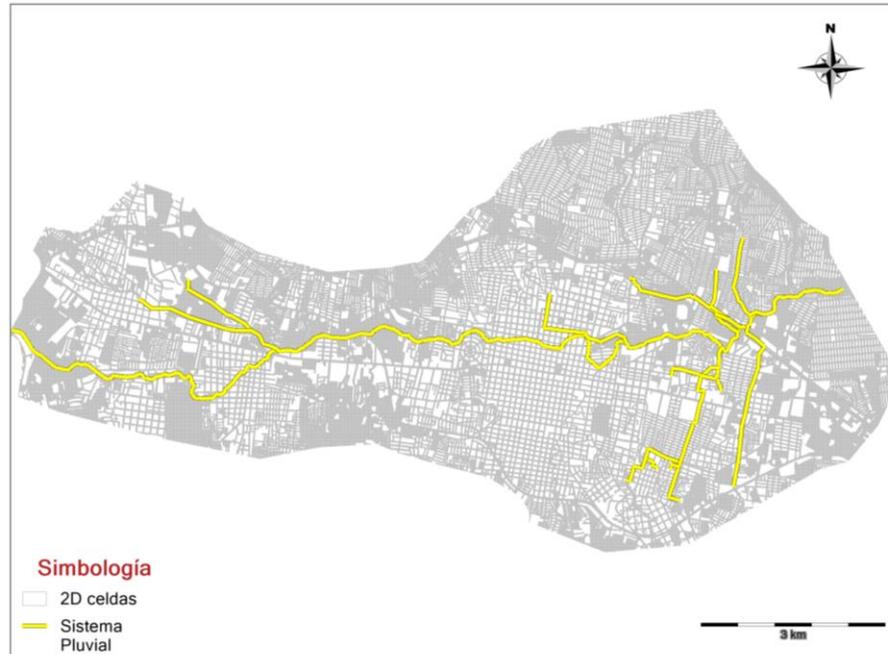


Ilustración 7.21 Malla generada en la zona urbana de Tuxtla Gutiérrez para la modelación 2D (32.61 km²)

La integración del modelo de simulación 1D-2D, permite contar con un sistema de drenaje dual, es decir los escurrimientos superficiales generados sobre las calles se consideran como un *sistema mayor* y el flujo transportado en los colectores pluviales se conoce como *sistema menor* (Ilustración 7.22).



a)



Ilustración 7.22 Integración del modelo 1D-2D a) Generación de la malla rectangular de 15 m x 15 m, b) sistema de drenaje pluvial mayor (río Sabinal) y sistema de drenaje pluvial menor (colectores)

Del modelo hidráulico 1D-2D se realizó la simulación de los eventos seleccionados para la obtención de los tirantes (m) y velocidades (m/s) que generan los escurrimientos superficiales en la zona urbana de Tuxtla Gutiérrez, además del funcionamiento hidráulico del sistema de drenaje pluvial considerando de manera unidimensional (1D) integrado por el río Sabinal y los arroyos Brasilito, Canal, Cerro Hueco, Poc Poc, Potinaspak, Santa Ana, Totoposte y los colectores embovedados (Patria Nueva, 24 de junio, San Agustín y Chacona) .

7.5 Mapas de peligro por inundación

Los mapas de peligro por una inundación, son una representación gráfica, resultado de lluvia en exceso, desbordamiento de un río, incremento en el oleaje, rompimiento de una presa, etc., en el que se plasman los niveles del agua alcanzados y la velocidad de escurrimiento dentro de una zona urbana, el lecho de un río o laguna (IMTA, 2015).

El siguiente trabajo muestra la generación de mapas de peligro considerando 3 eventos (registrando su mayor intensidad los *primeros 60 minutos*):

1. *Evento del 12 de agosto del 2015.* Precipitación promedio en la subcuenca de 50.5 mm con una duración de 100 min
2. *Evento del 2 de septiembre del 2016.* Precipitación promedio en la subcuenca de 81.5 mm con una duración de 185 min
3. *Evento del 23 de junio del 2017.* Precipitación promedio en la subcuenca de 67.5 mm con una duración de 300 min

La respuesta de una cuenca a la precipitación, en forma de hidrograma, depende del estado de saturación del terreno, de lo que se conoce como estado de humedad antecedente; el estado de saturación del terreno varía mucho a lo largo del año y depende de las precipitaciones ocurridas en los días previos. Esto tiene como consecuencia que el hidrograma resultante de la transformación lluvia-escorrentía en condiciones secas puede diferir en casi un 50 % del que corresponda a un estado de humedad antecedente alto (Aldana V., 2015).

Se ha considerado la condición del suelo húmedo, es decir se ajustaron los parámetros de infiltración con el método de Horton (ver Anexo G) de tal manera que es suelo se encontrará parcialmente saturado considerando que en días anteriores se presentaron lluvias.

Obtenidos los tirantes y velocidades de los escurrimientos superficiales en el modelo bidimensional (2D), se generaron los mapas de tirantes máximos que se presentan en la zona urbana de Tuxtla Gutiérrez y los mapas de peligro por inundación utilizando los valores propuestos por IMTA, (2015) de acuerdo a la Tabla 5.4.

Se realizó un ajuste en el nivel de peligro Nulo de la tabla antes mencionada realizando la consideración del nivel de la banquetta promedio, de acuerdo con el “reglamento de construcción para el municipio de Tuxtla Gutiérrez” donde se establece lo siguiente:

Capítulo III. Guarniciones. (H. Ayuntamiento de Tuxtla Gutiérrez, 2017)

Artículo 54. Las guarniciones de tipo "integral" deberán ser de 65 centímetros de ancho de los cuales 50 centímetros corresponden a la losa, el machuelo medirá 15 centímetros en la base, 12 en la corona y altura de 15 centímetros

Artículo 55. La sección de las guarniciones del tipo "recto" deberá tener 20 centímetros de base, 15 de corona y 40 centímetros de altura, debiendo invariablemente sobresalir 15 centímetros del pavimento.

Se considera que la banquetta está a la altura de la guarnición la cual sobresale 15 centímetros del pavimento de acuerdo con los artículos 54 y 55. La Tabla 7.4 muestra los valores establecidos para la generación de mapas de peligro por inundación considerados.

Tabla 7.4 Valores establecidos para la generación de mapas de peligro por inundación. Adaptado de (IMTA, 2015)

Nivel de peligro	Altura (m)	Volcamiento (m^2/s)	Deslizamiento (m^3/s)
Nulo	$h < 0.15$	$vh < 0.15$	$v^2h < 0.15$
Bajo	$0.15 \geq h < 0.5$	$0.15 \geq vh < 0.5$	$0.15 \geq v^2h < 0.5$
Medio	$0.5 \geq h < 1.5$	$0.5 \geq vh < 1.5$	$0.5 \geq v^2h < 1.23$
Alto	$h \geq 1.5$	$vh \geq 1.5$	$v^2h \geq 1.23$

De la Ilustración 7.23 a la Ilustración 7.28 se presentan los tirantes máximos alcanzados en la zona urbana de Tuxtla Gutiérrez de los 3 eventos considerados.

Establecidos los valores para la generación de los mapas de peligro por inundación (ver Tabla 7.4), de la Ilustración 7.29 a la Ilustración 7.34 se presenta los mapas de peligro clasificados por la zona de peligro .siendo alto (color rojo), medio (color naranja) y bajo (color amarillo). Asimismo, se coloca el periodo de retorno al cual se asocian.

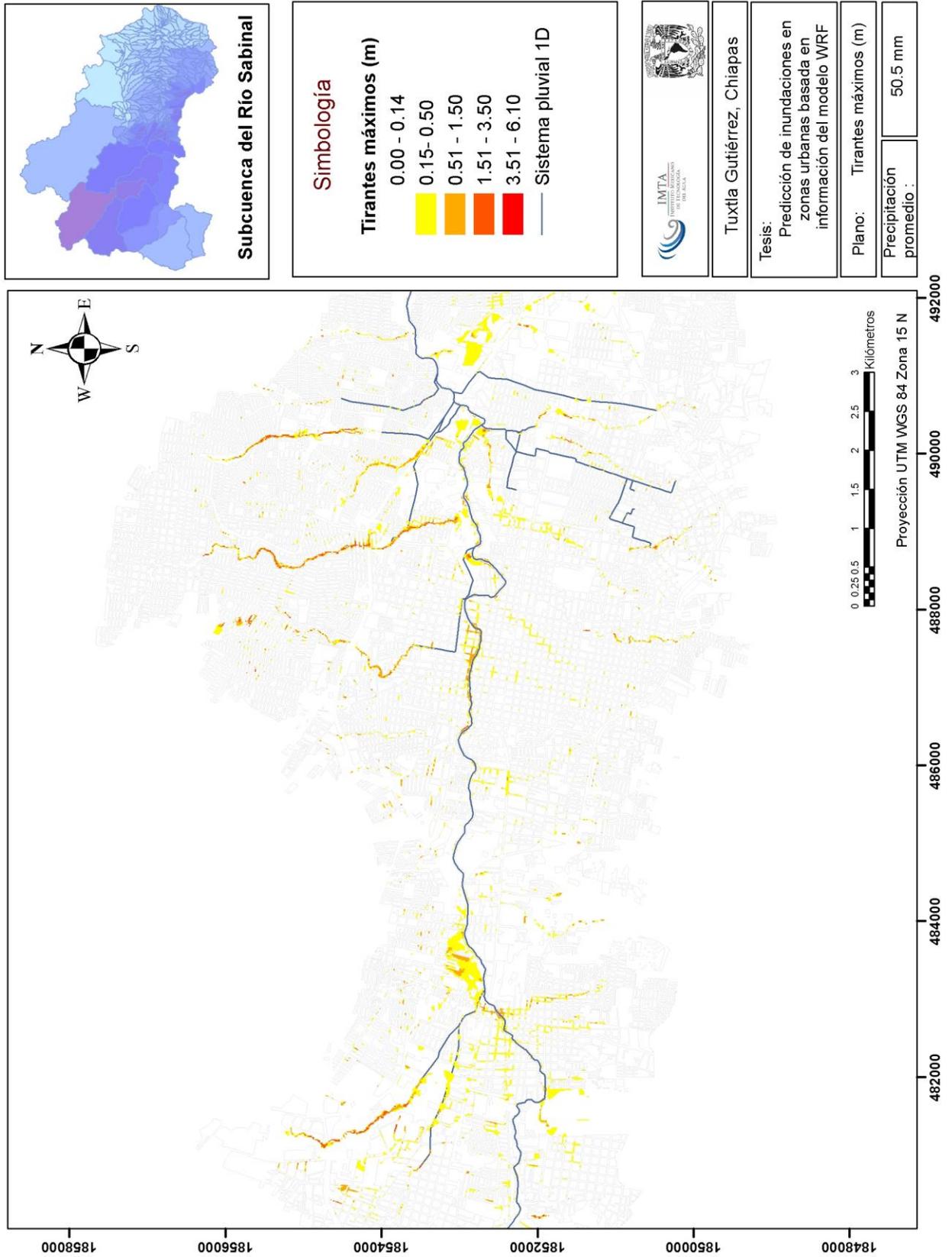


Ilustración 7.23 Tirantes máximos alcanzados en la zona urbana de Tuxtla Gutiérrez. Evento del 12 agosto del 2015

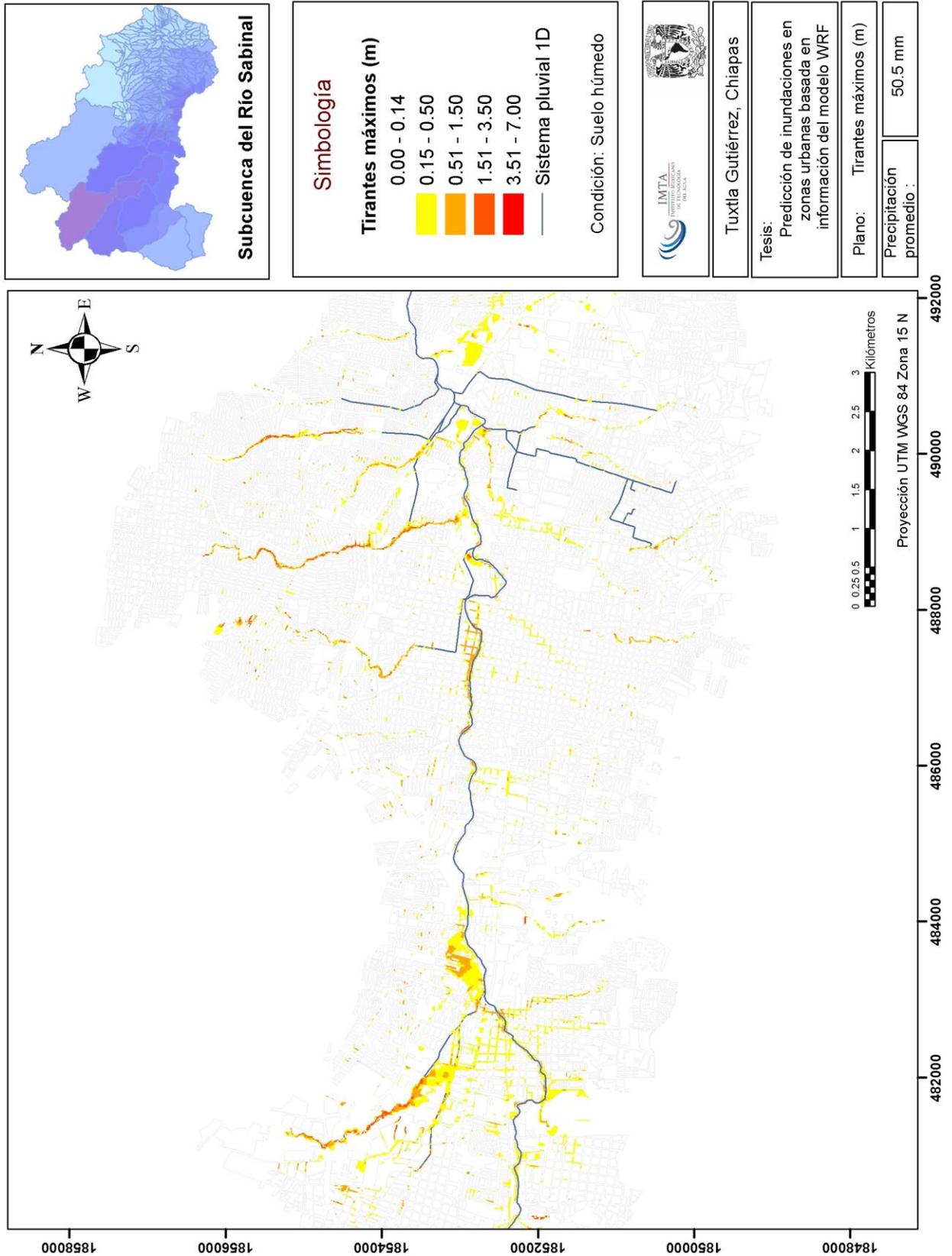


Ilustración 7.24 Tirantes máximos alcanzados considerando el suelo húmedo ajustando los parámetros de infiltración. Evento del 12 de agosto del 2015

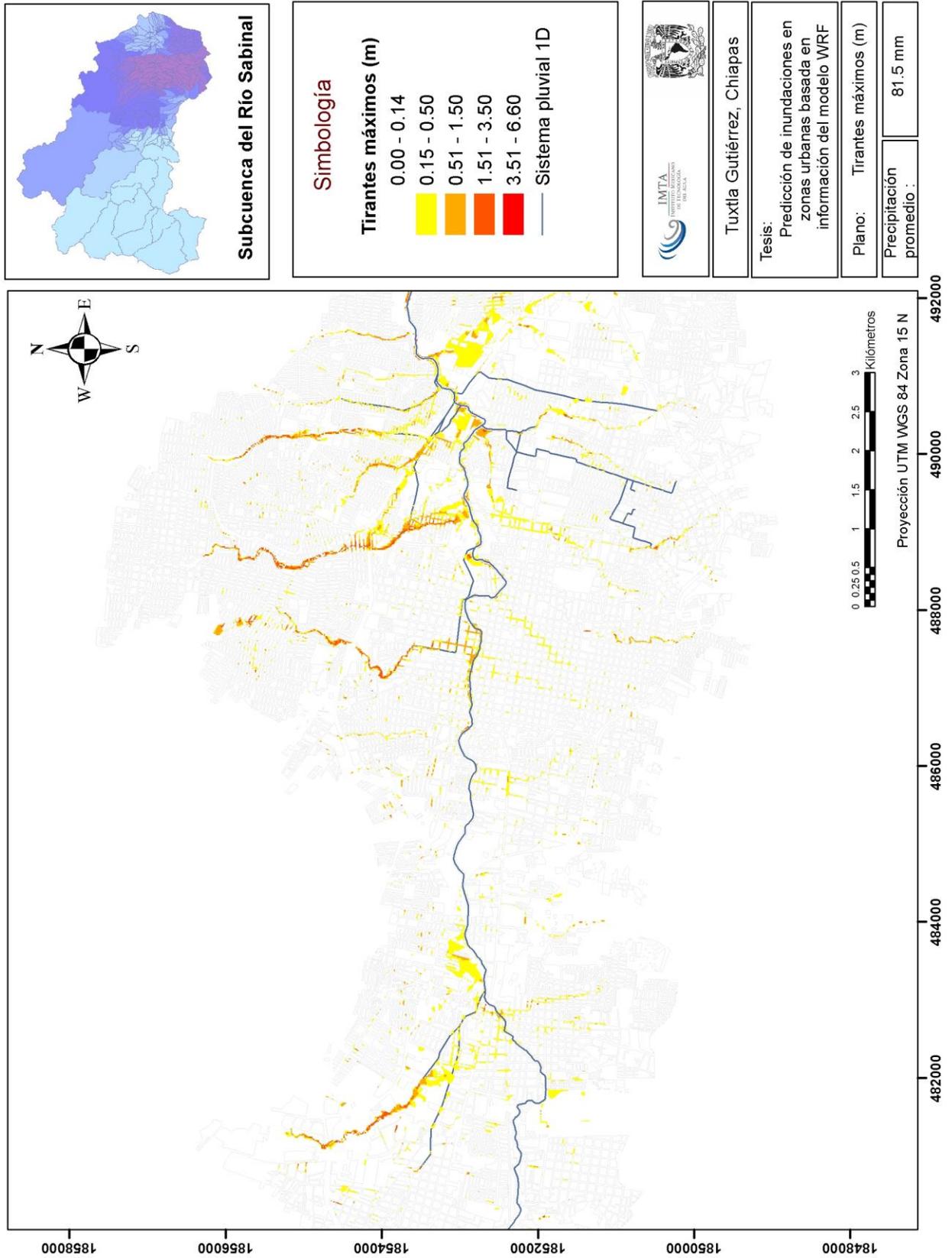


Ilustración 7.25 Tirantes máximos alcanzados en la zona urbana de Tuxtla Gutiérrez indicado el sistema de drenaje pluvial ID. Evento del 2 de septiembre del 2016

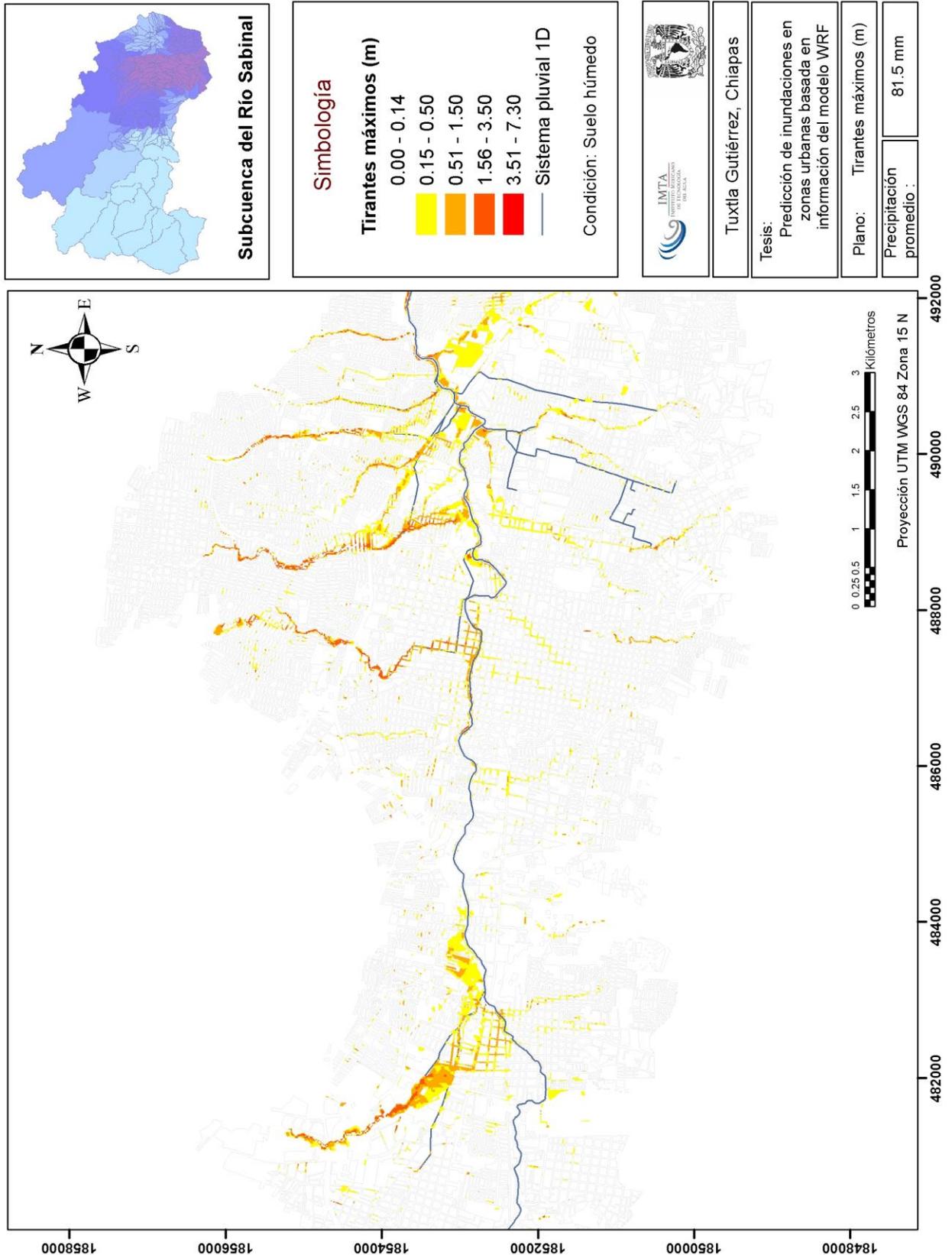


Ilustración 7.26 Tirantes máximos alcanzados considerando el suelo húmedo ajustando los parámetros de infiltración. Evento del 2 de septiembre del 2016

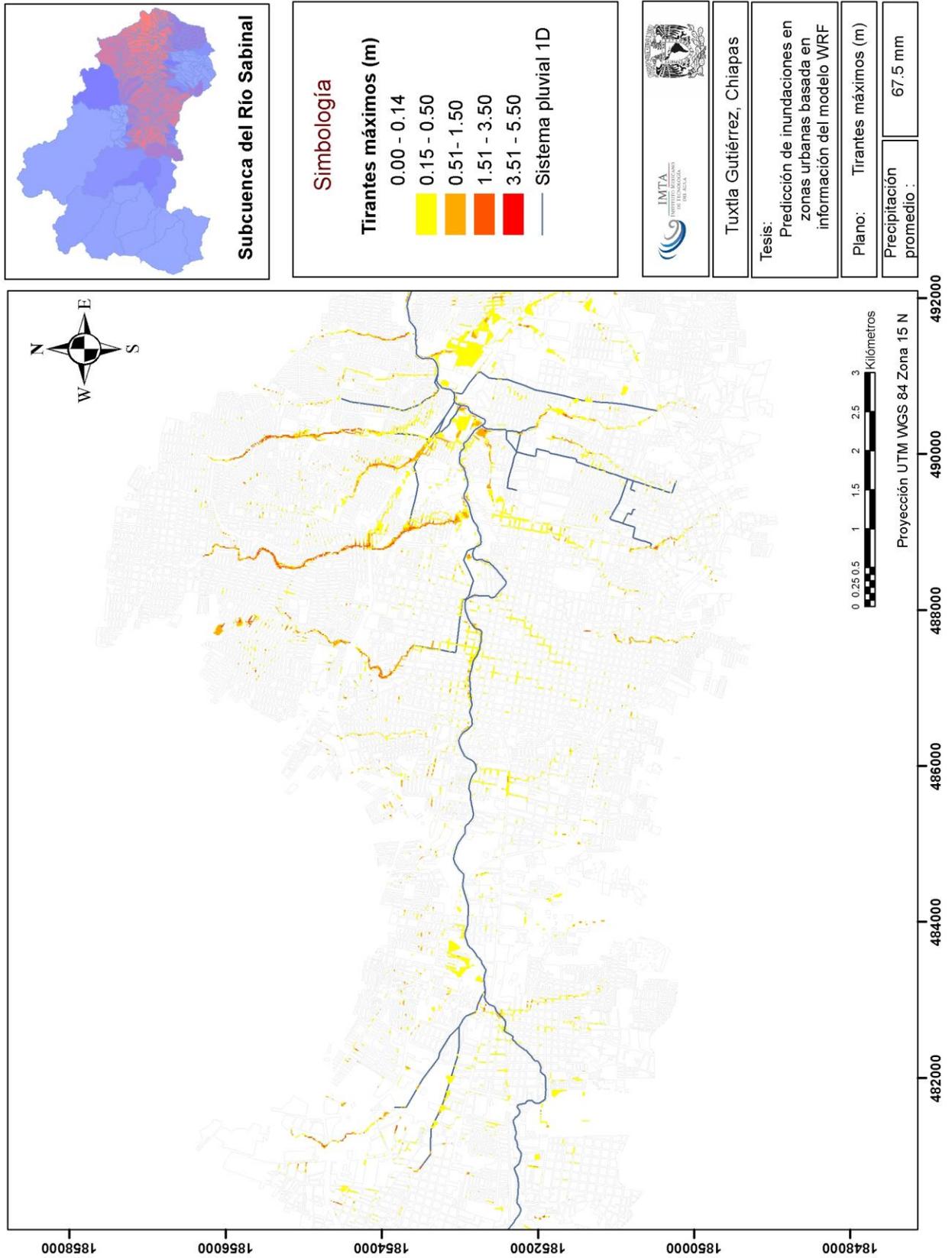


Ilustración 7.27 Tirantes máximos alcanzados en la zona urbana de Tuxtla Gutiérrez indicado el sistema de drenaje pluvial ID. Evento del 23 de junio del 2017

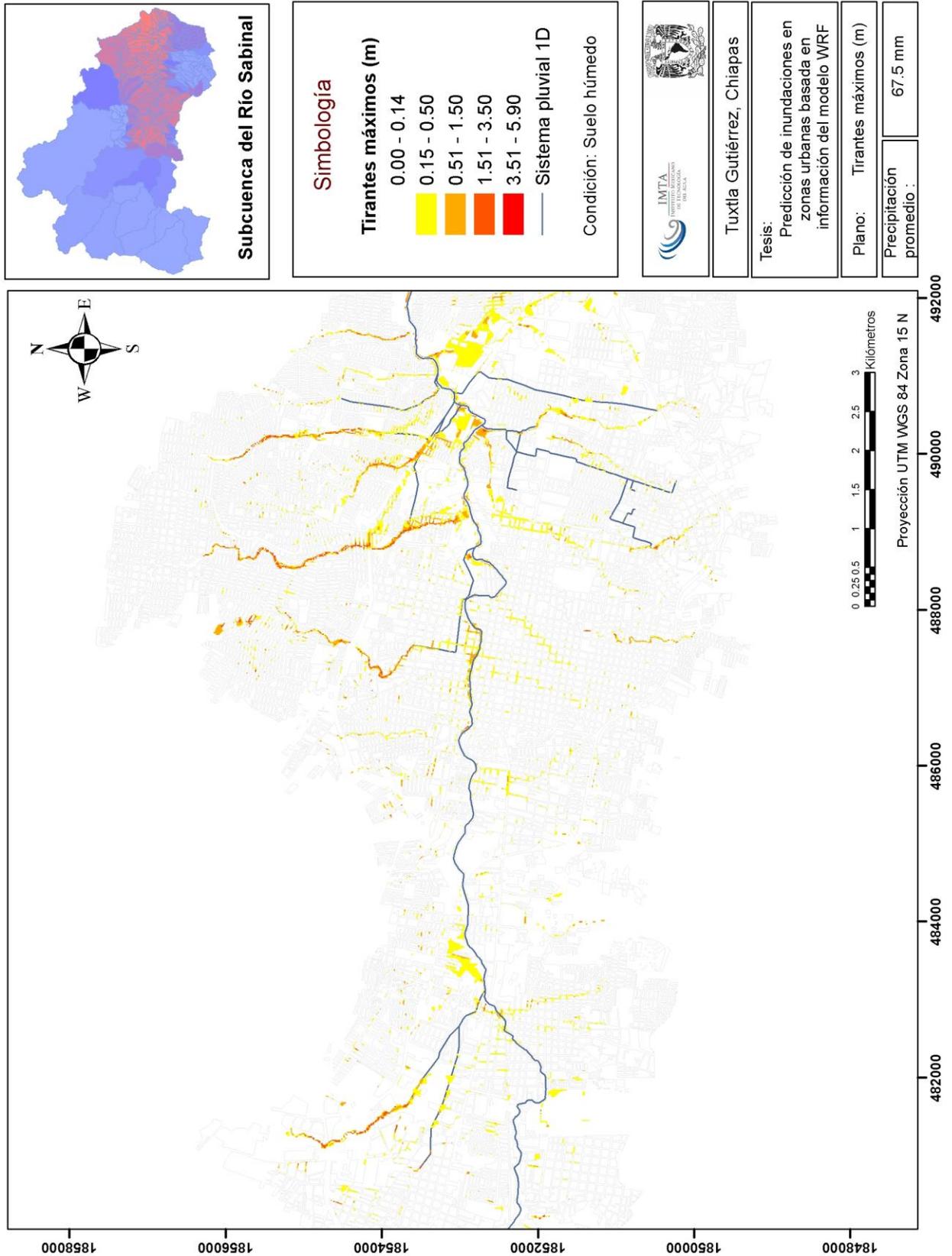


Ilustración 7.28 Tirantes máximos alcanzados considerando el suelo húmedo ajustando los parámetros de infiltración. Evento del 23 de junio del 2017

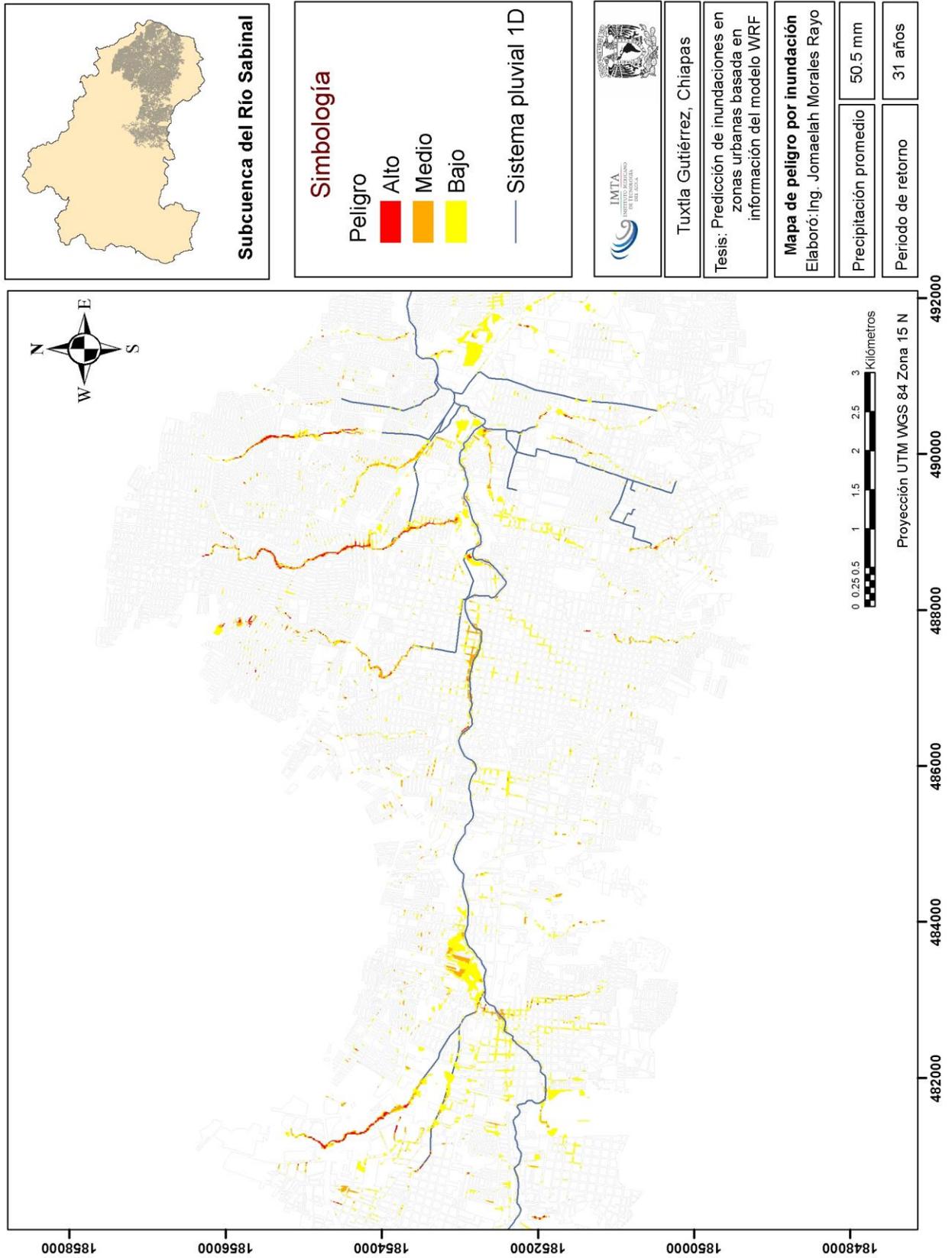


Ilustración 7.29 Mapa de peligro asociado a un periodo de retorno de 31 años. Evento del 12 de agosto del 2015

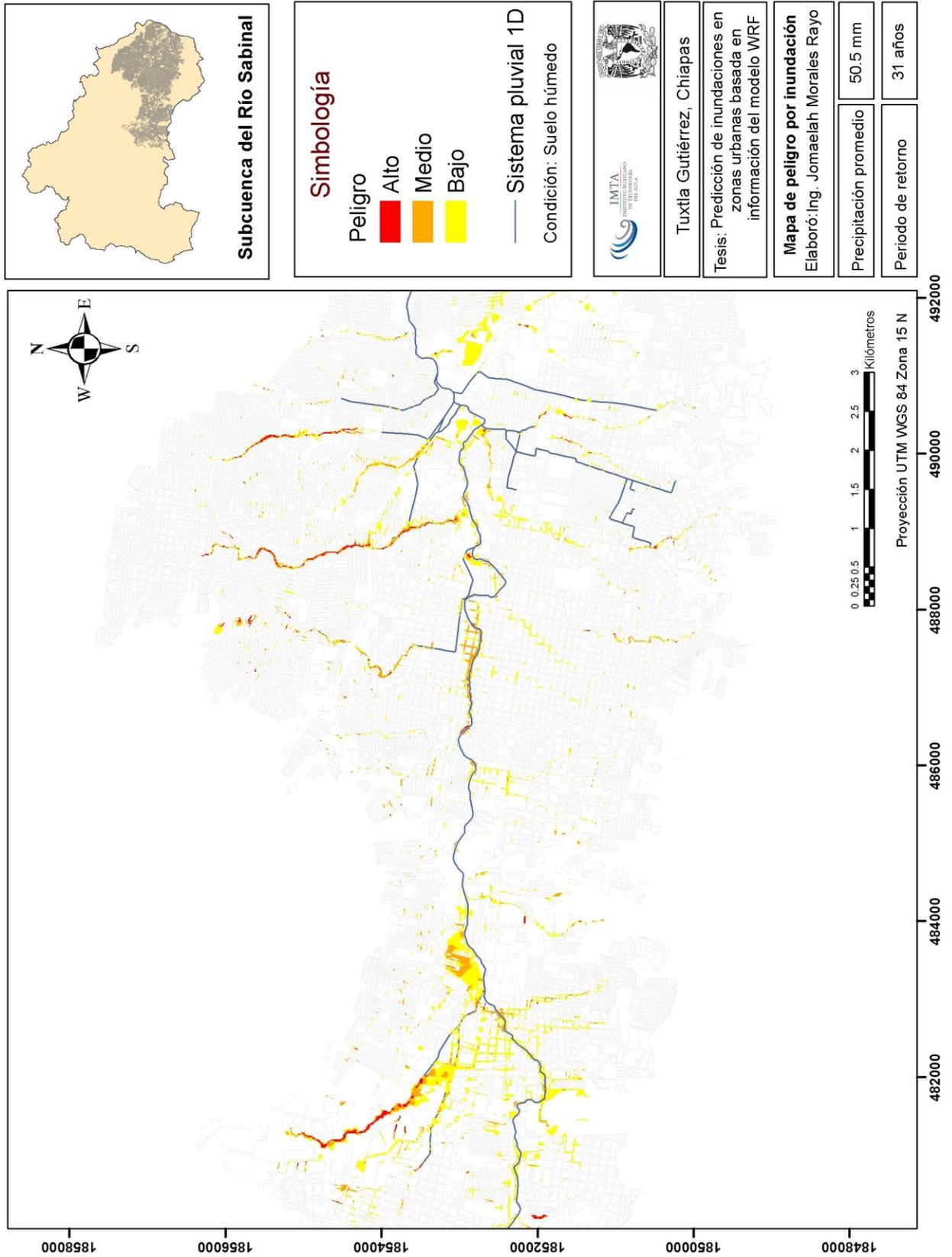


Ilustración 7.30 Mapa de peligro asociado a un periodo de retorno de 31 años. Evento del 12 de agosto del 2015-Suelo húmedo

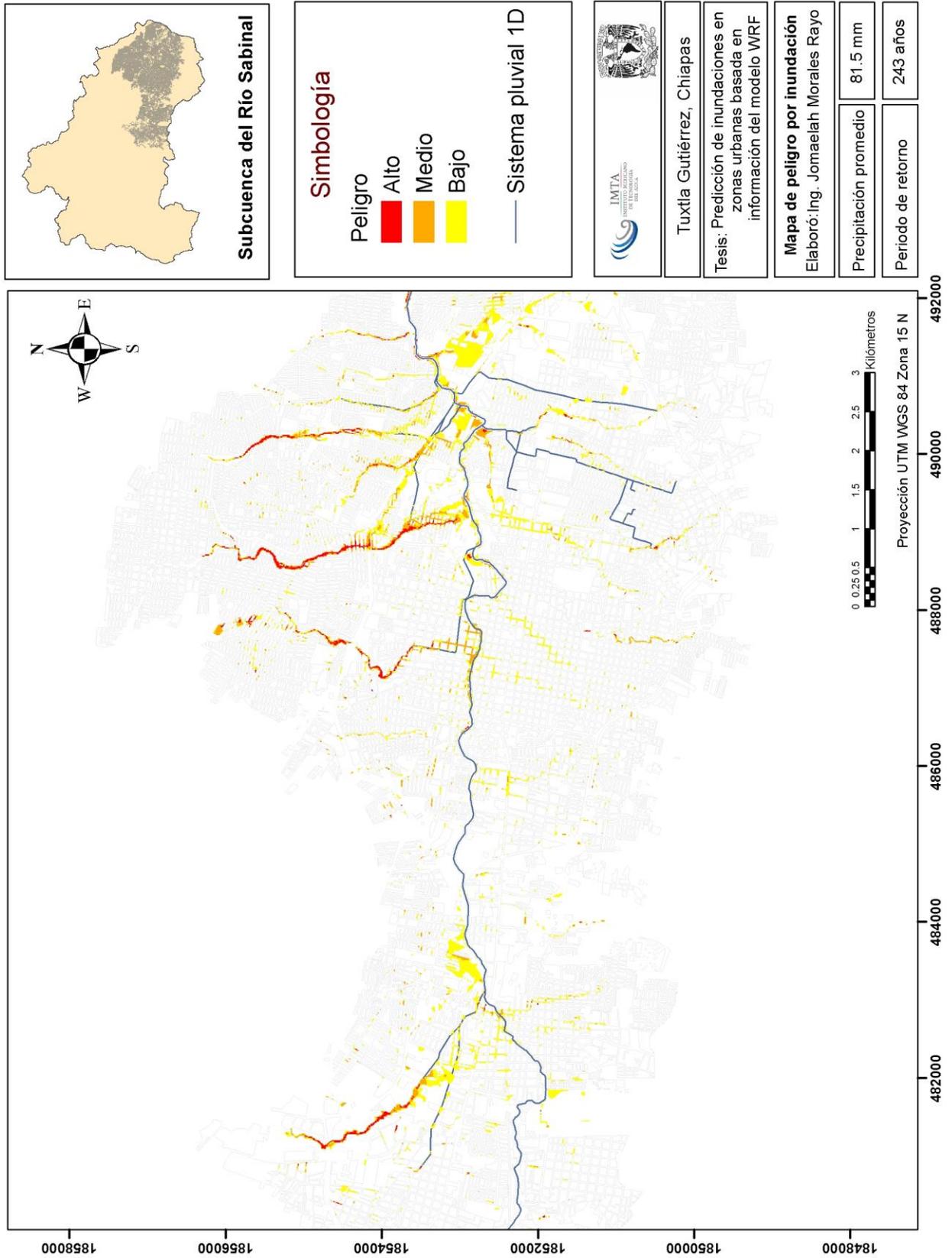


Ilustración 7.31 Mapa de peligro asociado a un periodo de retorno de 243 años. Evento del 2 de septiembre del 2016

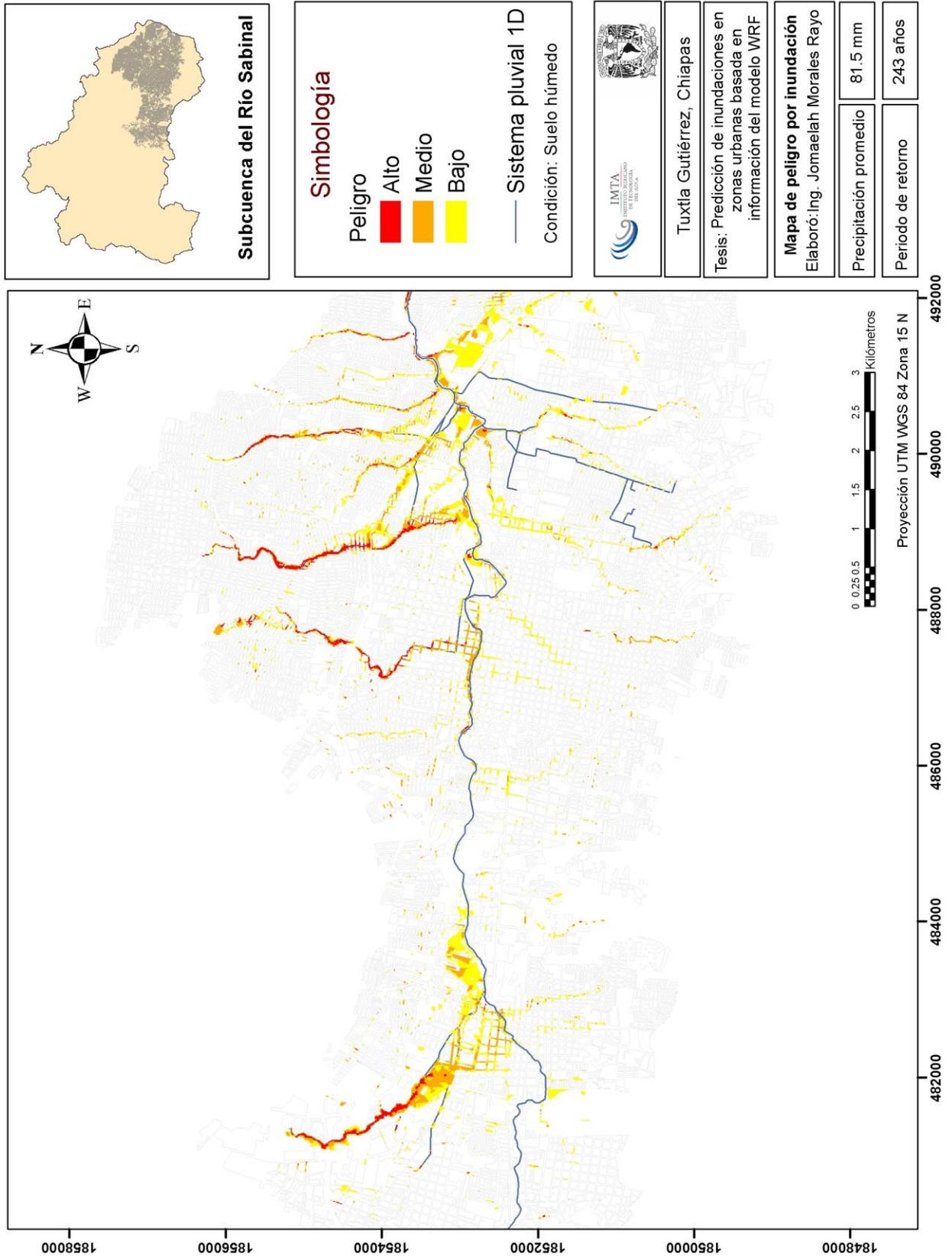


Ilustración 7.32 Mapa de peligro asociado a un periodo de retorno de 243 años. Evento del 2 de septiembre del 2016- suelo húmedo

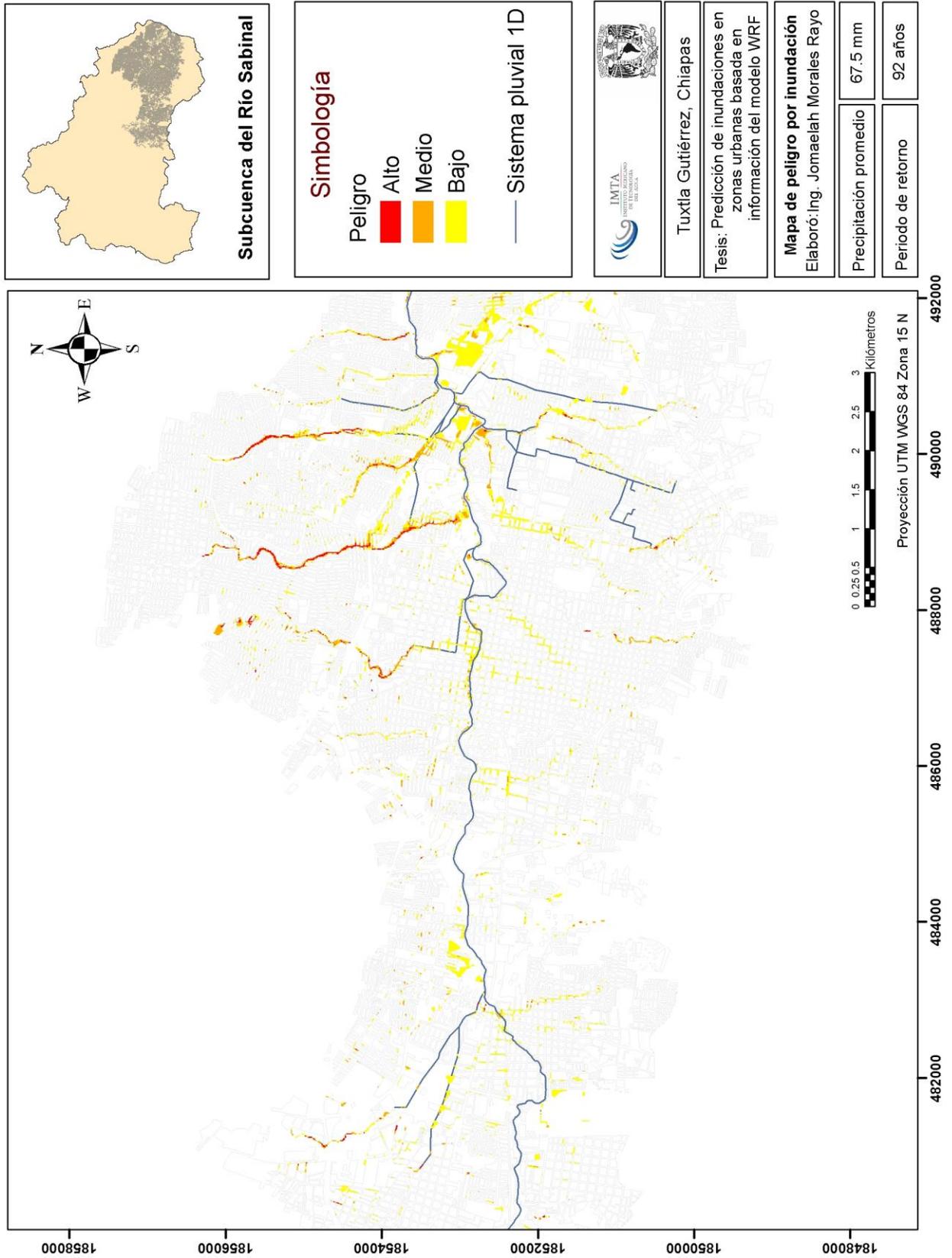


Ilustración 7.33 Mapa de peligro asociado a un periodo de retorno de 92 años. Evento del 23 de junio del 2017

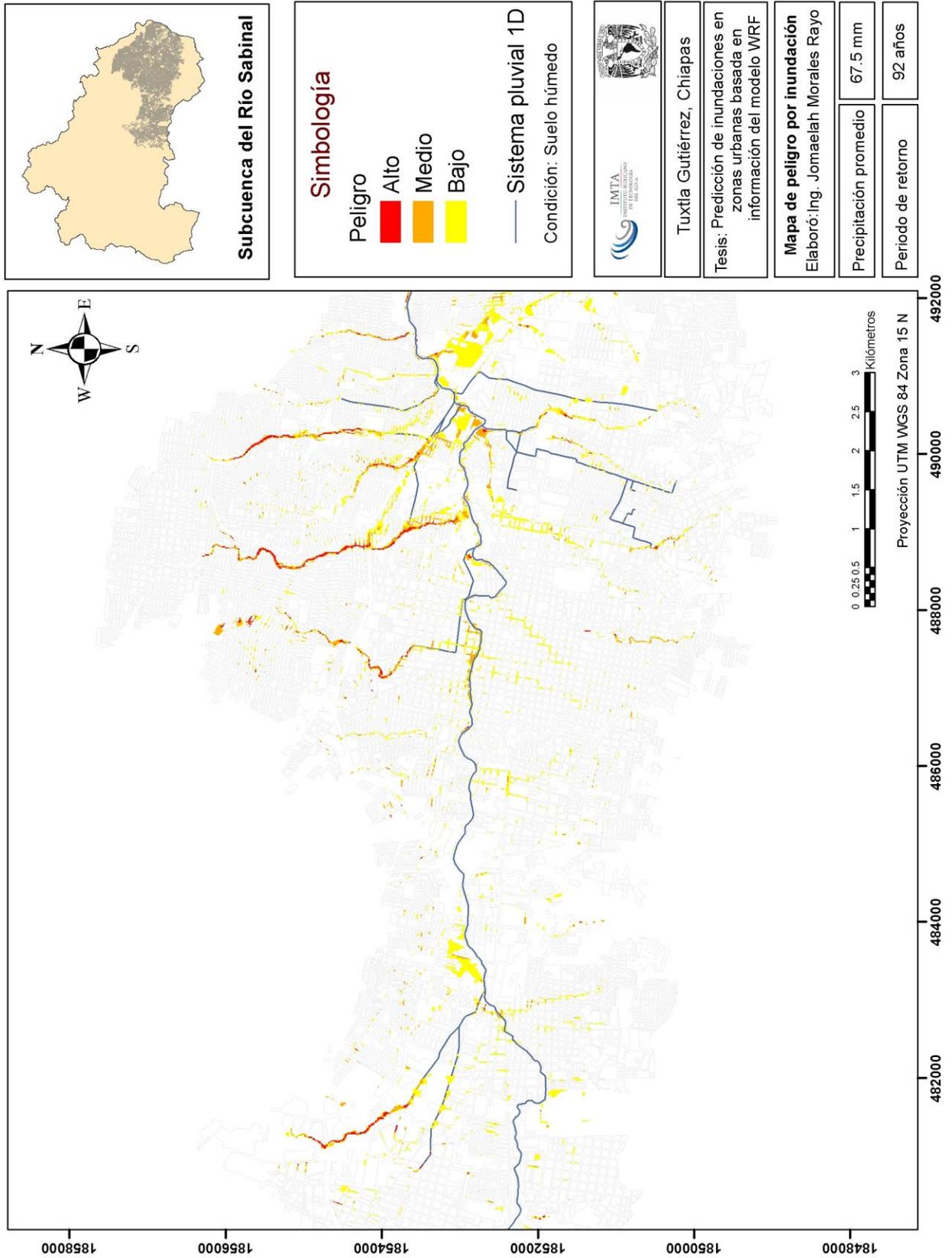


Ilustración 7.34 Mapa de peligro asociado a un periodo de retorno de 92 años. Evento del 23 de junio del 2017-suelo húmedo

7.6 Predicción de inundaciones en zonas urbanas

7.6.1 Predicción hidrológica

La predicción hidrológica se define como la acción y efecto de dar noticia o aviso de lo que ha de suceder en un sistema hidrológico. El proceso de vigilancia y predicción hidrológica debe entenderse bajo una concepción cíclica (ver Tabla 7.5), con unas fases que se van repitiendo cada cierto intervalo de tiempo (Aldana V., 2015).

Tabla 7.5 Fases y ciclos de vigilancia y previsión inundaciones. Retomado de: (Aldana V., 2015):

Fases	Procesos
1. Observación	Engloba todo de información (datos hidrológicos)
2. Análisis	Engloba los cálculos básicos, los visualizadores de datos y las herramientas avanzadas
3. Previsión	Sobre la base de observaciones, mediciones y análisis, cabe realizar la previsión de variables hidrológicas de interés (Gráficos, tablas, a partir de los modelos de simulación).
4. Difusión de la información	La información recolectada y la generada alcanzará su máxima utilidad una vez que haya sido difundida entre los diferentes usuarios potenciales, (protocolos y medios auxiliares).

El generar un *sistema de alerta* a los organismos encargados de la seguridad de la población ante un evento hidrometeorológico extremo como son las precipitaciones que generan inundaciones en zonas urbanas es parte de los objetivos de este trabajo para lo cual se debe entender el concepto “Tiempo real”.

El término “**tiempo real**”, que se aplica frecuentemente en el tema de vigilancia y predicción hidrológica, procede del campo de las tecnologías de la información, entendiéndose aquí como todo sistema que funciona sincronizado con un reloj de hora real y cuyos procesos tienen algún atributo temporal (hora de inicio, fin, duración). En el campo que nos ocupa se debe hacer referencia a la respuesta a tiempo. Si el sistema proporciona un producto que facilita la toma de decisiones y su puesta en práctica de manera adelantada (temprana), se puede decir que funciona en tiempo real (Aldana V., 2015).

7.7 Análisis del modelo unidimensional 1D para los diferentes eventos

Para la consideración del modelo unidimensional (1D) en la predicción hidrológica-hidráulica, fue necesaria revisar el comportamiento del sistema de drenaje pluvial y colocar la información mediante gráficos, tablas y esquemas que permitieran ser utilizados en un sistema de alerta temprana.

7.7.1 Distribución de la lluvia en el modelo 1D

La precipitación promedio sobre la cuenca del río Sabinal es de *31.38 mm asociada a un periodo de retorno de 8 años*, esto de acuerdo con los registros de las EMAS proporcionados por el Organismo de Cuenca Frontera Sur (Ocfs) de la Conagua.

Esta información se obtuvo mediante el análisis en un Sistema de Información Geográfica (SIG) de los registros de lluvia de las EMAS de los últimos años (2014-2017). Se obtuvieron 81 eventos con registros de lluvia mayores a 12 mm de los cuales la mayor cantidad se asocia a los periodos de retorno entre 5 y 10 años. Conociendo los valores extremos, mediante una interpolación lineal se obtuvo el periodo de retorno al cual se asocia la precipitación promedio en la cuenca.

El periodo de retorno de un evento hidrológico de magnitud dada, se define como el intervalo promedio de tiempo dentro del cual ese evento puede ser igualado o excedido una vez en promedio (Campos A., 2015). Para la cuenca del río Sabinal se cuentan con curvas de Precipitación (hp mm)-Duración (d min)- Periodo de retorno (Tr años) las cuales fueron generadas por IMTA, (2015).

Tabla 7.6 Curvas de Precipitación (hp mm) – Duración (d min) – Periodo de retorno (Tr años) para la cuenca del Sabinal. Fuente: (IMTA, 2015)

Tr (años)	Duración (minutos)						
	5	10	20	30	40	50	60
2	4.7	7	9.8	11.6	13	14.2	15.2
5	8.1	12.1	16.8	20	22.5	24.5	26.3
10	10.9	16.4	22.8	27.2	30.5	33.3	35.7
20	14	20.9	29.1	34.7	39	42.5	45.5
50	18.1	27.1	37.7	44.9	50.4	55	59.0
100	21.2	31.8	44.3	52.7	59.2	64.6	69.2
200	24.4	36.5	50.9	60.6	68.1	74.3	79.6
500	28.6	42.8	59.7	71.1	79.8	87.1	93.3

Evento del 12 de agosto del 2015. Precipitación promedio de 50.5 mm

Para el evento del 12 de agosto del 2015 se cuenta con una precipitación promedio de 50.5 mm sobre la cuenca del río Sabinal, el periodo de retorno (Tr) al cual se asocia el evento es de *31 años*. El evento se registró a la 19:10 y terminó a las 21:30 hrs en horario UTC, contando con la mayor precipitación en los primeros 60 minutos (entre las 19:20 y las 20:20). La Ilustración 7.35 muestra la distribución de la lluvia en el modelo 1D a partir de un intervalo representado en una gama de colores, donde la mayor intensidad se representa en color rojo y la menor intensidad en azul claro.

b)

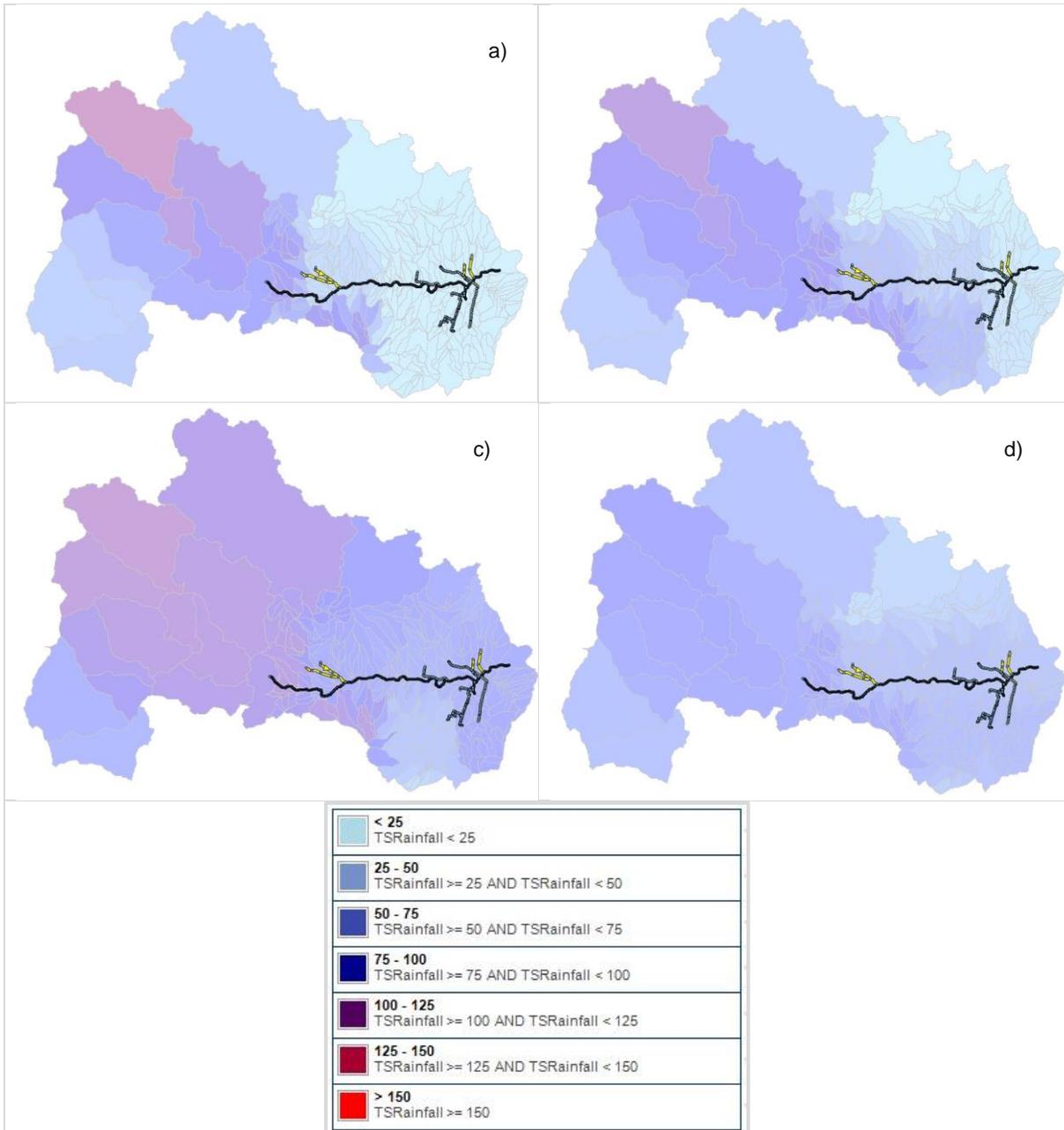


Ilustración 7.35 Intervalo donde se presentó la mayor precipitación en horario UTC a) 19:20, b) 19:40, c) 20:00 y d)

De acuerdo con el modelo de simulación hidrológica-hidráulica, la mayor precipitación acumulada fue de 141.7 mm (subcuenca C2) registrada en la zona denominada como alta de la cuenca del río Sabinal y la mínima fue de 24.3 mm (Subcuenca C8) abarcando las colonias los ángeles, la esperanza y las granjas oriente. ver Ilustración 7.36.

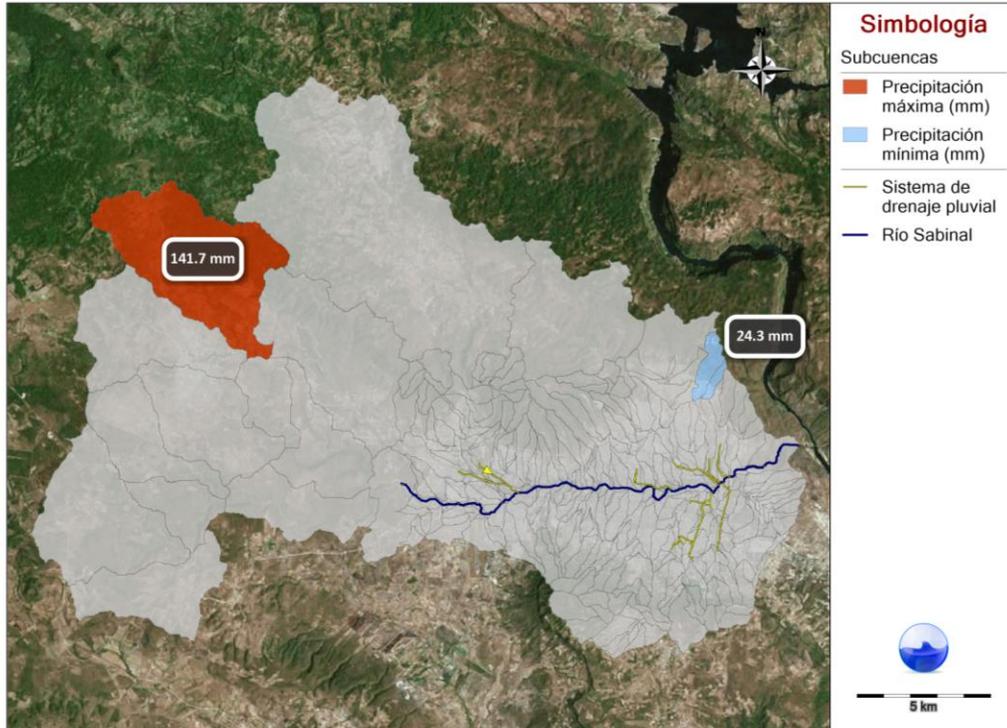
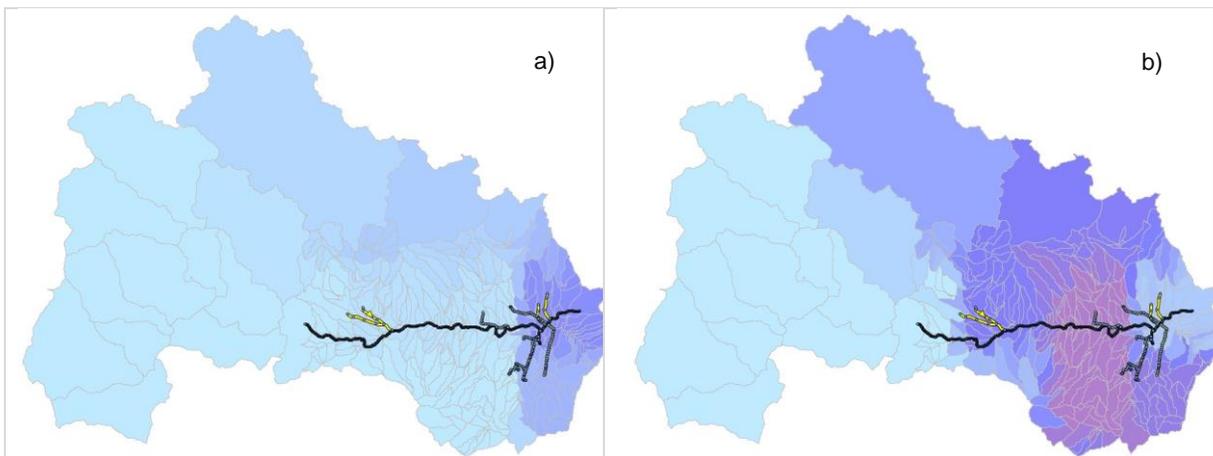


Ilustración 7.36 Máxima y mínima precipitación registrada en la cuenca del río Sabina. Evento del 12 de agosto del 2015

Evento del 2 de septiembre del 2016. Precipitación promedio de 81.5 mm

El periodo de retorno asociado para una precipitación promedio de 81.5 mm sobre la cuenca del río Sabinal es de 243 años. El evento tuvo una duración aproximada de 3 hrs. empezando a la 1:00 y terminando a las 4:20 en horario UTC, la mayor precipitación se registró en los primeros 60 minutos (entre la 1:10 y las 2:10). Ver Ilustración 7.37.



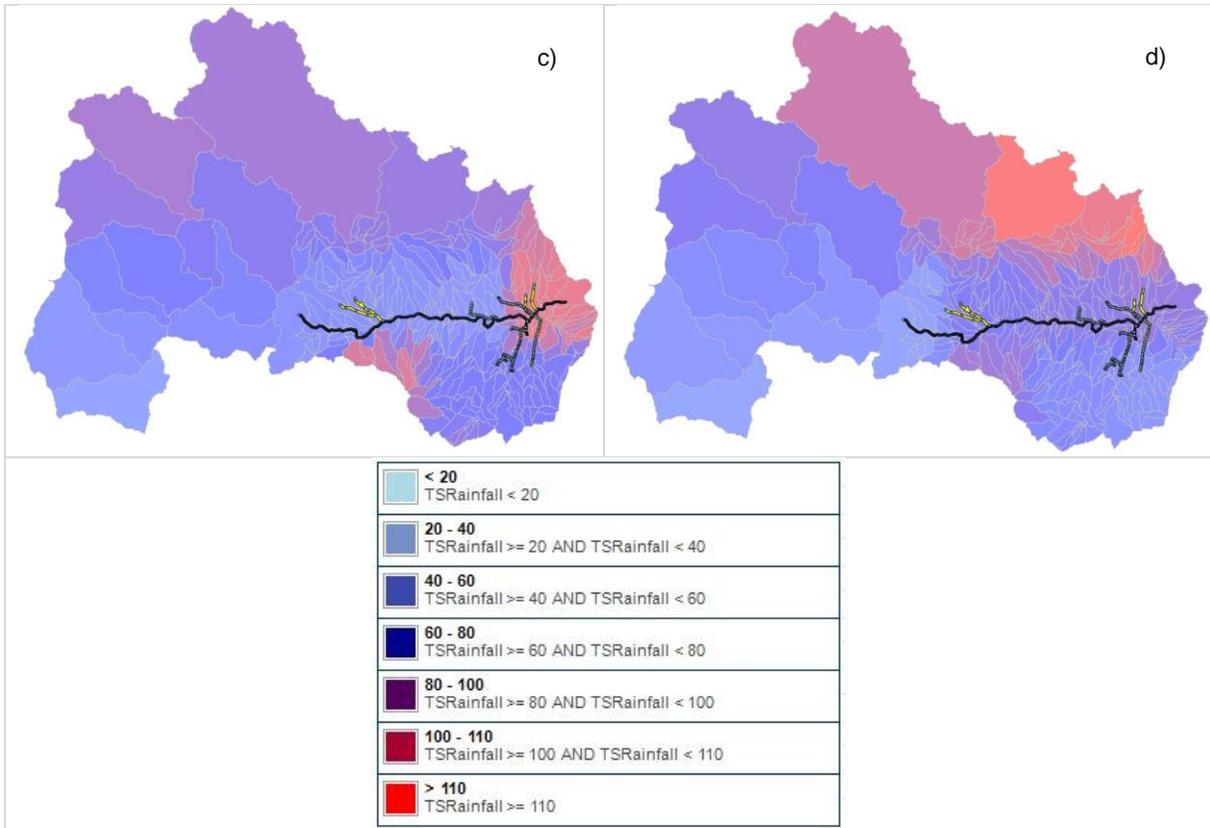


Ilustración 7.37 Intervalo donde se presentó la mayor precipitación en horario UTC a)1:10, b) 1:40, c) 2:00 y d) 2:10

La mayor precipitación acumulada fue de 123.3 mm (subcuencas C8 y C198), en la zona oriente norte específicamente en las colonias los ángeles, la esperanza, las granjas y las granjas oriente. La mínima precipitación fue de 40.0 mm (subcuenca C136) al sur de la colonia cumbres y del instituto Andes Tuxtla. (ver Ilustración 7.38 e Ilustración 7.39).

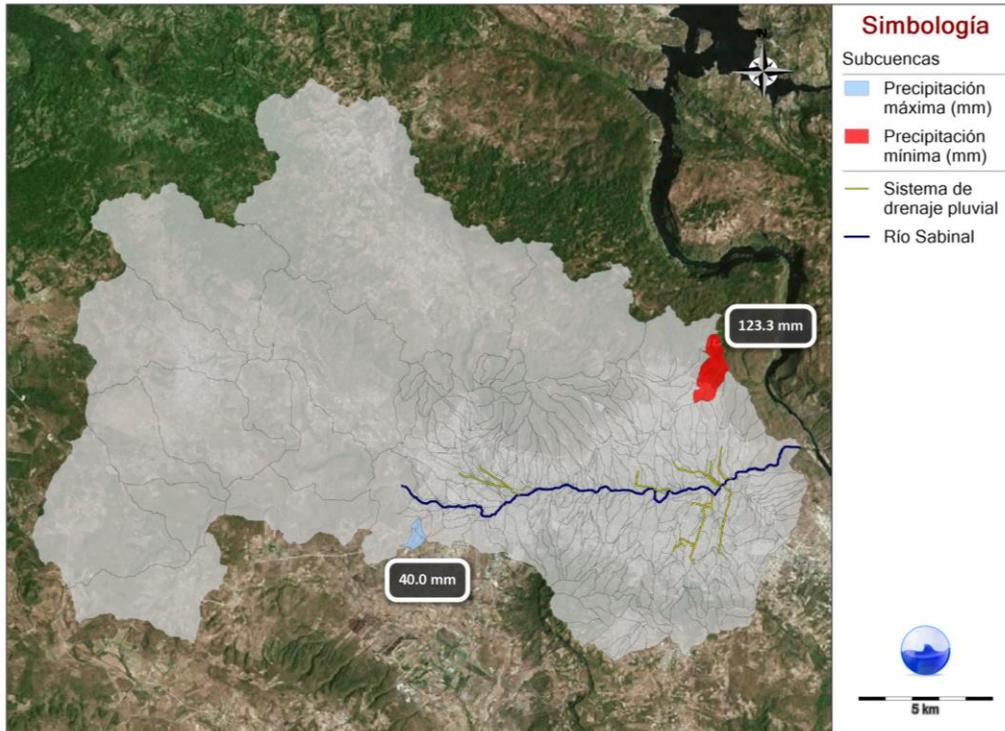


Ilustración 7.38 Precipitación máxima y mínima en la cuenca del río Sabinal. Evento del 2 de septiembre del 2016

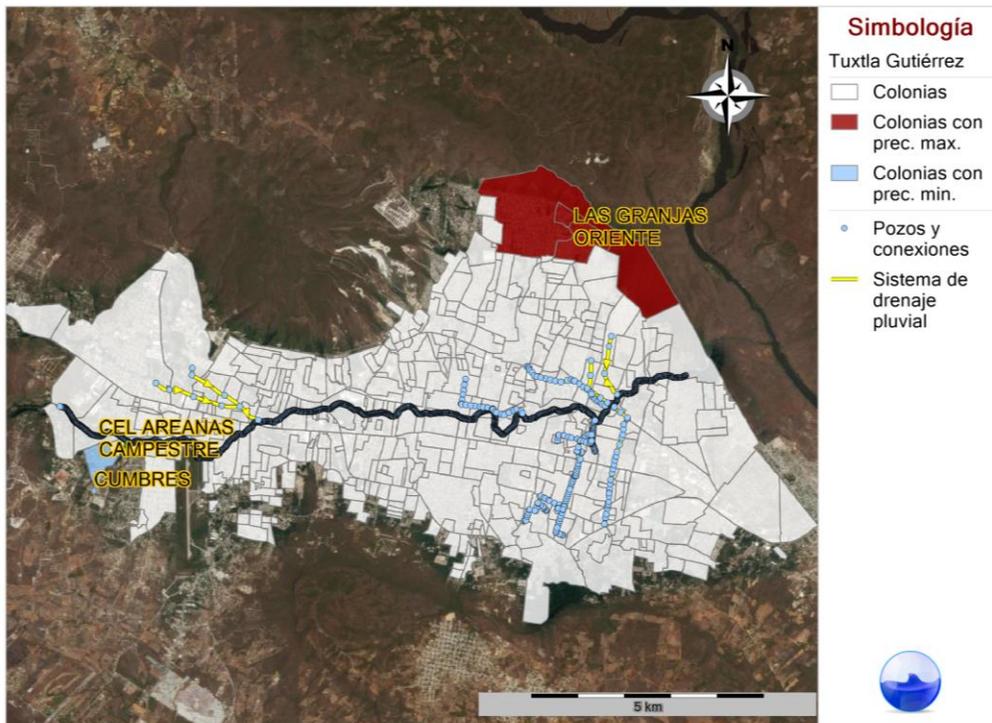


Ilustración 7.39 Colonias donde se registró la máxima y mínima precipitación para el evento del 2 de septiembre del 2016

Evento del 23 de junio del 2017. Precipitación promedio de 67.5 mm

La precipitación promedio sobre la cuenca del río Sabinal considerada es de 67.5 mm la cual se asocia a un periodo de retorno de 92 años. Es el evento considerado con la mayor duración (5 h), sin embargo, los primeros 60 minutos (entre las 23:40 y las 00:40) fueron los que presentaron la mayor precipitación. Empezó a las 23:40 h y terminó a las 4:50 en horario UTC (ver Ilustración 7.40).

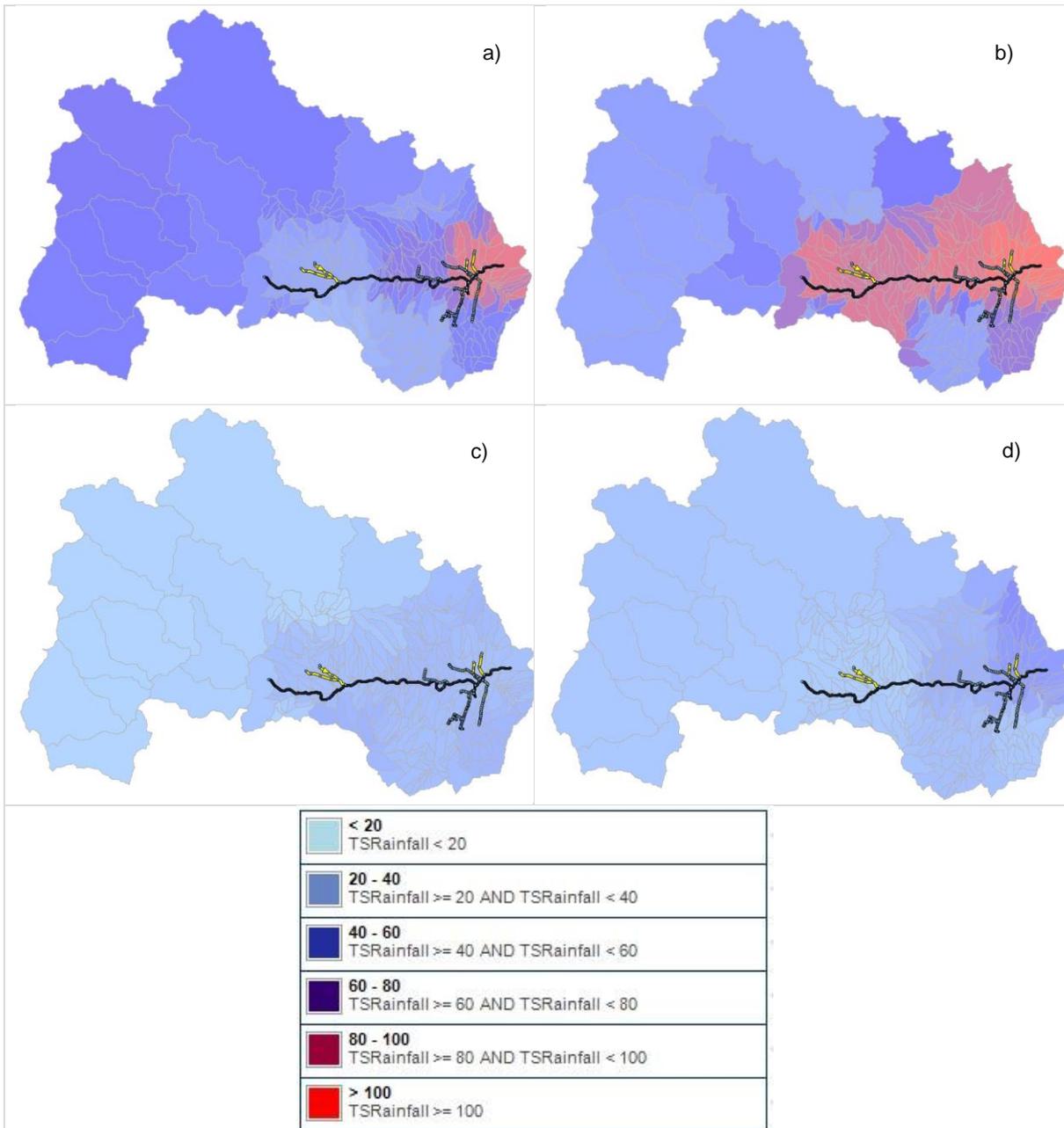


Ilustración 7.40 Intervalo donde se presentó la mayor precipitación en horario UTC a)23:40, b) 23:50, c)00:20 y d) 00:40

La mayor precipitación acumulada se registró de 81.6 mm y la mínima de 52.6 mm (ver Ilustración 7.41 e Ilustración 7.42), la Tabla 7.7 muestra las 43 colonias de la zona urbana de Tuxtla donde se registró la máxima intensidad.

Tabla 7.7 Colonias donde se presentó la máxima precipitación (81.65 mm). Evento del 23 de junio del 2017

Colonias	Colonias	Colonias	Colonias
13 de julio	Cobach plantel 13	La victoria	San Cayetano
21 de septiembre	El bosque	Las palmas	San Fernando
24 de junio	El Brasilito	Loma bonita	San isidro
Ampliación las palmas	El retiro	Loma larga	San pedro
Arroyo blanco	El rosario Infonavit	Los manguitos	San pedro progresivo
Belisario Domínguez	El vergel	Natalia Venegas	San roque
Brasilito	Grijalva Infonavit	Parque oriente Tuxtla	Tzocotumbac
Buenaventura	Huajintlán	Paso limón	Unidad chiapaneca
Capulines ii	Inst. de estudios superiores de Chiapas	Patria nueva	Univ. pedagógica nacional
Cerro de Guadalupe	Jardines del pedregal	Paulino Aguilar Paniagua	Zona sin asignación de nombre de col 24
CFE	La ilusión	Primavera	

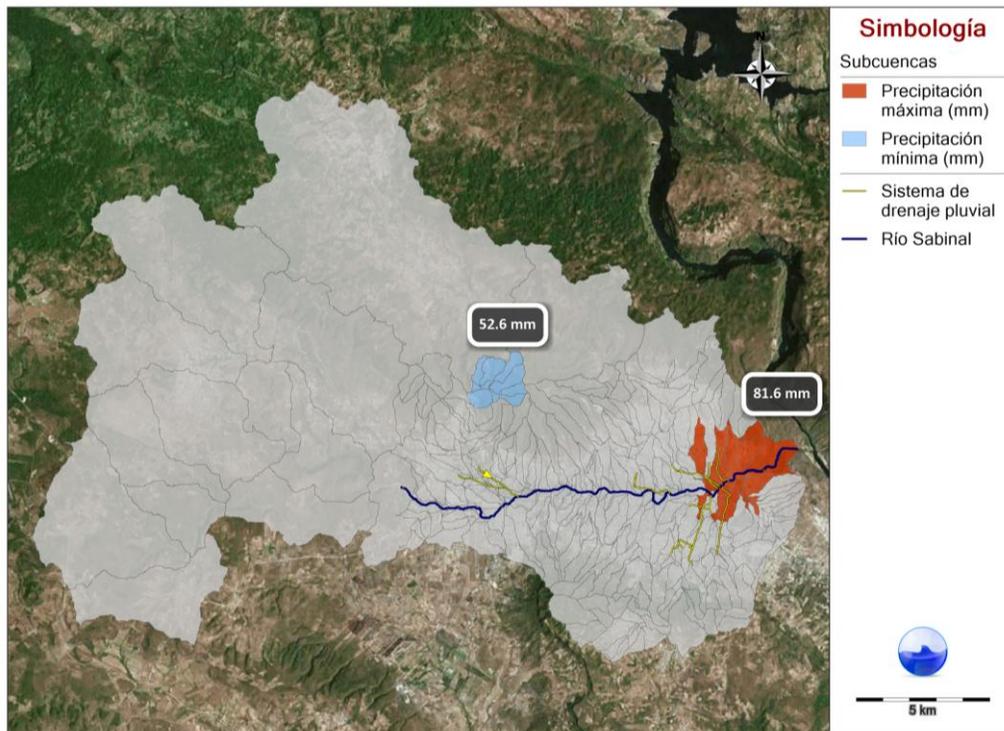


Ilustración 7.41 Precipitación máxima y mínima en la cuenca del río Sabinal. Evento del 23 de junio del 2017

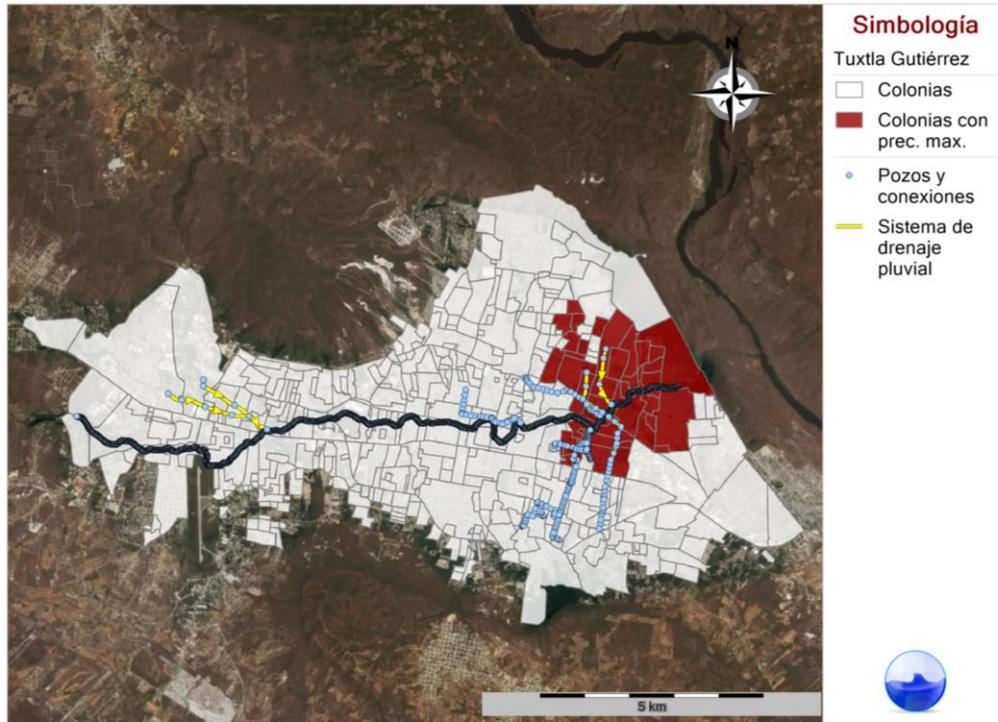


Ilustración 7.42 Colonias donde se registró la máxima precipitación para el evento del 23 de junio del 2017

7.7.2 El uso del modelo 1D y 2D en la predicción de inundaciones

Los modelos unidimensionales permiten obtener los datos hidráulicos en un tiempo relativamente corto en comparación con los bidimensionales, debido a que se asume que una de las dimensiones prevalece sobre las otras dos. Rodríguez (2012) menciona que estos modelos son aplicables en tramos de ríos y canales muy largos, y cuando se busca principalmente determinar el máximo nivel de agua. La Tabla 7.8 muestra la comparación entre un modelo 1D y 2D donde se pueden apreciar las ventajas y desventajas de ambos.

Tabla 7.8 Comparación de un modelo unidimensional vs bidimensional, fuente: (Cenapred, 2013)

Características	Unidimensionales	Bidimensionales
Insumos	X	
Complejidad de construcción	X	
Requerimientos computacionales.	X	
Aproximación de la realidad.		X
Complejidad de los resultados		X
Visualización de los resultados		X
Tiempo de cálculo	X	
Costo	X	

De la tabla anterior se puede concluir que cuando lo que se busca es determinar el tirante (m), velocidad (m/s), gasto (m^3/s) y capacidad (adimensional) de un sistema de drenaje pluvial se debe considerar un modelo de simulación unidimensional, sin embargo, cuando lo que se busca es simular los escurrimientos superficiales en áreas urbanas, es necesario considerar un modelo de simulación bidimensional (el cual considera la topografía del terreno) para la obtención de mapas de peligro por inundación los cuales representan los tirantes (m) y velocidades máximas (m/s) que se pueden presentar ante un evento hidrometeorológico extremo, en este caso, un evento de lluvia.

IMTA, (2015) menciona que los modelos de simulación bidimensional son utilizados para entender las complejas interacciones que se presentan con las lluvias y las inundaciones, donde es utilizado el drenaje dual (combinado) ya que los escurrimientos superficiales en áreas urbanas son conducidos por las calles, es de considerarse el sistema de drenaje pluvial que introduce parte de ese escurrimiento en sus conductos. (ver Ilustración 7.43).

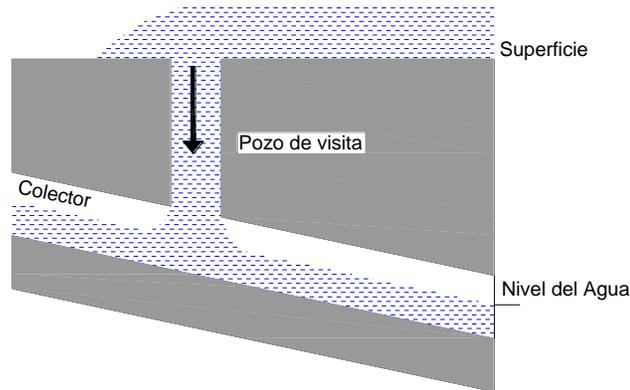


Ilustración 7.43 Flujo del sistema de calles en una tubería parcialmente llena, retomado de Mark et. al, (2004)

La Tabla 7.9 muestra el tiempo requerido para la simulación 1D y 2D en los tres eventos seleccionados, incluyendo la condición del suelo húmedo.

Tabla 7.9 Tiempo requerido para la simulación 1D y 2D de los eventos

Evento	Modelo 1D (Minutos)	Modelo 2D (hora)
12 de agosto del 2015	9	16
12 de agosto del 2015 (suelo húmedo)	12	24
2 de septiembre del 2016	8	21
2 de septiembre del 2016 (suelo húmedo)	19	32
23 de junio del 2017	10	17
23 de junio del 2017 (suelo húmedo)	12	25

7.7.3 Datos hidráulicos del modelo 1D

El sistema de drenaje pluvial mayor y menor considerado en el modelo 1D lo integran el río Sabinal (sistema mayor) y 9 colectores pluviales (sistema menor) y sus características se muestran en la Tabla 7.1.

De la Tabla 7.10 a la Tabla 7.13 se muestra los datos hidráulicos (a partir de los eventos analizados) de los colectores pluviales como son: gasto (m^3/s) transportado y capacidad del colector (m).

Tabla 7.10 Datos hidráulicos obtenidos - Precipitación promedio: 50.5 mm

Evento	Colector	Dimensiones(m)	Área hidráulica (m^2)	Gasto (m^3/s)	Capacidad máxima (m)	Desbordamiento
12 de agosto del 2015	Embovedado Patria Nueva	1.5 x 2.5	3.75	6.18	0.29	
	Embovedado 24 de junio	3.0 x 1.5	4.50	6.75	0.30	
	Embovedado Chacona	4.5 x 2.2	9.90	64.18	0.98	
	Embovedado San Agustín	6.0 x 1.0	6.00	46.10	0.97	
		2.5 x 2.0	5.00			
	Interceptor Potinaspak	2.13	3.56	15.4	1.00	Si
	Interceptor Totoposte	2.13	3.56	15.51	1.00	
	Interceptor Cerro Hueco	1.83	2.63	8.08	1.00	
		2.13	3.56			
	Poc Poc	2.13	3.56	7.41	0.85	
	Santa Ana	1.52	1.81	14.5	1.00	
		2.13	3.56			
		2.5 x 3.28	8.20			
	Brasilito	1.52	1.81	6.18	1.00	
		1.22	1.16			
1.52		1.81				
1.83		2.63				
3.0 x 2.0		6.00				
Canal	4.5 x 2.25 Talud 1:1	11.81	10.82	0.47		

Tabla 7.11 Datos hidráulicos obtenidos (considerando suelo húmedo) - Precipitación promedio: 50.5 mm

Evento	Colector	Dimensiones(m)	Área hidráulica (m ²)	Gasto (m ³ /s)	Capacidad máxima (m)	Desbordamiento
12 de agosto del 2015 (Suelo húmedo)	Embovedado Patria Nueva	1.5 x 2.5	3.75	6.33	0.30	
	Embovedado 24 de junio	3.0 x 1.5	4.50	6.79	0.30	
	Embovedado Chacona	4.5 x 2.2	9.90	72.28	1.00	si
	Embovedado San Agustín	6.0 x 1.0	6.00	66.10	1.00	si
		2.5 x 2.0	5.00			
	Interceptor Potinaspak	2.13	3.56	15.71	1.00	si
	Interceptor Totoposte	2.13	3.56	16.69	1.00	
	Interceptor Cerro Hueco	1.83	2.63	8.67	1.00	
		2.13	3.56			
	Poc Poc	2.13	3.56	9.07	1.00	
	Santa Ana	1.52	1.81	16.18	1.00	
		2.13	3.56			
		2.5 x 3.28	8.20			
	Brasilito	1.52	1.81	6.23	1.00	
1.22		1.16				
1.52		1.81				
1.83		2.63				
3.0 x 2.0		6.00				
Canal	4.5 x 2.25 Talud 1:1	11.81	12	0.50		

Tabla 7.12 Datos hidráulicos obtenidos - Precipitación promedio: 81.5 mm

Evento	Colector	Dimensiones(m)	Área hidráulica (m ²)	Gasto (m ³ /s)	Capacidad máxima (m)	Desbordamiento
2 de septiembre del 2016	Embovedado Patria Nueva	1.5 x 2.5	3.75	15.18	0.64	
	Embovedado 24 de junio	3.0 x 1.5	4.50	17.21	0.58	
	Embovedado Chacona	4.5 x 2.2	9.90	28.71	0.71	
	Embovedado San Agustín	6.0 x 1.0	6.00	14.08	0.55	
		2.5 x 2.0	5.00			
	Interceptor Potinaspak	2.13	3.56	22.38	1.00	si
	Interceptor Totoposte	2.13	3.56	32.49	1.00	si
	Interceptor Cerro Hueco	1.83	2.63	14.67	1.00	si
2.13		3.56				

Evento	Colector	Dimensiones(m)	Área hidráulica (m ²)	Gasto (m ³ /s)	Capacidad máxima (m)	Desbordamiento
	Poc Poc	2.13	3.56	11.65	1.00	si
	Santa Ana	1.52	1.81	21.11	1.00	si
		2.13	3.56			
		2.5 x 3.28	8.20			
	Brasilito	1.52	1.81	10.61	1.00	si
		1.22	1.16			
		1.52	1.81			
		1.83	2.63			
		3.0 x 2.0	6.00			
	Canal	4.5 x 2.25 Talud 1:1	11.81	22.84	0.65	

Tabla 7.13 Datos hidráulicos obtenidos (considerando suelo húmedo) - Precipitación promedio: 81.5 mm

Evento	Colector	Dimensiones(m)	Área hidráulica (m ²)	Gasto (m ³ /s)	Capacidad máxima (m)	Desbordamiento
2 de septiembre del 2016	Embovedado Patria Nueva	1.5 x 2.5	3.75	19.74	0.75	
	Embovedado 24 de junio	3.0 x 1.5	4.50	21.5	0.67	
	Embovedado Chacona	4.5 x 2.2	9.90	62.9	0.96	
	Embovedado San Agustín	6.0 x 1.0	6.00	16.55	0.63	
		2.5 x 2.0	5.00			
	Interceptor Potinaspak	2.13	3.56	25.21	1.00	si
	Interceptor Totoposte	2.13	3.56	41.99	1.00	si
	Interceptor Cerro Hueco	1.83	2.63	21.06	1.00	si
		2.13	3.56			
	Poc Poc	2.13	3.56	15.66	1.00	si
	Santa Ana	1.52	1.81	25.9	1.00	si
		2.13	3.56			
		2.5 x 3.28	8.20			
	Brasilito	1.52	1.81	11.45	1.00	si
		1.22	1.16			
		1.52	1.81			
1.83		2.63				
3.0 x 2.0		6.00				
Canal	4.5 x 2.25 Talud 1:1	11.81	29.77	0.72		

Tabla 7.14 Datos hidráulicos obtenidos - Precipitación promedio: 67.5 mm

Evento	Colector	Dimensiones(m)	Área hidráulica (m ²)	Gasto (m ³ /s)	Capacidad máxima (m)	Desbordamiento
23 de junio del 2017	Embovedado Patria Nueva	1.5 x 2.5	3.75	14.88	0.59	
	Embovedado 24 de junio	3.0 x 1.5	4.50	15.4	0.54	
	Embovedado Chacona	4.5 x 2.2	9.90	30.54	0.68	
	Embovedado San Agustín	6.0 x 1.0	6.00	16.27	0.62	
		2.5 x 2.0	5.00			
	Interceptor Potinaspak	2.13	3.56	25.05	1.00	si
	Interceptor Totoposte	2.13	3.56	33.03	1.00	si
	Interceptor Cerro Hueco	1.83	2.63	16.38	1.00	si
		2.13	3.56			
	Poc Poc	2.13	3.56	9.91	1.00	
	Santa Ana	1.52	1.81	21.36	1.00	si
		2.13	3.56			
		2.5 x 3.28	8.20			
	Brasilito	1.52	1.81	10.51	1.00	si
1.22		1.16				
1.52		1.81				
1.83		2.63				
3.0 x 2.0		6.00				
Canal	4.5 x 2.25 Talud 1:1	11.81	18.33	0.58		

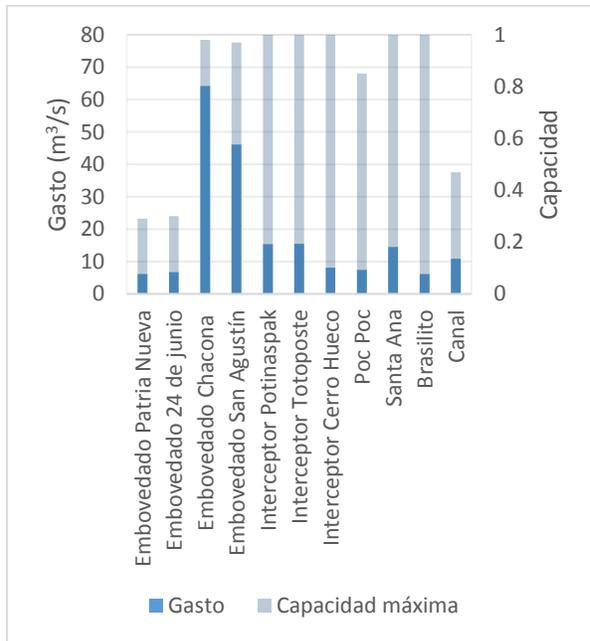
Tabla 7.15 Datos hidráulicos obtenidos (considerando suelo húmedo) - Precipitación promedio: 67.5 mm

Evento	Colector	Dimensiones(m)	Área hidráulica (m ²)	Gasto (m ³ /s)	Capacidad máxima (m)	Desbordamiento
23 de junio del 2017	Embovedado Patria Nueva	1.5 x 2.5	3.75	16.67	0.65	
	Embovedado 24 de junio	3.0 x 1.5	4.50	16.71	0.57	
	Embovedado Chacona	4.5 x 2.2	9.90	33.33	0.75	
	Embovedado San Agustín	6.0 x 1.0	6.00	18.62	0.65	
		2.5 x 2.0	5.00			
	Interceptor Potinaspak	2.13	3.56	25.75	1.00	si
	Interceptor Totoposte	2.13	3.56	38.65	1.00	si
	Interceptor Cerro Hueco	1.83	2.63	19.4	1.00	si
		2.13	3.56			
	Poc Poc	2.13	3.56	12.46	1.00	si

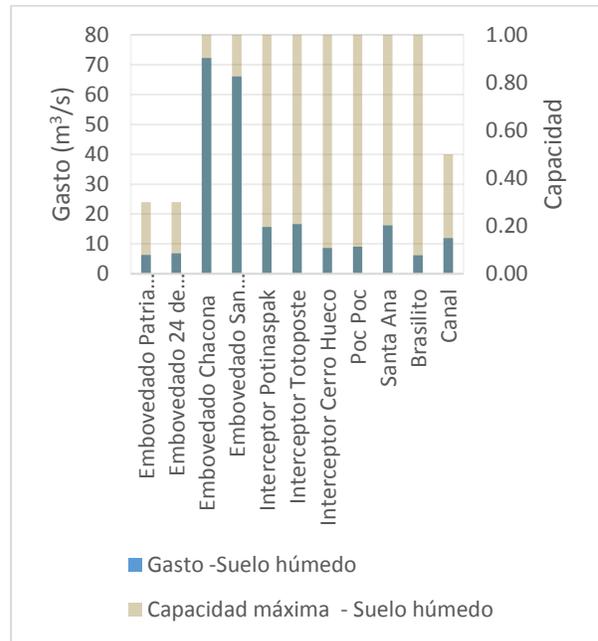
Evento	Colector	Dimensiones(m)	Área hidráulica (m ²)	Gasto (m ³ /s)	Capacidad máxima (m)	Desbordamiento
	Santa Ana	1.52	1.81	24.4	1.00	si
		2.13	3.56			
		2.5 x 3.28	8.20			
	Brasilito	1.52	1.81	10.93	1.00	si
		1.22	1.16			
		1.52	1.81			
		1.83	2.63			
		3.0 x 2.0	6.00			
	Canal	4.5 x 2.25 Talud 1:1	11.81	23.27	0.65	

De los datos obtenidos de la simulación hidráulica se observa que el *colector Potinaspak* presenta desbordamiento en los 3 eventos analizados. Para los eventos del 2 de septiembre del 2016 y del 23 de junio del 2017 los colectores *Totoposte*, *Cerro Hueco*, *Poc Poc*, *Santa Ana* y *Brasilito* presentan desbordamientos.

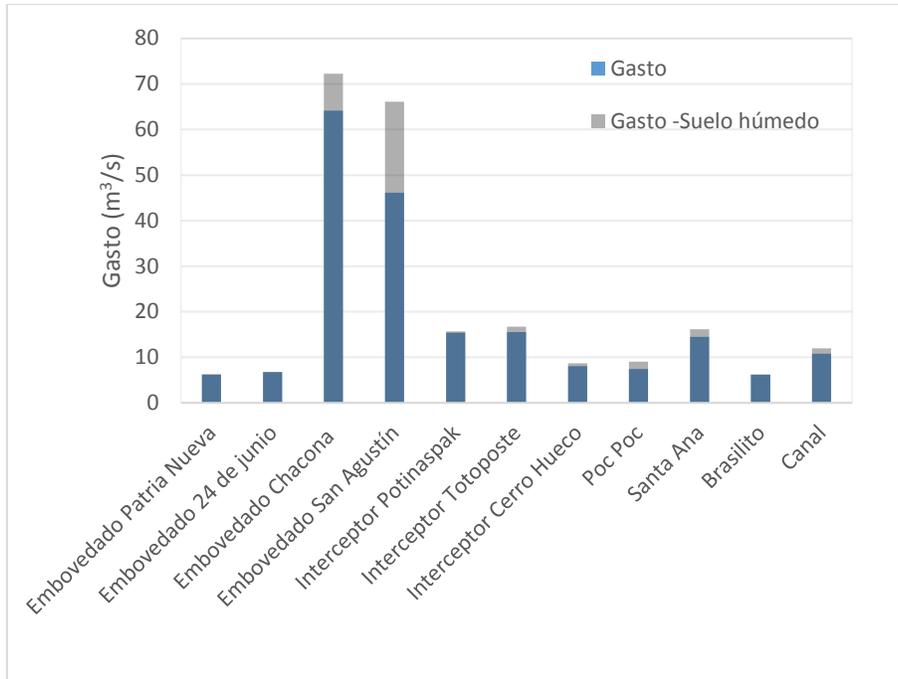
Realizando la consideración de que se hayan presentado lluvias en días anteriores, con lo cual el suelo se encuentre húmedo, los colectores *Potinaspak*, *Totoposte*, *Cerro Hueco*, *Poc Poc*, *Santa Ana* y *Brasilito* presentan problemas de desbordamiento. Cuando se presenta una lluvia en la zona alta de la cuenca del río Sabinal como fue el caso del evento del 12 de agosto del 2015, los colectores embovedados *Chacona* y *San Agustín* presentan desbordamientos. De la Ilustración 7.44 a la Ilustración 7.46 se muestra de manera visual la comparación de los gastos (m³/s) de aportación y capacidad máxima en los colectores pluviales.



a)

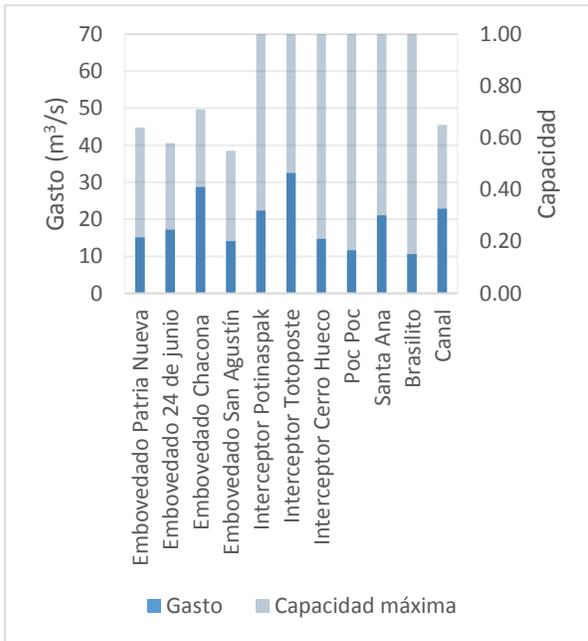


b)

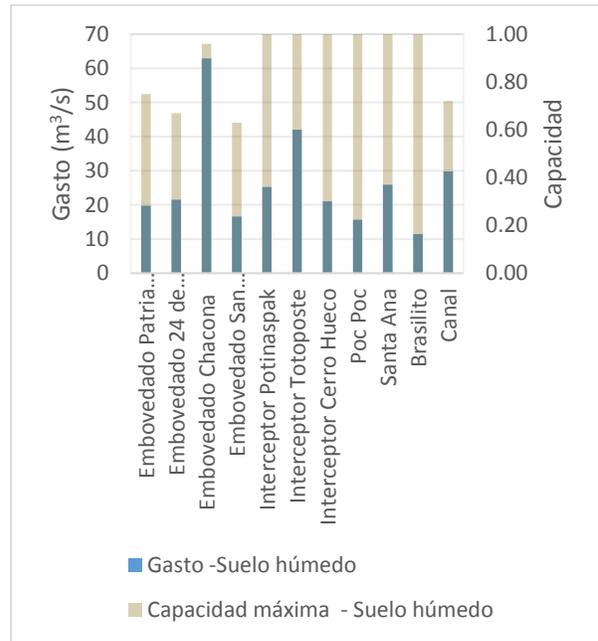


c)

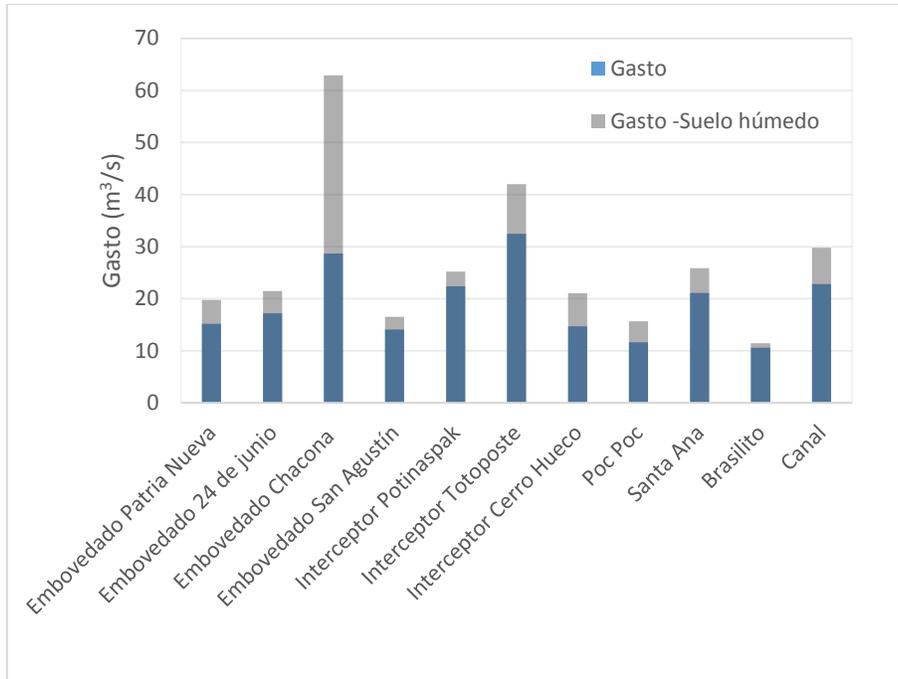
Ilustración 7.44 Datos hidráulicos - gastos y capacidad máxima en colectores pluviales: a) modelo calibrado, b) considerando el suelo húmedo y c) comparación de gastos. Evento del 12 de agosto del 2015



a)

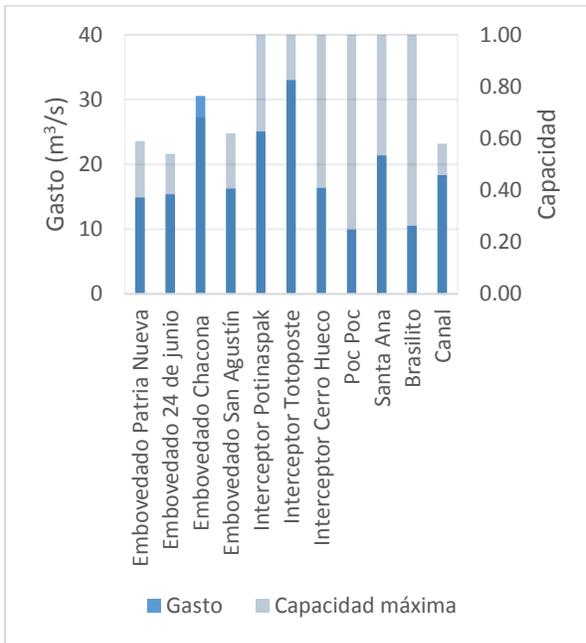


b)

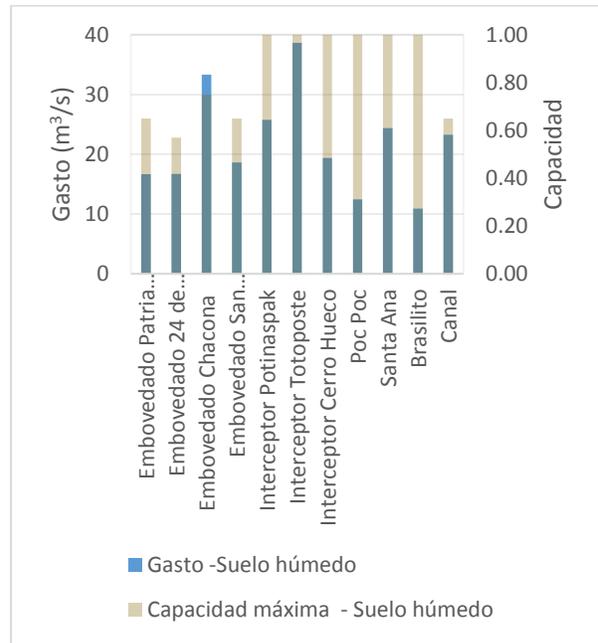


c)

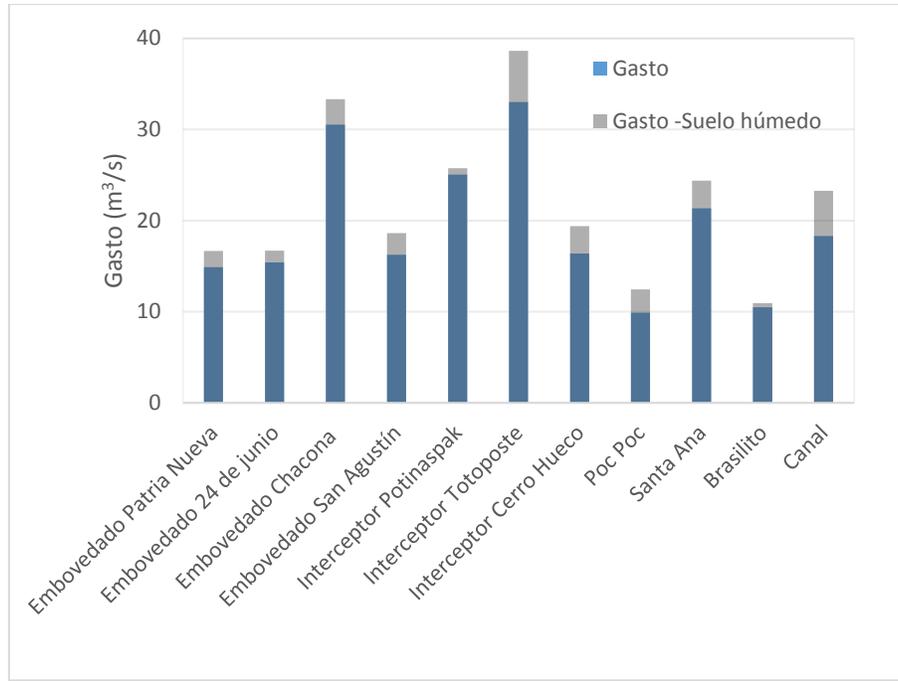
Ilustración 7.45 Datos hidráulicos - gastos y capacidad máxima en colectores pluviales: a) modelo calibrado, b) considerando el suelo húmedo y c) comparación de gastos. Evento del 2 de septiembre del 2016



a)



b)



c)

Ilustración 7.46 Datos hidráulicos - gastos y capacidad máxima en colectores pluviales: a) modelo calibrado, b) considerando el suelo húmedo y c) comparación de gastos. Evento del 23 de junio del 2017

7.7.4 Zonas que presentan desbordamientos en el río Sabinal

Siendo el río Sabinal aquel que recibe las aportaciones de los arroyos de la cuenca, es necesario conocer los gastos y tirantes máximos que se presentan sobre él cuando se presenta un evento extremo de lluvia como es el caso de los eventos analizados, además de los sitios que presentan desbordamientos. De igual manera se obtuvieron los datos hidráulicos sobre el río Sabinal considerando el suelo húmedo sobre la zona urbana de Tuxtla Gutiérrez.

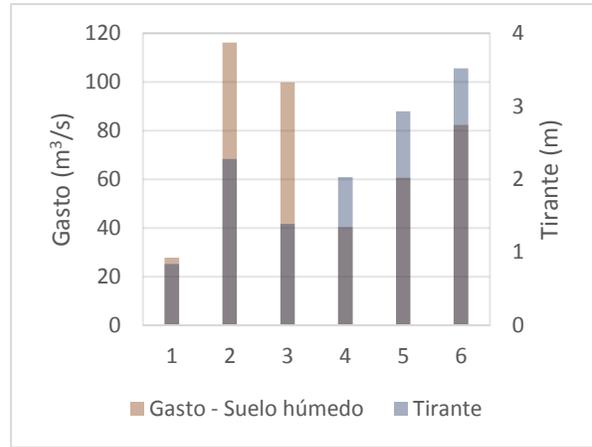
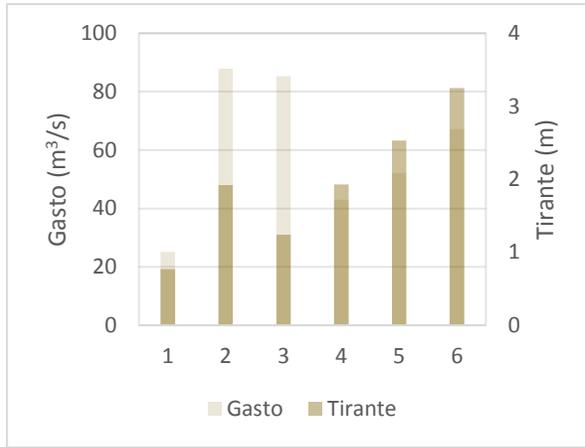
Eventos del 12 de agosto del 2015

Para el evento del 12 de agosto del 2015, en la Tabla 7.16 y la Ilustración 7.47 muestra los gastos y tirantes máximos en las secciones del río Sabinal donde se ubican las estaciones hidrométricas.

Tabla 7.16 Datos hidráulicos en las estaciones hidrométricas del río Sabinal. Evento del 12 de agosto del 2015

Id	Estación Hidrométrica	Coordenadas UTM		Gasto (m³/s)	Tirante (m)	Gasto - Suelo húmedo (m³/s)	Tirante (m)
		X	Y				
1	Club Campestre	480090.02	1852350.97	25.15	0.77	27.85	0.84
2	Joyyo Mayu (Reloj Floral)	484463.27	1852949.59	87.85	1.92	116.22	2.28
3	Casa Kolping	485169.94	1852941.10	85.31	1.24	99.91	1.39

Id	Estación Hidrométrica	Coordenadas UTM		Gasto (m³/s)	Tirante (m)	Gasto - Suelo húmedo (m³/s)	Tirante (m)
		X	Y				
4	Centro 2a Poniente	487503.30	1852752.15	42.96	1.93	40.34	2.03
5	Ciprés (puente IMSS)	488525.76	1852549.37	52.14	2.53	60.66	2.93
6	Parque Oriente	490627.09	1853041.23	67.21	3.25	82.27	3.52



a)

b)

Ilustración 7.47 Gastos y tirantes obtenidos en las estaciones hidrométricas. Evento del 12 de agosto del 2016

Cuando se presenta la mayor precipitación en la zona alta de la cuenca, se identificaron 16 sitios que son propensos a desbordamiento en el río Sabinal los cuales se muestran en la Tabla 7.17, así mismo se indican los tirantes alcanzados en el tramo analizado. La Ilustración 7.48 muestra el perfil de las zonas de desbordamientos.

Tabla 7.17 Sitios que presentan desbordamiento en el río Sabinal. Evento del 12 de agosto del 2015

No	Colonias afectadas	Tirantes en el tramo(m)	
		Inicial	Final
1	Club de golf club campestre (entre calle monterrey y camino al club campestre)	0.34	0.34
2	Club de golf club campestre (entre calle monterrey y camino al club campestre)	0.76	0.72
3	El Arenal Campestre (esquina con camino club campestre)	0.63	0.59
4	El Triunfo (entre calzada S/N y Rosario Sabinal)	1.03	0.94
5	Terán (Calzada Rosario Sabinal, dirección hacia el río)	0.44	0.44
6	Terán (entre Av. 1A Sur Poniente y Av. 2A Sur Poniente)	2.00	1.89
7	Terán (entre Av. 3A Norte Oriente y calle 2 Oriente)	2.35	2.27
8	Fraccionamiento Fovissste III (entre calle 34. Oriente Norte y Av. Constitución)	1.83	2.01
9	Villas del Río (entre Boulevard 28 de agosto y Belisario Domínguez)	2.32	0.76
10	Guadalupe (entre calle 10A Poniente Norte y 9A Poniente Norte)	4.02	3.98
11	Guadalupe (entre calle 9A Poniente Norte y 8A Poniente Norte)	4.12	4.11
12	Guadalupe (entre calle 7A Poniente Norte y 6A Poniente Norte)	3.72	3.63
13	Guadalupe (entre calle 6A Poniente Norte y 5A Poniente Norte)	3.14	3.13

No	Colonias afectadas	Tirantes en el tramo(m)	
		Inicial	Final
14	Guadalupe y Santo Domingo (entre calle 5A Poniente Norte y 2A Poniente Norte)	2.78	2.24
15	San Marcos (entre calle 1A Poniente Norte y Central Norte)	1.95	1.78
16	Hidalgo (entre Boulevard Francisco I. Madero y 20A. Oriente Norte)	1.34	1.31

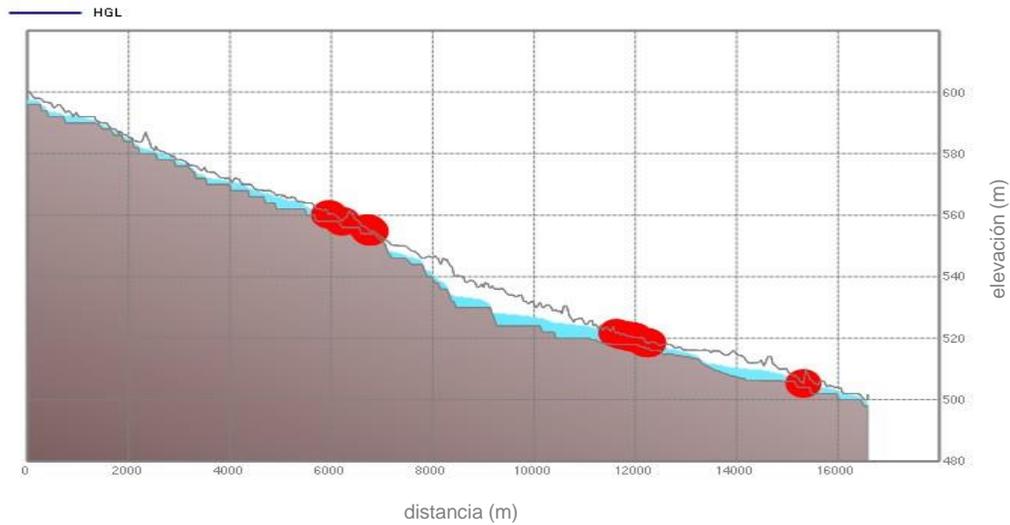


Ilustración 7.48 Zonas de desbordamiento en el río Sabinal. Evento del 12 de agosto del 2015

La Tabla 7.18 muestra los 22 sitios que presentan desbordamiento cuando se realiza la consideración del suelo húmedo sobre la zona urbana de Tuxtla Gutiérrez. La Ilustración 7.49 muestra el perfil de las zonas de desbordamiento. Se puede observar un aumento de los sitios propensos a que se presente desbordamiento sobre el río Sabinal, esto surge debido a que la mayor precipitación se registró en la parte alta de la cuenca.

Tabla 7.18 Sitios que presentan desbordamiento considerando el suelo húmedo. Evento del 12 de agosto del 2015

No	Colonias afectadas	Tirantes en el tramo (m)	
		Inicial	Final
1	Club campestre granjas (zona norte)	2.43	1.72
2	Club campestre granjas (zona centro)	2.16	2.07
3	Club campestre granjas (zona centro)	1.98	1.78
4	Club de golf club campestre (entre calle monterrey y camino al club campestre)	0.42	0.39
5	Club de golf club campestre (entre calle monterrey y camino al club campestre)	0.85	0.65
6	El Arenal Campestre (esquina con camino club campestre)	0.64	0.59
7	Terán (Calzada Rosario Sabinal, dirección hacia el río)	0.57	0.45
8	Terán (entre Av. 1A Sur Poniente y Av. 2A Sur Poniente)	2.06	1.71
9	Terán (entre Av. 2A Sur Poniente y Av. 5A Poniente Sur)	2.39	1.98
10	Terán (entre Av. 4A Poniente Sur y Av. 3A Poniente Sur)	2.53	4.15

No	Colonias afectadas	Tirantes en el tramo (m)	
		Inicial	Final
11	Terán (entre Av. 2A Poniente Sur y Av. Central poniente)	2.57	1.89
12	Terán (calle central y calle 2 Oriente)	2.40	2.25
13	Fraccionamiento Fovissste III (entre 2 Oriente y 3A Oriente Norte)	2.18	1.62
14	Fraccionamiento Fovissste III (entre 3A Oriente Norte y Boulevard Belisario Domínguez)	1.36	2.03
15	Villas del Río (entre Boulevard 28 de agosto y Belisario Domínguez)	2.04	0.68
16	Moctezuma (entre 15A Poniente Norte y 13A. Poniente Norte)	4.88	4.78
17	El Magueyito (entre 12A Poniente Norte y 11A. Poniente Norte)	4.22	4.01
18	Guadalupe (entre calle 10A Poniente Norte y 7A Poniente Norte)	4.22	4.08
19	Guadalupe (entre calle 7A Poniente Norte y 3A Poniente Norte)	3.80	2.29
20	Santo Domingo (3A Poniente Norte y 2A Poniente Norte)	2.29	2.37
21	San Marcos (14A Poniente Norte y Central Norte)	1.78	2.00
22	Hidalgo (entre Boulevard Francisco I. Madero y 20A Oriente Norte)	1.70	1.34

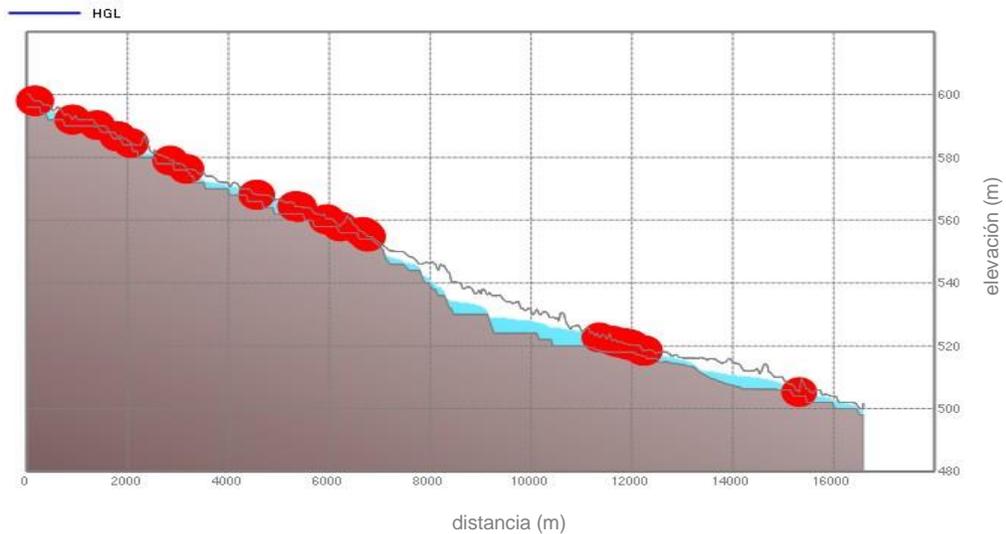


Ilustración 7.49 Sitios que presentan desbordamiento en el río Sabinal-Suelo húmedo- Evento del 12 de agosto del 2015

Eventos del 2 de septiembre del 2016

La Tabla 7.19 y la Ilustración 7.50 muestra los gastos y tirantes máximos para el evento analizado, en el cual la mayor precipitación se concentró en la zona urbana de la cuenca.

Tabla 7.19 Datos hidráulicos en las estaciones hidrométricas del río Sabinal. Evento del 2 de septiembre del 2016

Id	Estación Hidrométrica	Coordenadas UTM	Gasto	Tirante	Gasto - Suelo húmedo	Tirante
----	-----------------------	-----------------	-------	---------	----------------------	---------

		X	Y	(m ³ /s)	(m)	(m ³ /s)	(m)
1	Club Campestre	480090.02	1852350.97	4.22	0.33	4.54	0.34
2	Joyyo Mayu (Reloj Floral)	484463.27	1852949.59	93.77	1.60	96.93	1.92
3	Casa Kolping	485169.94	1852941.10	78.00	1.10	89.53	1.24
4	Centro 2a Poniente	487503.30	1852752.15	42.36	2.00	41.77	2.00
5	Ciprés (puente IMSS)	488525.76	1852549.37	71.51	4.07	89.84	4.78
6	Parque Oriente	490627.09	1853041.23	101.53	4.34	109.70	4.44

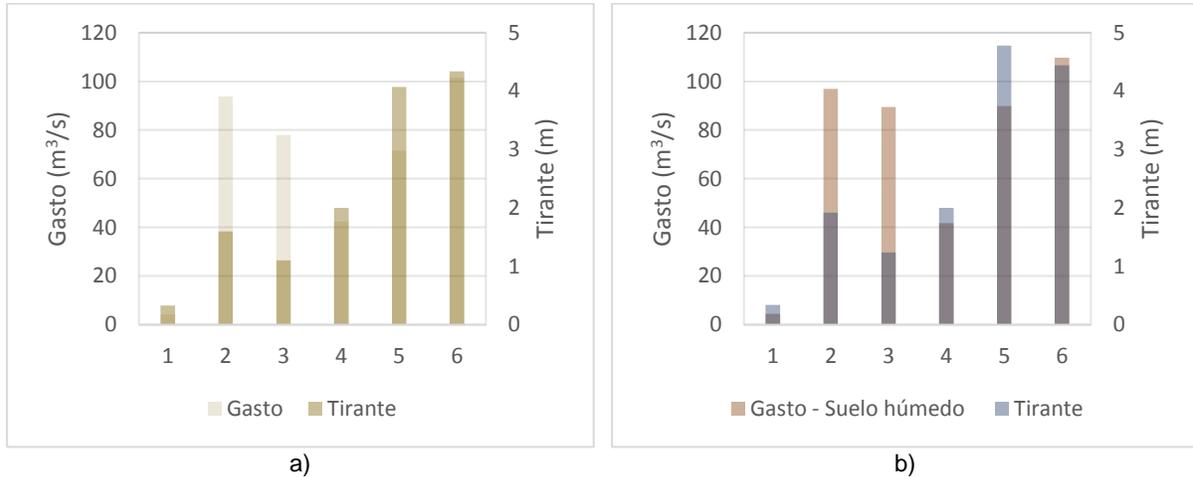


Ilustración 7.50 Gastos y tirantes obtenidos en las estaciones hidrométricas. Evento del 2 de septiembre del 2016

Para el evento analizado se identificaron 13 sitios que son propensos a desbordamientos en el río Sabinal (ver Tabla 7.20) y para la condición del suelo húmedo sobre la zona urbana se identificaron 17 sitios (ver Tabla 7.21).

Tabla 7.20 Sitios que presentan desbordamiento en el río Sabinal. Evento del 2 de septiembre del 2016

No	Colonias afectadas	Tirantes en el tramo (m)	
		Inicial	Final
1	Terán (Av. 3A Norte Oriente (entre calle central y 2 Oriente)	2.32	2.22
2	Fraccionamiento Fovissste III (entre calle 3A. Oriente Norte y Av. Constitución)	1.53	1.95
3	Villas del Río (entre Boulevard 28 de agosto y Belisario Domínguez)	1.26	0.72
4	Guadalupe (entre calle 10A Poniente Norte y 7A Poniente Norte)	4.22	4.08
5	Guadalupe (entre calle 7A Poniente Norte y 6A Poniente Norte)	3.87	3.56
6	Guadalupe (entre calle 6A Poniente Norte y 5A Poniente Norte)	3.34	3.02
7	Guadalupe (entre calle 5A Poniente Norte y 3A Poniente Norte)	2.92	2.29
8	Santo Domingo (3A Poniente Norte y 2A Poniente Norte)	2.29	2.34
9	San Marcos (entre calle 1A Poniente Norte y Central Norte)	1.75	1.78
10	Hidalgo (entre Boulevard Francisco I. Madero y 20A. Oriente Norte)	1.89	1.34
11	Fraccionamiento Vergel (Intersección del canal al río)	1.81	2.00
12	Parque Oriente Tuxtla (entre Av. Artículo 115 y libramiento Norte Oriente)	3.02	4.37
13	Instituto superior de Chiapas (a la altura de la Intersección del colector embovedado Patria Nueva al río)	2.33	3.93

Tabla 7.21 Sitios que presentan desbordamiento considerando el suelo húmedo. Evento del 2 de septiembre del 2016

No	Colonias afectadas	Tirantes en el tramo (m)	
		Inicial	Final
1	Terán (Av. 3A Norte Oriente (entre calle central y 2 Oriente)	2.32	2.22
2	Fraccionamiento Fovissste III (entre calle 3A. Oriente Norte y Av. Constitución)	1.64	1.98
3	Villas del Río (entre Boulevard 28 de agosto y Belisario Domínguez)	1.90	0.70
4	Moctezuma (entre 13A. Poniente Norte y 12A Poniente Norte)	5.46	5.07
5	El Magueyito (entre 12A Poniente Norte y 11A. Poniente Norte)	4.54	4.24
6	Guadalupe (entre calle 10A Poniente Norte y 7A Poniente Norte)	4.03	4.24
7	Guadalupe (entre calle 7A Poniente Norte y 6A Poniente Norte)	3.94	3.58
8	Guadalupe (entre calle 6A Poniente Norte y 5A Poniente Norte)	3.34	3.04
9	Guadalupe (entre calle 5A Poniente Norte y 3A Poniente Norte)	2.91	2.29
10	Santo Domingo (3A Poniente Norte y 2A Poniente Norte)	2.29	2.34
11	San Marcos (entre calle 1A Poniente Norte y Central Norte)	1.77	1.89
12	Hidalgo (cerca de la intersección del colector Potinaspak al río)	4.92	4.83
13	Hidalgo (entre Boulevard Francisco I. Madero y 20A. Oriente Norte)	2.10	1.33
14	Fraccionamiento Vergel (Intersección del canal al río)	1.79	2.05
15	Parque Oriente Tuxtla (entre Av. Artículo 115 y libramiento Norte Oriente)	3.10	4.45
16	Parque Oriente Tuxtla (libramiento Norte Oriente, intersección embovedado 24 de junio)	4.18	3.83
17	Instituto superior de Chiapas (a la altura de la Intersección del colector embovedado Patria Nueva al río)	2.49	3.56

La Ilustración 7.51 e Ilustración 7.52 presentan los sitios propensos a desbordamiento sobre el río Sabinal.

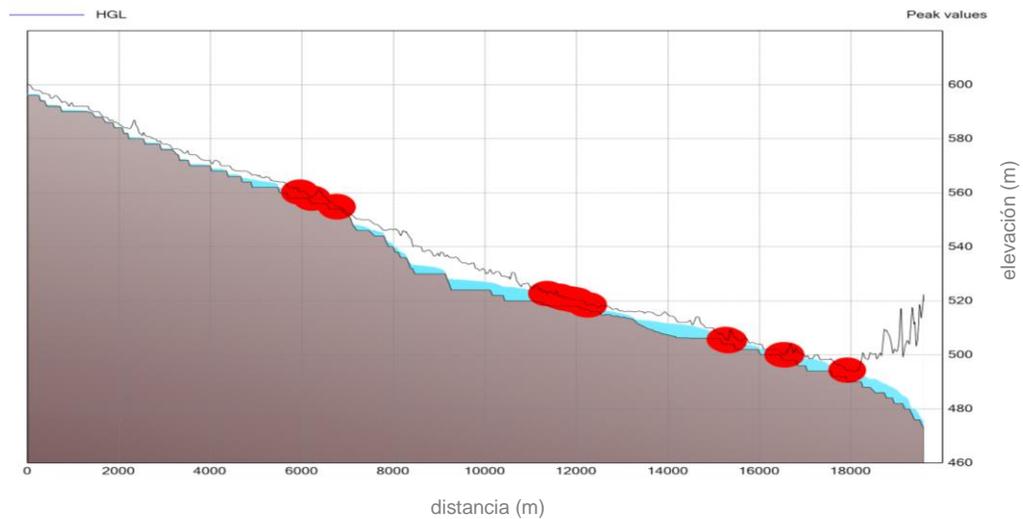


Ilustración 7.51 Zonas de desbordamiento en el río Sabinal. Evento del 2 de septiembre del 2016

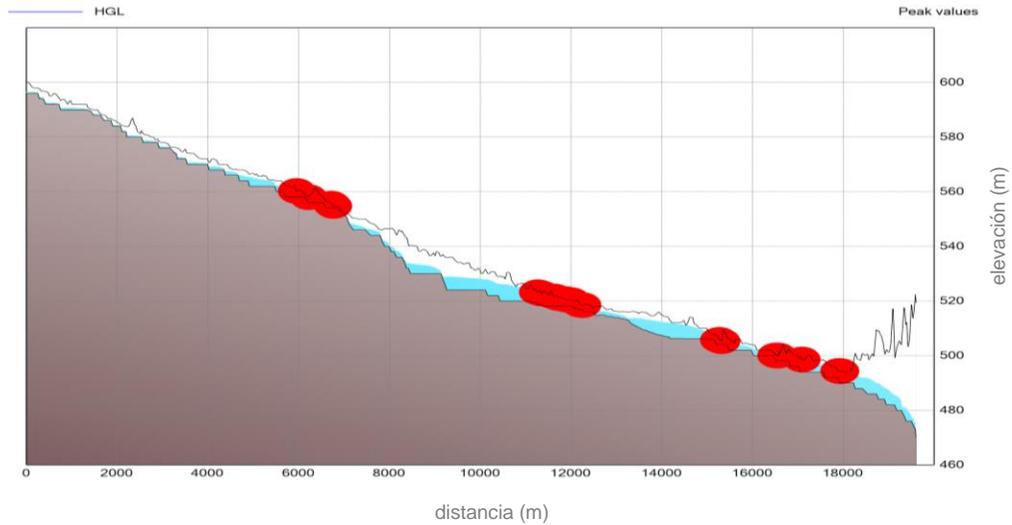


Ilustración 7.52 Sitios que presentan desbordamiento en el río Sabinal-Suelo húmedo- Evento del 2 de septiembre del 2016

Eventos del 23 de junio del 2017

Como se ha mencionado la precipitación máxima en el evento se registró a la salida de la subcuenca, para lo cual la estación hidrométrica Parque oriente registró el mayor tirante. La Tabla 7.19 y la Ilustración 7.50 muestra los gastos y tirantes máximos en las estaciones hidrométricas.

Tabla 7.22 Datos hidráulicos en las estaciones hidrométricas del río Sabinal. Evento del 23 de junio del 2017

Id	Estación Hidrométrica	Coordenadas UTM		Gasto (m ³ /s)	Tirante (m)	Gasto - Suelo húmedo (m ³ /s)	Tirante (m)
		X	Y				
1	Club Campestre	480090.02	1852350.97	7.45	0.43	10.71	0.49
2	Joyyo Mayu (Reloj Floral)	484463.27	1852949.59	78.44	1.61	95.11	1.73
3	Casa Kolping	485169.94	1852941.10	63.29	0.93	78.82	1.14
4	Centro 2a Poniente	487503.30	1852752.15	42.38	1.98	44.19	1.98
5	Ciprés (puente IMSS)	488525.76	1852549.37	61.96	3.24	65.10	3.81
6	Parque Oriente	490627.09	1853041.23	102.04	4.21	101.57	4.33

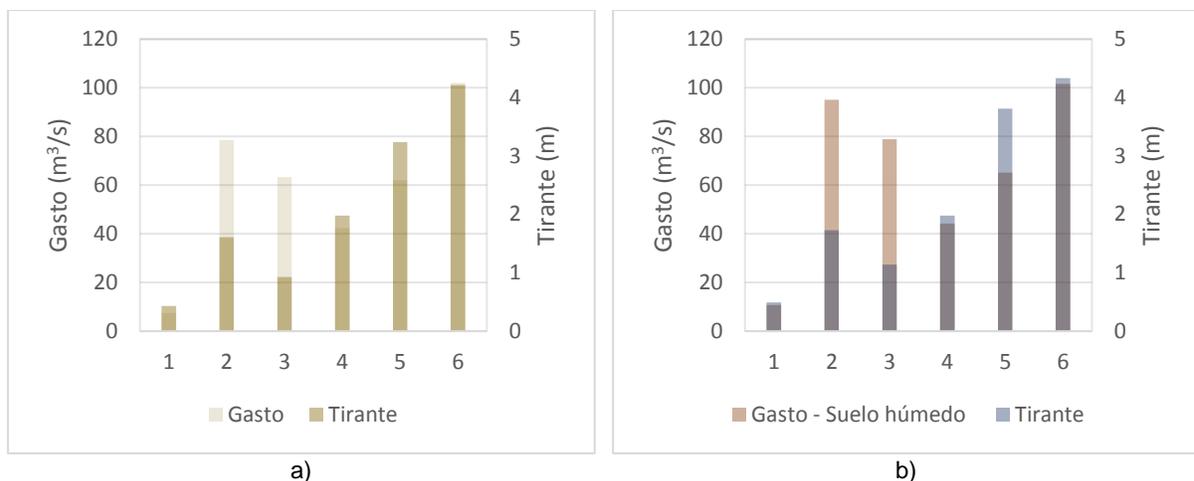


Ilustración 7.53 Gastos y tirantes obtenidos en las estaciones hidrométricas. Evento del 23 de junio del 2017

La Tabla 7.23 muestra los 13 sitios que presentaron desbordamientos sobre el río Sabinal para el evento analizado y la Tabla 7.24 los 14 sitios realizando la consideración del suelo húmedo sobre la zona urbana.

Tabla 7.23 Sitios que presentan desbordamiento en el río Sabinal. Evento del 23 de junio del 2017

No	Colonias afectadas	Tirantes en el tramo (m)	
		Inicial	Final
1	Terán (Av. 3A Norte Oriente (entre calle central y 2 Oriente)	2.28	2.20
2	Fraccionamiento Fovissste III (entre 3A. Oriente Norte y Av. Norte Oriente)	2.14	1.96
3	Villas del Río (entre Boulevard 28 de agosto y Belisario Domínguez)	1.05	0.70
4	Guadalupe (entre calle 10A Poniente Norte y 7A Poniente Norte)	3.95	3.90
5	Guadalupe (entre calle 7A Poniente Norte y 6A Poniente Norte)	3.79	3.49
6	Guadalupe (entre calle 6A Poniente Norte y 5A Poniente Norte)	3.26	3.04
7	Guadalupe (entre calle 5A Poniente Norte y 3A Poniente Norte)	2.87	2.29
8	Santo Domingo (3A Poniente Norte y 2A Poniente Norte)	2.29	2.33
9	San Marcos (entre calle 1A Poniente Norte y Central Norte)	1.70	1.78
10	Hidalgo (entre Boulevard Francisco I. Madero y 20A. Oriente Norte)	1.67	1.31
11	Fraccionamiento Vergel (Intersección del canal al río)	2.06	1.97
12	Parque Oriente Tuxtla (entre Av. Artículo 115 y libramiento Norte Oriente)	3.42	4.27
13	Instituto superior de Chiapas (a la altura de la Intersección del colector embovedado Patria Nueva al río)	3.60	3.87

Tabla 7.24 Sitios que presentan desbordamiento considerando el suelo húmedo. Evento del 23 de junio del 2017

No	Colonias afectadas	Tirantes en el tramo (m)	
		Inicial	Final
1	Terán (Av. 3A Norte Oriente (entre calle central y 2 Oriente)	2.30	2.23
2	Fraccionamiento Fovissste III (entre calle 3A. Oriente Norte y Av. Constitución)	1.61	1.94
3	Villas del Río (entre Boulevard 28 de agosto y Belisario Domínguez)	1.25	0.73

4	Guadalupe (entre calle 10A Poniente Norte y 7A Poniente Norte)	4.21	4.18
5	Guadalupe (entre calle 7A Poniente Norte y 6A Poniente Norte)	3.79	3.64
6	Guadalupe (entre calle 6A Poniente Norte y 5A Poniente Norte)	3.35	3.04
7	Guadalupe (entre calle 5A Poniente Norte y 3A Poniente Norte)	2.88	2.29
8	Santo Domingo (3A Poniente Norte y 2A Poniente Norte)	2.29	2.33
9	San Marcos (entre calle 1A Poniente Norte y Central Norte)	1.78	1.78
10	Hidalgo (entre Boulevard Francisco I. Madero y 20A. Oriente Norte)	1.90	1.35
11	Fraccionamiento Vergel (Intersección del canal al río)	1.84	2.00
12	Parque Oriente Tuxtla (entre Av. Artículo 115 y libramiento Norte Oriente)	2.99	4.36
13	Parque Oriente Tuxtla (libramiento Norte Oriente- intersección embovedado 24 de junio)	3.95	3.61
14	Instituto superior de Chiapas (a la altura de la Intersección del colector embovedado Patria Nueva al río)	2.34	3.85

La Ilustración 7.54 e Ilustración 7.55 presentan los sitios propensos a desbordamiento sobre el río Sabinal considerando que la mayor precipitación se presenta sobre la parte norte de la zona urbana de Tuxtla Gutiérrez.

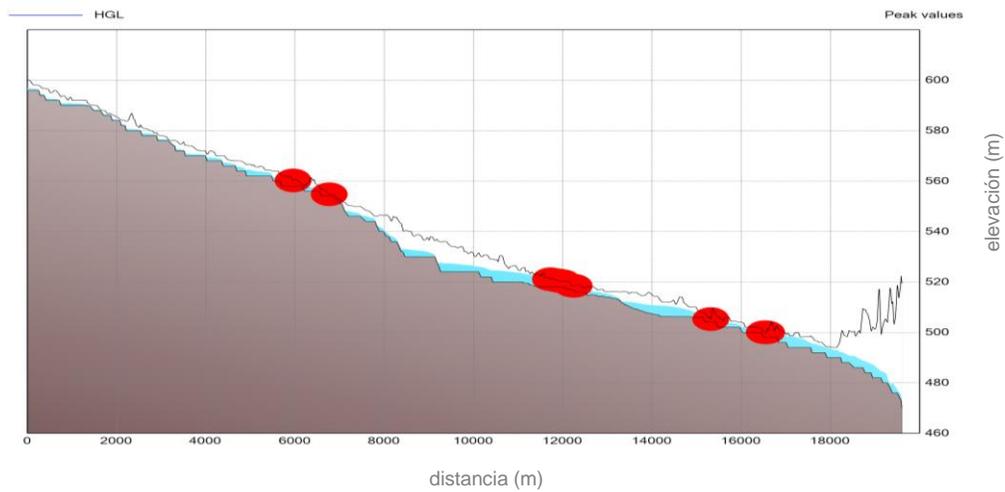


Ilustración 7.54 Zonas de desbordamiento en el río Sabinal. Evento del 23 de junio del 2017

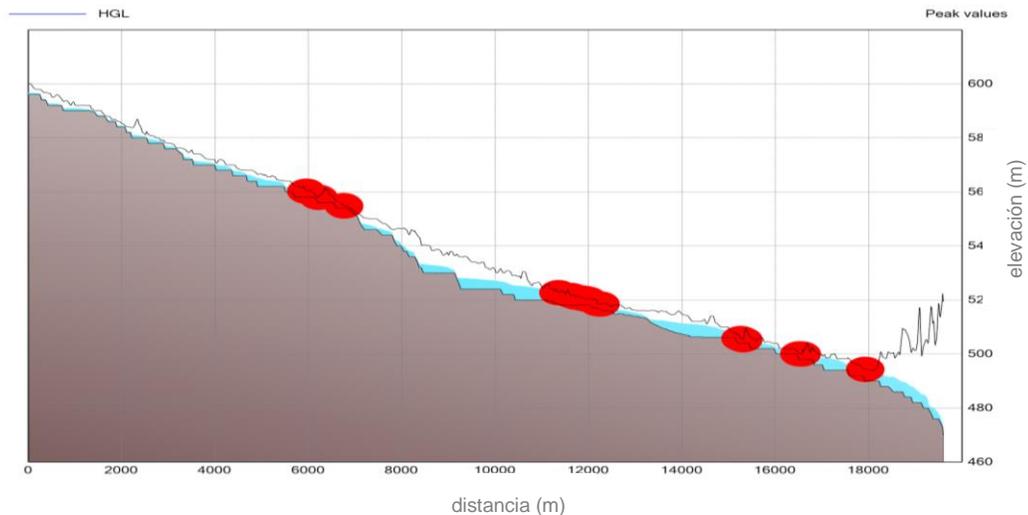


Ilustración 7.55 Sitios que presentan desbordamiento en el río Sabinal-Suelo húmedo- Evento del 23 de junio del 2017

De los resultados obtenidos del modelo unidimensional (1D) se puede observar las variaciones de los gastos (m^3/s) y tirantes (m) sobre el sistema de drenaje pluvial de la zona urbana de Tuxtla Gutiérrez a partir del evento analizado. En el análisis de la predicción de inundaciones es necesario conocer la respuesta del río Sabinal cuando se presenta la mayor intensidad en diferentes zonas de la cuenca:

- Zona alta (evento del 12 de agosto del 2015)
- Zona norte de Tuxtla Gutiérrez (evento del 2 de septiembre del 2016)
- Zona sur de Tuxtla Gutiérrez (evento del 12 de agosto del 2017)

Se consideró conocer los sitios propensos a desbordamientos en los diferentes eventos, asimismo el tiempo en que éstos se presentan tal como se muestra de la Ilustración 7.56 a la Ilustración 7.61.

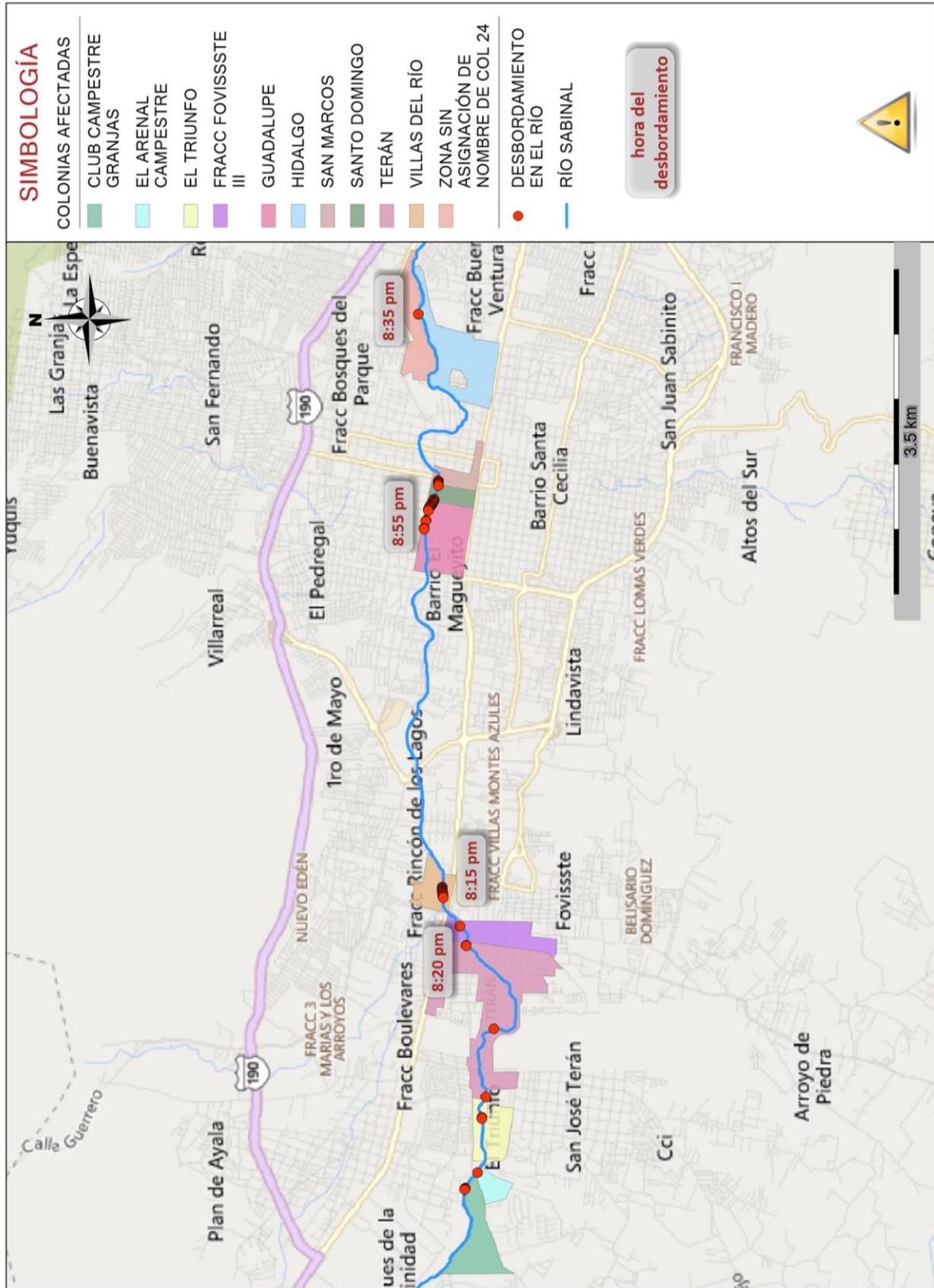


Ilustración 7.56 Sitios propensos a desbordamientos sobre el río Sabinal. Evento del 12 de agosto del 2015

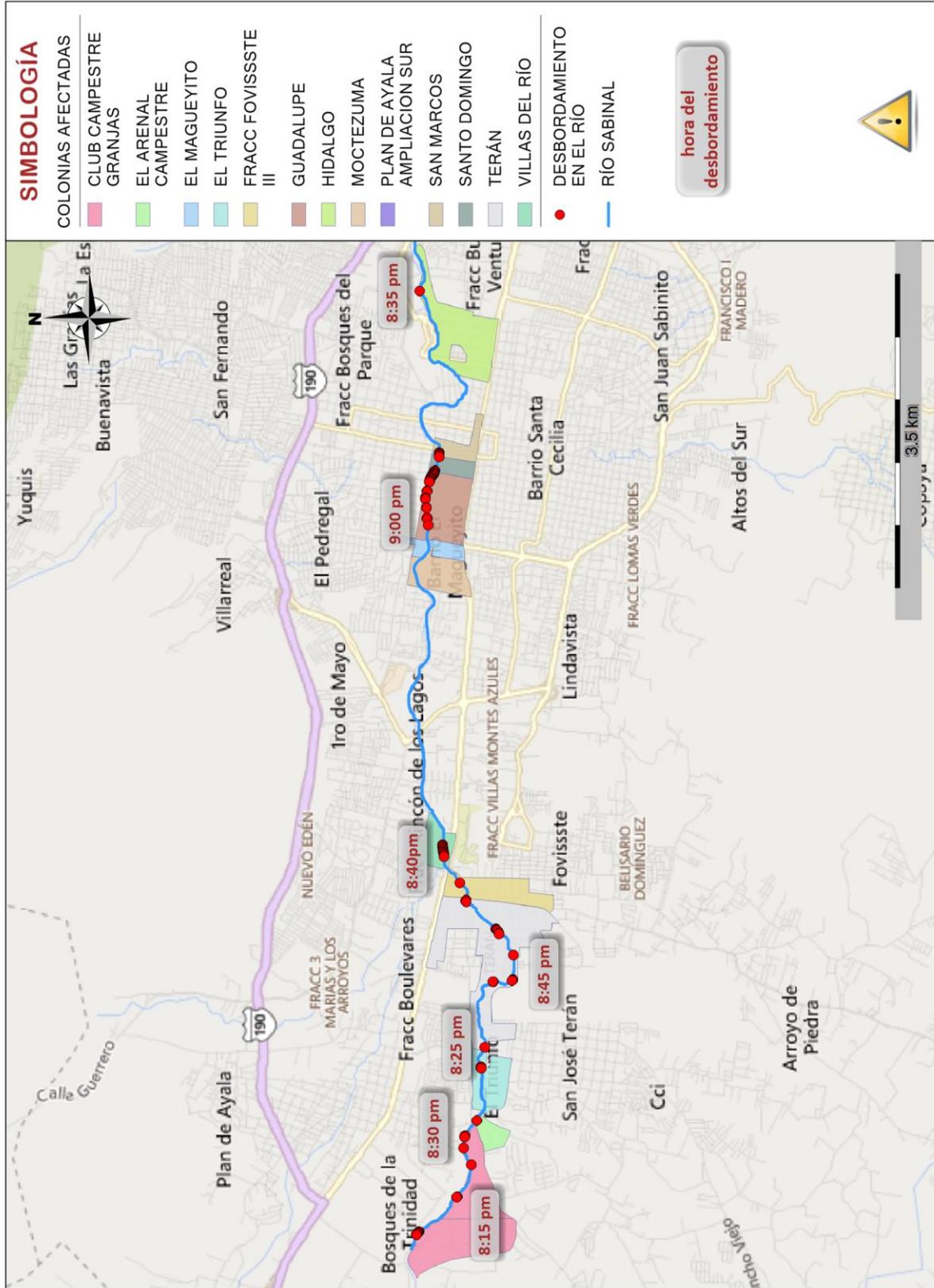


Ilustración 7.57 Sitios propensos a desbordamientos sobre el río Sabinal. - Suelo húmedo- Evento del 12 de agosto del 2015

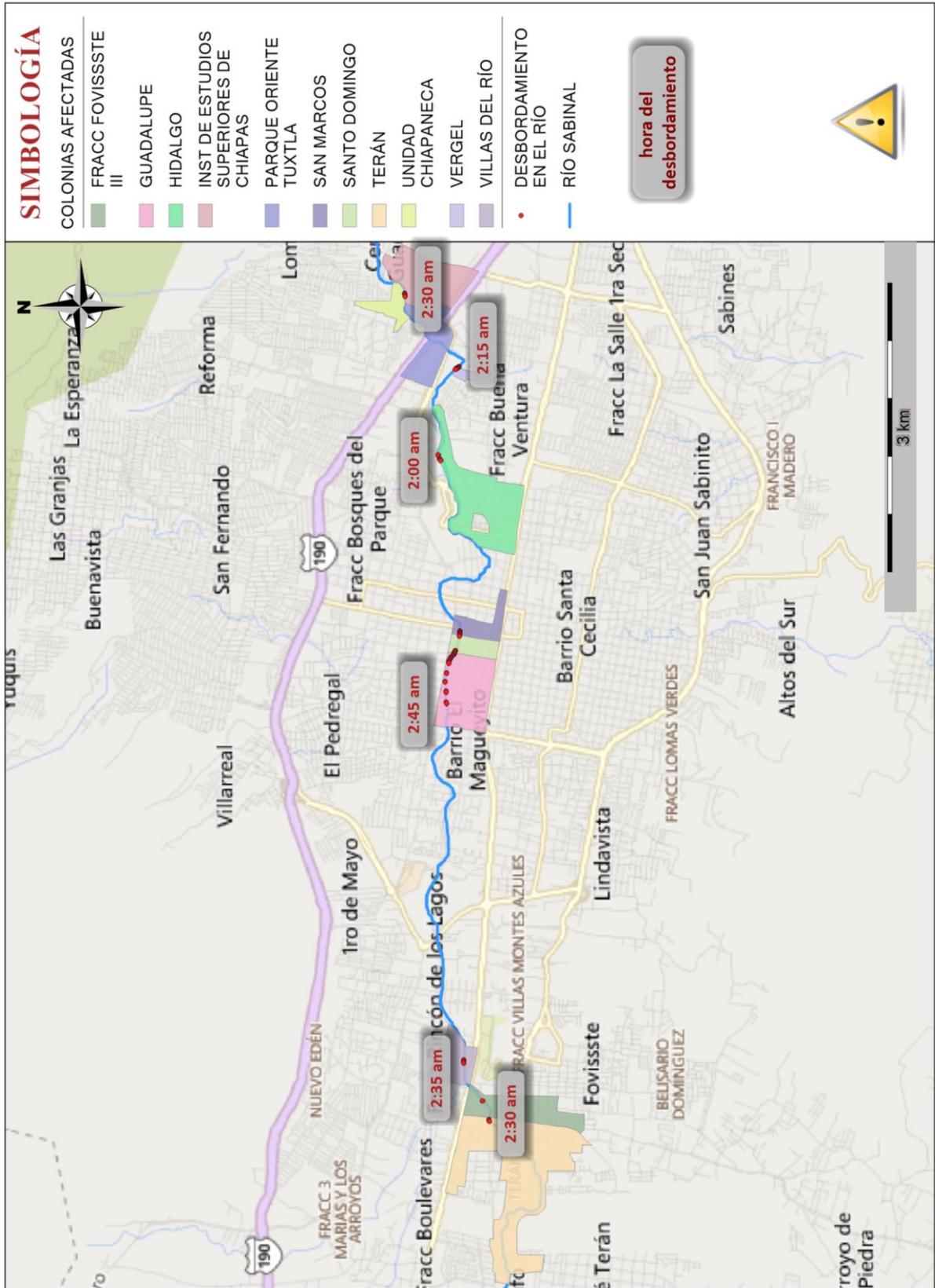


Ilustración 7.58 Sitios propensos a desbordamientos sobre el río Sabinal. Evento del 2 de septiembre del 2016

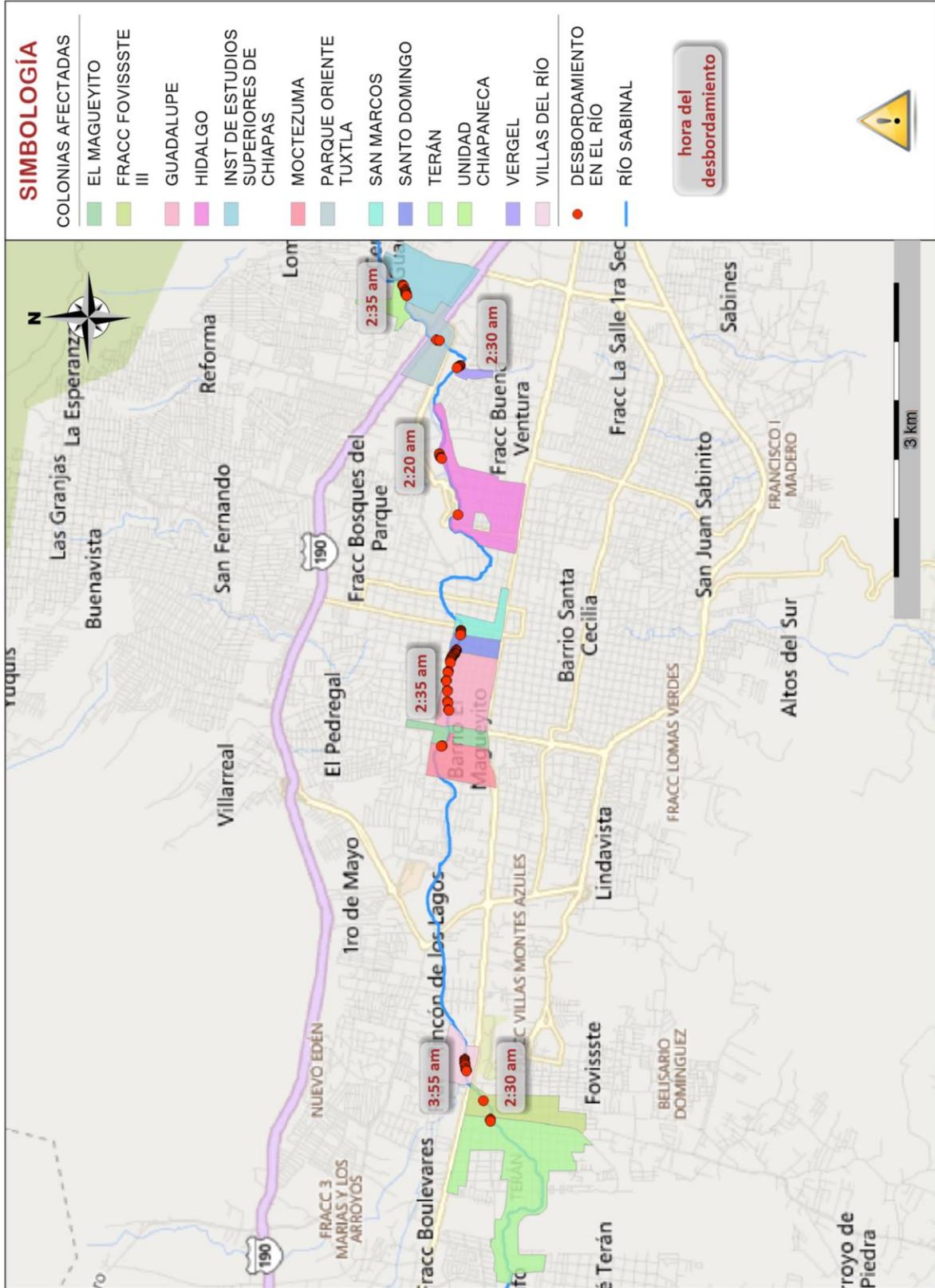


Ilustración 7.59 Sitios propensos a desbordamientos sobre el río Sabinal. - Suelo húmedo- Evento del 2 de septiembre del 2016

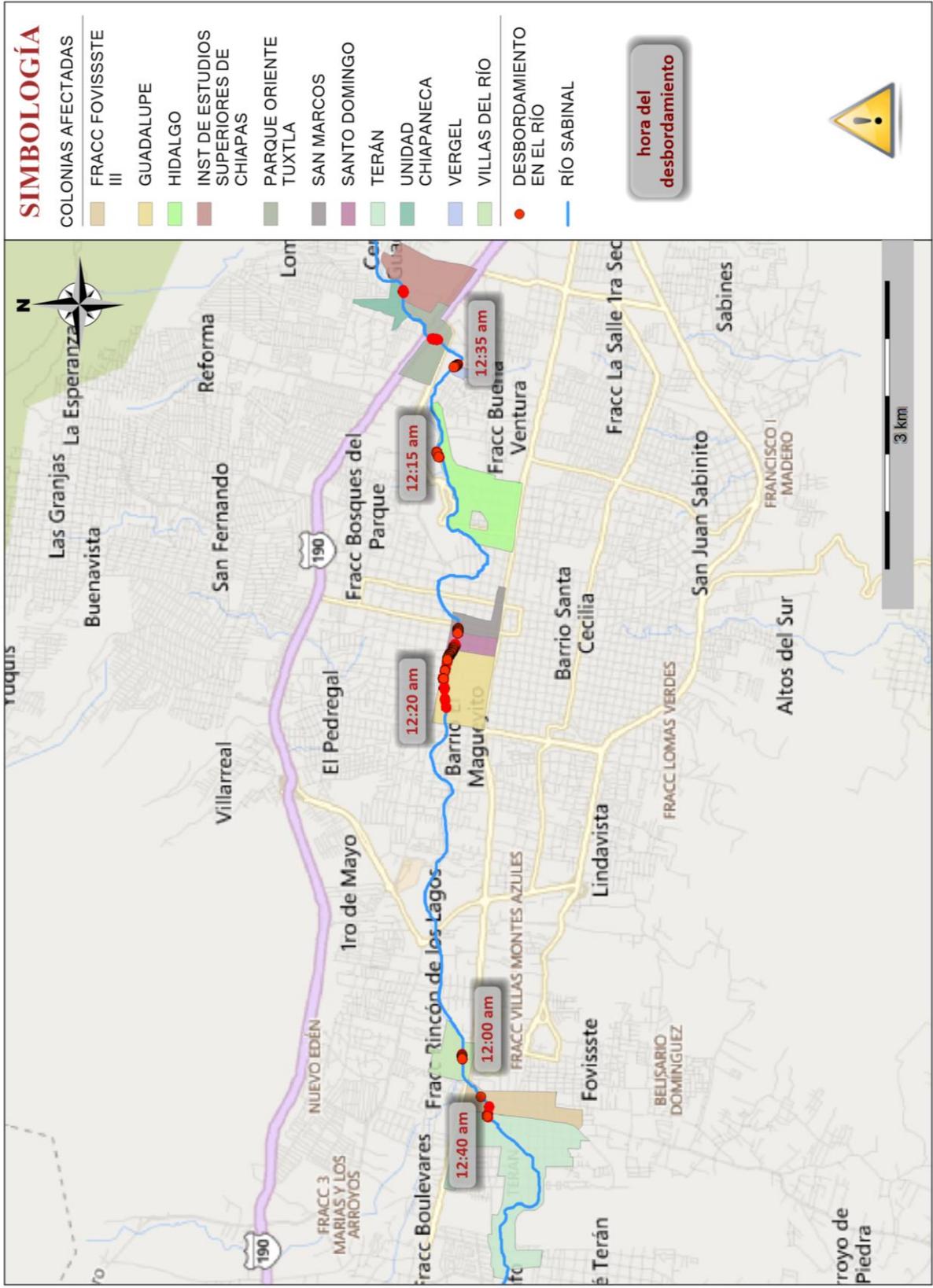


Ilustración 7.60 Sitios propensos a desbordamientos sobre el río Sabinal. Evento del 23 de junio del 2017

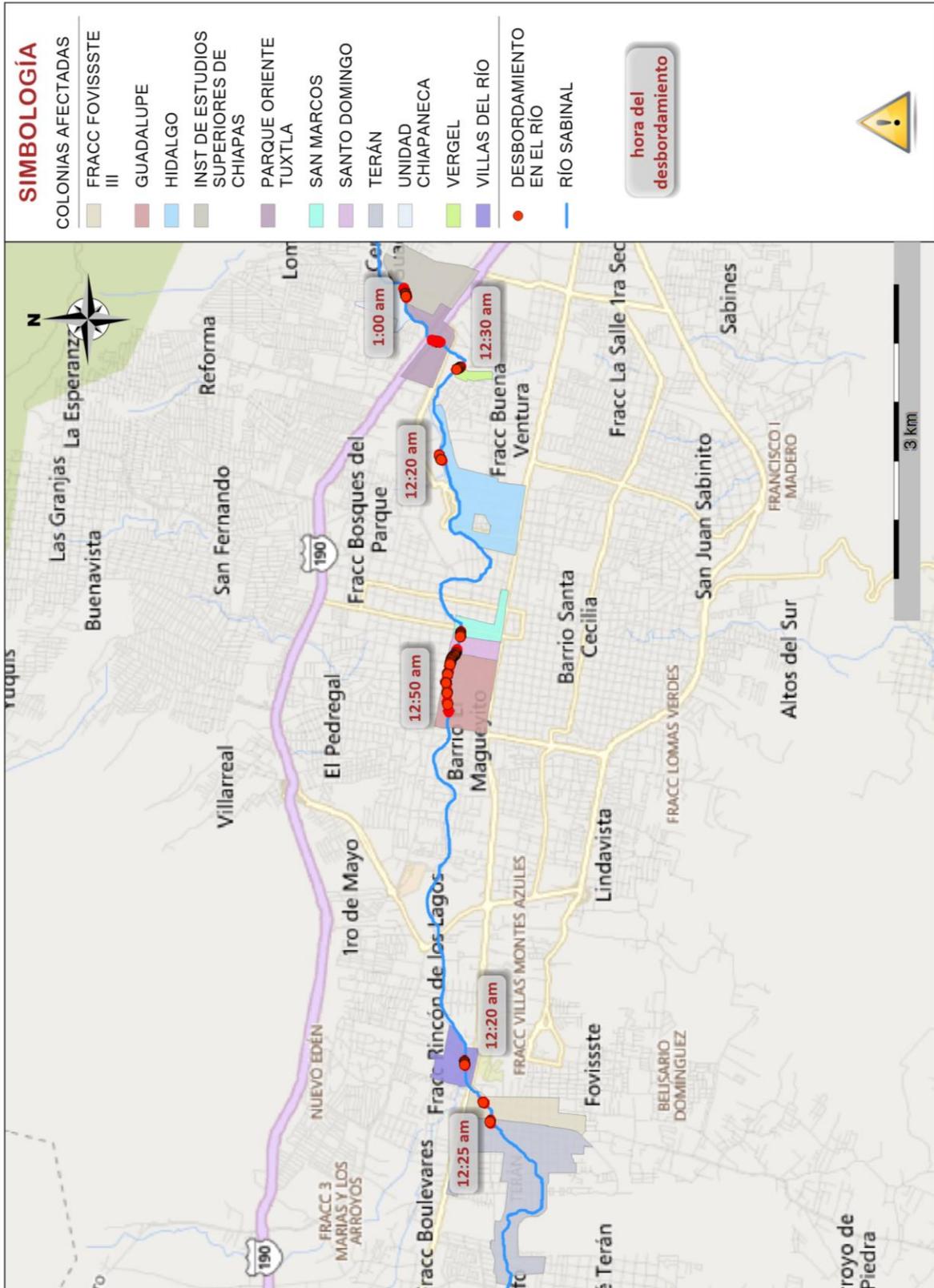


Ilustración 7.61 Sitios propensos a desbordamientos sobre el río Sabinal. - Suelo húmedo- Evento del 23 de junio del 2017

7.8 Análisis del modelo bidimensional

A partir de un evento de lluvia o para un periodo de retorno analizado el modelo bidimensional permite visualizar los escurrimientos superficiales sobre las calles y sitios que abarca el área de modelación con lo cual se obtiene la ubicación de los mismos. De la Tabla 7.25 a la Tabla 7.27 muestra las principales colonias que presentaron problemas de acuerdo a fuentes informativas de la región.

Realizada la modelación bidimensional de los 3 eventos considerados se corroboró la información de los sitios y se obtuvieron aquellos que son propensos a ser afectados constantemente independientemente de la lluvia analizada, como es el caso de:

- Colonia 24 de junio
- Colonia 14 de enero
- Colonia los laureles
- Colonias las palmas
- Colonia Fovissste
- El libramiento norte a la altura de la PGJE
- El libramiento norte a la altura de las torres
- El colector Potinaspak
- El colector Totoposte

Tabla 7.25 Sitios y colonias afectadas para el evento del 12 de agosto del 2015. Fuente: (El Universal, El Universal, 2015)

Evento	No	Colonias
12 de agosto del 2015	1	Av. Belisario Domínguez
	2	Col Paso limón
	3	Las torres
	4	Los Laureles
	5	Jardín Corona
	6	Fovissste
	7	Bugambilias

Tabla 7.26 Sitios y colonias afectadas para el evento del 2 de septiembre del 2016. Fuente: (sinembargo.mx, 2016)

Evento	No	Colonias
2 de septiembre del 2016	1	Bienestar Social
	2	La Ilusión
	3	Las Torres
	4	Bienestar Social
	5	Granja Uncil

Evento	No	Colonias
	6	Romeo Rincón
	7	La Ilusión
	8	Romeo Rincón
	9	Libramiento Norte Tuxtla PGJE
	10	Río Potinaspak
	11	San Francisco

Tabla 7.27 Sitios y colonias afectadas para el evento del 23 de agosto del 2017. Fuente: (El Universal, 2017)

Evento	No	Colonias
23 de junio del 2017	1	24 de junio
	2	Esc. Gómez Farías -24 de junio
	3	Libramiento Norte Tuxtla PGJE
	4	Libramiento Sur
	5	Calzada Fidel Velázquez
	6	Plaza poli fórum
	7	Libramiento Norte
	8	Procuraduría-24 de junio
	9	Maya
	10	Calzada de las Etnias
	11	17 de enero
	12	Las Palmas
	13	La moderna

Como parte de la predicción de inundaciones en zonas urbanas basada en información de lluvia proveniente del modelo WRF v3.6.1 y de EMAS, de la Ilustración 7.62 a la Ilustración 7.64 se muestran de manera visual los sitios que son más propensos a presentar problemas ante un evento de extremo de lluvia.

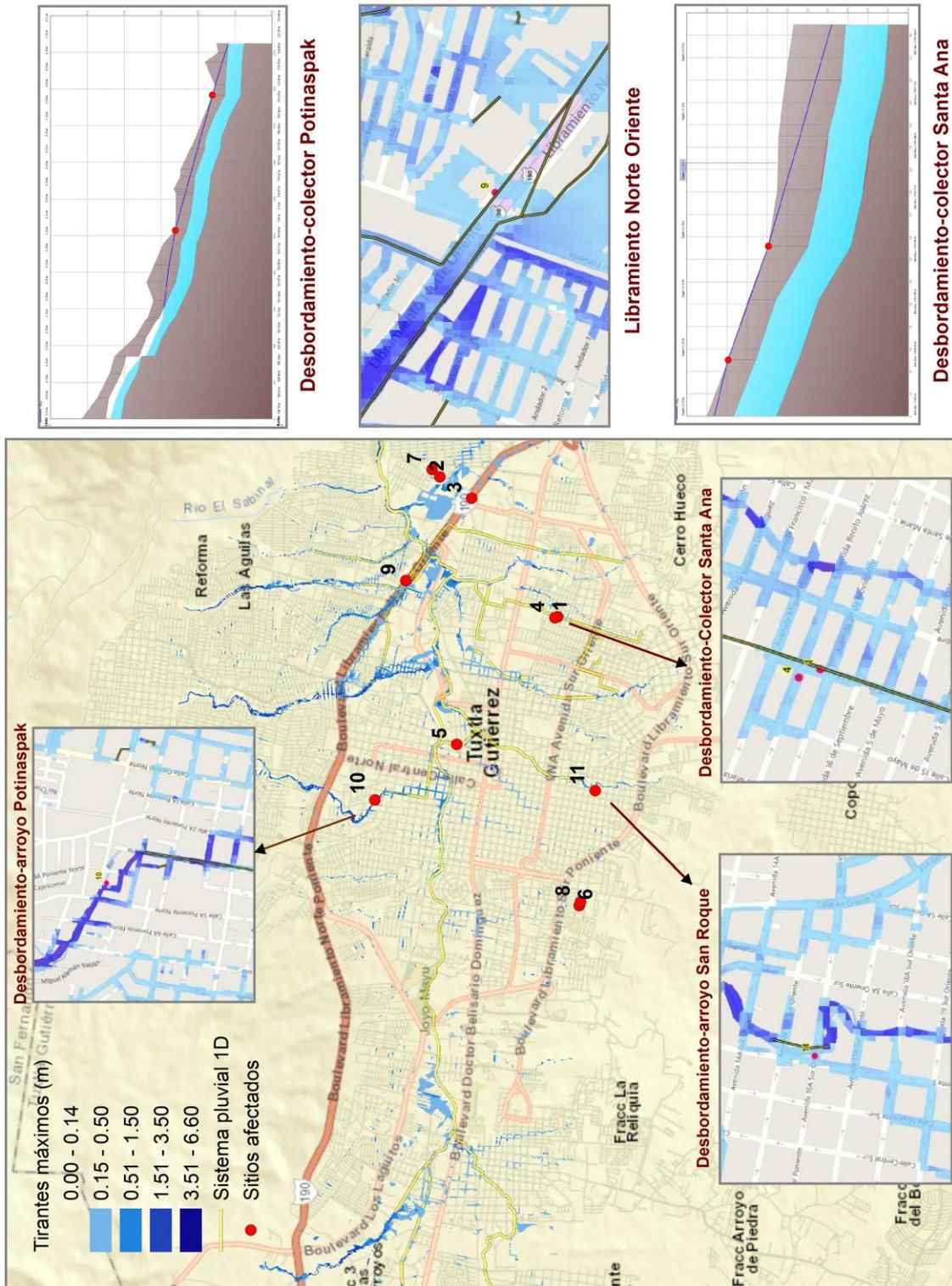


Ilustración 7.63 Sitios afectados a partir de la modelación bidimensional realizada. Evento del 2 de septiembre del 2016

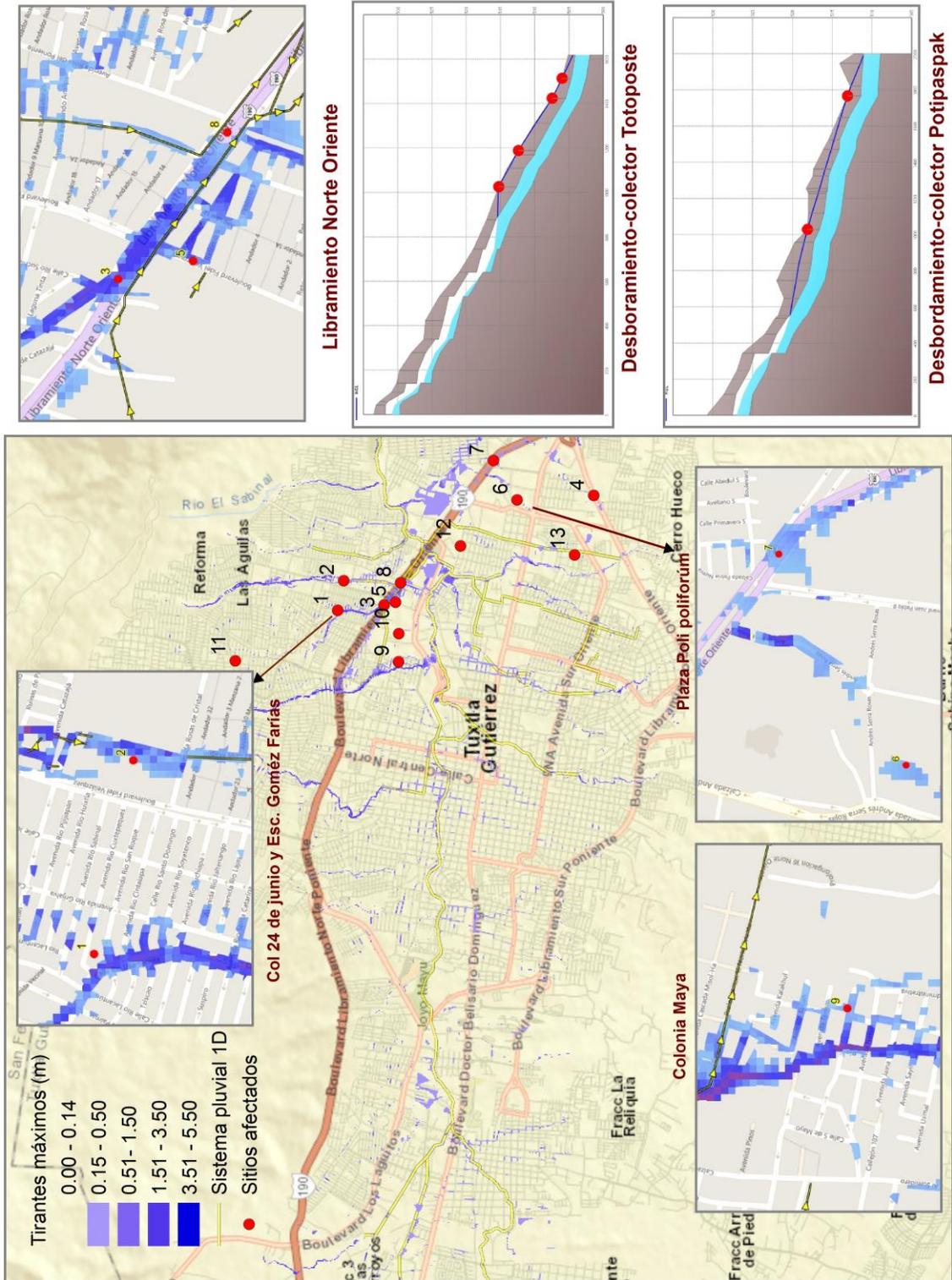


Ilustración 7.64 Sitios afectados a partir de la modelación bidimensional realizada. Evento del 23 de junio del 2017

7.9 El uso del modelo WRF v3.6.1 en la predicción de inundaciones

Como se ha mencionado anteriormente el modelo numérico de predicción del tiempo WRF v3.6.1 utiliza datos históricos de variables (reflectividad, temperatura, lluvia, viento, humedad) para dar una proyección hacia adelante en el tiempo, a partir de las ecuaciones que resuelve. La información del modelo la obtiene de las siguientes redes de monitoreo hidrometeorológico:

- Estaciones climatológicas convencionales
- Estación Meteorológica Automática
- Información Satelital
- Boyas meteorológicas

En la predicción del tiempo el modelo WRF v3.6.1 utiliza como condiciones iniciales los datos medidos de las últimas horas, en el campo de la meteorología estas mediciones se reportan mundialmente. Como se presenta en el sitio Galileo (<http://galileo.imta.mx>) desarrollado por el IMTA, el modelo puede predecir el tiempo hasta 5 días, realizando la actualización de las variables consideradas cada 4 horas. Con esta información que proporciona y conociendo los tiempos necesarios de simulación hidráulica 1D-2D (ver Tabla 7.9) se puede conocer el tiempo requerido para la predicción de un evento en la zona urbana de Tuxtla Gutiérrez y por ende su utilización en un sistema de alerta temprana (ver Tabla 7.28).

Tabla 7.28 Tiempos requeridos para realizar la predicción de inundaciones en Tuxtla Gutiérrez Utilizando el Modelo WRF v3.6.1 y el modelo numérico de simulación 1D-2D en el programa PCSWMM®

Modelo WRF v3.6.1	Ubicación del evento	Condición	Modelo 1D (Minutos)	Modelo 2D (hora)
De 1 a 5 días (actualización de variables cada 4 hrs)	Zona alta de la cuenca	Normal	9	16
		Suelo húmedo	12	24
	Zona norte - Tuxtla Gutiérrez	Normal	8	21
		Suelo húmedo	19	32
	Zona centro-Tuxtla Gutiérrez	Normal	10	17
		Suelo húmedo	12	25

7.10 Difusión de la información

Dentro de trabajo de esta tesis, los resultados se han presentado a través de tablas, gráficos e imágenes que muestran la ubicación en un plano de las variables que se están analizando, esto de acuerdo a la *fase de previsión* dentro del proceso de predicción hidrológica. Los resultados obtenidos son producto del uso de lluvia distribuida a través del modelo WRF v3.6.1 y de las EMAS ubicadas en la zona de estudio.

La *difusión de la información* se puede decir que es el punto más importante dentro del proceso de predicción hidrológica debido a que es aquella acción que determinará como se atiende a las necesidades de la población ante un evento hidrometeorológico extremo, en este caso las inundaciones en zonas urbanas (ver Ilustración 7.65).



Ilustración 7.65 Dependencias que participan en la difusión de la información para la predicción de inundación en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez

8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 Conclusiones

- El pronóstico de precipitación mediante el modelo WRF v3.6.1 e información de EMAS, puede ser utilizado en un sistema de alerta temprana ante eventos hidrometeorológicos. Debido a que el modelo WRF v3.6.1 pronostica el tiempo para las siguientes 120 h, la metodología propuesta puede aplicarse para un sistema de predicción de inundaciones, ayudando a las dependencias responsables de la atención a emergencias a identificar los puntos de mayor afectación.
- Ante la necesidad de establecer un procedimiento para vincular los datos de pronóstico de lluvia con el modelo hidráulico, se realizaron diversos procedimientos en un SIG, dando como resultado la generación de hietogramas de lluvia en las 33 celdas con resolución de 4 x 4 km que abarcan la cuenca del río Sabinal.
- El modelo WRF v3.6.1 y las EMAS en la modelación hidrológica- hidráulica permiten obtener una mejor representación espacial y temporal de la lluvia, resultando una precipitación promedio en la cuenca de 81.5 mm, mientras las EMAS registraron 83.0 mm (1.81 % de diferencia) para los datos de lluvia del 2 de septiembre del 2016 y; en el evento del 23 de junio del 2017 se obtuvo una precipitación promedio de 67.5 mm y las EMAS registraron 66.3 mm (1.77% de diferencia), obteniéndose un coeficiente de correlación mínimo de 0.86.
- Con respecto a la calibración del modelo hidráulico 1D, del evento del 2 de septiembre del 2016 se modificaron los parámetros hasta en un 20 % (infiltración, ancho de la cuenca, n permeable, n impermeable y porcentaje impermeable), comparándose los datos de nivel en la estación hidrométrica Parque Oriente y obteniéndose un coeficiente de Nash-Sutcliffe de 0.87; para el segundo evento resultó un coeficiente de Nash-Sutcliffe de 0.59. Con estos resultados se puede establecer que con el uso del Modelo WRF v3.6.1 se representa las condiciones del evento.
- Al calibrarse el modelo hidráulico 1D, permite establecer el comportamiento de los escurrimientos en el río Sabinal y de los principales colectores pluviales, obteniéndose condiciones hidráulicas de las tuberías como: gasto (m^3/s),

velocidad (m/s) y capacidad (adimensional). Por ejemplo, el colector Potinaspak presenta rebosamiento con una lluvia vinculada a un periodo de retorno de 31 años (50.5 mm) y en los colectores totoposte, cerro hueco, Poc Poc, Santa Ana y Brasilito presentan rebosamientos con lluvias asociadas a un periodo de retorno de 92 años (67.5 mm).

- Con la combinación del modelo WRF v3.6.1 y el modelo hidráulico unidimensional del río Sabinal, se puede representar el comportamiento espacial de la lluvia permitiendo establecer escenarios de precipitación en las subcuencas cuando la tormenta se desplaza en diferentes direcciones, estimándose también el comportamiento de los niveles del río, que pueden ser corroborados en las 6 estaciones hidrométricas.
- Se observó que cuando se presenta una lluvia promedio de 50.5 mm con una precipitación máxima acumulada de 141.7 mm en la zona alta de la cuenca, en la estación hidrométrica Parque Oriente se registra un tirante de 3.25 m (65% de la capacidad del cauce) y realizando la consideración del suelo húmedo por lluvia antecedente, se incrementa hasta alcanzar los 3.52 m (70.4 % de su capacidad). Cuando una lluvia promedio de 81.5 mm con una precipitación máxima acumulada de 123.3 mm ocurre en la zona norte de Tuxtla Gutiérrez, donde se localizan las colonias Ángeles, La Esperanza y Las Granjas, el nivel máximo registrado en la estación hidrométrica resulta de 4.34 m (86.8 % de su capacidad) mientras que con la consideración del suelo húmedo es de 4.44 (88.8 % de su capacidad). Al presentarse una lluvia promedio de 67.5 mm con una precipitación máxima acumulada de 81.6 mm en la zona centro donde se ubican las colonias 24 de junio, 21 de septiembre y Parque Oriente, entre otras, el nivel alcanzado es de 4.21 m (84.2% de su capacidad) y al considerar el suelo húmedo por lluvia antecedente resulta de 4.33 m (86.6% de su capacidad).
- En tiempos de lluvias la cuenca del río Sabinal tiene una precipitación recurrente de 31.8 mm asociado con un periodo de retorno de 8 años. De los eventos analizados se observó que el más recurrente a presentarse es el que considera una precipitación promedio de 50.5 mm asociado con un periodo de retorno de 31 años. Sin embargo, el evento que registró la mayor afectación fue el que se presentó en la zona norte de Tuxtla Gutiérrez (2 de septiembre del 2016) con una precipitación promedio de 81.5 mm asociado con un periodo de retorno de 243 años.
- Entre los resultados del modelo hidráulico 1D están los tiempos y ubicación de los desbordamientos a lo largo del río, y del modelo hidráulico 2D se obtienen

datos de tirantes y velocidades que permiten generar los mapas de peligro por inundación; ambos resultados son esenciales para generar medidas no estructurales para control de avenidas.

- El modelo hidráulico bidimensional (2D) permitió identificar las colonias y sitios afectados con lluvias que en promedio oscilan de los 50.5 mm a los 81.5 mm sobre la cuenca del río Sabinal presentándose las siguientes:
 - Colonia 24 de junio
 - Colonia 14 de enero
 - Colonia los laureles
 - Colonias las palmas
 - Colonia Fovissste
 - El libramiento norte a la altura de la PGJE
 - El libramiento norte a la altura de las torres
 - El colector Potinaspak
 - El colector Totoposte

8.2 Recomendaciones

- Se requiere que el modelo hidráulico 1D tenga una constante calibración debido a la variación del uso de suelo, para lo cual se deben actualizar los parámetros de las subcuencas como el porcentaje de impermeabilidad, coeficiente de rugosidad, así como la máxima y mínima infiltración.
- Se debe contar con un levantamiento de la infraestructura pluvial existente que permita obtener una mejor representación de los escurrimientos a través del sistema de drenaje pluvial.
- Se requiere contar con un levantamiento topográfico de alta resolución que permita la representación de los escurrimientos superficiales en el modelo hidráulico 1D-2D y por ende la generación de los mapas de peligro por inundación.
- La simulación del modelo hidráulico 1D-2D con distintos escenarios de lluvia sobre la cuenca del río Sabinal permitirá obtener gráficos, tablas y mapas que podrán ser utilizados como medidas preventivas para la identificación de sitios que son propensos a daños.

- El simular un modelo hidráulico 1D-2D con el uso del modelo WRF v3.6.1 e información pluviométrica medida desde la superficie, permite contar con una nueva forma de *predicción hidrológica* utilizando las redes de monitoreo hidrometeorológico, que puede ser adaptada y utilizada a las diferentes zonas urbanas de México.

9 BIBLIOGRAFÍA

- Acosta C., L., & Pérez H., J. (2011). *El radar meteorológico como herramienta para la medición de precipitación espacialmente distribuida*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Albuja S., E. C., & Tenelanda P., D. O. (2014). *Desarrollo de un modelo conceptual de lluvia-escorrentía para la interpretación de procesos hidrológicos en la cuenca altoandina del río Zhuruca*. Cuenca-Ecuador: Universidad de cuenca.
- Alcocer Y., V. H., Rodríguez V., J. M., Bourguett O., V. J., Llaguno G., O. J., & Albornoz G., P. M. (2016). Metodología para la generación de mapas de riesgo por inundación en zonas urbanas. *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. VII núm. 5, 33-55.
- Alcocer Yamanaka, V. H. (2007). *Flujo estocástico y transporte en redes de distribución de agua potable*. Morelos: UNAM.
- Alcocer-Yamanaka, V. H., Albornoz M., P., Maldonado J., J., López J., J., Alonso J., A., & Quiñones J., R. (2012). Manejo de aguas pluviales de la ciudad de Chetumal, Quintana Roo. *Agua en Quintana Roo*, 9-14.
- Aldana V., A. L. (2015). *BASES SPH 2015. Bases conceptuales y organizativas para los sistemas de predicción hidrológica*. Madrid, España: Angel Luis Aldana Valverde.
- Alexander, M. B. (2015). *Métodos numéricos para la predicción de inundaciones*. Panamá, Panamá: Journal of Undergraduate Research.
- Aparicio Mijares, F. J. (1992). *Fundamentos de Hidrología de superficie*. México, D.F.: LIMUSA,S.A. de C.V.
- ASCE. (1992). *Design & Construction of Urban Stormwater Management Systems*, New York. New York, NY: ASCE.
- Atlas, D.; Rosenfeld, D.; Jameson, A.;. (1997). Evolution of radar measurements: Steps and mis-Steps. *Water Resources Management*, 3-67.
- Baldemar M, A. (2005). *Aplicación hidrológica de los radares meteorológicos*. México, D.F.: UNAM.
- Battan, L. (1973). Radar Observation of the Atmosphere. *University of Chicago Press Chicago, IL*, 324.
- Becerra Soriano, L. (2009). *Estimación de lluvia en el distrito federal utilizando datos de pluviógrafos y de radar meteorológico*. D.F.: UNAM.
- Blanchard D, C. (1953). Raindrop size distribution in Hawaiian rains. *Journal of Meteorology*, Núm. 10 457-73.
- Brevnova E. (2001). *Green - Ampt infiltration model parameter determination using SCS Curve number (CN) and soil texture class, and application to the SCS Runoff Model*. West Virginia University, USA 158 p.: Thesis submitted for the

- degree of master of Science in Civil Engineering, Colege of Enginieering and Mineral Resources.
- Calheiros , V., & Zawadzky, I. (1987). Reflectivity-Rain Rate relationship for Radar Hydrology in Brazil. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 26, 118-132 .
- Campillo Díaz, N. (2009). *Utilización de datos de lluvia distribuidos en estudios hidrológicos de inundación. Aplicación con HEC-HMS*. Barcelona: UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA.
- Campos A, F. (1992). *Procesos del ciclo hidrológico*. San Luis Potosí: Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Campos A., D. F. (2015). *Introducción a la hidrología Urbana*. San Luis Potosí: Daniel Francisco Campos Aranda.
- Cdmx. (2018). *CDMX. Ciudad de México*. Obtenido de <http://www.cdmx.gob.mx>
- Cenapred. (2013). *Cenapred*. Recuperado el 11 de junio de 2013, de http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=78&Itemid=190
- Cenapred. (2014). *Atlas Nacional de Riesgos*. Ciudad de México: Protección Civil Federal.
- Cenapred. (2015). *Impacto Socioeconómico de los Desastres en México durante 2015*. Ciudad de México: Cenapred.
- Cenapred. (2016). *Comparación y verificación de los modelos numéricos de pronóstico del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua y del Servicio Meteorológico Nacional para la variable de precipitación en 2015*. Ciudad de México: Cenapred.
- Cenapred. (2016). *Descripción de los fenómenos hidrometeorológicos. Subdirección de Riesgos Hidrometeorológicos*. Ciudad de México: Cenapred.
- Chiapas, G. d. (2017). *Gobierno del estado de Chiapas*. Obtenido de <http://www.chiapas.gob.mx>
- Collier G., C. (1996). *Applications of Weather Radar Systems*. Chichester/London: John Wiley And Sons .
- Computational Hydraulics International. (2017). *CHI. Computational Hydraulics International. PCSWMM Support*. Obtenido de <https://support.chiwater.com>
- Conagua. (1987). *Instructivo de hidrología para determinar la avenida máxima ordinaria asociada a la delimitación de la zona federal*. D.F.
- Conagua. (2011). *Manual para el control de inundaciones*. México, D.F.: Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Conagua. (Agosto de 2011). Riesgos de inundación en México. *Tercer Seminario Internacional de Potamología*. Chiapas, México. Obtenido de https://www.imta.gob.mx/potamologia/images/stories/ponencias_tercer_seminario/seminario/felipe_arreguin/riesgosinundacionmexico25082011vb.pdf
- Conagua. (2017). *Comisión Nacional del Agua*. Obtenido de <http://smn1.conagua.gob.mx>

- Doviak, R., & Zrníc, D. (1984). *Doppler Radar and Weather Observations*. San Diego, CA: Academic Press.
- El Universal. (12 de agosto de 2015). *El Universal*. Obtenido de <http://www.eluniversal.com.mx>
- El Universal. (23 de junio de 2017). Obtenido de <http://www.eluniversal.com.mx>
- EPA. (2009). *Storm Water Management Model Applications Manual*. Cincinnati, OH: U.S. Environmental Protection Agency.
- EPA. (2015). *Storm Water Management Model. User's Manual Version 5.1*. Cincinnati, OH: United States Environmental Protection Agency.
- Expreso Chiapas. (2 de Septiembre de 2016). *Expreso Chiapas*. Obtenido de Expreso Chiapas: <http://expresochiapas.com>
- FEMA. (2009). *Federal Emergency Management Agency. Recuperado el 2010 de Abril de 01, de Federal Emergency Management Agency*. Obtenido de <https://www.fema.gov>
- Flo-2d. (2018). *Flo-2d*. Obtenido de www.flo-2d.com
- Fuentes Mariles, O. A. (2011). *Estimación de peligro y vulnerabilidad por inundaciones en zonas urbanas*. Ciudad Universitaria, 28 de noviembre del 2011: Semana de Riesgos Naturales y Antropogénicos, Instituto de Ingeniería, UNAM.
- García Salas, J. C. (2007). *Descripción de las capacidades de programas comerciales para la simulación de flujo a superficie libre*. Jiutepec, Morelos: IMTA-IHS.
- Garrido, M. M. (2012). *Integración de herramientas informáticas para la alerta temprana ante el peligro de inundaciones*. La Habana, Cuba.
- Gieck, K. (1981). *Manual de fórmulas técnicas*. México D.F.: Rep y Servicios de Ingeniería S.A.
- Gómez, L. (2007). *Modelización de la turbulencia en aguas poco profundas*. E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Coruña. España: Universidad de A coruña.
- Gómez, V. M. (2006). *Notas del seminario de Hidrología Urbana*. Morelia, Michoacán, 322 P. , 12 a 14 de julio: Universidad de Cataluña.
- H. Ayuntamiento de Tuxtla Gutiérrez. (2017). *Reglamento De Construcción Para El Municipio De Tuxtla Gutiérrez*. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas: Periódico Oficial del Estado. No 310.
- Iber. (2018). *Iber*. Obtenido de <http://iberaula.es/>
- IMTA. (2013). *Servicios especializados en el desarrollo de herramientas de meteorología operativa*. Jiutepec, Morelos: IMTA.
- IMTA. (2014 a). *Estudio Geohidrológico y de escorrentía para la prevención de inundaciones en la zona costera de Puerto Morelos*. HC1448.3. Jiutepec, Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- IMTA. (2014 b). *Estudio Hidrológico para el pronóstico en ríos en cuencas del Organismo de Cuenca Pacífico Sur*. Jiutepec, Morelos: IMTA.

- IMTA. (2015). *Estudio de riegos de inundaciones en zonas urbanas de la República Mexicana*. Jiutepec, Morelos: IMTA-Conagua-Conacyt.
- IMTA. (2016 a). *Implementación del modelo acoplado WRF-Hydro en una cuenca piloto de México*. Jiutepec, Morelos: IMTA.
- IMTA. (2016 b). *Servicios de asistencia especializada de cartas meteorológicas por ensamble del modelo Weather Research and Forecasting (WRF) y análisis hidrometeorológico*. Jiutepec, Morelos: IMTA.
- IMTA. (2018). *Galileo IMTA*. Obtenido de <http://galileo.imta.mx>
- INEGI. (2017). *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. Obtenido de <http://www.inegi.org.mx>
- INEGI. (2018). *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. Obtenido de <http://cuentame.inegi.org.mx>
- INIFAP. (23 de Enero de 2018). *Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación*. Obtenido de <http://clima.inifap.gob.mx>
- Ivanov, V., Vivoni, E., Brass, R., & Entekhabi, D. (2004). Preserving high-resolution surface and rainfall data in operational-scale basin hydrology: a fully-distributed physically based approach. *Journal of Hydrology*, 80-111.
- James, W. (2005). *Rules for Responsible Modeling*. Guelph, Ontario: Computational Hydraulics International.
- Jones A, D. M. (Abril de 1956). Rainfall drop-size distribution and radar reflectivity. University of Illinois Urbana, Illinois, USA: Meteorology Laboratory at the University of Illinois Urbana, Illinois.
- Kitanidis, P. (1997). *Introduction to GEOSTATISTICS Applications in hydrogeology*. Cambridge: Published by the press syndicate of the University of Cambridge.
- Llaguno G., O. J. (2014). *Generación de Mapas de Riesgo considerando la topografía urbana, aplicado a la Ciudad de Oaxaca de Juárez, Oaxaca*. Jiutepec, Morelos: UNAM.
- Loat, R., & Petrascheck, A. (1997). *Prise en compte des dangers dus aux crues dans la cadre des activités de l'aménagement du territoire, Dangers Naturels*. Bienne: Office Fédéral de l'Economie des Eaux (OFEE), Office Fédéral de l'Aménagement du Territoire (OFAT), Office Fédéral de l'Environnement des Forêts et du Paysage (OFEFP).
- Magaña H., F., Khalidou M., B., & Guerra C., V. H. (2013). Estimación del hidrograma de crecientes con modelación determinística y precipitación derivada de radar. *Agrociencia*, 739-752.
- MAPAS. (2015). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Drenaje Pluvial urbano*. México, D.F.: Conagua.
- Marshall J, S., & Palmer W, M. K. (1948). The distribution of raindrops with size. *Journal of Meteorology*, Vol. 5, 165-166.

- Masch, F. D. (1985). Hydrology. Chapter 8: Urbanization and other factors affecting peak discharge and hydrographs. En F. H. Transportation. Virginia, USA: Federal Highway Administration of the U.S. Department of Transportation.
- Méndez, A. B., Mora, R. D., Rueda, V. M., E. C., & Elizondo, E. C. (2006). Calibración hidrológica de radares meteorológicos. *ResearchGate*.
- MetEd. (2017). *MetEd*. Obtenido de <https://www.meted.ucar.edu/>
- Molnar, P. (2011). *Calibration Watershed Modelling. SS 2011*. ETH Zürich. Switzerland: Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management.
- Nanía, L. S. (1999). *Metodología Numérico Experimental para el análisis del riesgo asociado a la escorrentía pluvial en una red de calles. Tesis doctoral*. Barcelona: Universidad Polytechnica de Catalunya.
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual model. *Journal of Hydrology*, 282-290.
- NOAA. (Febrero de 2018). *National Oceanic & Atmospheric Administration*. Obtenido de Hurricane Research Division. Atlantic Oceanographic & Meteorological Laboratory: <http://www.aoml.noaa.gov>
- Océano-Atmósfera-CCA-UNAM, G. I. (23 de Enero de 2018). *PEMEX. EXPLORACIÓN Y PRODUCCIÓN*. Obtenido de <http://grupo-ia.atmosfera.unam.mx>
- Rodríguez V., H. G. (2012). *Inundaciones en zonas urbanas. Medidas preventivas y correctivas, acciones estructurales y no estructurales*. Cuernavaca, Morelos: UNAM.
- Rosenfeld, D., Atlas, D., & Short, D. (1990). The Estimate of Convective Rainfall by Area Integrals. Part II: The Height-Area Threshold (HART) Method. *Journal of Geophysical Research*, 95, D3, 2161-2176.
- Russo, B., Llorca, X., Sánchez, P., & Rodríguez, A. (2017). Integración de nowcasting radar y modelización 1D/2D en un sistema de alerta temprana para inundaciones en medio urbano. *JIA*, 1-10.
- sinembargo.mx. (4 de Septiembre de 2016). *sinembargo.mx*. Obtenido de <http://www.sinembargo.mx>
- SMN. (2017). *Servicio Meteorológico Nacional*. Obtenido de <http://smn.cna.gob.mx>
- Streeter L, V., & E, B. (1994). *Mecánica de fluidos*. México D.F.: McGRAW-HILL.
- UPC, C. y. (2017). *Centro de Recerca Aplicada en Hidrometeorologia*. Obtenido de <http://www.crahi.upc.edu>
- Vargas G., C. (2016). *Modelación y calibración del proceso lluvia y escurrimiento en una cuenca urbana, para la generación de mapas de peligro de inundación*. Ciudad de México: UNAM.

10 Anexo A. Datos de lluvia asignados a las celdas del modelo WRF v3.6.1

1) Evento del 2 de septiembre del 2016

	ID	1
Hora	Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)
01:00	0.0	0.00
01:10	0.8	0.47
01:20	0.8	0.00
01:30	0.8	0.00
01:40	0.7	0.00
01:50	0.8	23.71
02:00	0.8	39.21
02:10	0.8	30.33
02:20	0.6	10.90
02:30	0.7	16.06
02:40	0.8	32.60
02:50	0.9	6.68
03:00	1.0	9.88
03:10	1.2	7.61
03:20	0.9	5.12
03:30	1.5	7.39
03:40	2.3	13.65
03:50	1.0	5.23
04:00	0.9	4.81
04:10	1.0	5.42
04:20	1.0	6.16
04:30	1.0	3.55
04:40	1.0	0.58
04:50	0.9	0.57

	ID	2
Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)	
1.0	0.00	
1.0	0.90	
1.0	13.20	
1.0	55.80	
1.0	64.50	
1.0	69.30	
1.0	72.00	
1.0	56.40	
1.0	30.30	
1.0	22.50	
1.0	10.20	
1.0	8.70	
1.0	6.30	
1.0	3.60	
1.0	4.80	
1.0	5.70	
1.0	5.10	
1.0	5.10	
1.0	5.10	
1.0	2.70	
1.0	1.20	
1.0	0.30	
1.0	0.00	
1.0	0.00	

	ID	3
Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)	
1.0	0.00	
1.0	1.80	
1.0	25.80	
1.0	111.60	
1.0	103.80	
1.0	30.60	
1.0	39.00	
1.0	34.20	
1.0	24.60	
1.0	12.00	
1.0	12.00	
1.0	8.40	
1.0	4.20	
1.0	1.80	
1.0	3.60	
1.0	7.20	
1.0	6.00	
1.0	3.60	
1.0	3.00	
1.0	1.20	
1.0	0.00	
1.0	0.00	
1.0	0.00	
1.0	0.00	

	ID	4
Hora	Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)
01:00	0.0	0.00
01:10	0.7	0.42
01:20	1.3	0.00
01:30	0.8	0.00
01:40	0.7	0.00
01:50	0.7	21.68
02:00	0.8	40.20
02:10	1.0	39.36
02:20	1.2	20.78
02:30	1.2	28.94
02:40	1.3	51.29

	ID	5
Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)	
0.0	0.00	
0.7	0.44	
0.8	0.00	
0.8	0.00	
0.7	0.00	
0.7	22.78	
0.8	38.77	
0.9	36.95	
1.1	17.91	
1.1	25.30	
1.1	44.73	

	ID	6
Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)	
0.0	0.00	
0.7	0.43	
0.7	0.00	
0.7	0.00	
0.7	0.00	
0.7	22.46	
0.8	40.69	
0.9	36.51	
0.9	15.56	
0.9	22.06	
1.0	37.67	

	ID	4
Hora	Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)
02:50	1.5	10.69
03:00	1.6	15.72
03:10	1.6	10.63
03:20	1.2	6.44
03:30	1.1	5.39
03:40	1.2	7.29
03:50	0.5	2.49
04:00	0.5	2.48
04:10	0.3	1.52
04:20	0.6	3.63
04:30	0.7	2.68
04:40	0.8	0.50
04:50	0.9	0.54

	ID	5
Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)	
1.3	9.14	
1.3	12.65	
1.4	8.96	
1.1	5.87	
1.0	4.64	
1.7	10.27	
1.0	5.48	
0.8	4.44	
0.7	3.93	
0.8	5.03	
0.9	3.19	
0.9	0.56	
0.9	0.57	

	ID	6
Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)	
1.0	7.53	
1.1	10.90	
1.2	7.68	
0.9	5.01	
1.5	6.99	
2.4	14.18	
1.0	5.57	
1.0	5.20	
1.0	5.31	
1.0	5.93	
1.0	3.50	
1.0	0.59	
1.0	0.59	

	ID	7
Hora	Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)
01:00	0.0	0.00
01:10	0.7	0.43
01:20	0.7	0.00
01:30	0.7	0.00
01:40	0.7	0.00
01:50	0.7	22.18
02:00	0.9	45.71
02:10	1.0	38.69
02:20	0.7	12.36
02:30	0.8	19.03
02:40	0.8	30.38
02:50	0.8	5.52
03:00	0.9	8.42
03:10	0.9	6.20
03:20	0.9	5.10
03:30	1.2	5.84
03:40	1.5	9.02
03:50	1.2	6.69
04:00	1.3	7.06
04:10	1.1	6.16
04:20	1.1	6.54
04:30	1.0	3.74
04:40	1.0	0.60
04:50	1.0	0.60

	ID	8
Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)	
1.0	0.00	
1.0	0.00	
1.0	0.60	
1.0	0.00	
1.0	25.20	
1.0	108.00	
1.0	105.00	
1.0	78.60	
1.0	36.00	
1.0	33.00	
1.0	8.40	
1.0	9.00	
1.0	8.40	
1.0	5.40	
1.0	6.00	
1.0	4.20	
1.0	4.20	
1.0	6.60	
1.0	7.20	
1.0	4.20	
1.0	2.40	
1.0	0.60	
1.0	0.00	
1.0	0.00	

	ID	9
Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)	
1.0	0.00	
1.0	0.60	
1.0	8.80	
1.0	60.40	
1.0	84.00	
1.0	82.60	
1.0	60.20	
1.0	51.40	
1.0	35.00	
1.0	21.40	
1.0	9.80	
1.0	10.20	
1.0	6.20	
1.0	3.60	
1.0	4.40	
1.0	5.40	
1.0	5.60	
1.0	5.60	
1.0	4.80	
1.0	2.60	
1.0	1.00	
1.0	0.20	
1.0	0.00	
1.0	0.00	

	ID	10
Hora	Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)
01:00	1.0	0.90
01:10	1.0	29.85
01:20	1.0	58.65
01:30	1.0	72.15
01:40	1.0	70.35
01:50	1.0	51.75
02:00	1.0	61.35
02:10	1.0	46.35
02:20	1.0	31.95
02:30	1.0	17.70
02:40	1.0	11.85
02:50	1.0	6.15
03:00	1.0	3.75
03:10	1.0	3.15
03:20	1.0	5.40
03:30	1.0	7.95
03:40	1.0	6.00
03:50	1.0	3.30
04:00	1.0	2.25
04:10	1.0	0.60
04:20	1.0	0.15
04:30	1.0	0.15
04:40	1.0	0.00
04:50	1.0	0.00

	ID	11
Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)	
0.0	0.00	
0.8	0.49	
0.7	0.00	
0.7	0.00	
0.8	0.00	
0.8	25.52	
1.1	52.30	
1.3	51.52	
1.8	29.43	
1.6	37.51	
1.6	61.11	
1.7	12.33	
1.9	17.82	
1.7	10.98	
1.3	7.16	
1.4	6.62	
1.5	8.76	
0.5	2.64	
0.4	1.99	
0.3	1.59	
0.4	2.45	
0.7	2.36	
0.8	0.47	
0.9	0.52	

	ID	12
Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)	
0.0	0.00	
0.8	0.49	
0.8	0.00	
0.8	0.00	
0.8	0.00	
0.8	26.30	
1.1	51.91	
1.2	47.44	
1.5	25.17	
1.4	34.15	
1.5	56.67	
1.6	11.31	
1.6	15.32	
1.5	9.81	
1.3	6.95	
1.3	6.02	
1.2	7.42	
0.4	2.22	
0.3	1.68	
0.5	2.73	
0.7	4.04	
0.8	2.91	
0.9	0.52	
0.9	0.55	

	ID	13
Hora	Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)
01:00	0.0	0.00
01:10	1.0	0.57
01:20	1.0	0.00
01:30	1.0	0.00
01:40	0.9	0.00
01:50	1.0	29.89
02:00	1.1	53.73
02:10	1.2	46.85
02:20	1.3	21.67
02:30	1.3	30.48
02:40	1.3	49.84
02:50	1.3	9.64
03:00	1.3	12.27
03:10	1.3	8.40
03:20	1.2	6.31
03:30	1.1	5.40

	ID	14
Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)	
1.0	0.00	
1.0	0.60	
1.0	0.00	
1.0	0.00	
1.0	0.00	
1.0	31.20	
1.0	49.20	
1.0	39.60	
1.0	16.80	
1.0	24.00	
1.0	39.00	
1.0	7.20	
1.0	9.60	
1.0	6.60	
1.0	5.40	
1.0	4.80	

	ID	15
Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)	
0.8	0.00	
0.8	5.04	
0.8	21.52	
0.9	35.69	
1.0	62.86	
0.9	56.08	
0.9	48.58	
0.9	63.98	
0.7	42.11	
0.8	28.92	
0.9	29.50	
0.9	10.74	
0.9	5.70	
0.9	4.07	
1.0	5.28	
0.7	4.14	

	ID	13
Hora	Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)
03:40	1.1	6.59
03:50	0.5	2.61
04:00	0.7	3.88
04:10	0.7	4.04
04:20	0.8	4.96
04:30	0.9	3.23
04:40	0.9	0.56
04:50	1.0	0.58

	ID	14
Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)	
1.0	6.00	
1.0	5.40	
1.0	5.40	
1.0	5.40	
1.0	6.00	
1.0	3.60	
1.0	0.60	
1.0	0.60	

	ID	15
Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)	
0.5	2.77	
0.7	3.34	
0.8	3.11	
0.9	2.67	
0.9	1.79	
1.0	1.00	
1.0	0.14	
0.9	0.28	

	ID	16
Hora	Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)
01:00	1.0	0.00
01:10	1.0	4.40
01:20	1.0	41.00
01:30	1.0	56.20
01:40	1.0	84.00
01:50	1.0	64.20
02:00	1.0	46.00
02:10	1.0	68.20
02:20	1.0	63.80
02:30	1.0	37.80
02:40	1.0	25.20
02:50	1.0	12.00
03:00	1.0	5.60
03:10	1.0	4.40
03:20	1.0	4.20
03:30	1.0	5.60
03:40	1.0	6.80
03:50	1.0	5.00
04:00	1.0	3.40
04:10	1.0	2.00
04:20	1.0	0.40
04:30	1.0	0.20
04:40	1.0	0.00
04:50	1.0	0.00

	ID	17
Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)	
1.0	0.60	
1.0	51.60	
1.0	48.60	
1.0	28.80	
1.0	17.40	
1.0	62.40	
1.0	111.60	
1.0	72.60	
1.0	52.20	
1.0	30.00	
1.0	17.40	
1.0	8.40	
1.0	3.00	
1.0	3.00	
1.0	7.80	
1.0	7.80	
1.0	5.40	
1.0	3.00	
1.0	2.40	
1.0	0.00	
1.0	0.00	
1.0	0.60	
1.0	0.00	
1.0	0.00	

	ID	18
Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)	
0.0	0.00	
1.3	79.19	
1.3	177.41	
1.3	85.57	
1.3	45.76	
1.1	41.65	
1.0	57.17	
1.0	49.25	
1.2	35.08	
1.2	18.91	
1.1	9.63	
0.8	2.99	
1.0	3.67	
1.0	3.77	
1.3	7.77	
1.7	15.45	
1.7	9.94	
1.5	3.54	
1.0	0.00	
1.0	0.57	
1.0	0.00	
1.0	0.00	
1.0	0.00	
0.9	0.00	

	ID	19
Hora	Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)
01:00	0.0	0.00
01:10	1.0	0.59
01:20	1.0	0.00
01:30	1.0	0.00
01:40	1.0	0.00

	ID	20
Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)	
0.0	0.00	
1.1	0.64	
1.1	0.00	
1.1	0.00	
1.1	0.00	

	ID	21
Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)	
0.0	0.00	
1.2	0.71	
1.2	0.00	
1.2	0.00	
1.2	0.00	

	ID	19
Hora	Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)
01:50	1.2	37.91
02:00	1.5	72.37
02:10	1.7	66.65
02:20	2.2	36.72
02:30	1.9	44.93
02:40	1.8	69.97
02:50	1.9	13.95
03:00	1.9	18.69
03:10	1.8	12.03
03:20	1.5	8.18
03:30	1.5	7.32
03:40	1.6	9.79
03:50	0.6	3.14
04:00	0.4	2.31
04:10	0.3	1.53
04:20	0.4	2.21
04:30	0.6	2.13
04:40	0.8	0.46
04:50	0.8	0.51

	ID	20
Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)	
1.2	37.53	
1.4	71.19	
1.6	64.11	
2.0	33.58	
1.8	42.19	
1.7	65.95	
1.8	13.12	
1.8	16.98	
1.7	11.23	
1.4	7.72	
1.3	6.39	
1.3	8.00	
0.5	2.61	
0.4	2.05	
0.5	2.96	
0.7	4.31	
0.8	2.90	
0.9	0.52	
0.9	0.54	

	ID	21
Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)	
1.2	38.03	
1.5	71.83	
1.6	62.17	
1.8	30.69	
1.6	38.35	
1.5	59.12	
1.6	11.69	
1.5	14.87	
1.5	10.20	
1.3	7.10	
1.1	5.44	
1.1	6.72	
0.4	2.15	
0.8	4.54	
0.9	4.89	
0.9	5.50	
0.9	3.32	
0.9	0.56	
0.9	0.57	

	ID	22
Hora	Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)
01:00	0.0	0.00
01:10	1.4	9.81
01:20	1.4	36.39
01:30	0.9	19.42
01:40	1.0	32.51
01:50	1.0	51.61
02:00	1.0	66.14
02:10	1.0	77.70
02:20	1.0	53.34
02:30	1.0	42.08
02:40	1.1	44.70
02:50	1.4	14.92
03:00	1.4	9.96
03:10	1.3	6.28
03:20	1.3	7.61
03:30	0.7	3.84
03:40	0.4	1.90
03:50	0.6	3.07
04:00	0.8	3.12
04:10	0.8	3.22
04:20	0.8	2.77

	ID	23
Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)	
0.0	0.00	
1.2	16.81	
1.2	65.04	
0.9	35.85	
0.9	61.64	
1.0	64.71	
0.9	72.15	
0.9	100.86	
0.8	67.47	
0.8	48.72	
0.9	37.67	
1.1	15.79	
1.1	5.47	
1.1	3.22	
1.2	7.78	
0.5	2.94	
0.6	2.66	
0.7	3.10	
0.9	2.13	
0.9	2.18	
0.9	0.54	

	ID	24
Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)	
1.0	0.00	
1.0	12.90	
1.0	56.40	
1.0	40.50	
1.0	66.00	
1.0	56.40	
1.0	68.40	
1.0	108.30	
1.0	92.70	
1.0	53.70	
1.0	43.50	
1.0	12.90	
1.0	4.80	
1.0	4.20	
1.0	6.30	
1.0	6.90	
1.0	5.70	
1.0	4.20	
1.0	2.70	
1.0	2.10	
1.0	0.60	

	ID	22
Hora	Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)
04:30	0.9	1.85
04:40	0.9	0.27
04:50	0.9	0.27

	ID	23
Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)	
0.9	0.54	
0.9	0.00	
0.9	0.00	

	ID	24
Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)	
1.0	0.30	
1.0	0.00	
1.0	0.30	

	ID	25
Hora	Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)
01:00	0.7	0.14
01:10	1.0	26.75
01:20	1.1	58.32
01:30	1.1	40.59
01:40	1.2	58.76
01:50	1.2	68.27
02:00	1.2	99.03
02:10	1.3	120.98
02:20	1.2	97.42
02:30	1.1	50.56
02:40	1.6	54.25
02:50	1.4	16.12
03:00	1.3	5.48
03:10	1.4	5.27
03:20	1.3	9.00
03:30	1.4	10.18
03:40	1.5	8.52
03:50	1.3	4.81
04:00	1.1	2.87
04:10	1.1	1.53
04:20	1.1	0.43
04:30	1.1	0.42
04:40	1.0	0.00
04:50	1.1	0.21

	ID	26
Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)	
0.0	0.00	
1.2	0.71	
1.2	0.00	
1.2	0.00	
1.2	0.00	
1.5	47.30	
1.8	90.58	
2.1	83.48	
2.6	43.08	
2.1	50.98	
2.0	76.99	
2.0	14.36	
2.0	19.57	
2.0	13.21	
1.6	8.57	
1.6	7.53	
1.6	9.67	
0.6	3.25	
0.4	2.04	
0.2	0.97	
0.4	2.20	
0.6	2.01	
0.7	0.43	
0.8	0.48	

	ID	27
Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)	
0.0	0.00	
1.3	0.78	
1.3	0.00	
1.3	0.00	
1.3	0.00	
1.5	47.55	
1.7	84.62	
1.9	75.16	
2.3	37.93	
2.0	48.34	
1.8	72.07	
1.8	13.27	
1.9	18.00	
1.8	12.08	
1.4	7.47	
1.3	6.28	
1.2	7.40	
0.5	2.55	
0.4	1.90	
0.6	2.97	
0.7	4.12	
0.8	2.74	
0.8	0.49	
0.9	0.51	

	ID	28
Hora	Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)
01:00	0.0	0.00
01:10	1.4	0.85
01:20	1.4	0.00
01:30	1.4	0.00
01:40	1.4	0.00
01:50	1.5	45.58
02:00	1.6	79.26
02:10	1.7	66.05
02:20	1.9	32.71
02:30	1.8	43.99

	ID	29
Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)	
0.0	0.00	
1.1	8.11	
1.1	30.09	
1.1	23.33	
1.1	34.98	
1.7	82.07	
1.2	73.87	
1.2	90.75	
1.2	61.79	
1.2	49.22	

	ID	30
Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)	
0.0	0.00	
1.7	23.64	
1.7	91.47	
0.8	33.74	
0.9	56.17	
1.2	80.84	
1.0	80.33	
1.1	126.22	
1.0	91.73	
1.0	61.80	

	ID	28
Hora	Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)
02:40	1.7	66.34
02:50	1.7	12.12
03:00	1.7	16.41
03:10	1.7	11.02
03:20	1.2	6.70
03:30	1.1	5.24
03:40	1.1	6.38
03:50	0.5	2.75
04:00	1.0	5.33
04:10	1.0	5.59
04:20	1.0	5.96
04:30	0.9	3.15
04:40	0.9	0.52
04:50	0.9	0.54

	ID	29
Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)	
1.3	50.93	
1.6	16.85	
1.7	12.05	
1.5	7.03	
1.3	7.74	
0.7	3.82	
0.3	1.64	
0.8	3.98	
1.0	3.80	
1.0	3.80	
0.9	3.12	
0.9	1.89	
0.9	0.27	
0.9	0.27	

	ID	30
Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)	
1.1	45.33	
1.4	19.46	
1.5	7.25	
1.3	3.77	
1.3	8.75	
0.5	2.87	
0.8	3.94	
0.8	3.56	
0.9	2.06	
0.9	2.08	
0.9	0.53	
0.9	0.55	
0.9	0.00	
0.8	0.00	

	ID	31
Hora	Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)
01:00	0.0	0.00
01:10	1.3	17.68
01:20	1.3	68.41
01:30	0.7	30.51
01:40	0.9	60.72
01:50	1.1	72.04
02:00	1.2	92.75
02:10	1.3	150.54
02:20	1.3	117.75
02:30	1.2	71.82
02:40	1.2	48.27
02:50	1.3	17.60
03:00	1.3	6.32
03:10	1.2	3.71
03:20	1.3	8.30
03:30	2.0	11.74
03:40	1.2	5.65
03:50	1.0	4.14
04:00	0.9	2.22
04:10	0.9	2.22
04:20	0.9	0.56
04:30	0.9	0.57
04:40	0.9	0.00
04:50	0.8	0.00

	ID	32
Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)	
0.0	0.00	
1.4	10.20	
1.4	37.81	
1.4	29.31	
1.4	45.18	
1.4	68.04	
1.4	87.42	
1.5	115.38	
1.6	84.37	
1.6	65.56	
1.6	65.20	
2.0	21.35	
2.1	15.15	
1.7	8.04	
1.3	7.85	
0.7	3.87	
0.3	1.42	
0.2	0.78	
0.5	2.09	
0.7	2.54	
0.7	2.23	
0.7	1.43	
0.7	0.21	
0.7	0.22	

	ID	33
Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)	
0.0	0.00	
1.2	16.37	
1.2	63.33	
1.2	49.10	
1.1	71.21	
1.2	80.10	
1.2	94.40	
1.2	134.56	
1.1	94.20	
1.1	66.24	
1.3	52.66	
2.1	28.46	
2.2	10.66	
1.5	4.59	
1.5	9.60	
0.5	2.93	
0.1	0.53	
0.5	2.15	
0.6	1.46	
0.6	1.53	
0.6	0.38	
0.6	0.38	
0.7	0.00	
0.7	0.00	

2) Evento del 23 de junio del 2017

	ID	1
Hora	Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)
11:30:00 p. m.		0.00
11:40:00 p. m.	1.1	15.41
11:50:00 p. m.	1.1	165.09
12:00:00 a. m.	1.1	67.75
12:10:00 a. m.	1.1	47.35
12:20:00 a. m.	1.1	33.38
12:30:00 a. m.	1.0	17.96
12:40:00 a. m.	1.0	12.71
12:50:00 a. m.	1.0	51.02
01:00:00 a. m.	1.1	11.08
01:10:00 a. m.	1.1	3.28
01:20:00 a. m.	1.1	1.91
01:30:00 a. m.	1.0	1.80
01:40:00 a. m.	0.9	1.12
01:50:00 a. m.	0.8	1.51
02:00:00 a. m.	0.8	1.96
02:10:00 a. m.	0.8	3.91
02:20:00 a. m.	0.8	3.33
02:30:00 a. m.	0.8	2.39
02:40:00 a. m.	0.8	1.47
02:50:00 a. m.	0.8	2.97
03:00:00 a. m.	0.8	2.92
03:10:00 a. m.	0.8	1.93
03:20:00 a. m.	0.8	2.46
03:30:00 a. m.	0.9	2.61
03:40:00 a. m.	0.9	2.19
03:50:00 a. m.	1.0	2.39
04:00:00 a. m.	1.1	3.23
04:10:00 a. m.	1.1	1.95
04:20:00 a. m.	1.1	0.64
04:30:00 a. m.	1.1	0.65
04:40:00 a. m.	1.1	0.00
04:50:00 a. m.	1.1	0.69

	ID	2
Sesgo (F.C.)		Lluvia(mm/hr)
		0.00
1.0		31.55
1.0		37.22
1.0		83.10
1.0		77.97
1.0		22.48
1.0		14.90
1.0		22.82
1.0		17.70
1.0		3.68
1.0		0.61
1.0		3.01
1.0		1.80
1.0		1.17
0.9		2.26
0.9		3.26
0.9		3.70
0.9		3.17
0.9		3.17
0.9		2.58
0.9		3.23
0.9		3.33
1.0		3.43
1.0		2.29
0.9		1.69
0.9		1.65
0.9		1.62
0.9		0.54
0.9		1.09
0.9		0.00
1.0		0.58
1.0		0.59
1.0		0.00

	ID	3
Sesgo (F.C.)		Lluvia(mm/hr)
		0.00
0.9		29.16
1.0		34.92
1.0		78.09
0.9		73.41
0.9		21.27
1.0		14.36
1.0		22.44
1.0		17.38
1.0		3.57
1.0		0.59
1.0		2.94
1.0		1.78
1.0		1.16
0.9		2.24
0.9		3.21
0.9		3.61
0.9		3.11
0.9		3.13
0.9		2.66
0.9		3.31
1.0		3.47
1.0		3.63
1.0		2.46
1.0		1.85
1.0		1.81
1.0		1.75
0.9		0.56
0.9		1.11
1.0		0.00
1.0		0.60
1.0		0.62
1.0		0.00

	ID	4
Hora	Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)
11:30:00 p. m.		0.00
11:40:00 p. m.	1.1	53.68
11:50:00 p. m.	1.1	34.48
12:00:00 a. m.	1.1	49.32
12:10:00 a. m.	1.1	19.73
12:20:00 a. m.	1.1	10.98

	ID	5
Sesgo (F.C.)		Lluvia(mm/hr)
		0.00
1.1		53.98
1.1		34.60
1.1		49.36
1.1		19.80
1.1		11.06

	ID	6
Sesgo (F.C.)		Lluvia(mm/hr)
		0.00
1.1		54.13
1.1		34.79
1.1		49.63
1.1		20.03
1.1		11.17

	ID	4
Hora	Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)
12:30:00 a. m.	1.1	24.92
12:40:00 a. m.	1.1	18.13
12:50:00 a. m.	1.1	35.65
01:00:00 a. m.	1.2	20.29
01:10:00 a. m.	1.2	5.54
01:20:00 a. m.	1.1	1.99
01:30:00 a. m.	1.0	1.26
01:40:00 a. m.	1.0	2.33
01:50:00 a. m.	0.9	2.12
02:00:00 a. m.	0.9	1.57
02:10:00 a. m.	0.9	2.59
02:20:00 a. m.	0.8	2.99
02:30:00 a. m.	0.8	2.41
02:40:00 a. m.	0.8	1.88
02:50:00 a. m.	0.8	2.79
03:00:00 a. m.	0.8	3.20
03:10:00 a. m.	0.8	2.71
03:20:00 a. m.	0.8	2.77
03:30:00 a. m.	0.8	3.54
03:40:00 a. m.	0.9	2.18
03:50:00 a. m.	1.0	1.81
04:00:00 a. m.	1.1	3.91
04:10:00 a. m.	1.1	2.72
04:20:00 a. m.	1.2	1.39
04:30:00 a. m.	1.2	0.70
04:40:00 a. m.	1.2	0.00
04:50:00 a. m.	1.2	0.71

	ID	5
Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)	
1.1	24.94	
1.1	17.89	
1.1	35.08	
1.2	20.22	
1.2	5.65	
1.2	2.07	
1.1	1.32	
1.0	2.46	
0.9	2.23	
0.9	1.65	
0.9	2.69	
0.9	3.07	
0.8	2.44	
0.8	1.89	
0.8	2.82	
0.8	3.25	
0.8	2.79	
0.8	2.86	
0.8	3.50	
0.9	2.13	
1.0	1.76	
1.1	3.82	
1.1	2.69	
1.2	1.38	
1.1	0.68	
1.1	0.00	
1.1	0.67	

	ID	6
Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)	
1.1	25.18	
1.1	18.04	
1.1	35.14	
1.2	20.18	
1.2	5.64	
1.2	2.09	
1.1	1.34	
1.1	2.53	
1.0	2.30	
0.9	1.68	
0.9	2.72	
0.9	3.08	
0.8	2.41	
0.8	1.89	
0.8	2.79	
0.8	3.17	
0.8	2.74	
0.8	2.83	
0.8	3.50	
0.9	2.13	
1.0	1.73	
1.0	3.70	
1.1	2.61	
1.1	1.35	
1.1	0.67	
1.1	0.00	
1.0	0.61	

	ID	7
Hora	Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)
11:30:00 p. m.		0.00
11:40:00 p. m.	1.1	54.03
11:50:00 p. m.	1.1	34.57
12:00:00 a. m.	1.1	49.23
12:10:00 a. m.	1.1	19.93
12:20:00 a. m.	1.1	11.22
12:30:00 a. m.	1.1	25.13
12:40:00 a. m.	1.1	17.69
12:50:00 a. m.	1.1	34.25
01:00:00 a. m.	1.1	19.58
01:10:00 a. m.	1.1	5.44
01:20:00 a. m.	1.1	2.01
01:30:00 a. m.	1.1	1.29

	ID	8
Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)	
	0.00	
1.0	24.19	
1.1	98.77	
1.1	76.54	
1.1	65.18	
1.1	28.67	
1.0	16.96	
1.0	18.32	
1.0	34.87	
1.1	7.41	
1.1	1.94	
1.1	2.56	
1.0	1.88	

	ID	9
Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)	
	0.00	
1.0	31.80	
1.0	36.60	
1.0	82.20	
1.0	78.60	
1.0	22.80	
1.0	15.00	
1.0	22.80	
1.0	17.40	
1.0	3.60	
1.0	0.60	
1.0	3.00	
1.0	1.80	

	ID	7
Hora	Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)
01:40:00 a. m.	1.0	2.51
01:50:00 a. m.	1.0	2.36
02:00:00 a. m.	0.9	1.70
02:10:00 a. m.	0.9	2.76
02:20:00 a. m.	0.9	3.22
02:30:00 a. m.	0.9	2.63
02:40:00 a. m.	0.9	2.14
02:50:00 a. m.	0.9	3.23
03:00:00 a. m.	0.9	3.66
03:10:00 a. m.	0.9	3.07
03:20:00 a. m.	0.9	3.08
03:30:00 a. m.	0.9	3.73
03:40:00 a. m.	0.9	2.22
03:50:00 a. m.	1.0	1.77
04:00:00 a. m.	1.0	3.69
04:10:00 a. m.	1.0	2.50
04:20:00 a. m.	1.0	1.24
04:30:00 a. m.	1.0	0.61
04:40:00 a. m.	1.0	0.00
04:50:00 a. m.	1.0	0.60

	ID	8
Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)	
1.0	1.23	
1.0	2.09	
1.0	2.91	
1.0	4.30	
0.9	3.70	
0.9	3.08	
0.9	2.23	
1.0	3.42	
0.9	3.36	
0.9	2.76	
0.9	2.47	
0.9	2.21	
0.9	1.98	
1.0	2.03	
1.0	1.77	
1.0	1.48	
1.0	0.30	
1.0	0.59	
1.0	0.29	
1.0	0.29	

	ID	9
Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)	
1.0	1.20	
1.0	2.40	
1.0	3.60	
1.0	4.20	
1.0	3.60	
1.0	3.60	
1.0	3.00	
1.0	3.60	
1.0	3.60	
1.0	3.60	
1.0	2.40	
1.0	1.80	
1.0	1.80	
1.0	1.80	
1.0	0.60	
1.0	1.20	
1.0	0.00	
1.0	0.60	
1.0	0.60	
1.0	0.00	

	ID	10
Hora	Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)
11:30:00 p. m.		0.00
11:40:00 p. m.	1.0	51.75
11:50:00 p. m.	1.0	69.45
12:00:00 a. m.	1.0	90.75
12:10:00 a. m.	1.0	62.55
12:20:00 a. m.	1.0	26.70
12:30:00 a. m.	1.0	24.00
12:40:00 a. m.	1.0	18.60
12:50:00 a. m.	1.0	9.45
01:00:00 a. m.	1.0	2.55
01:10:00 a. m.	1.0	0.75
01:20:00 a. m.	1.0	1.50
01:30:00 a. m.	1.0	1.35
01:40:00 a. m.	1.0	0.90
01:50:00 a. m.	1.0	1.50
02:00:00 a. m.	1.0	2.85
02:10:00 a. m.	1.0	4.50
02:20:00 a. m.	1.0	4.35
02:30:00 a. m.	1.0	3.30
02:40:00 a. m.	1.0	3.00

	ID	11
Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)	
	0.00	
1.1	55.19	
1.1	35.60	
1.2	50.72	
1.1	20.18	
1.1	11.24	
1.1	25.48	
1.1	18.45	
1.2	36.70	
1.2	21.12	
1.2	5.83	
1.2	2.08	
1.1	1.30	
1.0	2.45	
1.0	2.30	
1.0	1.72	
0.9	2.84	
0.9	3.25	
0.9	2.60	
0.8	2.02	

	ID	12
Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)	
	0.00	
1.1	56.04	
1.2	36.16	
1.2	51.38	
1.1	20.39	
1.1	11.29	
1.1	25.39	
1.1	18.30	
1.1	36.25	
1.2	21.04	
1.2	5.85	
1.2	2.11	
1.1	1.33	
1.1	2.52	
1.0	2.37	
1.0	1.77	
1.0	2.91	
0.9	3.30	
0.9	2.61	
0.8	2.02	

	ID	10
Hora	Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)
02:50:00 a. m.	1.0	3.15
03:00:00 a. m.	1.0	3.45
03:10:00 a. m.	1.0	2.70
03:20:00 a. m.	1.0	2.40
03:30:00 a. m.	1.0	1.80
03:40:00 a. m.	1.0	1.50
03:50:00 a. m.	1.0	1.50
04:00:00 a. m.	1.0	0.75
04:10:00 a. m.	1.0	0.75
04:20:00 a. m.	1.0	0.45
04:30:00 a. m.	1.0	0.45
04:40:00 a. m.	1.0	0.30
04:50:00 a. m.	1.0	0.15

	ID	11
Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)	
0.8	2.93	
0.8	3.27	
0.8	2.70	
0.8	2.76	
0.8	3.48	
0.9	2.16	
1.0	1.78	
1.1	3.79	
1.1	2.67	
1.2	1.38	
1.2	0.69	
1.2	0.00	
1.3	0.75	

	ID	12
Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)	
0.8	2.96	
0.8	3.32	
0.8	2.78	
0.8	2.84	
0.8	3.41	
0.9	2.09	
0.9	1.70	
1.0	3.59	
1.1	2.52	
1.1	1.30	
1.1	0.65	
1.1	0.00	
1.1	0.68	

	ID	13
Hora	Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)
11:30:00 p. m.		0.00
11:40:00 p. m.	1.1	55.54
11:50:00 p. m.	1.2	36.07
12:00:00 a. m.	1.2	51.60
12:10:00 a. m.	1.2	20.70
12:20:00 a. m.	1.1	11.52
12:30:00 a. m.	1.1	25.88
12:40:00 a. m.	1.1	18.68
12:50:00 a. m.	1.2	36.79
01:00:00 a. m.	1.2	21.18
01:10:00 a. m.	1.2	5.87
01:20:00 a. m.	1.2	2.12
01:30:00 a. m.	1.1	1.34
01:40:00 a. m.	1.1	2.56
01:50:00 a. m.	1.0	2.39
02:00:00 a. m.	1.0	1.79
02:10:00 a. m.	1.0	2.95
02:20:00 a. m.	0.9	3.36
02:30:00 a. m.	0.9	2.62
02:40:00 a. m.	0.8	2.00
02:50:00 a. m.	0.8	2.95
03:00:00 a. m.	0.8	3.35
03:10:00 a. m.	0.8	2.84
03:20:00 a. m.	0.8	2.90
03:30:00 a. m.	0.9	3.61
03:40:00 a. m.	0.9	2.19
03:50:00 a. m.	1.0	1.74

	ID	14
Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)	
	0.00	
1.1	34.70	
1.1	101.05	
1.1	59.72	
1.1	34.89	
1.1	23.16	
1.1	22.42	
1.1	16.08	
1.1	45.72	
1.2	16.26	
1.2	4.60	
1.1	2.07	
1.1	1.65	
1.1	1.91	
1.0	2.11	
1.0	2.08	
1.0	3.85	
1.0	3.74	
0.9	2.76	
0.9	1.87	
0.9	3.17	
0.9	3.35	
0.9	2.55	
0.9	2.83	
0.9	3.22	
0.9	2.27	
1.0	2.08	

	ID	15
Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)	
	0.00	
1.0	33.34	
1.1	95.27	
1.1	55.96	
1.1	33.06	
1.1	22.05	
1.1	21.50	
1.0	15.41	
1.1	43.29	
1.1	15.25	
1.1	4.33	
1.1	1.98	
1.1	1.61	
1.0	1.88	
1.0	2.14	
1.0	2.11	
1.0	3.90	
1.0	3.83	
1.0	2.87	
0.9	1.96	
0.9	3.31	
0.9	3.55	
0.9	2.73	
0.9	3.02	
0.9	3.33	
0.9	2.26	
1.0	2.05	

	ID	13
Hora	Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)
04:00:00 a. m.	1.0	3.61
04:10:00 a. m.	1.0	2.49
04:20:00 a. m.	1.1	1.26
04:30:00 a. m.	1.0	0.61
04:40:00 a. m.	1.0	0.00
04:50:00 a. m.	1.0	0.58

	ID	14
Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)	
1.0	3.35	
1.0	2.16	
1.0	0.92	
1.0	0.59	
0.9	0.00	
0.9	0.55	

	ID	15
Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)	
1.0	3.30	
1.0	2.15	
1.0	0.93	
1.0	0.61	
1.0	0.00	
1.0	0.58	

	ID	16
Hora	Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)
11:30:00 p. m.		0.00
11:40:00 p. m.	1.0	63.15
11:50:00 p. m.	1.0	102.75
12:00:00 a. m.	1.0	73.95
12:10:00 a. m.	1.0	51.30
12:20:00 a. m.	1.0	24.30
12:30:00 a. m.	1.0	23.85
12:40:00 a. m.	1.0	28.80
12:50:00 a. m.	1.0	25.50
01:00:00 a. m.	1.0	6.00
01:10:00 a. m.	1.0	1.65
01:20:00 a. m.	1.0	1.95
01:30:00 a. m.	1.0	1.50
01:40:00 a. m.	1.0	0.90
01:50:00 a. m.	1.0	1.50
02:00:00 a. m.	1.0	2.70
02:10:00 a. m.	1.0	4.35
02:20:00 a. m.	1.0	3.90
02:30:00 a. m.	1.0	3.00
02:40:00 a. m.	1.0	2.40
02:50:00 a. m.	1.0	3.00
03:00:00 a. m.	1.0	3.15
03:10:00 a. m.	1.0	2.55
03:20:00 a. m.	1.0	2.55
03:30:00 a. m.	1.0	2.25
03:40:00 a. m.	1.0	1.65
03:50:00 a. m.	1.0	1.80
04:00:00 a. m.	1.0	2.10
04:10:00 a. m.	1.0	1.35
04:20:00 a. m.	1.0	0.45
04:30:00 a. m.	1.0	0.45
04:40:00 a. m.	1.0	0.15
04:50:00 a. m.	1.0	0.30

	ID	17
Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)	
	0.00	
1.0	103.20	
1.0	112.50	
1.0	76.50	
1.0	41.40	
1.0	21.60	
1.0	31.50	
1.0	39.90	
1.0	17.70	
1.0	5.10	
1.0	1.50	
1.0	1.50	
1.0	1.20	
1.0	0.60	
1.0	0.90	
1.0	2.40	
1.0	4.20	
1.0	3.90	
1.0	2.70	
1.0	2.40	
1.0	2.40	
1.0	2.40	
1.0	2.70	
1.0	2.10	
1.0	2.40	
1.0	1.20	
1.0	1.50	
1.0	2.40	
1.0	1.20	
1.0	0.60	
1.0	0.30	
1.0	0.00	
1.0	0.30	

	ID	18
Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)	
	0.00	
1.0	19.20	
1.0	107.23	
0.9	116.55	
0.9	66.53	
0.9	36.39	
0.9	13.95	
0.9	14.10	
0.9	9.49	
0.9	2.22	
0.9	0.54	
0.9	0.53	
0.9	0.54	
0.9	1.09	
0.9	1.68	
0.9	2.82	
1.0	4.02	
1.0	3.60	
1.0	3.72	
1.0	3.75	
1.0	3.72	
1.0	3.68	
1.0	2.50	
1.1	2.56	
1.1	1.95	
1.1	1.30	
1.1	1.34	
1.1	0.00	
1.1	0.68	
1.1	0.66	
1.1	0.00	
1.1	0.00	
1.1	0.00	

	ID	19
Hora	Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)
11:30:00 p. m.		0.00
11:40:00 p. m.	1.1	57.36
11:50:00 p. m.	1.2	37.10
12:00:00 a. m.	1.2	52.60
12:10:00 a. m.	1.2	20.74
12:20:00 a. m.	1.1	11.49
12:30:00 a. m.	1.1	25.88
12:40:00 a. m.	1.1	18.88
12:50:00 a. m.	1.2	37.94
01:00:00 a. m.	1.3	21.82
01:10:00 a. m.	1.2	5.95
01:20:00 a. m.	1.2	2.09
01:30:00 a. m.	1.1	1.32
01:40:00 a. m.	1.0	2.52
01:50:00 a. m.	1.0	2.40
02:00:00 a. m.	1.0	1.82
02:10:00 a. m.	1.0	2.99
02:20:00 a. m.	0.9	3.39
02:30:00 a. m.	0.9	2.72
02:40:00 a. m.	0.9	2.11
02:50:00 a. m.	0.8	3.03
03:00:00 a. m.	0.8	3.35
03:10:00 a. m.	0.8	2.78
03:20:00 a. m.	0.8	2.91
03:30:00 a. m.	0.9	3.61
03:40:00 a. m.	0.9	2.19
03:50:00 a. m.	1.0	1.81
04:00:00 a. m.	1.1	3.83
04:10:00 a. m.	1.1	2.66
04:20:00 a. m.	1.1	1.37
04:30:00 a. m.	1.1	0.68
04:40:00 a. m.	1.2	0.00
04:50:00 a. m.	1.2	0.75

	ID	20
Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)	
		0.00
1.2	58.26	
1.2	37.72	
1.2	53.48	
1.2	21.11	
1.2	11.74	
1.1	26.37	
1.1	19.17	
1.2	38.29	
1.3	22.03	
1.3	6.02	
1.2	2.12	
1.1	1.35	
1.1	2.60	
1.0	2.44	
1.0	1.85	
1.0	3.04	
1.0	3.45	
0.9	2.75	
0.9	2.13	
0.9	3.08	
0.8	3.41	
0.8	2.83	
0.8	2.93	
0.8	3.54	
0.9	2.14	
1.0	1.72	
1.0	3.59	
1.1	2.52	
1.1	1.29	
1.1	0.64	
1.1	0.00	
1.1	0.68	

	ID	21
Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)	
		0.00
1.1	56.95	
1.2	36.91	
1.2	52.78	
1.2	21.20	
1.2	11.83	
1.1	26.77	
1.2	19.50	
1.2	38.76	
1.3	22.19	
1.3	6.10	
1.2	2.17	
1.1	1.36	
1.1	2.64	
1.0	2.47	
1.0	1.85	
1.0	3.07	
1.0	3.52	
0.9	2.81	
0.9	2.18	
0.9	3.19	
0.9	3.57	
0.8	3.00	
0.8	3.06	
0.9	3.70	
0.9	2.24	
1.0	1.76	
1.0	3.60	
1.0	2.50	
1.1	1.27	
1.0	0.61	
1.0	0.00	
1.0	0.60	

	ID	22
Hora	Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)
11:30:00 p. m.		0.00
11:40:00 p. m.	1.1	53.93
11:50:00 p. m.	1.1	34.91
12:00:00 a. m.	1.1	50.19
12:10:00 a. m.	1.1	20.32
12:20:00 a. m.	1.1	11.41
12:30:00 a. m.	1.1	25.93

	ID	23
Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)	
		0.00
1.0	51.81	
1.1	32.88	
1.1	46.95	
1.1	19.26	
1.1	10.91	
1.1	24.87	

	ID	24
Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)	
		0.00
1.0	38.40	
1.0	92.80	
1.0	56.00	
1.0	39.60	
1.0	23.00	
1.0	22.80	

	ID	22
Hora	Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)
12:40:00 a. m.	1.1	18.61
12:50:00 a. m.	1.1	36.47
01:00:00 a. m.	1.2	20.72
01:10:00 a. m.	1.2	5.73
01:20:00 a. m.	1.2	2.10
01:30:00 a. m.	1.1	1.35
01:40:00 a. m.	1.1	2.64
01:50:00 a. m.	1.0	2.52
02:00:00 a. m.	1.0	1.89
02:10:00 a. m.	1.0	3.14
02:20:00 a. m.	1.0	3.64
02:30:00 a. m.	1.0	2.93
02:40:00 a. m.	1.0	2.28
02:50:00 a. m.	0.9	3.35
03:00:00 a. m.	0.9	3.79
03:10:00 a. m.	0.9	3.21
03:20:00 a. m.	0.9	3.25
03:30:00 a. m.	0.9	3.83
03:40:00 a. m.	0.9	2.27
03:50:00 a. m.	1.0	1.75
04:00:00 a. m.	1.0	3.56
04:10:00 a. m.	1.0	2.46
04:20:00 a. m.	1.1	1.27
04:30:00 a. m.	1.0	0.62
04:40:00 a. m.	1.0	0.00
04:50:00 a. m.	1.0	0.58

	ID	23
Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)	
1.1	17.77	
1.1	34.09	
1.1	19.02	
1.1	5.28	
1.1	1.96	
1.1	1.29	
1.1	2.56	
1.0	2.51	
1.0	1.87	
1.0	3.14	
1.0	3.70	
1.0	3.02	
1.0	2.38	
1.0	3.51	
1.0	4.02	
0.9	3.41	
1.0	3.43	
1.0	4.02	
1.0	2.33	
1.0	1.76	
1.0	3.48	
1.0	2.37	
1.0	1.24	
1.0	0.61	
1.0	0.00	
1.0	0.58	

	ID	24
Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)	
1.0	26.20	
1.0	36.20	
1.0	11.80	
1.0	3.40	
1.0	1.80	
1.0	1.40	
1.0	1.40	
1.0	1.80	
1.0	1.60	
1.0	3.60	
1.0	3.80	
1.0	2.80	
1.0	2.20	
1.0	3.20	
1.0	3.40	
1.0	2.60	
1.0	3.00	
1.0	3.20	
1.0	2.00	
1.0	1.80	
1.0	3.20	
1.0	2.00	
1.0	0.80	
1.0	0.60	
1.0	0.00	
1.0	0.60	

	ID	25
Hora	Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)
11:30:00 p. m.		0.00
11:40:00 p. m.	1.0	48.48
11:50:00 p. m.	1.0	94.28
12:00:00 a. m.	1.0	60.55
12:10:00 a. m.	0.9	53.52
12:20:00 a. m.	0.9	26.16
12:30:00 a. m.	0.9	26.11
12:40:00 a. m.	0.9	46.49
12:50:00 a. m.	0.9	26.14
01:00:00 a. m.	0.9	7.35
01:10:00 a. m.	0.9	2.23
01:20:00 a. m.	0.9	1.67
01:30:00 a. m.	0.9	1.11
01:40:00 a. m.	0.9	0.56

	ID	26
Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)	
	0.00	
1.2	59.82	
1.2	38.75	
1.2	54.62	
1.2	21.42	
1.2	11.84	
1.1	26.68	
1.2	19.67	
1.2	39.53	
1.3	22.43	
1.3	6.05	
1.2	2.15	
1.1	1.35	
1.1	2.56	

	ID	27
Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)	
	0.00	
1.2	59.88	
1.2	38.63	
1.2	54.49	
1.2	21.67	
1.2	12.08	
1.2	27.24	
1.2	20.03	
1.3	40.16	
1.3	22.85	
1.3	6.19	
1.2	2.20	
1.1	1.38	
1.1	2.64	

	ID	25
Hora	Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)
01:50:00 a. m.	1.0	1.16
02:00:00 a. m.	1.0	0.58
02:10:00 a. m.	1.0	2.90
02:20:00 a. m.	1.0	3.50
02:30:00 a. m.	1.0	2.40
02:40:00 a. m.	1.0	2.51
02:50:00 a. m.	1.1	2.59
03:00:00 a. m.	1.1	2.64
03:10:00 a. m.	1.1	1.98
03:20:00 a. m.	1.1	2.63
03:30:00 a. m.	1.1	2.61
03:40:00 a. m.	1.1	1.29
03:50:00 a. m.	1.1	1.27
04:00:00 a. m.	1.1	3.18
04:10:00 a. m.	1.0	1.86
04:20:00 a. m.	1.0	0.61
04:30:00 a. m.	1.0	0.62
04:40:00 a. m.	1.1	0.00
04:50:00 a. m.	1.1	0.68

	ID	26
Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)	
1.0	2.43	
1.0	1.84	
1.0	3.00	
1.0	3.46	
0.9	2.85	
0.9	2.24	
0.9	3.25	
0.9	3.62	
0.8	3.06	
0.9	3.28	
1.0	4.07	
1.0	2.47	
1.1	2.02	
1.2	4.26	
1.2	2.95	
1.2	1.45	
1.1	0.68	
1.1	0.00	
1.3	0.75	

	ID	27
Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)	
1.0	2.48	
1.0	1.85	
1.0	3.04	
1.0	3.49	
1.0	2.85	
0.9	2.25	
0.9	3.30	
0.9	3.68	
0.9	3.10	
0.9	3.25	
0.9	3.95	
1.0	2.36	
1.1	1.91	
1.1	3.99	
1.2	2.76	
1.1	1.38	
1.1	0.65	
1.1	0.00	
1.1	0.69	

	ID	28
Hora	Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)
11:30:00 p. m.		0.00
11:40:00 p. m.	1.1	57.66
11:50:00 p. m.	1.2	37.38
12:00:00 a. m.	1.2	53.48
12:10:00 a. m.	1.2	21.35
12:20:00 a. m.	1.2	11.90
12:30:00 a. m.	1.2	27.07
12:40:00 a. m.	1.2	19.66
12:50:00 a. m.	1.2	39.24
01:00:00 a. m.	1.3	22.43
01:10:00 a. m.	1.3	6.21
01:20:00 a. m.	1.2	2.24
01:30:00 a. m.	1.2	1.42
01:40:00 a. m.	1.1	2.75
01:50:00 a. m.	1.1	2.61
02:00:00 a. m.	1.1	1.92
02:10:00 a. m.	1.0	3.13
02:20:00 a. m.	1.0	3.58
02:30:00 a. m.	1.0	2.92
02:40:00 a. m.	1.0	2.32
02:50:00 a. m.	1.0	3.43

	ID	29
Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)	
	0.00	
1.1	54.84	
1.1	35.63	
1.2	51.68	
1.2	20.92	
1.1	11.71	
1.1	26.28	
1.1	18.80	
1.2	36.86	
1.2	20.98	
1.2	5.84	
1.2	2.15	
1.2	1.39	
1.1	2.73	
1.1	2.64	
1.1	1.97	
1.1	3.23	
1.0	3.72	
1.0	3.04	
1.0	2.43	
1.0	3.61	

	ID	30
Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)	
	0.00	
1.0	52.67	
1.1	33.54	
1.1	48.36	
1.1	19.80	
1.1	11.24	
1.1	25.51	
1.1	18.21	
1.1	35.39	
1.1	19.87	
1.1	5.45	
1.1	2.00	
1.1	1.30	
1.1	2.59	
1.1	2.53	
1.1	1.91	
1.1	3.20	
1.0	3.75	
1.0	3.12	
1.1	2.53	
1.1	3.81	

	ID	28
Hora	Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)
03:00:00 a. m.	0.9	3.88
03:10:00 a. m.	0.9	3.30
03:20:00 a. m.	0.9	3.42
03:30:00 a. m.	1.0	4.08
03:40:00 a. m.	1.0	2.40
03:50:00 a. m.	1.0	1.88
04:00:00 a. m.	1.1	3.81
04:10:00 a. m.	1.1	2.58
04:20:00 a. m.	1.1	1.27
04:30:00 a. m.	1.0	0.61
04:40:00 a. m.	1.0	0.00
04:50:00 a. m.	1.0	0.63

	ID	29
Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)	
1.0	4.12	
1.0	3.54	
1.0	3.62	
1.0	4.29	
1.0	2.50	
1.1	1.91	
1.1	3.83	
1.1	2.54	
1.0	1.23	
1.0	0.61	
1.0	0.00	
0.9	0.56	

	ID	30
Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)	
1.0	4.40	
1.1	3.79	
1.1	3.86	
1.1	4.52	
1.1	2.60	
1.1	1.96	
1.1	3.92	
1.1	2.60	
1.1	1.28	
1.1	0.63	
1.0	0.00	
1.0	0.57	

	ID	31
Hora	Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)
11:30:00 p. m.		0.00
11:40:00 p. m.	1.0	51.41
11:50:00 p. m.	1.0	32.04
12:00:00 a. m.	1.0	45.33
12:10:00 a. m.	1.0	18.49
12:20:00 a. m.	1.0	10.48
12:30:00 a. m.	1.0	23.91
12:40:00 a. m.	1.0	17.05
12:50:00 a. m.	1.0	32.82
01:00:00 a. m.	1.0	18.24
01:10:00 a. m.	1.0	4.96
01:20:00 a. m.	1.0	1.82
01:30:00 a. m.	1.0	1.19
01:40:00 a. m.	1.0	2.37
01:50:00 a. m.	1.0	2.38
02:00:00 a. m.	1.0	1.79
02:10:00 a. m.	1.0	3.05
02:20:00 a. m.	1.0	3.64
02:30:00 a. m.	1.0	3.03
02:40:00 a. m.	1.0	2.51
02:50:00 a. m.	1.1	3.87
03:00:00 a. m.	1.1	4.57
03:10:00 a. m.	1.1	3.98
03:20:00 a. m.	1.1	4.04
03:30:00 a. m.	1.1	4.75
03:40:00 a. m.	1.1	2.70
03:50:00 a. m.	1.1	2.00
04:00:00 a. m.	1.1	3.98

	ID	32
Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)	
	0.00	
1.2	58.01	
1.2	37.97	
1.2	54.57	
1.2	21.85	
1.2	12.14	
1.2	27.57	
1.2	19.77	
1.2	39.72	
1.3	22.85	
1.3	6.34	
1.3	2.30	
1.2	1.47	
1.2	2.86	
1.1	2.71	
1.1	2.00	
1.1	3.24	
1.0	3.68	
1.0	3.01	
1.0	2.41	
1.0	3.58	
1.0	4.08	
1.0	3.53	
1.0	3.69	
1.1	4.46	
1.1	2.65	
1.2	2.10	
1.2	4.35	

	ID	33
Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)	
	0.00	
1.1	55.24	
1.2	36.04	
1.2	52.47	
1.2	21.26	
1.2	11.92	
1.1	26.86	
1.1	19.12	
1.2	37.49	
1.2	21.25	
1.2	5.89	
1.2	2.17	
1.2	1.41	
1.2	2.81	
1.1	2.70	
1.1	2.02	
1.1	3.32	
1.0	3.78	
1.0	3.09	
1.0	2.49	
1.0	3.72	
1.0	4.29	
1.0	3.74	
1.1	3.89	
1.1	4.69	
1.2	2.76	
1.2	2.14	
1.2	4.42	

	ID	31
Hora	Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)
04:10:00 a. m.	1.1	2.66
04:20:00 a. m.	1.1	1.32
04:30:00 a. m.	1.1	0.65
04:40:00 a. m.	1.1	0.00
04:50:00 a. m.	1.2	0.70

ID	32
Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)
1.2	2.95
1.2	1.44
1.1	0.67
1.0	0.00
1.0	0.58

ID	33
Sesgo (F.C.)	Lluvia(mm/hr)
1.2	2.98
1.2	1.44
1.2	0.71
1.2	0.00
1.0	0.61

11 Anexo B. Parámetros del método de Horton

1) Valores típicos de tasa máxima de infiltración en la ecuación de Horton

Fuente: (EPA, 2015)

1. Suelo seco (con poca o ninguna vegetación)	
<ul style="list-style-type: none"> Suelo de arena: 	125 mm/h (5 in/h)
<ul style="list-style-type: none"> Suelo de marga 	75 mm/h (3 in/h)
<ul style="list-style-type: none"> Suelo de arcilla 	25 mm/h (1 in/h)
2. Suelo SECO (con vegetación densa)	
<ul style="list-style-type: none"> Multiplicar los valores del apartado 1 por 2 	
3. Suelo húmedo	
<ul style="list-style-type: none"> Suelos drenantes que no se secaron: dividir los valores de los apds. 1 y 2. entre 3. 	
<ul style="list-style-type: none"> Suelos cercanos a la saturación: valores próximos a la tasa mínima de infiltración 	
<ul style="list-style-type: none"> Suelos que se han secado parcialmente: dividir los valores de los apds. 1 y 2. Entre 1.5 a 2.5 	

2) Valores de almacenamiento de depresión para los atributos de Dstore perv e Imperv

El almacenamiento de depresión es la capacidad de un área particular de tierra para retener agua en sus pozos y depresiones, evitando así que fluya, (Computational Hydraulics International, 2017).

Fuente: (ASCE, 1992)

Superficie	Almacenamiento de depresión (in)	Almacenamiento de depresión (mm)
Superficies impermeables	0.05-0.010	1.25-2.5
Césped	0.10-0.2	2.5-5.0
Pasto	0.20	5.0
Basura del bosque	0.30	8.0

12 Anexo C. Evento del mes de septiembre del 2016

1) Hidrogramas obtenidos en las subcuencas del modelo Lluvia-escorrentía sin Calibración

Nombre	Área (ha)	Gasto (m ³ /s)	Nombre	Área (ha)	Gasto (m ³ /s)	Nombre	Área (ha)	Gasto (m ³ /s)
C1	6369.75	115.25	C137	31.33	5.81	C175	39.80	2.84
C10	581.70	5.78	C138	31.34	5.9	C176	40.07	0.79
C100	26.78	4.07	C139	31.44	0.53	C177	40.22	33.3
C101	27.05	2.06	C14	930.03	2.42	C178	40.24	2.57
C102	27.05	4.34	C140	31.47	2.45	C179	40.54	2.27
C103	27.17	2.34	C141	31.50	4.98	C18	2.77	23.02
C104	27.40	4.12	C142	31.52	22.93	C180	40.79	0.75
C105	27.48	5.59	C143	32.12	0.56	C181	40.92	8.87
C106	27.50	3.34	C144	32.28	10.52	C182	41.57	1.74
C107	27.70	8.72	C145	32.58	0.91	C183	41.60	5.98
C108	27.76	5.17	C146	33.48	16.1	C184	41.80	1.29
C109	27.78	5.25	C147	33.48	77.99	C185	42.18	68.37
C11	491.90	21.78	C148	33.55	64.35	C186	42.59	2.71
C110	27.87	3.09	C149	34.01	2.68	C187	42.74	4.74
C111	28.32	0.65	C15	1856.39	5.39	C188	43.27	12.44
C112	28.32	5.47	C150	34.69	0.49	C189	43.59	2.26
C113	28.57	6.74	C151	34.81	6.54	C19	3.21	16.81
C114	28.60	2.14	C152	34.84	6.68	C190	43.64	3.58
C115	28.76	4.43	C153	34.89	3.87	C191	43.72	29.09
C116	28.78	0.46	C154	35.15	3.95	C192	43.73	0.47
C117	28.86	3.66	C155	35.18	5.15	C193	44.15	6.56
C118	28.91	1.09	C156	35.71	8.06	C194	44.65	4.96
C119	28.92	2.49	C157	35.77	1.17	C195	44.96	5
C12	1007.37	2.8	C158	35.78	0.95	C196	45.25	5.06
C120	29.01	3.13	C159	36.18	2.99	C197	45.43	7.82
C121	29.13	0.7	C16	1133.86	2.22	C198	45.70	5.34
C122	29.50	81.9	C160	36.22	0.6	C199	46.35	3.44
C123	29.83	0.3	C161	36.37	0.58	C2	2427.6	13.48
C124	29.86	1.06	C162	36.48	9.93	C20	3.48	5.87
C125	29.95	3.94	C163	36.59	15.27	C200	47.54	18.37
C126	29.98	7.71	C164	37.46	2.03	C201	48.29	1.08
C127	30.03	3.01	C165	37.65	77.37	C202	48.39	35.41
C128	30.06	0.84	C166	37.66	19.51	C203	48.49	14.31
C129	30.37	14.14	C167	37.92	15.46	C204	48.60	8.15
C13	546.32	1.73	C168	38.07	4.74	C205	48.61	7.72
C130	30.61	4.87	C169	38.16	4.99	C206	48.82	14.73
C131	30.62	27.22	C17	1.33	8.38	C207	47.97	100.66
C132	30.63	6.3	C170	38.16	6.18	C208	48.98	5.8
C133	30.69	1.35	C171	38.25	0.39	C209	50.16	3
C134	30.76	1.51	C172	38.54	6.04	C21	3.53	7.83
C135	30.99	4.98	C173	38.91	10.4	C210	49.23	1.96
C136	31.18	0.71	C174	39.69	21.42	C211	49.86	8.97

Nombre	Área (ha)	Gasto (m ³ /s)
C212	50.01	13.76
C213	50.03	0.77
C214	50.14	19.09
C215	50.18	3.7
C216	50.63	7.91
C217	51.20	33.73
C218	51.23	7.35
C219	51.45	50.7
C22	3.59	0.3
C220	51.53	3.27
C221	51.97	101.6
C222	52.14	0.72
C223	52.97	108.36
C224	53.66	3.7
C225	54.94	1.6
C226	55.20	0.46
C227	55.24	78.23
C228	55.26	3.01
C229	55.92	2.81
C23	3.62	1.05
C230	55.96	9.91
C231	56.09	14.57
C232	56.67	0.48
C233	56.82	11.09
C234	57.41	6.69
C235	57.72	1.72
C236	58.26	31.62
C237	58.68	5.64
C238	59.23	9.52
C239	59.38	2.53
C24	3.88	0.53
C240	59.71	5.12
C241	60.00	19.12
C242	59.90	9.19
C243	62.37	4
C244	62.17	1.86
C245	62.76	1.02
C246	63.43	9.24
C247	63.54	2.28
C248	65.02	12.37
C249	65.99	7.49
C25	4.39	0.39

Nombre	Área (ha)	Gasto (m ³ /s)
C250	66.16	2.16
C251	66.41	6.72
C252	66.54	8.16
C253	67.06	11.37
C254	67.58	2.83
C255	68.95	51.71
C256	69.11	9.68
C257	69.52	29.86
C258	72.04	3.74
C259	73.69	6.02
C26	4.53	11.95
C260	75.14	12.62
C261	75.49	2.06
C262	77.27	5.96
C263	80.82	3.44
C264	80.96	13.16
C265	82.18	13.05
C266	83.83	12.95
C267	84.90	4.44
C268	85.24	4.39
C269	85.73	2.85
C27	5.24	1.06
C270	86.83	1.95
C271	88.16	3.69
C272	90.13	16.15
C273	90.46	5.91
C274	91.71	0.72
C275	92.38	9.9
C276	94.40	57.87
C277	97.38	3.95
C278	99.61	50.16
C279	100.40	80.46
C28	4.67	5.54
C280	102.92	10.41
C281	103.78	3.6
C282	104.84	38.02
C283	107.53	26.29
C284	109.40	0.43
C285	111.61	3.05
C286	113.36	15.59
C287	117.78	13.35
C288	118.30	2.27

Nombre	Área (ha)	Gasto (m ³ /s)
C289	119.48	15.37
C29	4.68	15.87
C290	122.50	19.36
C291	133.78	0.94
C292	143.38	3.48
C293	162.76	2.28
C294	167.04	6.59
C295	177.54	14.27
C296	185.33	4.12
C297	188.06	9.84
C3	1627.83	37.72
C30	4.77	71.04
C31	5.11	4.22
C32	5.46	8.66
C33	5.79	32.15
C34	6.61	4.81
C35	6.70	0.18
C36	6.77	5.55
C37	7.22	1.48
C38	7.67	5.93
C39	7.81	9.56
C4	532.97	8.37
C40	7.88	55.95
C41	7.91	59.65
C42	8.20	2.78
C43	8.32	4.79
C44	8.50	1.55
C45	9.50	11.63
C46	10.05	3.37
C47	10.14	23.18
C48	10.26	6.08
C49	10.55	17.21
C5	1788.86	36.22
C50	10.78	82.79
C51	10.84	22.95
C52	10.96	0.71
C53	11.46	16.71
C54	11.76	6.38
C55	12.21	21.7
C56	12.69	6.84
C57	12.96	9.67
C58	13.12	3.04

Nombre	Área (ha)	Gasto (m ³ /s)
C59	13.73	2.11
C6	2213.03	21.67
C60	13.85	3.82
C61	14.08	6.8
C62	14.16	102.38
C63	14.25	15.02
C64	15.38	7.95
C65	16.73	3.1
C66	17.20	4.33
C67	17.23	17.5
C68	16.67	38.27
C69	17.69	23.02
C7	1396.12	34.23
C70	17.90	3.26
C71	18.35	1.04
C72	18.43	3.44
C73	18.49	16.28
C74	18.74	45.83
C75	19.31	22.41
C76	20.30	2.48
C77	20.82	14.31
C78	21.00	6.47
C79	22.33	16.23
C8	145.04	11.09
C80	22.92	30.28
C81	22.95	10.31
C82	22.96	80.63
C83	23.57	12.43
C84	23.92	10.46
C85	24.45	17.31
C86	22.73	18.31
C87	24.94	80.41
C88	25.04	98.56
C89	25.10	2.16
C9	942.13	3.56
C90	25.13	3.54
C91	25.30	1.61
C92	25.30	18.98
C93	25.36	3.73
C94	25.74	1.26
C95	26.28	1.4
C96	26.30	1.72
C97	26.31	3.05
C98	26.37	12.5
C99	26.70	3.03

2) Evento del 23 de junio del 2017

Nombre	Área (ha)	Gasto (m³/s)	Nombre	Área (ha)	Gasto (m³/s)	Nombre	Área (ha)	Gasto (m³/s)
C1	6369.75	51.12	C137	31.33	3.59	C175	39.80	3.56
C10	581.70	9.44	C138	31.34	4.15	C176	40.07	0.22
C100	26.78	4.46	C139	31.44	0.49	C177	40.22	0.54
C101	27.05	2.25	C14	930.03	2.61	C178	40.24	1.58
C102	27.05	4.22	C140	31.47	2.74	C179	40.54	2.14
C103	27.17	3.22	C141	31.50	4.80	C18	2.77	0.55
C104	27.40	4.91	C142	31.52	5.40	C180	40.79	0.44
C105	27.48	3.35	C143	32.12	0.33	C181	40.92	9.06
C106	27.50	3.25	C144	32.28	5.98	C182	41.57	2.07
C107	27.70	4.63	C145	32.58	0.25	C183	41.60	4.57
C108	27.76	5.00	C146	33.48	0.98	C184	41.80	1.30
C109	27.78	5.23	C147	33.48	5.74	C185	42.18	7.86
C11	491.90	12.17	C148	33.55	6.16	C186	42.59	0.43
C110	27.87	3.55	C149	34.01	2.61	C187	42.74	5.88
C111	28.32	0.08	C15	1856.39	5.06	C188	43.27	7.25
C112	28.32	6.70	C150	34.69	0.10	C189	43.59	2.48
C113	28.57	3.41	C151	34.81	5.11	C19	3.21	0.68
C114	28.60	2.49	C152	34.84	3.99	C190	43.64	2.62
C115	28.76	3.81	C153	34.89	4.10	C191	43.72	7.11
C116	28.78	0.27	C154	35.15	4.32	C192	43.73	0.31
C117	28.86	3.97	C155	35.18	2.81	C193	44.15	6.64
C118	28.91	0.17	C156	35.71	7.82	C194	44.65	5.49
C119	28.92	3.15	C157	35.77	0.94	C195	44.96	4.35
C12	1007.37	2.42	C158	35.78	1.54	C196	45.25	4.55
C120	29.01	3.82	C159	36.18	0.47	C197	45.43	6.04
C121	29.13	0.08	C16	1133.86	2.49	C198	45.70	3.11
C122	29.50	3.17	C160	36.22	1.33	C199	46.35	3.68
C123	29.83	0.09	C161	36.37	0.35	C2	2427.66	8.41
C124	29.86	1.06	C162	36.48	6.36	C20	3.48	0.55
C125	29.95	4.00	C163	36.59	8.81	C200	47.54	5.86
C126	29.98	3.13	C164	37.46	1.77	C201	48.29	0.14
C127	30.03	3.79	C165	37.65	6.76	C202	48.39	1.00
C128	30.06	1.11	C166	37.66	4.92	C203	48.49	4.49
C129	30.37	6.12	C167	37.92	8.51	C204	48.60	8.92
C13	546.32	1.67	C168	38.07	5.53	C205	48.61	7.78
C130	30.61	5.24	C169	38.16	5.19	C206	48.82	6.72
C131	30.62	3.67	C17	1.33	0.16	C207	47.97	3.80
C132	30.63	6.45	C170	38.16	6.70	C208	48.98	4.14
C133	30.69	0.09	C171	38.25	0.11	C209	50.16	2.12
C134	30.76	0.98	C172	38.54	6.07	C21	3.53	0.77
C135	30.99	5.60	C173	38.91	6.56	C210	49.23	1.96
C136	31.18	0.87	C174	39.69	7.00	C211	49.86	7.06

Nombre	Área (ha)	Gasto (m³/s)	Nombre	Área (ha)	Gasto (m³/s)	Nombre	Área (ha)	Gasto (m³/s)
C212	50.01	8.23	C255	68.95	11.55	C3	1627.83	25.56
C213	50.03	0.46	C256	69.11	9.84	C30	4.77	0.54
C214	50.14	8.27	C257	69.52	9.34	C31	5.11	0.96
C215	50.18	4.69	C258	72.04	4.45	C32	5.46	1.06
C216	50.63	5.04	C259	73.69	5.39	C33	5.79	1.42
C217	51.20	10.03	C26	4.53	1.20	C34	6.61	1.40
C218	51.23	7.80	C260	75.14	12.12	C35	6.70	0.25
C219	51.45	10.35	C261	75.49	4.11	C36	6.77	0.73
C22	3.59	0.67	C262	77.27	6.25	C37	7.22	1.42
C220	51.53	2.27	C263	80.82	3.24	C38	7.67	0.23
C221	51.97	1.21	C264	80.96	13.07	C39	7.81	2.18
C222	52.14	0.16	C265	82.18	12.16	C4	532.97	4.97
C223	52.97	0.49	C266	83.83	12.41	C40	7.88	2.05
C224	53.66	4.59	C267	84.90	2.36	C41	7.91	2.18
C225	54.94	0.98	C268	85.24	5.36	C42	8.20	0.03
C226	55.20	0.34	C269	85.73	4.43	C43	8.32	0.02
C227	55.24	9.78	C27	5.24	1.28	C44	8.50	1.82
C228	55.26	3.74	C270	86.83	1.66	C45	9.50	0.92
C229	55.92	6.17	C271	88.16	6.71	C46	10.05	0.21
C23	3.62	0.80	C272	90.13	18.18	C47	10.14	2.20
C230	55.96	9.61	C273	90.46	5.75	C48	10.26	0.74
C231	56.09	9.71	C274	91.71	0.57	C49	10.55	2.21
C232	56.67	0.35	C275	92.38	10.24	C5	1788.86	4.94
C233	56.82	10.90	C276	94.40	14.37	C50	10.78	2.00
C234	57.41	7.01	C277	97.38	3.44	C51	10.84	2.35
C235	57.72	0.49	C278	99.61	15.20	C52	10.96	0.03
C236	58.26	7.86	C279	100.40	5.24	C53	11.46	1.96
C237	58.68	5.09	C28	4.67	0.99	C54	11.76	0.90
C238	59.23	5.03	C280	102.92	8.15	C55	12.21	2.62
C239	59.38	3.12	C281	103.78	3.53	C56	12.69	1.97
C24	3.88	0.66	C282	104.84	13.78	C57	12.96	2.29
C240	59.71	5.06	C283	107.53	15.02	C58	13.12	3.05
C241	60.00	10.83	C284	109.40	0.60	C59	13.73	2.42
C242	59.90	10.77	C285	111.61	4.15	C6	2213.03	17.25
C243	62.37	4.99	C286	113.36	12.29	C60	13.85	1.90
C244	62.17	0.18	C287	117.78	12.27	C61	14.08	2.59
C245	62.76	0.26	C288	118.30	0.35	C62	14.16	1.18
C246	63.43	9.17	C289	119.48	13.14	C63	14.25	0.89
C247	63.54	0.18	C29	4.68	1.16	C64	15.38	3.20
C248	65.02	7.53	C290	122.50	16.80	C65	16.73	3.91
C249	65.99	7.80	C291	133.78	0.75	C66	17.20	4.33
C25	4.39	0.65	C292	143.38	4.51	C67	17.23	3.15
C250	66.16	0.30	C293	162.76	1.74	C68	16.67	3.88
C251	66.41	6.29	C294	167.04	3.74	C69	17.69	4.22
C252	66.54	6.78	C295	177.54	8.51	C7	1396.12	25.76
C253	67.06	8.33	C296	185.33	4.40	C70	17.90	3.94
C254	67.58	1.67	C297	188.06	9.74	C71	18.35	1.05

Nombre	Área (ha)	Gasto (m ³ /s)
C72	18.43	0.37
C73	18.49	3.09
C74	18.74	3.60
C75	19.31	2.82
C76	20.30	2.50
C77	20.82	4.22
C78	21.00	2.92
C79	22.33	3.18
C8	145.04	6.57
C80	22.92	5.30
C81	22.95	3.16
C82	22.96	2.48
C83	23.57	4.22
C84	23.92	2.97
C85	24.45	4.62
C86	22.73	1.86
C87	24.94	5.59
C88	25.04	2.09
C89	25.10	2.23
C9	942.13	2.93
C90	25.13	3.46
C91	25.30	2.20
C92	25.30	0.31
C93	25.36	4.79
C94	25.74	1.79
C95	26.28	0.08
C96	26.30	1.61
C97	26.31	3.07
C98	26.37	5.56
C99	26.70	3.89

13 Anexo D. Parámetros de las subcuencas antes de la calibración

Nombre	Ancho (m)	Imperv. (%)	N Imperv	N Perv	Dstore Imperv (mm)	Dstore Perv (mm)	Max. Infil. Rate (mm/hr)	Min. Infil. Rate (mm/hr)	Decay Constant (1/hr)	Drying Time (days)
C1	4280.17	6.7	0.023	0.306	2.5	5	127	12.7	4	7
C10	2998.46	7.8	0.024	0.195	2.5	5	127	12.7	4	7
C100	179.76	76.8	0.012	0.153	2.5	5	127	12.7	4	2
C101	247.23	37.4	0.019	0.259	2.5	5	127	12.7	4	2
C102	173.41	84.2	0.013	0.174	2.5	5	127	12.7	4	2
C103	225.83	66.5	0.015	0.21	2.5	5	127	12.7	4	2
C104	250.95	73.0	0.015	0.2	2.5	5	127	12.7	4	2
C105	283.32	48.4	0.018	0.267	2.5	5	127	12.7	4	2
C106	188.37	53.6	0.017	0.234	2.5	5	127	12.7	4	2
C107	187.18	77.4	0.014	0.146	2.5	5	127	12.7	4	2
C108	138.82	81.4	0.016	0.18	2.5	5	127	12.7	4	2
C109	132.29	74.1	0.015	0.165	2.5	5	127	12.7	4	2
C11	1967.61	9.7	0.023	0.541	2.5	5	127	12.7	4	2
C110	167.87	64.6	0.016	0.339	2.5	5	127	12.7	4	2
C111	230.22	2.0	0.024	0.4	2.5	5	127	12.7	4	2
C112	670.50	88.2	0.015	0.153	2.5	5	127	12.7	4	2
C113	275.99	74.9	0.014	0.196	2.5	5	127	12.7	4	2
C114	270.08	42.5	0.02	0.248	2.5	5	127	12.7	4	2
C115	227.93	82.5	0.012	0.156	2.5	5	127	12.7	4	2
C116	276.72	2.3	0.024	0.422	2.5	5	127	12.7	4	2
C117	246.03	63.6	0.016	0.235	2.5	5	127	12.7	4	2
C118	245.59	2.0	0.024	0.687	2.5	5	127	12.7	4	2
C119	252.15	60.0	0.014	0.19	2.5	5	127	12.7	4	2
C12	1461.66	1.7	0.024	0.318	2.5	5	127	12.7	4	7
C120	229.68	49.1	0.014	0.269	2.5	5	127	12.7	4	2
C121	236.03	2.0	0.024	0.782	2.5	5	127	12.7	4	2
C122	399.72	58.1	0.017	0.235	2.5	5	127	12.7	4	2
C123	221.93	2.0	0.024	0.776	2.5	5	127	12.7	4	2
C124	224.52	15.1	0.022	0.497	2.5	5	127	12.7	4	2
C125	199.64	69.9	0.015	0.214	2.5	5	127	12.7	4	2
C126	232.37	54.6	0.021	0.217	2.5	5	127	12.7	4	2
C127	280.90	51.4	0.016	0.206	2.5	5	127	12.7	4	2
C128	187.85	14.4	0.022	0.247	2.5	5	127	12.7	4	2
C129	363.65	88.3	0.013	0.165	2.5	5	127	12.7	4	2
C13	2007.06	2.0	0.024	0.655	2.5	5	127	12.7	4	7
C130	268.48	83.4	0.014	0.178	2.5	5	127	12.7	4	2
C131	892.63	49.8	0.018	0.305	2.5	5	127	12.7	4	2
C132	235.61	71.2	0.014	0.184	2.5	5	127	12.7	4	2
C133	333.62	2.0	0.024	0.4	2.5	5	127	12.7	4	2
C134	269.82	2.0	0.024	0.06	2.5	5	127	12.7	4	2
C135	218.24	92.8	0.012	0.155	2.5	5	127	12.7	4	2
C136	301.26	21.6	0.022	0.122	2.5	5	127	12.7	4	2
C137	219.07	62.4	0.015	0.224	2.5	5	127	12.7	4	2

Nombre	Ancho (m)	Imperv. (%)	N Imperv	N Perv	Dstore Imperv (mm)	Dstore Perv (mm)	Max. Infil. Rate (mm/hr)	Min. Infil. Rate (mm/hr)	Decay Constant (1/hr)	Drying Time (days)
C138	456.75	50.7	0.019	0.248	2.5	5	127	12.7	4	2
C139	237.08	5.5	0.024	0.291	2.5	5	127	12.7	4	2
C14	1096.47	1.9	0.024	0.518	2.5	5	127	12.7	4	7
C140	151.86	45.6	0.016	0.296	2.5	5	127	12.7	4	2
C141	252.01	72.4	0.014	0.18	2.5	5	127	12.7	4	2
C142	283.53	83.3	0.014	0.165	2.5	5	127	12.7	4	2
C143	179.42	2.0	0.024	0.253	2.5	5	127	12.7	4	2
C144	347.11	87.9	0.013	0.163	2.5	5	127	12.7	4	2
C145	566.91	2.0	0.024	0.785	2.5	5	127	12.7	4	2
C146	500.31	10.0	0.024	0.396	2.5	5	127	12.7	4	2
C147	261.53	79.9	0.014	0.186	2.5	5	127	12.7	4	2
C148	530.80	79.5	0.019	0.175	2.5	5	127	12.7	4	2
C149	207.99	34.5	0.02	0.333	2.5	5	127	12.7	4	2
C15	2678.78	2.0	0.024	0.582	2.5	5	127	12.7	4	7
C150	262.78	2.0	0.024	0.7	2.5	5	127	12.7	4	2
C151	280.71	68.2	0.015	0.206	2.5	5	127	12.7	4	2
C152	213.74	61.1	0.015	0.176	2.5	5	127	12.7	4	2
C153	188.61	60.3	0.014	0.182	2.5	5	127	12.7	4	2
C154	303.04	57.3	0.017	0.247	2.5	5	127	12.7	4	2
C155	216.79	58.5	0.024	0.129	2.5	5	127	12.7	4	2
C156	201.75	88.1	0.013	0.16	2.5	5	127	12.7	4	2
C157	384.65	4.3	0.024	0.462	2.5	5	127	12.7	4	2
C158	246.76	24.6	0.02	0.116	2.5	5	127	12.7	4	2
C159	238.06	2.0	0.024	0.13	2.5	5	127	12.7	4	2
C16	1984.69	1.6	0.024	0.344	2.5	5	127	12.7	4	7
C160	183.38	13.9	0.022	0.332	2.5	5	127	12.7	4	2
C161	227.34	2.0	0.024	0.326	2.5	5	127	12.7	4	2
C162	489.44	81.5	0.013	0.164	2.5	5	127	12.7	4	2
C163	368.52	85.3	0.013	0.171	2.5	5	127	12.7	4	2
C164	300.90	17.4	0.017	0.342	2.5	5	127	12.7	4	2
C165	257.51	83.6	0.014	0.171	2.5	5	127	12.7	4	2
C166	181.60	66.8	0.022	0.197	2.5	5	127	12.7	4	2
C167	263.32	82.6	0.014	0.178	2.5	5	127	12.7	4	2
C168	204.69	69.9	0.015	0.184	2.5	5	127	12.7	4	2
C169	231.27	47.5	0.016	0.171	2.5	5	127	12.7	4	2
C17	80.13	45.9	0.031	0.149	2.5	5	127	12.7	4	2
C170	263.19	85.6	0.013	0.172	2.5	5	127	12.7	4	2
C171	305.98	2.0	0.024	0.707	2.5	5	127	12.7	4	2
C172	198.67	60.7	0.016	0.146	2.5	5	127	12.7	4	2
C173	290.39	84.6	0.014	0.175	2.5	5	127	12.7	4	2
C174	579.35	63.9	0.017	0.225	2.5	5	127	12.7	4	2
C175	224.87	40.8	0.019	0.438	2.5	5	127	12.7	4	2
C176	357.78	2.0	0.024	0.4	2.5	5	127	12.7	4	2
C177	453.42	4.3	0.024	0.395	2.5	5	127	12.7	4	2
C178	324.26	14.3	0.023	0.397	2.5	5	127	12.7	4	2
C179	213.37	23.2	0.02	0.315	2.5	5	127	12.7	4	2
C18	106.37	60.0	0.019	0.218	2.5	5	127	12.7	4	2

Nombre	Ancho (m)	Imperv. (%)	N Imperv	N Perv	Dstore Imperv (mm)	Dstore Perv (mm)	Max. Infil. Rate (mm/hr)	Min. Infil. Rate (mm/hr)	Decay Constant (1/hr)	Drying Time (days)
C180	364.18	2.0	0.024	0.414	2.5	5	127	12.7	4	2
C181	346.81	76.7	0.014	0.179	2.5	5	127	12.7	4	2
C182	337.96	18.4	0.022	0.332	2.5	5	127	12.7	4	2
C183	299.27	53.0	0.015	0.218	2.5	5	127	12.7	4	2
C184	245.90	13.0	0.022	0.387	2.5	5	127	12.7	4	2
C185	355.05	76.6	0.015	0.197	2.5	5	127	12.7	4	2
C186	360.66	7.0	0.023	0.362	2.5	5	127	12.7	4	2
C187	982.55	50.9	0.017	0.199	2.5	5	127	12.7	4	2
C188	584.73	74.0	0.015	0.205	2.5	5	127	12.7	4	2
C189	249.07	31.8	0.018	0.132	2.5	5	127	12.7	4	2
C19	473.34	66.1	0.025	0.134	2.5	5	127	12.7	4	2
C190	298.89	23.4	0.021	0.348	2.5	5	127	12.7	4	2
C191	343.97	68.5	0.015	0.194	2.5	5	127	12.7	4	2
C192	336.37	2.0	0.024	0.623	2.5	5	127	12.7	4	2
C193	344.93	79.9	0.014	0.189	2.5	5	127	12.7	4	2
C194	513.27	47.4	0.015	0.191	2.5	5	127	12.7	4	2
C195	333.07	72.1	0.014	0.189	2.5	5	127	12.7	4	2
C196	328.40	70.2	0.013	0.156	2.5	5	127	12.7	4	2
C197	273.67	53.1	0.018	0.254	2.5	5	127	12.7	4	2
C198	296.73	27.0	0.021	0.481	2.5	5	127	12.7	4	2
C199	545.34	34.5	0.02	0.286	2.5	5	127	12.7	4	2
C2	3669.38	2.3	0.024	0.413	2.5	5	127	12.7	4	7
C20	120.39	69.3	0.027	0.139	2.5	5	127	12.7	4	2
C200	469.77	70.3	0.015	0.197	2.5	5	127	12.7	4	2
C201	312.38	2.0	0.024	0.6	2.5	5	127	12.7	4	2
C202	556.88	2.0	0.024	0.13	2.5	5	127	12.7	4	2
C203	446.91	44.9	0.021	0.234	2.5	5	127	12.7	4	2
C204	360.01	89.5	0.013	0.163	2.5	5	127	12.7	4	2
C205	448.02	59.8	0.014	0.169	2.5	5	127	12.7	4	2
C206	746.50	59.1	0.018	0.186	2.5	5	127	12.7	4	2
C207	999.47	32.1	0.02	0.332	2.5	5	127	12.7	4	2
C208	290.16	37.9	0.014	0.191	2.5	5	127	12.7	4	2
C209	345.94	26.1	0.02	0.423	2.5	5	127	12.7	4	2
C21	217.67	95.4	0.012	0.15	2.5	5	127	12.7	4	2
C210	307.68	16.9	0.022	0.37	2.5	5	127	12.7	4	2
C211	356.12	75.8	0.015	0.202	2.5	5	127	12.7	4	2
C212	454.68	81.8	0.014	0.175	2.5	5	127	12.7	4	2
C213	395.84	3.1	0.024	0.687	2.5	5	127	12.7	4	2
C214	380.16	92.2	0.012	0.157	2.5	5	127	12.7	4	2
C215	295.17	42.2	0.018	0.459	2.5	5	127	12.7	4	2
C216	320.44	60.4	0.016	0.195	2.5	5	127	12.7	4	2
C217	750.79	90.3	0.014	0.149	2.5	5	127	12.7	4	2
C218	284.64	71.8	0.015	0.173	2.5	5	127	12.7	4	2
C219	1469.93	69.6	0.014	0.173	2.5	5	127	12.7	4	2
C22	180.63	69.9	0.021	0.15	2.5	5	127	12.7	4	2
C220	792.82	2.0	0.024	0.06	2.5	5	127	12.7	4	2
C221	654.54	10.2	0.023	0.304	2.5	5	127	12.7	4	2

Nombre	Ancho (m)	Imperv. (%)	N Imperv	N Perv	Dstore Imperv (mm)	Dstore Perv (mm)	Max. Infil. Rate (mm/hr)	Min. Infil. Rate (mm/hr)	Decay Constant (1/hr)	Drying Time (days)
C222	372.40	2.0	0.024	0.576	2.5	5	127	12.7	4	2
C223	795.30	6.4	0.024	0.274	2.5	5	127	12.7	4	2
C224	298.12	39.6	0.017	0.403	2.5	5	127	12.7	4	2
C225	465.57	2.0	0.024	0.501	2.5	5	127	12.7	4	2
C226	501.77	2.0	0.024	0.8	2.5	5	127	12.7	4	2
C227	472.92	84.1	0.014	0.17	2.5	5	127	12.7	4	2
C228	378.51	25.8	0.021	0.247	2.5	5	127	12.7	4	2
C229	464.03	46.7	0.016	0.19	2.5	5	127	12.7	4	2
C23	104.07	88.6	0.013	0.168	2.5	5	127	12.7	4	2
C230	363.37	84.0	0.013	0.168	2.5	5	127	12.7	4	2
C231	262.00	86.8	0.013	0.165	2.5	5	127	12.7	4	2
C232	319.63	2.0	0.024	0.725	2.5	5	127	12.7	4	2
C233	283.39	79.5	0.014	0.192	2.5	5	127	12.7	4	2
C234	291.28	56.3	0.017	0.191	2.5	5	127	12.7	4	2
C235	351.92	3.9	0.024	0.344	2.5	5	127	12.7	4	2
C236	812.21	78.0	0.016	0.176	2.5	5	127	12.7	4	2
C237	251.86	42.3	0.014	0.187	2.5	5	127	12.7	4	2
C238	387.61	37.7	0.02	0.146	2.5	5	127	12.7	4	2
C239	444.02	26.9	0.024	0.283	2.5	5	127	12.7	4	2
C24	124.55	76.6	0.013	0.168	2.5	5	127	12.7	4	2
C240	353.32	35.2	0.016	0.329	2.5	5	127	12.7	4	2
C241	250.84	80.7	0.014	0.167	2.5	5	127	12.7	4	2
C242	474.67	82.4	0.014	0.182	2.5	5	127	12.7	4	2
C243	311.87	33.0	0.02	0.339	2.5	5	127	12.7	4	2
C244	436.26	2.0	0.024	0.46	2.5	5	127	12.7	4	2
C245	363.63	2.0	0.024	0.404	2.5	5	127	12.7	4	2
C246	277.84	56.3	0.017	0.155	2.5	5	127	12.7	4	2
C247	479.91	2.0	0.024	0.527	2.5	5	127	12.7	4	2
C248	351.46	53.1	0.017	0.325	2.5	5	127	12.7	4	2
C249	289.83	63.2	0.016	0.204	2.5	5	127	12.7	4	2
C25	176.28	50.9	0.023	0.109	2.5	5	127	12.7	4	2
C250	342.77	2.0	0.024	0.435	2.5	5	127	12.7	4	2
C251	494.89	62.7	0.015	0.215	2.5	5	127	12.7	4	2
C252	437.74	47.4	0.017	0.228	2.5	5	127	12.7	4	2
C253	372.57	66.4	0.018	0.212	2.5	5	127	12.7	4	2
C254	387.30	8.1	0.023	0.464	2.5	5	127	12.7	4	2
C255	358.74	84.9	0.014	0.174	2.5	5	127	12.7	4	2
C256	346.07	74.4	0.015	0.199	2.5	5	127	12.7	4	2
C257	571.70	59.4	0.021	0.186	2.5	5	127	12.7	4	2
C258	458.86	23.1	0.021	0.192	2.5	5	127	12.7	4	2
C259	369.36	35.1	0.018	0.336	2.5	5	127	12.7	4	2
C26	342.82	76.2	0.025	0.16	2.5	5	127	12.7	4	2
C260	542.10	86.8	0.013	0.165	2.5	5	127	12.7	4	2
C261	359.47	24.9	0.021	0.272	2.5	5	127	12.7	4	2
C262	606.98	60.2	0.016	0.168	2.5	5	127	12.7	4	2
C263	467.15	17.7	0.021	0.459	2.5	5	127	12.7	4	2
C264	574.19	70.1	0.015	0.18	2.5	5	127	12.7	4	2

Nombre	Ancho (m)	Imperv. (%)	N Imperv	N Perv	Dstore Imperv (mm)	Dstore Perv (mm)	Max. Infil. Rate (mm/hr)	Min. Infil. Rate (mm/hr)	Decay Constant (1/hr)	Drying Time (days)
C265	623.54	47.7	0.019	0.242	2.5	5	127	12.7	4	2
C266	670.06	75.7	0.015	0.188	2.5	5	127	12.7	4	2
C267	441.72	9.8	0.023	0.479	2.5	5	127	12.7	4	2
C268	318.31	29.8	0.02	0.555	2.5	5	127	12.7	4	2
C269	412.39	23.5	0.02	0.494	2.5	5	127	12.7	4	2
C27	93.40	95.2	0.012	0.149	2.5	5	127	12.7	4	2
C270	442.31	6.9	0.021	0.395	2.5	5	127	12.7	4	2
C271	410.06	49.6	0.015	0.172	2.5	5	127	12.7	4	2
C272	598.49	86.9	0.013	0.161	2.5	5	127	12.7	4	2
C273	416.88	28.5	0.02	0.348	2.5	5	127	12.7	4	2
C274	789.91	2.0	0.024	0.79	2.5	5	127	12.7	4	2
C275	529.09	51.2	0.018	0.214	2.5	5	127	12.7	4	2
C276	807.56	76.8	0.015	0.178	2.5	5	127	12.7	4	2
C277	492.56	15.2	0.022	0.555	2.5	5	127	12.7	4	2
C278	536.41	85.7	0.013	0.169	2.5	5	127	12.7	4	2
C279	441.33	30.2	0.02	0.268	2.5	5	127	12.7	4	2
C28	158.37	79.3	0.013	0.173	2.5	5	127	12.7	4	2
C280	1008.02	34.9	0.013	0.168	2.5	5	127	12.7	4	2
C281	407.00	14.9	0.022	0.395	2.5	5	127	12.7	4	2
C282	583.74	64.4	0.016	0.195	2.5	5	127	12.7	4	2
C283	319.94	67.2	0.017	0.196	2.5	5	127	12.7	4	2
C284	522.93	2.6	0.024	0.463	2.5	5	127	12.7	4	2
C285	380.66	14.5	0.022	0.638	2.5	5	127	12.7	4	2
C286	484.04	56.3	0.016	0.233	2.5	5	127	12.7	4	2
C287	982.31	46.2	0.018	0.272	2.5	5	127	12.7	4	2
C288	755.40	2.0	0.024	0.427	2.5	5	127	12.7	4	2
C289	551.11	59.8	0.015	0.21	2.5	5	127	12.7	4	2
C29	61.52	89.9	0.013	0.159	2.5	5	127	12.7	4	2
C290	571.11	66.6	0.014	0.185	2.5	5	127	12.7	4	2
C291	636.44	2.0	0.024	0.793	2.5	5	127	12.7	4	2
C292	501.32	13.0	0.022	0.603	2.5	5	127	12.7	4	2
C293	408.03	5.3	0.023	0.646	2.5	5	127	12.7	4	2
C294	493.03	11.3	0.023	0.429	2.5	5	127	12.7	4	2
C295	508.43	51.5	0.018	0.201	2.5	5	127	12.7	4	2
C296	783.99	10.1	0.023	0.274	2.5	5	127	12.7	4	2
C297	688.12	15.6	0.025	0.347	2.5	5	127	12.7	4	2
C3	2146.39	14.2	0.022	0.213	2.5	5	127	12.7	4	7
C30	119.23	35.5	0.02	0.303	2.5	5	127	12.7	4	2
C31	245.68	75.8	0.021	0.176	2.5	5	127	12.7	4	2
C32	84.19	89.0	0.013	0.163	2.5	5	127	12.7	4	2
C33	339.51	95.2	0.012	0.149	2.5	5	127	12.7	4	2
C34	274.07	59.5	0.017	0.224	2.5	5	127	12.7	4	2
C35	167.47	14.5	0.024	0.362	2.5	5	127	12.7	4	2
C36	375.90	28.7	0.02	0.235	2.5	5	127	12.7	4	2
C37	89.93	92.6	0.012	0.152	2.5	5	127	12.7	4	2
C38	287.55	10.7	0.012	0.151	2.5	5	127	12.7	4	2
C39	232.61	85.5	0.013	0.171	2.5	5	127	12.7	4	2

Nombre	Ancho (m)	Imperv. (%)	N Imperv	N Perv	Dstore Imperv (mm)	Dstore Perv (mm)	Max. Infil. Rate (mm/hr)	Min. Infil. Rate (mm/hr)	Decay Constant (1/hr)	Drying Time (days)
C4	891.26	6.9	0.023	0.709	2.5	5	127	12.7	4	7
C40	391.04	79.2	0.014	0.169	2.5	5	127	12.7	4	2
C41	523.73	83.7	0.013	0.179	2.5	5	127	12.7	4	2
C42	194.63	2.0	0.024	0.406	2.5	5	127	12.7	4	2
C43	190.93	2.0	0.024	0.705	2.5	5	127	12.7	4	2
C44	160.30	91.9	0.018	0.142	2.5	5	127	12.7	4	2
C45	256.93	39.0	0.021	0.136	2.5	5	127	12.7	4	2
C46	376.44	2.0	0.024	0.418	2.5	5	127	12.7	4	2
C47	224.42	80.1	0.019	0.134	2.5	5	127	12.7	4	2
C48	226.45	28.6	0.021	0.328	2.5	5	127	12.7	4	2
C49	188.33	95.2	0.012	0.15	2.5	5	127	12.7	4	2
C5	5261.35	1.8	0.024	0.561	2.5	5	127	12.7	4	7
C50	530.70	54.7	0.017	0.231	2.5	5	127	12.7	4	2
C51	243.61	72.2	0.028	0.152	2.5	5	127	12.7	4	2
C52	199.04	2.0	0.024	0.4	2.5	5	127	12.7	4	2
C53	348.51	73.0	0.015	0.201	2.5	5	127	12.7	4	2
C54	207.38	31.6	0.014	0.182	2.5	5	127	12.7	4	2
C55	334.60	72.5	0.015	0.188	2.5	5	127	12.7	4	2
C56	134.99	65.5	0.019	0.139	2.5	5	127	12.7	4	2
C57	156.09	82.8	0.022	0.157	2.5	5	127	12.7	4	2
C58	374.11	71.8	0.015	0.204	2.5	5	127	12.7	4	2
C59	196.07	74.3	0.018	0.178	2.5	5	127	12.7	4	2
C6	2486.56	5.5	0.024	0.441	2.5	5	127	12.7	4	7
C60	139.08	59.4	0.017	0.243	2.5	5	127	12.7	4	2
C61	128.36	88.6	0.013	0.163	2.5	5	127	12.7	4	2
C62	336.49	32.2	0.021	0.306	2.5	5	127	12.7	4	2
C63	116.65	42.6	0.019	0.281	2.5	5	127	12.7	4	2
C64	226.82	95.0	0.012	0.151	2.5	5	127	12.7	4	2
C65	700.78	80.9	0.016	0.167	2.5	5	127	12.7	4	2
C66	582.56	77.5	0.014	0.192	2.5	5	127	12.7	4	2
C67	253.90	82.8	0.014	0.171	2.5	5	127	12.7	4	2
C68	332.79	85.4	0.014	0.167	2.5	5	127	12.7	4	2
C69	362.66	80.9	0.014	0.176	2.5	5	127	12.7	4	2
C7	1875.49	20.1	0.022	0.293	2.5	5	127	12.7	4	7
C70	480.66	86.5	0.018	0.156	2.5	5	127	12.7	4	2
C71	370.78	41.2	0.019	0.149	2.5	5	127	12.7	4	2
C72	382.08	2.0	0.024	0.392	2.5	5	127	12.7	4	2
C73	201.92	78.7	0.013	0.169	2.5	5	127	12.7	4	2
C74	269.99	73.0	0.016	0.198	2.5	5	127	12.7	4	2
C75	335.25	55.3	0.018	0.244	2.5	5	127	12.7	4	2
C76	455.47	38.3	0.02	0.291	2.5	5	127	12.7	4	2
C77	216.83	65.3	0.014	0.178	2.5	5	127	12.7	4	2
C78	324.53	55.4	0.015	0.172	2.5	5	127	12.7	4	2
C79	291.62	67.2	0.016	0.213	2.5	5	127	12.7	4	2
C8	700.99	18.0	0.022	0.576	2.5	5	127	12.7	4	2
C80	757.45	82.5	0.017	0.153	2.5	5	127	12.7	4	2
C81	271.01	54.5	0.016	0.201	2.5	5	127	12.7	4	2

Nombre	Ancho (m)	Imperv. (%)	N Imperv	N Perv	Dstore Imperv (mm)	Dstore Perv (mm)	Max. Infil. Rate (mm/hr)	Min. Infil. Rate (mm/hr)	Decay Constant (1/hr)	Drying Time (days)
C82	576.95	31.5	0.017	0.239	2.5	5	127	12.7	4	2
C83	299.95	66.2	0.013	0.161	2.5	5	127	12.7	4	2
C84	427.83	59.0	0.017	0.244	2.5	5	127	12.7	4	2
C85	502.67	75.9	0.014	0.187	2.5	5	127	12.7	4	2
C86	269.30	58.3	0.018	0.221	2.5	5	127	12.7	4	2
C87	439.02	68.4	0.021	0.176	2.5	5	127	12.7	4	2
C88	533.94	32.5	0.02	0.306	2.5	5	127	12.7	4	2
C89	127.10	43.8	0.018	0.203	2.5	5	127	12.7	4	2
C9	2017.40	2.1	0.024	0.292	2.5	5	127	12.7	4	7
C90	270.16	61.2	0.016	0.231	2.5	5	127	12.7	4	2
C91	225.08	38.2	0.017	0.235	2.5	5	127	12.7	4	2
C92	254.83	4.0	0.024	0.628	2.5	5	127	12.7	4	2
C93	307.42	74.5	0.015	0.167	2.5	5	127	12.7	4	2
C94	321.71	47.0	0.017	0.146	2.5	5	127	12.7	4	2
C95	263.33	2.0	0.024	0.4	2.5	5	127	12.7	4	2
C96	202.32	40.0	0.019	0.296	2.5	5	127	12.7	4	2
C97	217.41	68.8	0.015	0.206	2.5	5	127	12.7	4	2
C98	204.45	95.2	0.012	0.15	2.5	5	127	12.7	4	2
C99	310.45	57.5	0.016	0.211	2.5	5	127	12.7	4	2

14 Anexo E. Parámetros de las subcuencas calibrados con la herramienta SRTC

Nombre	Ancho (m)	Imperv. (%)	N Imperv	N Perv	Dstore Imperv (mm)	Dstore Perv (mm)	Max. Infil. Rate (mm/hr)	Min. Infil. Rate (mm/hr)	Decay Constant (1/hr)	Drying Time (days)
C1	4815.19	5.26	0.018	0.383	2.5	5	165.1	76.2	4	7
C10	3373.27	6.11	0.019	0.244	2.5	5	165.1	76.2	4	7
C100	202.23	59.96	0.01	0.191	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C101	278.13	29.22	0.015	0.324	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C102	195.09	65.71	0.01	0.218	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C103	254.06	51.87	0.012	0.263	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C104	282.32	56.99	0.012	0.25	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C105	318.74	37.74	0.014	0.334	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C106	211.92	41.82	0.014	0.293	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C107	210.58	60.40	0.011	0.183	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C108	156.17	63.50	0.013	0.225	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C109	148.83	57.82	0.012	0.206	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C11	2213.56	7.56	0.018	0.676	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C110	188.85	50.43	0.013	0.424	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C111	259.00	1.56	0.019	0.5	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C112	754.31	68.80	0.012	0.191	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C113	310.49	58.47	0.011	0.245	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C114	303.84	33.19	0.016	0.31	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C115	256.42	64.41	0.01	0.195	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C116	311.31	1.83	0.019	0.528	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C117	276.78	49.60	0.013	0.294	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C118	276.29	1.56	0.019	0.859	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C119	283.67	46.85	0.011	0.238	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C12	1644.37	1.33	0.019	0.398	2.5	5	165.1	76.2	4	7
C120	258.39	38.36	0.011	0.336	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C121	265.53	1.56	0.019	0.978	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C122	449.69	45.38	0.014	0.294	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C123	249.67	1.56	0.019	0.97	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C124	252.59	11.77	0.018	0.621	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C125	224.60	54.57	0.012	0.268	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C126	261.42	42.64	0.017	0.271	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C127	316.01	40.09	0.013	0.258	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C128	211.33	11.20	0.018	0.309	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C129	409.11	68.94	0.01	0.206	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C13	2257.94	1.56	0.019	0.819	2.5	5	165.1	76.2	4	7
C130	302.04	65.08	0.011	0.223	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C131	1004.21	38.90	0.014	0.381	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C132	265.06	55.54	0.011	0.23	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C133	375.32	1.56	0.019	0.5	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C134	303.55	1.56	0.019	0.075	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C135	245.52	72.44	0.01	0.194	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C136	338.92	16.86	0.018	0.153	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C137	246.45	48.68	0.012	0.28	2.5	5	165.1	76.2	4	2

Nombre	Ancho (m)	Imperv. (%)	N Imperv	N Perv	Dstore Imperv (mm)	Dstore Perv (mm)	Max. Infil. Rate (mm/hr)	Min. Infil. Rate (mm/hr)	Decay Constant (1/hr)	Drying Time (days)
C138	513.84	39.59	0.015	0.31	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C139	266.72	4.33	0.019	0.364	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C14	1233.53	1.52	0.019	0.648	2.5	5	165.1	76.2	4	7
C140	170.84	35.56	0.013	0.37	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C141	283.51	56.54	0.011	0.225	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C142	318.97	64.99	0.011	0.206	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C143	201.85	1.58	0.019	0.316	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C144	390.50	68.62	0.01	0.204	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C145	637.77	1.56	0.019	0.981	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C146	562.85	7.80	0.019	0.495	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C147	294.22	62.34	0.011	0.233	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C148	597.15	62.09	0.015	0.219	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C149	233.99	26.94	0.016	0.416	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C15	3013.63	1.56	0.019	0.728	2.5	5	165.1	76.2	4	7
C150	295.63	1.56	0.019	0.875	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C151	315.80	53.21	0.012	0.258	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C152	240.46	47.69	0.012	0.22	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C153	212.19	47.07	0.011	0.228	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C154	340.92	44.75	0.014	0.309	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C155	243.89	45.67	0.019	0.161	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C156	226.97	68.79	0.01	0.2	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C157	432.73	3.36	0.019	0.578	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C158	277.61	19.24	0.016	0.145	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C159	267.82	1.56	0.019	0.163	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C16	2232.78	1.22	0.019	0.43	2.5	5	165.1	76.2	4	7
C160	206.30	10.87	0.018	0.415	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C161	255.76	1.56	0.019	0.408	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C162	550.62	63.65	0.01	0.205	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C163	414.59	66.61	0.01	0.214	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C164	338.51	13.59	0.014	0.428	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C165	289.70	65.27	0.011	0.214	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C166	204.30	52.12	0.018	0.246	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C167	296.24	64.47	0.011	0.223	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C168	230.28	54.58	0.012	0.23	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C169	260.18	37.05	0.013	0.214	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C17	90.15	35.83	0.025	0.186	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C170	296.09	66.78	0.01	0.215	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C171	344.23	1.56	0.019	0.884	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C172	223.50	47.34	0.013	0.183	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C173	326.69	66.06	0.011	0.219	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C174	651.77	49.90	0.014	0.281	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C175	252.98	31.85	0.015	0.548	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C176	402.50	1.56	0.019	0.5	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C177	510.10	3.38	0.019	0.494	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C178	364.79	11.15	0.018	0.496	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C179	240.04	18.10	0.016	0.394	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C18	119.67	46.82	0.015	0.273	2.5	5	165.1	76.2	4	2

Nombre	Ancho (m)	Imperv. (%)	N Imperv	N Perv	Dstore Imperv (mm)	Dstore Perv (mm)	Max. Infil. Rate (mm/hr)	Min. Infil. Rate (mm/hr)	Decay Constant (1/hr)	Drying Time (days)
C180	409.70	1.56	0.019	0.518	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C181	390.16	59.89	0.011	0.224	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C182	380.21	14.37	0.018	0.415	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C183	336.68	41.40	0.012	0.273	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C184	276.64	10.16	0.018	0.484	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C185	399.43	59.79	0.012	0.246	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C186	405.74	5.43	0.018	0.453	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C187	1105.37	39.74	0.014	0.249	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C188	657.82	57.76	0.012	0.256	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C189	280.20	24.81	0.014	0.165	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C19	532.51	51.57	0.02	0.168	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C190	336.25	18.26	0.017	0.435	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C191	386.97	53.50	0.012	0.243	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C192	378.42	1.56	0.019	0.779	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C193	388.05	62.39	0.011	0.236	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C194	577.43	36.97	0.012	0.239	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C195	374.70	56.30	0.011	0.236	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C196	369.45	54.82	0.01	0.195	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C197	307.88	41.41	0.014	0.318	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C198	333.82	21.04	0.017	0.601	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C199	613.51	26.89	0.016	0.358	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C2	4128.05	1.83	0.019	0.516	2.5	5	165.1	76.2	4	7
C20	135.44	54.08	0.022	0.174	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C200	528.49	54.86	0.012	0.246	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C201	351.43	1.56	0.019	0.75	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C202	626.49	1.56	0.019	0.163	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C203	502.77	35.04	0.017	0.293	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C204	405.01	69.88	0.01	0.204	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C205	504.02	46.70	0.011	0.211	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C206	839.81	46.16	0.014	0.233	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C207	1124.40	25.08	0.016	0.415	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C208	326.43	29.57	0.011	0.239	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C209	389.18	20.39	0.016	0.529	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C21	244.88	74.44	0.01	0.188	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C210	346.14	13.17	0.018	0.463	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C211	400.64	59.13	0.012	0.253	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C212	511.52	63.88	0.011	0.219	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C213	445.32	2.42	0.019	0.859	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C214	427.68	71.99	0.01	0.196	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C215	332.07	32.92	0.014	0.574	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C216	360.50	47.14	0.013	0.244	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C217	844.64	70.48	0.011	0.186	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C218	320.22	56.01	0.012	0.216	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C219	1653.67	54.34	0.011	0.216	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C22	203.21	54.59	0.017	0.188	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C220	891.92	1.56	0.019	0.075	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C221	736.36	8.00	0.018	0.38	2.5	5	165.1	76.2	4	2

Nombre	Ancho (m)	Imperv. (%)	N Imperv	N Perv	Dstore Imperv (mm)	Dstore Perv (mm)	Max. Infil. Rate (mm/hr)	Min. Infil. Rate (mm/hr)	Decay Constant (1/hr)	Drying Time (days)
C222	418.95	1.56	0.019	0.72	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C223	894.71	5.00	0.019	0.343	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C224	335.39	30.89	0.014	0.504	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C225	523.77	1.56	0.019	0.626	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C226	564.49	1.56	0.019	1	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C227	532.04	65.63	0.011	0.213	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C228	425.82	20.14	0.017	0.309	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C229	522.03	36.45	0.013	0.238	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C23	117.08	69.18	0.01	0.21	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C230	408.79	65.57	0.01	0.21	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C231	294.75	67.74	0.01	0.206	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C232	359.58	1.56	0.019	0.906	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C233	318.81	62.03	0.011	0.24	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C234	327.69	43.91	0.014	0.239	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C235	395.91	3.08	0.019	0.43	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C236	913.74	60.86	0.013	0.22	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C237	283.34	33.04	0.011	0.234	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C238	436.06	29.46	0.016	0.183	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C239	499.52	20.96	0.019	0.354	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C24	140.12	59.79	0.01	0.21	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C240	397.49	27.50	0.013	0.411	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C241	282.20	62.98	0.011	0.209	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C242	534.00	64.34	0.011	0.228	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C243	350.85	25.75	0.016	0.424	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C244	490.79	1.56	0.019	0.575	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C245	409.08	1.56	0.019	0.505	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C246	312.57	43.94	0.014	0.194	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C247	539.90	1.56	0.019	0.659	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C248	395.39	41.47	0.014	0.406	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C249	326.06	49.30	0.013	0.255	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C25	198.32	39.71	0.018	0.136	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C250	385.62	1.56	0.019	0.544	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C251	556.75	48.95	0.012	0.269	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C252	492.46	36.97	0.014	0.285	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C253	419.14	51.85	0.014	0.265	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C254	435.71	6.35	0.018	0.58	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C255	403.58	66.29	0.011	0.218	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C256	389.33	58.08	0.012	0.249	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C257	643.16	46.33	0.017	0.233	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C258	516.22	18.04	0.017	0.24	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C259	415.53	27.42	0.014	0.42	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C26	385.67	59.48	0.02	0.2	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C260	609.86	67.73	0.01	0.206	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C261	404.40	19.45	0.017	0.34	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C262	682.85	46.98	0.013	0.21	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C263	525.54	13.81	0.017	0.574	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C264	645.96	54.71	0.012	0.225	2.5	5	165.1	76.2	4	2

Nombre	Ancho (m)	Imperv. (%)	N Imperv	N Perv	Dstore Imperv (mm)	Dstore Perv (mm)	Max. Infil. Rate (mm/hr)	Min. Infil. Rate (mm/hr)	Decay Constant (1/hr)	Drying Time (days)
C265	701.48	37.26	0.015	0.303	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C266	753.82	59.07	0.012	0.235	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C267	496.94	7.62	0.018	0.599	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C268	358.10	23.26	0.016	0.694	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C269	463.94	18.37	0.016	0.618	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C27	105.08	74.32	0.01	0.186	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C270	497.60	5.40	0.017	0.494	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C271	461.32	38.68	0.012	0.215	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C272	673.30	67.82	0.01	0.201	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C273	468.99	22.26	0.016	0.435	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C274	888.65	1.56	0.019	0.988	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C275	595.23	39.93	0.014	0.268	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C276	908.51	59.91	0.012	0.223	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C277	554.13	11.86	0.018	0.694	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C278	603.46	66.89	0.01	0.211	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C279	496.50	23.60	0.016	0.335	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C28	178.17	61.93	0.01	0.216	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C280	1134.02	27.21	0.01	0.21	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C281	457.88	11.65	0.018	0.494	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C282	656.71	50.29	0.013	0.244	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C283	359.93	52.43	0.014	0.245	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C284	588.30	1.99	0.019	0.579	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C285	428.24	11.31	0.018	0.798	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C286	544.55	43.93	0.013	0.291	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C287	1105.10	36.03	0.014	0.34	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C288	849.83	1.56	0.019	0.534	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C289	620.00	46.68	0.012	0.263	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C29	69.21	70.14	0.01	0.199	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C290	642.50	52.00	0.011	0.231	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C291	716.00	1.56	0.019	0.991	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C292	563.99	10.14	0.018	0.754	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C293	459.03	4.12	0.018	0.808	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C294	554.66	8.85	0.018	0.536	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C295	571.98	40.20	0.014	0.251	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C296	881.99	7.88	0.018	0.343	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C297	774.14	12.19	0.02	0.434	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C3	2414.69	11.09	0.018	0.266	2.5	5	165.1	76.2	4	7
C30	134.13	27.74	0.016	0.379	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C31	276.39	59.14	0.017	0.22	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C32	94.71	69.47	0.01	0.204	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C33	381.95	74.27	0.01	0.186	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C34	308.33	46.45	0.014	0.28	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C35	188.40	11.31	0.019	0.453	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C36	422.89	22.39	0.016	0.294	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C37	101.17	72.28	0.01	0.19	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C38	323.49	8.39	0.01	0.189	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C39	261.69	66.73	0.01	0.214	2.5	5	165.1	76.2	4	2

Nombre	Ancho (m)	Imperv. (%)	N Imperv	N Perv	Dstore Imperv (mm)	Dstore Perv (mm)	Max. Infil. Rate (mm/hr)	Min. Infil. Rate (mm/hr)	Decay Constant (1/hr)	Drying Time (days)
C4	1002.67	5.41	0.018	0.886	2.5	5	165.1	76.2	4	7
C40	439.92	61.82	0.011	0.211	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C41	589.20	65.33	0.01	0.224	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C42	218.96	1.56	0.019	0.508	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C43	214.80	1.56	0.019	0.881	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C44	180.34	71.71	0.014	0.178	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C45	289.05	30.48	0.017	0.17	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C46	423.50	1.56	0.019	0.523	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C47	252.47	62.48	0.015	0.168	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C48	254.76	22.35	0.017	0.41	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C49	211.87	74.29	0.01	0.188	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C5	5919.02	1.38	0.019	0.701	2.5	5	165.1	76.2	4	7
C50	597.04	42.73	0.014	0.289	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C51	274.06	56.38	0.022	0.19	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C52	223.92	1.56	0.019	0.5	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C53	392.07	56.99	0.012	0.251	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C54	233.30	24.70	0.011	0.228	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C55	376.43	56.55	0.012	0.235	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C56	151.86	51.09	0.015	0.174	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C57	175.60	64.65	0.018	0.196	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C58	420.87	56.08	0.012	0.255	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C59	220.58	57.98	0.014	0.223	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C6	2797.38	4.33	0.019	0.551	2.5	5	165.1	76.2	4	7
C60	156.47	46.35	0.014	0.304	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C61	144.41	69.14	0.01	0.204	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C62	378.55	25.16	0.017	0.383	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C63	131.23	33.27	0.015	0.351	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C64	255.17	74.14	0.01	0.189	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C65	788.38	63.17	0.013	0.209	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C66	655.38	60.47	0.011	0.24	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C67	285.64	64.63	0.011	0.214	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C68	374.39	66.64	0.011	0.209	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C69	407.99	63.12	0.011	0.22	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C7	2109.93	15.67	0.018	0.366	2.5	5	165.1	76.2	4	7
C70	540.74	67.52	0.014	0.195	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C71	417.13	32.18	0.015	0.186	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C72	429.84	1.56	0.019	0.49	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C73	227.16	61.41	0.01	0.211	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C74	303.74	56.94	0.013	0.248	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C75	377.16	43.19	0.014	0.305	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C76	512.40	29.89	0.016	0.364	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C77	243.93	50.99	0.011	0.223	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C78	365.10	43.28	0.012	0.215	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C79	328.07	52.46	0.013	0.266	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C8	788.61	14.05	0.018	0.72	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C80	852.13	64.37	0.014	0.191	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C81	304.89	42.56	0.013	0.251	2.5	5	165.1	76.2	4	2

Nombre	Ancho (m)	Imperv. (%)	N Imperv	N Perv	Dstore Imperv (mm)	Dstore Perv (mm)	Max. Infil. Rate (mm/hr)	Min. Infil. Rate (mm/hr)	Decay Constant (1/hr)	Drying Time (days)
C82	649.07	24.58	0.014	0.299	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C83	337.44	51.65	0.01	0.201	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C84	481.31	46.07	0.014	0.305	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C85	565.50	59.23	0.011	0.234	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C86	302.96	45.50	0.014	0.276	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C87	493.90	53.38	0.017	0.22	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C88	600.68	25.40	0.016	0.383	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C89	142.99	34.20	0.014	0.254	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C9	2269.58	1.62	0.019	0.365	2.5	5	165.1	76.2	4	7
C90	303.93	47.74	0.013	0.289	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C91	253.22	29.83	0.014	0.294	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C92	286.68	3.16	0.019	0.785	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C93	345.85	58.16	0.012	0.209	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C94	361.92	36.70	0.014	0.183	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C95	296.25	1.56	0.019	0.5	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C96	227.61	31.26	0.015	0.37	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C97	244.59	53.69	0.012	0.258	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C98	230.01	74.27	0.01	0.188	2.5	5	165.1	76.2	4	2
C99	349.26	44.91	0.013	0.264	2.5	5	165.1	76.2	4	2

15 Anexo F. Parámetros de las subcuencas considerando el suelo húmedo

Nombre	Ancho (m)	Imperv. (%)	Dstore Imperv (mm)	Dstore Perv (mm)	Max. Infil. Rate (mm/hr)	Min. Infil. Rate (mm/hr)
C1	4815.19	5.26	2.5	5	83	12.7
C10	3373.27	6.11	2.5	5	83	12.7
C100	202.23	59.96	2.5	5	76.2	12.7
C101	278.13	29.22	2.5	5	83	12.7
C102	195.09	65.71	2.5	5	76.2	12.7
C103	254.06	51.87	2.5	5	76.2	12.7
C104	282.32	56.99	2.5	5	76.2	12.7
C105	318.74	37.74	2.5	5	76.2	12.7
C106	211.92	41.82	2.5	5	76.2	12.7
C107	210.58	60.4	2.5	5	76.2	12.7
C108	156.17	63.5	2.5	5	76.2	12.7
C109	148.83	57.82	2.5	5	76.2	12.7
C11	2213.56	7.56	2.5	5	83	12.7
C110	188.85	50.43	2.5	5	76.2	12.7
C111	259	1.56	2.5	5	83	12.7
C112	754.31	68.8	2.5	5	76.2	12.7
C113	310.49	58.47	2.5	5	76.2	12.7
C114	303.84	33.19	2.5	5	76.2	12.7
C115	256.42	64.41	2.5	5	76.2	12.7
C116	311.31	1.83	2.5	5	83	12.7
C117	276.78	49.6	2.5	5	83	12.7
C118	276.29	1.56	2.5	5	83	12.7
C119	283.67	46.85	2.5	5	76.2	12.7
C12	1644.37	1.33	2.5	5	83	12.7
C120	258.39	38.36	2.5	5	76.2	12.7
C121	265.53	1.56	2.5	5	83	12.7
C122	449.69	45.38	2.5	5	76.2	12.7
C123	249.67	1.56	2.5	5	83	12.7
C124	252.59	11.77	2.5	5	76.2	12.7
C125	224.6	54.57	2.5	5	76.2	12.7
C126	261.42	42.64	2.5	5	76.2	12.7
C127	316.01	40.09	2.5	5	76.2	12.7
C128	211.33	11.2	2.5	5	76.2	12.7
C129	409.11	68.94	2.5	5	76.2	12.7
C13	2257.94	1.56	2.5	5	83	12.7
C130	302.04	65.08	2.5	5	76.2	12.7
C131	1004.21	38.9	2.5	5	83	12.7

Nombre	Ancho (m)	Imperv. (%)	Dstore Imperv (mm)	Dstore Perv (mm)	Max. Infil. Rate (mm/hr)	Min. Infil. Rate (mm/hr)
C132	265.06	55.54	2.5	5	76.2	12.7
C133	375.32	1.56	2.5	5	83	12.7
C134	303.55	1.56	2.5	5	83	12.7
C135	245.52	72.44	2.5	5	76.2	12.7
C136	338.92	16.86	2.5	5	76.2	12.7
C137	246.45	48.68	2.5	5	76.2	12.7
C138	513.84	39.59	2.5	5	76.2	12.7
C139	266.72	4.33	2.5	5	83	12.7
C14	1233.53	1.52	2.5	5	83	12.7
C140	170.84	35.56	2.5	5	76.2	12.7
C141	283.51	56.54	2.5	5	76.2	12.7
C142	318.97	64.99	2.5	5	76.2	12.7
C143	201.85	1.58	2.5	5	83	12.7
C144	390.5	68.62	2.5	5	76.2	12.7
C145	637.77	1.56	2.5	5	83	12.7
C146	562.85	7.8	2.5	5	83	12.7
C147	294.22	62.34	2.5	5	76.2	12.7
C148	597.15	62.09	2.5	5	76.2	12.7
C149	233.99	26.94	2.5	5	76.2	12.7
C15	3013.63	1.56	2.5	5	83	12.7
C150	295.63	1.56	2.5	5	83	12.7
C151	315.8	53.21	2.5	5	76.2	12.7
C152	240.46	47.69	2.5	5	76.2	12.7
C153	212.19	47.07	2.5	5	76.2	12.7
C154	340.92	44.75	2.5	5	83	12.7
C155	243.89	45.67	2.5	5	76.2	12.7
C156	226.97	68.79	2.5	5	76.2	12.7
C157	432.73	3.36	2.5	5	76.2	12.7
C158	277.61	19.24	2.5	5	76.2	12.7
C159	267.82	1.56	2.5	5	76.2	12.7
C16	2232.78	1.22	2.5	5	83	12.7
C160	206.3	10.87	2.5	5	76.2	12.7
C161	255.76	1.56	2.5	5	83	12.7
C162	550.62	63.65	2.5	5	76.2	12.7
C163	414.59	66.61	2.5	5	76.2	12.7
C164	338.51	13.59	2.5	5	76.2	12.7
C165	289.7	65.27	2.5	5	76.2	12.7
C166	204.3	52.12	2.5	5	76.2	12.7
C167	296.24	64.47	2.5	5	76.2	12.7
C168	230.28	54.58	2.5	5	76.2	12.7
C169	260.18	37.05	2.5	5	76.2	12.7

Nombre	Ancho (m)	Imperv. (%)	Dstore Imperv (mm)	Dstore Perv (mm)	Max. Infil. Rate (mm/hr)	Min. Infil. Rate (mm/hr)
C17	90.15	35.83	2.5	5	76.2	12.7
C170	296.09	66.78	2.5	5	76.2	12.7
C171	344.23	1.56	2.5	5	83	12.7
C172	223.5	47.34	2.5	5	76.2	12.7
C173	326.69	66.06	2.5	5	76.2	12.7
C174	651.77	49.9	2.5	5	76.2	12.7
C175	252.98	31.85	2.5	5	76.2	12.7
C176	402.5	1.56	2.5	5	83	12.7
C177	510.1	3.38	2.5	5	83	12.7
C178	364.79	11.15	2.5	5	76.2	12.7
C179	240.04	18.1	2.5	5	76.2	12.7
C18	119.67	46.82	2.5	5	76.2	12.7
C180	409.7	1.56	2.5	5	83	12.7
C181	390.16	59.89	2.5	5	76.2	12.7
C182	380.21	14.37	2.5	5	76.2	12.7
C183	336.68	41.4	2.5	5	76.2	12.7
C184	276.64	10.16	2.5	5	76.2	12.7
C185	399.43	59.79	2.5	5	76.2	12.7
C186	405.74	5.43	2.5	5	83	12.7
C187	1105.37	39.74	2.5	5	76.2	12.7
C188	657.82	57.76	2.5	5	76.2	12.7
C189	280.2	24.81	2.5	5	76.2	12.7
C19	532.51	51.57	2.5	5	76.2	12.7
C190	336.25	18.26	2.5	5	76.2	12.7
C191	386.97	53.5	2.5	5	76.2	12.7
C192	378.42	1.56	2.5	5	83	12.7
C193	388.05	62.39	2.5	5	76.2	12.7
C194	577.43	36.97	2.5	5	76.2	12.7
C195	374.7	56.3	2.5	5	76.2	12.7
C196	369.45	54.82	2.5	5	76.2	12.7
C197	307.88	41.41	2.5	5	76.2	12.7
C198	333.82	21.04	2.5	5	76.2	12.7
C199	613.51	26.89	2.5	5	83	12.7
C2	4128.05	1.83	2.5	5	83	12.7
C20	135.44	54.08	2.5	5	76.2	12.7
C200	528.49	54.86	2.5	5	76.2	12.7
C201	351.43	1.56	2.5	5	83	12.7
C202	626.49	1.56	2.5	5	76.2	12.7
C203	502.77	35.04	2.5	5	76.2	12.7
C204	405.01	69.88	2.5	5	76.2	12.7
C205	504.02	46.7	2.5	5	76.2	12.7

Nombre	Ancho (m)	Imperv. (%)	Dstore Imperv (mm)	Dstore Perv (mm)	Max. Infil. Rate (mm/hr)	Min. Infil. Rate (mm/hr)
C206	839.81	46.16	2.5	5	76.2	12.7
C207	1124.4	25.08	2.5	5	76.2	12.7
C208	326.43	29.57	2.5	5	76.2	12.7
C209	389.18	20.39	2.5	5	76.2	12.7
C21	244.88	74.44	2.5	5	83	12.7
C210	346.14	13.17	2.5	5	76.2	12.7
C211	400.64	59.13	2.5	5	76.2	12.7
C212	511.52	63.88	2.5	5	76.2	12.7
C213	445.32	2.42	2.5	5	83	12.7
C214	427.68	71.99	2.5	5	76.2	12.7
C215	332.07	32.92	2.5	5	76.2	12.7
C216	360.5	47.14	2.5	5	76.2	12.7
C217	844.64	70.48	2.5	5	76.2	12.7
C218	320.22	56.01	2.5	5	76.2	12.7
C219	1653.67	54.34	2.5	5	76.2	12.7
C22	203.21	54.59	2.5	5	76.2	12.7
C220	891.92	1.56	2.5	5	83	12.7
C221	736.36	8	2.5	5	76.2	12.7
C222	418.95	1.56	2.5	5	83	12.7
C223	894.71	5	2.5	5	83	12.7
C224	335.39	30.89	2.5	5	76.2	12.7
C225	523.77	1.56	2.5	5	76.2	12.7
C226	564.49	1.56	2.5	5	83	12.7
C227	532.04	65.63	2.5	5	76.2	12.7
C228	425.82	20.14	2.5	5	76.2	12.7
C229	522.03	36.45	2.5	5	76.2	12.7
C23	117.08	69.18	2.5	5	76.2	12.7
C230	408.79	65.57	2.5	5	76.2	12.7
C231	294.75	67.74	2.5	5	76.2	12.7
C232	359.58	1.56	2.5	5	83	12.7
C233	318.81	62.03	2.5	5	76.2	12.7
C234	327.69	43.91	2.5	5	76.2	12.7
C235	395.91	3.08	2.5	5	83	12.7
C236	913.74	60.86	2.5	5	76.2	12.7
C237	283.34	33.04	2.5	5	76.2	12.7
C238	436.06	29.46	2.5	5	76.2	12.7
C239	499.52	20.96	2.5	5	76.2	12.7
C24	140.12	59.79	2.5	5	76.2	12.7
C240	397.49	27.5	2.5	5	76.2	12.7
C241	282.2	62.98	2.5	5	76.2	12.7
C242	534	64.34	2.5	5	76.2	12.7

Nombre	Ancho (m)	Imperv. (%)	Dstore Imperv (mm)	Dstore Perv (mm)	Max. Infil. Rate (mm/hr)	Min. Infil. Rate (mm/hr)
C243	350.85	25.75	2.5	5	76.2	12.7
C244	490.79	1.56	2.5	5	83	12.7
C245	409.08	1.56	2.5	5	83	12.7
C246	312.57	43.94	2.5	5	76.2	12.7
C247	539.9	1.56	2.5	5	83	12.7
C248	395.39	41.47	2.5	5	76.2	12.7
C249	326.06	49.3	2.5	5	76.2	12.7
C25	198.32	39.71	2.5	5	76.2	12.7
C250	385.62	1.56	2.5	5	83	12.7
C251	556.75	48.95	2.5	5	76.2	12.7
C252	492.46	36.97	2.5	5	76.2	12.7
C253	419.14	51.85	2.5	5	76.2	12.7
C254	435.71	6.35	2.5	5	76.2	12.7
C255	403.58	66.29	2.5	5	76.2	12.7
C256	389.33	58.08	2.5	5	76.2	12.7
C257	643.16	46.33	2.5	5	76.2	12.7
C258	516.22	18.04	2.5	5	76.2	12.7
C259	415.53	27.42	2.5	5	76.2	12.7
C26	385.67	59.48	2.5	5	76.2	12.7
C260	609.86	67.73	2.5	5	76.2	12.7
C261	404.4	19.45	2.5	5	76.2	12.7
C262	682.85	46.98	2.5	5	76.2	12.7
C263	525.54	13.81	2.5	5	76.2	12.7
C264	645.96	54.71	2.5	5	76.2	12.7
C265	701.48	37.26	2.5	5	76.2	12.7
C266	753.82	59.07	2.5	5	76.2	12.7
C267	496.94	7.62	2.5	5	76.2	12.7
C268	358.1	23.26	2.5	5	76.2	12.7
C269	463.94	18.37	2.5	5	76.2	12.7
C27	105.08	74.32	2.5	5	76.2	12.7
C270	497.6	5.4	2.5	5	83	12.7
C271	461.32	38.68	2.5	5	76.2	12.7
C272	673.3	67.82	2.5	5	76.2	12.7
C273	468.99	22.26	2.5	5	76.2	12.7
C274	888.65	1.56	2.5	5	83	12.7
C275	595.23	39.93	2.5	5	83	12.7
C276	908.51	59.91	2.5	5	76.2	12.7
C277	554.13	11.86	2.5	5	83	12.7
C278	603.46	66.89	2.5	5	76.2	12.7
C279	496.5	23.6	2.5	5	76.2	12.7
C28	178.17	61.93	2.5	5	76.2	12.7

Nombre	Ancho (m)	Imperv. (%)	Dstore Imperv (mm)	Dstore Perv (mm)	Max. Infil. Rate (mm/hr)	Min. Infil. Rate (mm/hr)
C280	1134.02	27.21	2.5	5	76.2	12.7
C281	457.88	11.65	2.5	5	76.2	12.7
C282	656.71	50.29	2.5	5	76.2	12.7
C283	359.93	52.43	2.5	5	76.2	12.7
C284	588.3	1.99	2.5	5	83	12.7
C285	428.24	11.31	2.5	5	76.2	12.7
C286	544.55	43.93	2.5	5	76.2	12.7
C287	1105.1	36.03	2.5	5	76.2	12.7
C288	849.83	1.56	2.5	5	83	12.7
C289	620	46.68	2.5	5	76.2	12.7
C29	69.21	70.14	2.5	5	76.2	12.7
C290	642.5	52	2.5	5	76.2	12.7
C291	716	1.56	2.5	5	83	12.7
C292	563.99	10.14	2.5	5	76.2	12.7
C293	459.03	4.12	2.5	5	83	12.7
C294	554.66	8.85	2.5	5	83	12.7
C295	571.98	40.2	2.5	5	76.2	12.7
C296	881.99	7.88	2.5	5	83	12.7
C297	774.14	12.19	2.5	5	76.2	12.7
C3	2414.69	11.09	2.5	5	83	12.7
C30	134.13	27.74	2.5	5	76.2	12.7
C31	276.39	59.14	2.5	5	76.2	12.7
C32	94.71	69.47	2.5	5	76.2	12.7
C33	381.95	74.27	2.5	5	76.2	12.7
C34	308.33	46.45	2.5	5	76.2	12.7
C35	188.4	11.31	2.5	5	76.2	12.7
C36	422.89	22.39	2.5	5	76.2	12.7
C37	101.17	72.28	2.5	5	76.2	12.7
C38	323.49	8.39	2.5	5	76.2	12.7
C39	261.69	66.73	2.5	5	76.2	12.7
C4	1002.67	5.41	2.5	5	83	12.7
C40	439.92	61.82	2.5	5	76.2	12.7
C41	589.2	65.33	2.5	5	76.2	12.7
C42	218.96	1.56	2.5	5	83	12.7
C43	214.8	1.56	2.5	5	83	12.7
C44	180.34	71.71	2.5	5	76.2	12.7
C45	289.05	30.48	2.5	5	76.2	12.7
C46	423.5	1.56	2.5	5	83	12.7
C47	252.47	62.48	2.5	5	76.2	12.7
C48	254.76	22.35	2.5	5	76.2	12.7
C49	211.87	74.29	2.5	5	83	12.7

Nombre	Ancho (m)	Imperv. (%)	Dstore Imperv (mm)	Dstore Perv (mm)	Max. Infil. Rate (mm/hr)	Min. Infil. Rate (mm/hr)
C5	5919.02	1.38	2.5	5	83	12.7
C50	597.04	42.73	2.5	5	76.2	12.7
C51	274.06	56.38	2.5	5	76.2	12.7
C52	223.92	1.56	2.5	5	83	12.7
C53	392.07	56.99	2.5	5	76.2	12.7
C54	233.3	24.7	2.5	5	76.2	12.7
C55	376.43	56.55	2.5	5	76.2	12.7
C56	151.86	51.09	2.5	5	76.2	12.7
C57	175.6	64.65	2.5	5	76.2	12.7
C58	420.87	56.08	2.5	5	76.2	12.7
C59	220.58	57.98	2.5	5	76.2	12.7
C6	2797.38	4.33	2.5	5	83	12.7
C60	156.47	46.35	2.5	5	76.2	12.7
C61	144.41	69.14	2.5	5	76.2	12.7
C62	378.55	25.16	2.5	5	76.2	12.7
C63	131.23	33.27	2.5	5	76.2	12.7
C64	255.17	74.14	2.5	5	83	12.7
C65	788.38	63.17	2.5	5	76.2	12.7
C66	655.38	60.47	2.5	5	76.2	12.7
C67	285.64	64.63	2.5	5	76.2	12.7
C68	374.39	66.64	2.5	5	76.2	12.7
C69	407.99	63.12	2.5	5	76.2	12.7
C7	2109.93	15.67	2.5	5	83	12.7
C70	540.74	67.52	2.5	5	76.2	12.7
C71	417.13	32.18	2.5	5	76.2	12.7
C72	429.84	1.56	2.5	5	83	12.7
C73	227.16	61.41	2.5	5	76.2	12.7
C74	303.74	56.94	2.5	5	76.2	12.7
C75	377.16	43.19	2.5	5	76.2	12.7
C76	512.4	29.89	2.5	5	76.2	12.7
C77	243.93	50.99	2.5	5	76.2	12.7
C78	365.1	43.28	2.5	5	76.2	12.7
C79	328.07	52.46	2.5	5	76.2	12.7
C8	788.61	14.05	2.5	5	76.2	12.7
C80	852.13	64.37	2.5	5	76.2	12.7
C81	304.89	42.56	2.5	5	76.2	12.7
C82	649.07	24.58	2.5	5	76.2	12.7
C83	337.44	51.65	2.5	5	76.2	12.7
C84	481.31	46.07	2.5	5	76.2	12.7
C85	565.5	59.23	2.5	5	76.2	12.7
C86	302.96	45.5	2.5	5	76.2	12.7

Nombre	Ancho (m)	Imperv. (%)	Dstore Imperv (mm)	Dstore Perv (mm)	Max. Infil. Rate (mm/hr)	Min. Infil. Rate (mm/hr)
C87	493.9	53.38	2.5	5	76.2	12.7
C88	600.68	25.4	2.5	5	76.2	12.7
C89	142.99	34.2	2.5	5	76.2	12.7
C9	2269.58	1.62	2.5	5	83	12.7
C90	303.93	47.74	2.5	5	76.2	12.7
C91	253.22	29.83	2.5	5	76.2	12.7
C92	286.68	3.16	2.5	5	83	12.7
C93	345.85	58.16	2.5	5	76.2	12.7
C94	361.92	36.7	2.5	5	76.2	12.7
C95	296.25	1.56	2.5	5	83	12.7
C96	227.61	31.26	2.5	5	76.2	12.7
C97	244.59	53.69	2.5	5	76.2	12.7
C98	230.01	74.27	2.5	5	76.2	12.7
C99	349.26	44.91	2.5	5	76.2	12.7