

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA
FACULTAD DE INFORMÁTICA CULIACÁN
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y EL ESPACIO
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA INFORMACIÓN**



**DESARROLLO METODOLÓGICO PARA LA SIMULACIÓN GEOESPACIAL
DE INUNDACIÓN MEDIANTE TECNOLOGÍAS DE INFORMACIÓN
GEOGRÁFICA. CASO DE ESTUDIO: CIUDAD DE CULIACÁN**

TESIS

COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN CIENCIAS DE LA INFORMACIÓN

PRESENTA:

EVANGELINA AVILA ACEVES

DIRECTORES:

DR. WENSESLAO PLATA ROCHA

DR. SERGIO ALBERTO MONJARDIN ARMENTA

Culiacán Rosales, febrero 2025.



Dirección General de Bibliotecas
Ciudad Universitaria
Av. de las Américas y Blvd. Universitarios
C. P. 80010 Culiacán, Sinaloa, México.
Tel. (667) 713 78 32 y 712 50 57
dgbuas@uas.edu.mx

UAS-Dirección General de Bibliotecas

Repositorio Institucional Buelna

Restricciones de uso

Todo el material contenido en la presente tesis está protegido por la Ley Federal de Derechos de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

Queda prohibido la reproducción parcial o total de esta tesis. El uso de imágenes, tablas, gráficas, texto y demás material que sea objeto de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente correctamente mencionando al o los autores del presente estudio empírico. Cualquier uso distinto, como el lucro, reproducción, edición o modificación sin autorización expresa de quienes gozan de la propiedad intelectual, será perseguido y sancionado por el Instituto Nacional de Derechos de Autor.

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial
Compartir Igual, 4.0 Internacional



DEDICATORIA

A Dios, mi familia, amigos, y la dra. Swift.

AGRADECIMIENTOS

A DIOS, por su infinita misericordia hacia mi, y permitirme cumplir este proceso.

A la Universidad Autónoma de Sinaloa, la cual, aún a pie de lucha en defender la autonomía universitaria, permanece abierta y otorgando el mejor recurso que puede otorgar a quién bajo las alas del águila se refugia, el conocimiento.

A la nueva Secretaria de Ciencias Humanidades, y Tecnología (Secihti), antes CONAHCYT, por brindarme el sustento económico durante los años invertidos en el doctorado.

A mis asesores, por su tiempo, paciencia y confianza puesta en mí, así como también en animarme en participar en distintos eventos de difusión de la ciencia, por ultimo, pero menos importante, en su asesoría continua en todo este trayecto.

A mi familia a quienes amo con todo el corazón, y quienes han sido la fuerza motora, que aún en la distancia me sabia teniendo su amor, confianza y animos en los momentos mas oscuros.

Al Instituto Mexicano de Tecnologías del Agua (IMTA) y al Dr. Juan Pablo Rodríguez Rincón, por su apoyo en la realización de la estancia académica en septiembre de 2023, y todas las observaciones y nuevas herramientas que ayudaron a esta investigación.

A mis sinodales por sus revisiones oportunas, en cada seminario y sesión de tutorías, así como por todo su apoyo, amistad y trabajo en equipo en los productos obtenidos a raíz de esta investigación.

A mis amigas, Yedid, Lidia, Jazive, esta red de apoyo que tejimos, brindándonos soporte tanto en la investigación, como en los días en los que la construimos

ÍNDICE

DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTOS	vi
RESUMEN	16
ABSTRACT	17
CAPITULO I: INTRODUCCIÓN	18
1.1. Introducción	18
1.2. Planteamiento del problema.....	20
1.3. Justificación	20
1.4. Hipótesis	21
1.5. Objetivos de la investigación	21
1.5.1. Objetivo General	21
Objetivos Específicos	21
Preguntas de investigación	22
CAPITULO II: ANTECEDENTES.....	23
2.1. Análisis de precipitaciones	23
2.2. Simulación de inundaciones	24
2.3. Modelación hidrológica de inundaciones	26
2.4. Modelación hidráulica de inundaciones	27
2.5. Estudios regionales	30
CAPITULO III. MARCO TEÓRICO.....	31
3.1. Hidrología	31
3.2. Cuenca hidrográfica	31
3.3. Ciclo hidrológico	32
3.4. Precipitación	33
3.5. Infiltración, Evaporación, Escorrentía	40
3.6. Suelo	41

3.7. Relieve topográfico de la cuenca	42
3.8. Inundaciones	43
3.8.1. Inundaciones urbanas.....	45
3.8.2. Riesgo, Peligro, Vulnerabilidad.....	46
3.9. Medidas de control de inundaciones.....	47
3.10. Modelación geoespacial	49
3.10.1. Modelo probabilístico	49
3.10.2. Modelo empírico	50
3.10.3. Modelo físico	50
3.10.4. Modelo numérico	51
3.10.5. Simulación de inundaciones.....	56
3.10.6. Programas de simulación hidráulica	56
3.11. Observación de la tierra.....	59
3.12. Proyectos de observación terrestre.....	59
3.12.1. Misiones de observación terrestre.....	60
3.12.2. Misiones de Medición de Lluvias	60
3.12.3. Misiones de representación vertical del terreno.....	63
3.13. Cobertura de suelo y vegetación	63
3.14. Álgebra de bandas espectrales.....	64
3.15. Validación	65
CAPITULO IV: METODOLOGÍA.....	69
4.1. Área de estudio	69
4.2. Clima.....	70
4.2.1. Presas	71
4.3. Materiales.....	72
4.4. Métodos	73
4.4.1. Delimitación del parteaguas.....	75

4.4.2.	Pre procesamiento de la serie histórica de precipitaciones	77
4.4.3.	Análisis de precipitaciones, cálculo de precipitación media para cada periodo de retorno.....	78
4.4.4.	Geomorfología, parámetros de forma y constantes de escurrimiento de la cuenca	80
4.4.5.	Calculo de tiempo de concentración	85
4.4.6.	Hidrograma unitario sintético	86
4.4.7.	Modelación hidrológica semidistribuido	89
4.4.8.	Simulación hidráulica	90
4.4.8.1.	Simulación 1D.....	91
4.4.8.2.	Simulación 2D modelo acoplado	92
4.4.8.3.	Simulación 2D-SWE Modelo hidrológico-hidráulico integrado	94
4.4.8.4.	Simulación conjunta 2D+2D-SWE.....	95
4.4.9.	Validación	98
4.4.10.	Índice de Peligro de inundación.....	99
CAPITULO V: RESULTADOS Y DISCUSIONES.....		102
5.1.	Delimitación del parteaguas	102
5.2.	Pre-procesamiento de la serie histórica de datos de precipitacion.....	103
5.2.1.	Datos pluviométricos	103
5.2.1.1.	Análisis de frecuencia para modelo hidrológico concentrado	108
5.2.1.2.	Serie temporal para modelo hidrológico distribuido	110
5.2.2.	Malla de precipitacion satelital de datos CHIRPS.....	111
5.3.	Geomorfología y parámetros de forma de la cuenca	115
5.3.1.	Tiempo de concentración.....	119
5.4.	Modelo hidrológico	120
5.4.1.	Modelo hidrológico concentrado	120
5.4.2.	Modelo hidrológico distribuido	121
5.5.	Simulación hidráulica unidimensional	123

5.5.1. Simulación hidráulica 1D modelo concentrado.....	123
5.5.2. Simulación hidráulica 1D modelo semidistribuido	125
5.6. Simulación hidráulica 2D	127
5.6.1. Simulación 2D acoplado.....	128
5.6.2. Simulación 2D integrado	132
5.6.3. Simulación 2D conjunto	136
5.7. Validación.....	140
5.7.1. Validación de modelo estático, simulación 1D	140
5.7.2. Validación de modelo dinámico, simulación 2D.....	141
5.8. Índice de peligro de inundación.....	148
CAPITULO VII: CONCLUSIONES	153
BIBLIOGRAFÍA	156
ANEXOS	175
ANEXO 1. Productos obtenidos.....	175
ANEXO 2. Descargar datos de precipitación desde portal CONAGUA.....	175
ANEXO 3. Calculo de CN para cada sub cuenca en RStudio.....	180
ANEXO 4. Descarga de imágenes de radar Sentinel-2 desde GEE	181

ÍNDICE DE FIGURAS

FIG. 1 CLASIFICACIÓN DE LAS MEDIDAS DE CONTROL DE INUNDACIONES. FUENTE: TRADUCIDO DE (AVILA-ACEVES ET AL., 2023).	48
FIG. 2 UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.	70
FIG. 3 ESQUEMA DE METODOLÓGICO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	74
FIG. 4 DELIMITACIÓN DEL PARTEAGUAS DE LA CUENCA PARA EL MODELO HIDROLÓGICO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	76
FIG. 5 ESQUEMA METODOLÓGICO DE LAS PRUEBAS DE HOMOGENEIDAD E INDEPENDENCIA DE LAS ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS.....	77
FIG. 6 POLÍGONOS DE THIESSEN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	79
FIG. 7 REPRESENTACIÓN DE MODELOS HIDROLÓGICOS A) CONCENTRADO Y B) SEMIDISTRIBUIDO, EN EL PROCESO DE TRANSFORMAR LA LLUVIA EN ESCORRENTÍA EN UNIDAD ESPACIAL.	89

FIG. 8 GEOMETRÍA PARA LA SIMULACIÓN HIDRÁULICA 1D.	91
FIG. 9 MALLA DE SIMULACIÓN 2D EN HEC-RAS	93
FIG. 10 MALLADO 2D DE 100 *100 Y ÁREAS DE REFORZAMIENTO EN LOS RÍO DE 10*10 M.	93
FIG. 11 GEOMETRÍA DE CÁLCULO PARA LA EJECUCIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO-HIDRÁULICO ACOPLADO EN HEC-RAS.	95
FIG. 12 CONFIGURACIÓN DE LA GEOMETRÍA PARA LA SIMULACIÓN CONJUNTA DE LOS MODELOS 2D.	96
FIG. 13 FLUJO DE TRABAJO DE LA COMBINACIÓN DE MODELOS EMPLEADOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	97
FIG. 14 DAÑOS ASOCIADOS DE UNA INUNDACIÓN EN FUNCIÓN DE LA RELACIÓN ENTRE LA PROFUNDIDAD Y VELOCIDAD DEL FLUJO. FUENTE: (CARDONA OROZCO ET AL., 2007).....	100
FIG. 15 CUENCA RÍO CULIACÁN DELIMITADA POR HEC- GEOHMS.	103
FIG. 16 REGIONES HOMOGÉNEAS	104
FIG. 17 UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS, Y REGIÓN HOMOGÉNEA.	106
FIG. 18 SERIE TEMPORAL DE DATOS RELLENOS DE ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS	107
FIG. 19 PLUVIÓMETROS DE INFLUENCIA POR SUBCUENCA DELIMITADOS PO POLIGOSNOS DE THIESEN.	110
FIG. 20 PLUVIÓMETROS DE INFLUENCIA PARA LAS SUB CUENCAS HMS POR POLÍGONOS DE THIESEN	111
FIG. 21 MALLA DE PRECIPITACIÓN CHIRPS DEL AÑO 2017 Y LA UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES EMPLEADAS EN EL PROYECTO.	112
FIG. 22 COMPARACIÓN DE PRECIPITACIÓN EN LAS ESTACIONES Y LA INFORMACIÓN DE CHIRPS v2.0.....	113
FIG. 23 PUNTOS DE EXTRACCIÓN DE VALORES DE PRECIPITACIÓN PARA CADA PIXEL DE LA MALLA.	115
FIG. 24 USO DE SUELO SENTINEL, AÑO 2022.....	116
FIG. 25 GRUPO HIDROLÓGICO A PARTIR DE MAPAS EDAFOLÓGICOS Y GEOLÓGICOS NACIONALES.	117
FIG. 26 COEFICIENTE DE NÚMERO DE CURVA	118
FIG. 27 HIETOGRAMA RESULTANTE POR LAS TRANSFORMACIONES SNYNER (NARANJA) Y SCS (VERDE) DEL MODELO HMS.	122
FIG. 28 ESCENARIO DE INUNDACIÓN 1D EN HEC-RAS A PERIODOS DE RETORNO DE 2, 5, 10, 25, 50 Y 100 AÑOS, PARA LOS MODELOS SCS, SNYDER Y TÉMEZ.	124
FIG. 29 SIMULACIÓN DE ESCENARIOS DE INUNDACIÓN MODELO SEMIDISTRIBUIDO HEC-HMS POR EL MÉTODO DE TRANSFORMACIÓN SCS.	125
FIG. 30 SIMULACIÓN HIDRÁULICA 1D PARA EL EVENTO DE LA DEPRESIÓN TROPICAL 19-E A PARTIR DE LOS RESULTADOS DEL MODELO HIDROLÓGICO SEMIDISTRIBUIDO POR LA TRANSFORMACIÓN 1) SCS Y 2) SNYDER.....	126
FIG. 31 RESULTADO DE LA SIMULACIÓN HIDRÁULICA 2D EN HEC-RAS EN EL MODELO H-H ACOPLADO DATOS PLUVIOMÉTRICOS Y TRANSFORMACIÓN SCS.	129

FIG. 32 SIMULACIÓN 2D ACOPLADO; 3 DATOS PLUVIOMÉTRICOS Y TRANSFORMACIÓN SCS. 6 SIMULACIÓN CON DATOS PLUVIOMÉTRICOS Y TRANSFORMACIÓN SNYDER. 8 SIMULACIÓN CON DATOS CHIRPS Y TRANSFORMACIÓN SCS Y 11 SIMULACIÓN DE DATOS CHIRPS Y TRANSFORMACIÓN SNYDER.....	131
FIG. 33 RESULTADO DE LA SIMULACIÓN HIDRÁULICA 2D EN HEC-RAS EN EL MODELO H-H INTEGRADO.....	134
FIG. 34 SIMULACIÓN 2D INTEGRADO DE LA DEPRESIÓN TROPICAL 19-E, EMPLEANDO DATOS CHIRPS.	135
FIG. 35 RESULTADO DE LA SIMULACIÓN HIDRÁULICA 2D EN HEC-RAS EN EL MODELO H-H CONJUNTO DATOS PLUVIOMÉTRICOS Y TRANSFORMACIÓN SCS.....	138
FIG. 36 SIMULACIÓN 2D CONJUNTA; 4 DATOS PLUVIOMÉTRICOS Y TRANSFORMACIÓN SCS. 7 SIMULACIÓN CON DATOS PLUVIOMÉTRICOS Y TRANSFORMACIÓN SNYDER. 9 SIMULACIÓN CON DATOS CHIRPS Y TRANSFORMACIÓN SCS Y 12 SIMULACIÓN DE DATOS CHIRPS Y TRANSFORMACIÓN SNYDER.	138
FIG. 37 EVALUACIÓN PREDICTIVA DE UN EVENTO DE PRECIPITACIÓN DE LOS MODELOS SCS Y SNYDER A PARTIR DE DATOS PLUVIOMÉTRICOS Y CHIRPS.	142
FIG. 38 MODELOS H-H EN COMPARACIÓN CON LA EVIDENCIA FOTOGRÁFICA DISPONIBLE.	145
FIG. 39 SIMULACIÓN DE INUNDACIÓN DEL HURACÁN MANUEL, POR EL MODELO 4-P-SCS-HHC.	149
FIG. 40 ÍNDICE DE PELIGRO ANTE INUNDACIÓN POR EL HURACÁN MANUEL, MODELO 4-P-SCS-HHC.....	150
FIG. 41 SIMULACION DE INUNDACION DE LA DEPRESIÓN TOPIAL 19-E POR EL MODELO 4-P-SCS-HHC	151
FIG. 42 INDICE DE PELIGRO DE INUNDACION POR LA DEPRESIÓN TROPICAL 19-E, MODELO 4-P-SCS-HHC.....	152

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. FRECUENCIA Y PROBABILIDAD CORRESPONDIENTE A CADA PERIODO DE RETORNO	34
TABLA 2. ECUACIONES EMPÍRICAS PARA EL CÁLCULO DE T _C	36
TABLA 3. ECUACIONES PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES DE LA CUENCA	41
TABLA 4. ECUACIONES DE ÍNDICES USADOS EN MODELOS DE INUNDACIONES.	65
TABLA 5. MÉTRICAS ESTADÍSTICAS EMPLEADAS PARA LA COMPARACIÓN DE LOS MODELOS EMPLEADOS.	66
TABLA 6. MATRIZ DE COMBINACIONES POSIBLES EN UNA CLASIFICACIÓN BINARIA, FUENTE: (ARONICA ET AL., 2002).....	68
TABLA 7. VARIABLES INDEPENDIENTES Y FUENTES DE ADQUISICIÓN.....	73
TABLA 8. CLASIFICACIÓN DE GRUPOS HIDROLÓGICOS EN FUNCIÓN DE LA TEXTURA DE SUELO PARA EL CÁLCULO DE CN. FUENTE: (PEREZ-LUNA, 1998).	81

TABLA 9. CLASIFICACIÓN GEOLÓGICA DE SUELOS PARA EL CÁLCULO DE CN. FUENTE: (PEREZ-LUNA, 1998).....	82
TABLA 10. UNIDADES DE SUELO EDAFOLÓGICAS Y SU GRUPO DE SUELO HIDROLÓGICO PARA EL COEFICIENTE DE CN. FUENTE: (PEREZ-LUNA, 1998).....	83
TABLA 11. COEFICIENTE DE RUGOSIDAD N DE MANNING ASIGNADO A COBERTURA DE SUELO DE LA CLASIFICACIÓN DE SENTINEL. FUENTE: (HARRY H. BARNES, 1967).....	94
TABLA 12. CÓDIGO DE LAS COMBINACIONES DE MODELO HIDROLÓGICO-HIDRÁULICO.	98
TABLA 13. MÉTRICAS DEL RENDIMIENTO DE LOS MODELOS HIDROLÓGICOS. FUENTE: (ROCHA ET AL., 2023).....	99
TABLA 14. VALORACIÓN DEL COEFICIENTE KAPPA. FUENTE (CERDA LORCA & VILLARROEL DEL P., 2008).....	99
TABLA 15. COEFICIENTE DF PARA EL CÁLCULO DEL ÍNDICE DE PELIGRO	100
TABLA 16. ÍNDICE DE PELIGRO (HR) Y DESCRIPCIÓN POR NIVEL.	101
TABLA 17 PRUEBA DE HOMOGENEIDAD ANTES DEL RELLENO DE PRECIPITACIÓN DE LAS 13 ESTACIONES.....	105
TABLA 18 PRUEBAS DE HOMOGENEIDAD E INDEPENDENCIA DE LAS ESTACIONES.....	108
TABLA 19 DISTRIBUCIONES TEÓRICAS DE AJUSTE Y PERIODOS DE RETORNO CALCULADOS.....	109
TABLA 20 EVALUACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN ESTIMADA (CHIRPS) CON LA PRECIPITACIÓN OBSERVADA POR ESTACIÓN	114
TABLA 21 TIEMPO DE CONCENTRACIÓN Y CN PARA CADA SUB CUENCA HMS	119
TABLA 22. COEFICIENTE DE NUMERO DE CURVA CALCULADO.	120
TABLA 23. RESUMEN DEL CÁLCULO DE TIEMPO DE CONCENTRACIÓN PARA	121
TABLA 24. CAUDALES PICO PARA LAS CUENCAS HUMAYA, TAMAZULA Y CULIACÁN, CALCULADO POR LOS MÉTODOS SCS, SNYDER Y TÉMEZ A DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO.	121
TABLA 25 IDENTIFICACIÓN DE LOS PUNTOS PROBLEMÁTICOS DE INUNDACIÓN EN EL HURACÁN MANUEL Y DEPRESIÓN TROPICAL 19-E. FUENTE:(GEOLMEX - GEOLOGÍA Y SERVICIOS DE INGENIERÍA, 2020)	126
TABLA 26. MÉTRICAS DE VALIDACIÓN DE LOS MODELOS CON VALORES DE CAUDAL OBSERVADOS	141
TABLA 27. MÉTRICAS DE VALIDACIÓN DE LOS MODELOS HIDROLÓGICOS SEMIDISTRIBUIDOS EN HEC-HMS.	143
TABLA 28 RESUMEN DE LOS MODELOS H-H EN COMPARACIÓN CON LA EVIDENCIA FOTOGRÁFICA DISPONIBLE.....	145
TABLA 29 RESUMEN DE RESULTADOS DE PRUEBA DE SIMULACIÓN HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO PARA LAS COMBINACIONES DE MODELOS.....	147

ABREVIATURAS

BIAS	sesgo estadístico
CN	número de curva
CORINE	Coordination of Information on the Environmen
EO	Earth Observation
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
GSH	Grupo de Suelo Hidrológico
HEC-HMS	Sistema de Modelación Hidrológico del Centro de Ingeniería Hidrológica
HEC-RAS	Sistema de Análisis de Ríos del Centro de Ingeniería Hidrológica
HUS	Hidrograma unitario sintético
HUS	Hidrograma Unitario Sintético
IDF	Intensidad-Duración-Frecuencia
IDTr	Intensidad-Duración-Periodo de retorno
IMPLAN	Instituto Municipal de Planeación
IMTA	Intituto Mexicano de Tecnologías del Agua
K-S	prueba Kolmogorov-Smirnov
LiDAR	Light Detection an Ranging
LUCC	Land Use and Land Cover Change
m.s.n.m.	metros sobre el nivel medio del mar
m ²	metros cuadrados
m ³	metros cúbicos
MDE	Modelo Digital de Elevaciones
MHH	Modelo Hidrológico – Hidráulico
mm	milímetros
NSE	Eficiencia de Nash Sutcliffe
NSE	eficiencia de Nash-Sutcliffe
Pe	Precipitación efectiva

Qp	Caudal pico
RH10	Región Hidrológica número 10
RH10C	Cuenca del río Culiacán
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SWAT	Soil and Water Assessment Tool
Tc	Tiempo de concentración

RESUMEN

Las inundaciones es uno de los fenómenos hidrometeorológicos más comunes y con mayores pérdidas a nivel global y representan el 45% de los desastres naturales. Se estima que ha cobrado más de 58 mil vidas humanas durante el periodo de 1970 al 2019. Factores como el crecimiento de ciudades con poco o nulo control de ordenamiento territorial, cambio de usos de suelo de coberturas vegetativos (como forestal o pastizal) a suelos impermeables (como concreto y asfalto), producen el aumento en la escorrentía. El cambio climático ha provocado la presencia de largos periodos de sequía, sin embargo, las lluvias son cada vez mas de mayor intensidad en menos días de lluvia, resultado en eventos excepcionales donde en un par de días se registra precipitaciones equivalentes a la precipitación promedio anual y si esa lluvia ocurre en superficies impermeables, dan como resultado la generación de eventos de inundaciones cada vez más intensas. La zona urbana de la cuenca río Culiacán es continuamente amenazada por peligro de inundación en cada temporada de ciclones y huracanes en el pacifico. No obstante, en el pasado se han construido elementos para mitigar los impactos de las inundaciones, sin embargo, estas siguen siendo insuficiente para eventos críticos. La modelación geoespacial de inundaciones (modelos hidrológicos e hidráulicos), se han convertido en una herramienta con favorables resultados que brindan una ventaja en la simulación de inundaciones incluso para cuencas con poca cantidad de datos o cuencas no aforadas. En esta tesis doctoral se propone un esquema metodológico para la simulación de inundaciones aplicable y reproducible para cuencas no aforadas. La metodología emplea parte de la modelación hidrológica a nivel cuenca a partir de datos pluviométricos provenientes de estaciones climatologicas y deribada de imágenes satelitales, como CHIRPS, asimismo, analizando diversos métodos de transformación de lluvia-escorrentía y la simulación hidráulica se realiza en una y dos direcciones. Por su parte, la simulación en bidimensional se realizó tanto de manera acoplada (tradicional), integrada (lluvia en red) y conjunta (tradicional y lluvia en red en un mismo tiempo computacional). Posteriormente se evaluaron las combinaciones resultantes entre los diversos métodos de simulación de inundaciones. La metodología arrojó doce combinaciones posibles, de las cuales se evaluaron once, designados primeramente por los datos de entrada, es decir, pluviómetro (P) o CHIRPS (C); después por el método de transformación, SCS-CN (SCS) o Snyder (SND); posteriormente por la simulación unidimensional (1D) o bidimensional (2D); y por ultimo la combinación de modelación hidrológica-hidráulica, acoplado (HHA), integrado (HHI) o conjunta (HHC). Se evaluó la capacidad predictor de los modelos hidrológicos por NSE, PBIAS y RMSE, mientras que la simulación hidráulica se evaluó con $F^{(2)}$. Los resultados mostraron que las combinaciones P-SCS-2D-HHC y P-SND-2D-HHC presentaron superior a las otras combinaciones con NSE de 2.1 y 2.3 respectivamente y $F^{(2)}$ de 0.7101 y 0.7108 respectivamente, además con comparación fotográfica de la extensión de inundación que se comparan con evidencia fotográfica de un evento de inundación. Por último, se concluye que, la propuesta de modelo hidrológico-hidráulico conjunto permitieron visualizar de una manera holística el comportamiento del flujo en un evento de precipitación, simulando tanto los ríos como la rede de arroyos que cubren la ciudad de Culiacán.

ABSTRACT

Floods are one of the most common hydro-meteorological phenomena with the greatest losses at a global level and represent 45% of natural disasters. Experts estimate that floods have claimed over 58 thousand human lives during the period from 1970 to 2019. Factors such as the growth of cities with little or no land use planning control, change of land use from vegetative cover (such as forest or pasture) to impermeable soils (such as concrete and asphalt), cause an increase in runoff. Long periods of drought have resulted from climate change. However, rainfall has become increasingly intense, concentrated into fewer rainy days. This causes exceptional events where rainfall equivalent to the average annual rainfall falls within just a couple of days. If this rain occurs on impervious surfaces, increasingly intense flooding events result. Flooding hazards continuously threatened the urban area of the Culiacán river basin during each cyclone and hurricane season in the Pacific. However, in the past, elements have been built to mitigate the effects of flooding. However, these are still insufficient for critical events. Geospatial modeling of floods (hydrological and hydraulic models) has become a tool with favorable results that provide an advantage in flood simulation, even for basins with negligible amount of data or ungauged basins. This doctoral thesis proposes a methodological scheme for flood simulation applicable and reproducible for non-gauged basins. This method incorporates basin-level hydrological modeling based on pluviometric and satellite rainfall data, analyzing various rainfall-runoff transformation methods and carrying out hydraulic simulations in one and two directions. Two-dimensional simulation was carried out in a coupled (traditional), integrated (networked rainfall) and joint (traditional and networked rainfall in the same computational time) manner. We evaluated the resulting combinations of the various flood simulation methods. The method produced twelve combinations; we evaluated eleven of them, first designating them by the input data. Rain gauge (P) or CHIRPS (C); then by the transformation method, SCS-CN (SCS) or Snyder (SND); then by the one-dimensional (1D) or two-dimensional (2D) simulation; and finally, the combination of hydrologic-hydraulic modeling, coupled (HHA), integrated (HHI) or joint (HHC). We evaluated the hydrologic models' predictive capacity using NSE, PBIAS, and RMSE, and evaluated the hydraulic simulation with $F^{(2)}$. The results showed that the combinations P-SCS-2D-HHC and P-SND-2D-HHC presented superior to the other combinations with NSE of 2.1 and 2.3 respectively and $F^{(2)}$ of 0.7101 and 0.7108 respectively, in addition with photographic comparison of flood extent that are compared with photographic evidence of a flood event. Finally, we conclude the proposed joint hydrologic-hydraulic model allowed for a holistic visualization of flow behavior during a precipitation event, simulating both the rivers and the stream network covering Culiacán.

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

Los riesgos naturales se producen por distintas fuentes como: actividad sísmica y volcánica asociada a movimientos tectónicos, sequías, tormentas de granizo, nevadas, heladas, precipitaciones pluviales, ciclones tropicales, escurrimientos, e inundaciones asociadas a fenómenos hidrometeorológicos (CENAPRED-SEGOB, 2014), estos últimos, se producen en mayor frecuencia, con expectativas de aumento en el incremento de frecuencia e intensidad (Vergés et al., 2013).

Las inundaciones son uno de los desastres naturales más comunes, frecuentes y dañinos en el mundo, con repercusiones en la economía, propiedad privada, medio ambiente y vidas humanas, son causadas principalmente por fenómenos pluviales como huracanes, tormentas y lluvias extremas (Ellis et al., 2021; Ghimire, 2013; Jonoski et al., 2019; Li et al., 2021; Tanouchi et al., 2019; Wijayarathne & Coulibaly, 2020). La frecuencia, intensidad y probabilidad de ocurrencia de las inundaciones ha ido en aumento, debido al cambio climático (Dong et al., 2021; Quiroga et al., 2016).

En los últimos años, las inundaciones ha representado cerca del 45% de entre todos los desastres naturales, causando alrededor de 6000 víctimas por año (Kaykhosravi et al., 2020; Kordrostami et al., 2020). Sin embargo, son las ciudades las que padecen las consecuencias de esta problemática (Íñiguez-Ayón et al., 2015), debido al aumento de la temperatura y variabilidad de la precipitación se atribuyen riesgos relacionados con el agua como sequías (Perez-Aguilar et al., 2021) e inundaciones (León Ochoa et al., 2019). Sin embargo, es el crecimiento de asentamientos humanos, y el cambio a coberturas de suelo impermeables, así como la reducción de zonas boscosas, las que producen el aumento de las inundaciones (Manfreda et al., 2018).

Las inundaciones pueden ser clasificadas por tres tipos principales: (a) inundaciones por precipitación *in situ*, es decir inundaciones pluviales; (b) escorrentía, avenida o desbordamiento de cauces, también denominado inundaciones fluviales; y (c) por rotura u operación incorrecta de obras de infraestructura hidráulica (Sánchez-Romero et al., 2019).

La precipitación se emplea como insumo principal en las medidas de control de inundaciones, donde es necesario identificar la ubicación y dimensión de la zona inundada, con aplicaciones estadísticas y probabilísticas, con el propósito de dimensionar los escurrimientos superficiales y caudales de los afluentes para generar el acervo histórico y modelos empíricos de inundaciones (Comisión Nacional del Agua, 2011).

Dado a que es la vital fuente de agua a nivel global, presenta distribución espacial y temporal no uniforme e influenciada por el clima y uso de suelo (Ahmadi-sani et al., 2022; Domínguez Mora et al., 2016), es decir, entre más cerca se encuentre a los océanos, mayor es la precipitación en el lugar (Fu et al., 2020). Su medición anual es una variable climática de

importancia en sectores agrícolas, industrial, energético e hidrológico, con principal interés en el estudio de cambio climático y sus consecuencias (Asurza et al., 2018).

En cuanto al cambio climático, éste provocará cambios en las precipitaciones y otros factores climáticos se prevé la disminución de la cantidad de días con lluvia y al mismo tiempo aumento de la cantidad e intensidad de agua precipitada en algunas regiones (Ahmadi-sani et al., 2022). A partir de mediados de la década de los 90's, comenzó la construcción de modelos para identificar zonas inundables (Vergés et al., 2013) y generar modelos de susceptibilidad, peligro o riesgo de inundaciones. Los impactos del cambio climático en una escala de hidrología urbana, se analizan en términos de cambio en los parámetros hidrológicos urbanos de: intensidad, frecuencia, duración de la precipitación, volumen total precipitado y del escurrimiento (Valeo et al., 2021). Los cuales producen cambios climáticos importantes, generalizados en los regímenes de lluvias, ocasionando cambios temporales y espaciales significativos en la precipitación y evaporación, cambiando así los recursos hídricos, aumentando la probabilidad de fenómenos meteorológicos externos (Avand et al., 2021).

En ese sentido, la modelación geoespacial de inundaciones otorgan resultados importantes en la toma de decisiones sobre prevención y control de inundaciones (Ben Khalfallah & Saidi, 2018), como una herramienta empleada para predecir la extensión de inundación en zonas urbanas, útil en la prevención de desastres e investigaciones científicas (Dong et al., 2021). Estos modelos atienden principalmente las directivas de modelos hidrológicos e hidráulicos. Los primeros, permiten establecer el sistema lluvia – escorrentía, analizando los diversos mecanismos que intervienen en el proceso (Habtamu Tamiru & Dinka, 2021), mientras que en los modelos hidráulicos interviene el comportamiento hidrodinámico del agua durante el evento de inundación (A Petroselli et al., 2019).

Los modelos hidrodinámicos unidimensionales resultan sencillos en su ejecución, sin embargo, descuidan los momentos de transferencia de velocidad y masa, desde el cauce principal y la llanura de inundación, así como la correcta representación de fenómenos como atajos de meandros. Mientras que los modelos hidráulicos en 2D, representa la variabilidad del flujo en las dos dimensiones, y son usados en las llanuras de inundación a ambos márgenes del cauce principal. Entre sus aplicaciones está la evaluación del momento de transferencia de velocidad y masa desde el cauce principal a la llanura de inundación (Finaud-Guyot et al., 2011).

La búsqueda de modelos de inundación más precisos y detallados, han generado la necesidad de encontrar un equilibrio óptimo entre los detalles de salida de la modelación hidráulica y la resolución de los datos topográficos de entrada (Peña & Nardi, 2018). Se sacrifica cierta precisión local al obtener cobertura espacial más completa, que para ser aceptados, dichos modelos deben de ser validados a través de la evaluación comparativa con eventos históricos reales (Wing et al., 2021). No obstante, en la actualidad radica la falta de datos empíricos y reales para parametrizar y validar los resultados de los modelos. Sin embargo, con el aumento de la disponibilidad de datos de teledetección ha permitido abordar dicho problema y permite el progreso en la aplicación a gran escala, además de ampliar la variedad de modelos de

inundaciones en 2D (Ghimire, 2013). Recientemente, se ha apostado por el mapeo de inundaciones como insumo en la mitigación de inundaciones con el propósito de otorgar información sobre los peligros y daños potenciales y su respectiva medida de prevención (Abdelkarim et al., 2020).

1.2. Planteamiento del problema

La modelación geoespacial de inundaciones se ofrece como medida de control de inundaciones que permite conocer aquellas zonas susceptibles, en peligro o riesgo a inundación. Sin embargo, en función a la elección del tipo de enfoque a ejecutar requerirá cierta cantidad de datos e información para llevarlo a cabo, las cuales no siempre se encuentran disponibles.

La poca o nula información hidrológica (precipitación) e hidráulica (aforos) disponible en algunas zonas como la cuenca río Culiacán (RH10C), que presenta registros históricos de precipitaciones pluviales intermitentes y poco consistentes en la recolección de información de eventos extremos, la convierte en una fuente incierta para modelos empíricos ya que posiblemente presente discrepancia entre los datos. Conociendo esta limitante, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) recomienda el empleo de diversas fuentes de información de registros históricos de lluvias. La falta de datos de fuentes homogéneas de registros de precipitación, conlleva a buscar modelos estadísticos y métodos numéricos que respondan de manera las certera a lo ocurrido históricamente, el cual dependerá de la cantidad y calidad de los datos obtenidos, así como también el empleo de datos de precipitación de productos de diversas constelaciones satelitales.

De acuerdo a las ideas expuestas, se plantea establecer una metodología que responda adecuadamente a la estimación y simulación hidráulica de zonas de peligro de inundación en la zona urbana de la cuenca del río Culiacán, por medio de modelación hidrológica e hidráulica que permita la detección de zonas con peligro de inundación en cuencas no aforadas, es decir, con poca cantidad de datos, a partir de registro histórico de lluvias *in situ* y satelital, software SIG y de simulación hidrológica e hidráulica en 1D y 2D, a partir de la normalización de registros históricos de diversas fuentes, estimación de eventos extremos y la reducción en la precisión altimétrica de datos topográficos usando distintas fuentes de datos. Lo anterior para establecer el modelo que mejor se ajuste a la geomorfología del área de estudio y constituir escenarios de peligro de inundación.

1.3. Justificación

La simulación hidráulica de cauces naturales ha sido de gran ayuda como medidas de prevención de inundaciones, en la estimación de alturas de calado del cauce principal y su potencial área de inundación. Sin embargo, necesita gran cantidad de datos de registros de lluvia en la cuenca, aforo de los cauces principales y modelos digital de elevaciones.

Modelos hidrológicos en base física requiere gran cantidad de datos como temperatura, evapotranspiración y temperatura para asemejar los elementos del ciclo hidrológico. En cambio, los modelos hidrológicos conceptuales presentan capacidad limitada para la representación de la heterogeneidad espacial, sobre todo si solo se toma una estación pluviométrica de datos de entrada. Ahora bien, la simulación hidráulica por su parte también presenta limitaciones, una de ellas es la representación de un evento de inundación en lugares donde no se presenta una llanura de inundación directamente, es decir, que la simulación hidráulica no respalde correctamente el fenómeno de inundación que la topografía del lugar genera.

A raíz de la falta de datos para la simulación de inundaciones, se plantea metodologías que permitan llegar a la simulación de escenarios de inundaciones con pocos datos de entrada, ejecutado por medio de modelos geoespaciales hidrológicos e hidráulicos, ideales para cuencas no aforadas, empleando registros pluviométricos y satelitales de lluvia así como modelos digitales del terreno obtenidas de diversas fuentes de datos y resoluciones espaciales, que permitan reducir el tiempo de procesamiento según el planteamiento metodológico para la simulación inundaciones.

1.4. Hipótesis

La simulación geoespacial de inundaciones desarrollada por metodología integral con modelos hidrológicos e hidráulicos en su combinación acoplada e integrada, permitirán analizar, describir y determinar las zonas de peligro ante inundación para la cuenca del río Culiacán, así como la zona urbana de la ciudad que se ve afectada por la red de arroyos.

1.5. Objetivos de la investigación

1.5.1. Objetivo General

Desarrollar e implementar una metodología integral para el análisis geoespacial del flujo de inundaciones a través de tecnologías de la información geográfica y modelos hidrológicos e hidráulicos en su combinación acoplada e integrada, teniendo como área de estudio la zona urbana de la cuenca río Culiacán.

Objetivos Específicos

- Analizar el comportamiento espacial y temporal de la precipitación.
- Explorar el modelo hidrológico a nivel cuenca y analizar los valores de escorrentía resultante.
- Analizar, evaluar y validar el modelo hidráulico de inundaciones en 1D y 2D

- Desarrollar un modelo de simulación geoespacial de peligro de inundaciones a partir de mapas de profundidad y velocidad de inundación.

Preguntas de investigación

- ¿Cuáles son los actuales modelos de inundación que son susceptibles a utilizarse en el área de estudio con base en la disponibilidad actual de los datos de entrada?
- ¿Cuál es la eficiencia de la modelación 2D y el acoplamiento 1D y 2D para zona de estudios con red de arroyos?
- ¿Cuál es la resolución del modelo digital de elevaciones (DEM) suficiente para la simulación de red de arroyos para la modelación hidrológica-hidráulica de inundaciones?

CAPITULO II: ANTECEDENTES

2.1. Análisis de precipitaciones

Reducir zonas de riesgos de desastre es un punto de reflexión en los diferentes órdenes de decisión, especialmente por los problemas críticos en el desarrollo económico y social en algunas ciudades del país (Secretaría de Desarrollo Agrario Territorial y Urbano, 2015).

En México Wurl et al. (2015), realizaron un diagnóstico del oasis La Purísima, respecto a inundaciones, por consecuencia de lluvias extremas en el lugar, crearon un análisis estadístico de la precipitación para la elaboración de un modelo hidrológico e hidráulico, calculando el caudal máximo del arroyo Cadegomo. Realizaron el análisis estadístico con el software AX (Ajuste de Función de Probabilidad versión 1-05) para el método de Doble Gumbel. Además, usaron como fuente de datos topográficos el sensor *AsterGDEM* (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), extrayendo el modelo digital de elevaciones (DEM) con resolución espacial de 30 m en planimetría, con el fin de delimitar las zonas de inundación en escenarios de lluvias extremas. Con el modelo HEC-1 calcularon los diferentes escenarios de lluvias extremas, exponiendo que de manera general de usa el periodo de retorno de 100 años. El modelo hidráulico realizado en HEC-GeoRAS, les permitió crear la simulación en 1D para el flujo de corriente. Teniendo como resultado final la obtención del mapa de peligros de inundación del oasis.

En Flores (2015) se delimitó las zonas de amortiguamiento por crecidas de ríos, en la zona de estudio de la cuenca río Pesquería, a partir de los datos hidrometeorológicos y fisiológicos como tipos de suelo de las cuencas a partir de los mapas edafológicos. Realizaron un estudio de lluvias con datos de máxima precipitación a partir de 16 estaciones climatológicas con registros superiores a los 29 años. En una segunda parte, la validación de la información geomorfológica, meteorológica e hidrométrica se llevó a cabo con la materialización del modelo hidrológico empleando el modelo matemático HEC-geoHMS.

La propuesta de emplear L-moments para el análisis de frecuencia del histórico de precipitaciones, lo justifican al ser un sistema alternativo a los métodos tradicionales de distribución de probabilidad ejecutando combinaciones lineales de los momentos ponderados. El modelo hidrológico en HEC-HMS representa el proceso de lluvia-escorrentía determinando los parámetros por el método de número de curva. Los gastos de diseños de escorrentía generados, les sirvieron de datos de entrada para el modelo hidráulico en HEC-RAS, procesando la geometría del río en HEC-GeoRAS.

Por otra parte, las intensidades de precipitaciones reportadas en el estado de Veracruz entre el periodo de 1970-2015 para el análisis de inundaciones, no presentaron cambios significativos, lo que representa un dato importante al analizar que el aumento del riesgo de inundaciones, ya que este recae en el aumento de la vulnerabilidad, al aumento de cambio de cobertura de suelo con cubierta vegetal a materiales impermeables, refutando la idea que el

aumento de las inundaciones corresponde al cambio climático, y la ocurrencia de lluvias extremas (Zúñiga et al., 2020).

2.2. Simulación de inundaciones

La propuesta de Desarrollo del modelo hidrológico para la estimación de los gastos estimados en la simulación de inundaciones presentada por Salazar-Briones et al. (2018) muestra el modelo hidrológico realizado bajo el esquema de momentos lineales. Este modelo lo ejecutaron sobre la herramienta HEC-HMS en ambiente SIG, por medio de las extensiones HEC-geoHMS y HEC-geoRAS para la preparación de los insumos, entre los que destacan registros históricos de precipitaciones de 35 estaciones meteorológicas, así como registro histórico de caudal de una estación hidrométrica y MDE de 5m de resolución proveniente de levantamientos LiDAR descargado por INEGI.

Por otra parte, Li et al., (2020) evaluaron los diferentes modelos numéricos para la determinación de llanuras de inundación en sistemas fluviales de escasa vegetación en el río Colorado de Bolivia. Su propuesta consistió en adquirir MDE derivados de la misión TanDEM-X DEM combinados con imágenes satelitales de Landsat 8, Sentinel-2, Google Earth con datos de sistema posicionamiento global diferencial. Usaron imágenes satelitales de alta resolución espacial para visualizar los accidentes topográficos, como grietas y bajos aluviales susceptibles a inundación. Para la simulación hidráulica en HEC-RAS, emplearon un mallado de 40 x 40 m en la llanura de inundación y 5 x 5 en el cauce principal. Sus resultados mostraron concordancia respecto a lo simulado con el índice diferencial de agua normalizado modificado (MNDWI) para la determinación de inundaciones de fechas históricas mediante las imágenes Landsat.

Simultáneamente, Geravand et al., (2020) evaluaron el comportamiento hidráulico de largo alcance de un río de montaña por encima de los 2000 msnm en Irán, a partir de mediciones de elevación de alta densidad de puntos de levantamientos topográfico para simular el modelo de inundación para un evento de 100 años de periodo de retorno y un caudal de $1800 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ para un tramo de río de 40 kilómetros.

Desarrollaron su metodología a partir del enfoque de servicio de conservación de suelos modificado (SCS-CN por sus siglas en inglés) expresado en términos de número de curva. Estimaron el exceso de lluvia por medio del modelo hidrográfico unitario basado en geomorfología (GIUH por sus siglas en inglés), que posteriormente lo implementaron en HEC-RAS para ejecutar el modelo hidrodinámico en 1D. Los resultados de las curvas de intensidad-duración-frecuencia (IDF) se obtuvieron a partir del análisis de 128 tormentas registradas a intervalos de un minuto por los pluviómetros dentro de la cuenca de estudio, las duraciones de las tormentas de diseño las calcularon por medio del cálculo de tiempo de concentración (tabla 2). Posteriormente, consideraron la duración de la tormenta igual al tiempo promedio de concentración y diseñaron las características de la tormenta de diseño a periodos de retorno de 2 a 500 años.

Concluyen que una de las variables de mayor importancia para la simulación de desbordamiento de ríos son las consideraciones iniciales de caudal dado, es decir, el modelo de lluvia-escorrentía y tormenta de diseño que permite obtener las condiciones para llevar a cabo la simulación del modelo 1D de inundaciones.

2.3. Modelación hidrológica de inundaciones

En Chadli et al. (2016), evaluaron el coeficiente de escorrentía potencial para la cuenca de Sebou, Marruecos por el método de número de curva de manera integrada con SIG. Emplearon datos de lluvia, pendiente, uso de suelo y mapas de suelos global de la FAO. La clasificación de suelos se llevó a cabo en cuatro grupos hidrológicos en función del grado de tasa de infiltración (A, B, C, y D). En cambio, emplearon el mapa de uso de suelos descargado desde la base de datos Global Land Cover Characterization, posteriormente lo reclasificaron en cuatro clases: agua, residencia medio, forestal y agrícola. Además, usaron datos de precipitación para el período entre 1973-2013 perteneciente de la agencia hidráulica de Sebou. El MDE empleado fue obtenido de datos ASTER con resolución de 30 m. A partir del MDE obtuvieron el mapa de pendientes y la delimitación de la cuenca y sub cuencas.

Chadli et al. (2016) reprodujeron el modelo hidrológico por medio de la herramienta HEC-HMS integrada en el ambiente SIG de ArcGIS encontrada como HEC-geoHMS. Combinaron mapas de suelo y uso de suelo para asignar el valor de número de curva apropiado a cada polígono. Posteriormente calcularon la escorrentía por el método de número de curva. Los números de curva asignados variaron entre 80 y 87 con media en 85, representaba un riesgo de inundación catalogado por los autores como *muy serio* para la región, ya que presentaron profundidad promedio anual de 543.6 mm lo equivalente al 91.5 de la precipitación total anual, con variabilidad en el coeficiente de escorrentía oscilando entre 378.8 y 951.1 mm, donde la zona alta y montañosa presenta mayor escorrentía. Concluyeron que los resultados obtenidos por este método brindan la información básica para evaluar la escorrentía potencial.

Otro trabajo destacado es el de Tanouchi et al. (2019) para la cuenca del río Sege, Suecia. En el cual demostraron la ganancia potencial de aplicar una base de datos de uso de suelo de alta resolución diseñada para zonas urbanas en los atlas urbanos de la región, para simular la respuesta de la escorrentía en modelos de cuencas múltiples. Los autores usaron modelos semidistribuidos para multicuenca por medio del modelo HYPE de configuración nacional de Suecia. Asimismo, en su investigación usó el conjunto de datos de uso de suelo CORINE, basado en un mapa de cobertura terrestre de resolución de 100 m y unidad más pequeña mapeada de 2500 000 m² para el modelo hidrológico de cuencas múltiples que les permitió discriminar entre conjuntos urbanos continuos y discontinuos. Además, emplearon el Atlas Urbano (de AEMA) como datos sobre el uso de suelo, por la falta de discriminación entre usos de suelo de CORINE. Calcularon el NDVI con el que obtuvieron el porcentaje de impermeabilidad del suelo. Los datos de temperatura empleado correspondieron a lo proporcionados del 1 de enero del 2000 al 30 de junio del 2006 de cada subcuenca.

Posteriormente evaluaron el desempeño del modelo HYPE por unidad de subcuenca y cuenta, en condiciones controladas. Realizaron un análisis de escorrentía utilizando eventos de lluvias sintéticos con hietogramas de 30 días con cinco días lluviosos rodeados de periodos secos. A continuación, simularon con clima y condiciones reales registrados durante el periodo de 1 de enero de 2000 al 31 de diciembre de 2013, utilizando el primer año para calibrar los modelos, y

las subcuentas para evaluar el rendimiento por medio del sesgo estadísticos BIAS y Nash-Sutcliffe NSE.

En contraste, la primera parte de trabajo de Zhihua et al. (2020) consistió en emplear el modelo semidistribuido SWAT (Soil and Water Assessment Tool) para la simulación de inundaciones. Asimismo, calcularon la escorrentía para la cuenca hidrográfica de Baliqlu Chai en el noroeste de Irán, emplearon variables como: datos climáticos e hidrológicos, mapas topográficos, modelos digitales del terreno, suelo y uso de tierra. Valuaron la escorrentía superficial por el método de número de curva (CN), ya que les permitió separar la cantidad de lluvia que produce escorrentía de la precipitación total mediante el balance hídrico.

Por otro lado, en Mind'je et al. (2021) desarrollaron un sistema de modelado hidrológico y delinearon las características fisiográficas en la cuenca del río Nyabarongo en Rwanda. Emplearon datos hidrométricos de lluvia diaria y caudal observado disponibles durante el periodo de 2011 a 2018 registrados en la estación hidrométrica de Rweru. Además de datos fisiográficos como MDE de 30 m de resolución de la misión SRTM, mapas de uso de suelo obtenido por clasificación de imágenes Landsat 8 y tipo de suelo de 30 m y 30" de arco respectivamente. Ejecutaron el modelo con la herramienta Hec-HMS integrada en el ambiente SIG de ArcGIS encontrada como HEC-geoHMS. Calcularon los escurrimientos por medio del método de CN y evaluaron el desempeño con la métrica de Eficiencia de Nash Sutcliffe. Sus resultados reportaron subestimación en la escorrentía en el 40% de los eventos modelados. Concluyendo que la cantidad de escorrentía dependerá en gran medida de la cantidad de precipitación de Rwanda.

2.4. Modelación hidráulica de inundaciones

En la llanura de inundación del río Ranchería en la Guajira Colombia (Pérez et al., 2018), encontraron una metodología que permitía la modelación en 2D de la inundación, a pesar de presentar insuficientes datos hidroclimáticos y topográficos para la creación del modelo digital del terreno (MDT), utilizando imágenes de Google Earth para la elaboración del MDT y software IBER para el modelado en 2D, con levantamientos topográficos previos y visitas de campo, diseñaron el cauce y la llanura de inundación, a través de software SIG, creando la malla de triángulos irregulares (TIN) que mejor respondía al relieve propio del lugar a razón de criterios del investigador. Posteriormente realizaron el modelado hidráulico de inundaciones en 2D con el programa IBER hasta obtener el modelado definitivo que concordara con los datos de inundación histórica, ocurrido el dieciocho de septiembre del 2011. Además, modelaron alternativamente la simulación de un dique de un metro de altura para la contención de la inundación al margen derecho del río. Los resultados obtenidos resultaron favorables en la elaboración del MDT a partir de imágenes de Google Earth y la edición del tamaño de malla, para la simulación de inundaciones con fecha histórica, que, al modelar la situación con dique de contención, este evita la inundación del margen derecho del río en el mismo escenario.

En el trabajo de Ortiz Saenz de 2019 identifica y evalúa el área en riesgo de inundación en una parcela con cultivo de caña de azúcar, empleando DEM de alta resolución y modelos de lluvia-escorrentía en HEC-RAS y ArcGIS en el municipio de Palmira, departamento de Valle de Cauca, Colombia. El dato empleado para el modelo de elevaciones lo ejecutó empleando un vehículo aéreo no tripulado de ala fija a 150 m de altura, con una cámara óptica comercial de 24 Mpx y solape del 80% de las escenas permitiendo lograr 0.19 m de resolución espacial, que corrieron por medio de una empresa privada; información pluviométrica del periodo de 1973 al 2016 (Ortiz-Saenz, 2019).

Identificó las curvas IDF por el método general simplificado para Colombia. Posteriormente evaluaron la capacidad hidráulica del conector principal de la parcela empleando la herramienta HEC-geoRAS de HEC-RAS para Arcgis y para simular el comportamiento hidráulico del caudal en el terreno, empleó la pendiente promedio del colector y el coeficiente de rugosidad para ingresarlos como dato de entrada en la modelación en HEC-RAS. Los resultados reportados mostraron los caudales de ingreso y salida de los colectores de $9.45 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ en 206 ha en estudio, identificando zonas irregulares geométricas y de profundidad que variaron de 0.3 a 1.5 m. Reporta que la mayor limitante al generar DEM por fotogrametría. Centran la precisión del terreno por la interferencia ocasionada por vegetación densa y cuerpos de aguas, por lo que se sugiere el empleo de tecnología LiDAR, sin embargo, los DEM generados por LiDAR no aportan mejora sustancial en proyectos de gran envergadura como la simulación de inundaciones, concluyendo que no justifica su implementación en este tipo de proyecto a gran escala.

En Zhao et al. (2021) trabajaron bajo un nuevo enfoque de acopamiento de simulación hidráulica 1D-2D multiseccional definido por la escala de los MDE. Iniciando con una simulación de malla gruesa en 1D para discriminar las zonas sin riesgo de inundación, y posteriormente, mejorar la calidad de los MDE a escala decimétrica y el empleo de modelación 2D para el mallado fino en micro-topografías en la simulación de inundaciones urbanas. El procedimiento lo programaron en Python dentro del interfaz de Arcgis.

Extrajeron la superficie 1D de los DEM de alta resolución a gran escala empleando métodos basados en GIS, en la cual incluyeron cuatro objetos hidrográficos designados como puntos azules o sumideros, zonas de sub-impacto o captaciones, puntos de fluidez y enlaces de arroyos. Su algoritmo emplea enlaces de flujo como objetos computacionales, enlazando toda la información con características de sumideros unidos a enlaces de flujo interseccionados como bordes. Usando el orden de corriente como orden computacional en los enlaces de flujo y orden de convergencia de los flujos de exceso.

Las zonas de sub-impacto las programaron en un algoritmo que permitió realizar un rastreo de aguas arriba de la corriente, de manera que, cuando introdujeron infraestructura urbana como edificios o parques como variables de entrada, el algoritmo seleccionó las características de enlace de la corriente de intersección que representan las inundaciones locales

y caminos de entrada asociados, mientras que los sumideros podían recibir múltiples flujos de entrada.

Por su parte Choné et al. (2021) modelaron inundaciones a gran escala basado en datos aéreos LiDAR de 1 m de resolución y datos detallados del nivel del agua obtenidos por tecnología HydroBall en el modelo hidráulico en 1D-2D LISFLOOD-FP. La primera parte del modelo se ejecuta en 1D, modelaron el flujo en canales definidos por el ancho y elevación del lecho, mientras que el modelo 2D lo realizaron en la llanura aluvial, aplicando una subcuadrícula para canales con un ancho menor a la resolución del DEM el cual es de 10 m y para evitar incertidumbre en las estimaciones del caudal de los ríos, se delimitaron a aquellos con área de drenaje superior a 10 km² para cuatro cuencas hidrográficas en Quebec Canadá.

De esta manera, Choné et al. (2021) ejecutaron superredes en zonas donde el río era superior a la resolución del modelo digital para que el modelo 1D fuera una línea, además emplearon una máscara 2D con el que definieron la ubicación del canal. Minimizaron el tiempo de procesamiento en las simulaciones hidráulica al emplear DEM de 1m y remuestrear a 10 m promediando el componente 2D de las simulaciones hidráulicas siguieron la línea central de los ríos desde la base de datos del gobierno de Canadá, evitándose incoherencias de falsa sinuosidad que genera ArcGIS en sus herramientas de dirección de flujo desde el DEM LiDAR. Sus resultados revelaron que el modelo a gran escala puede proporcionar estimaciones del nivel de inundación cuando emplearon la batimetría estimada de LiDAR, su nivel de umbral lo tomaron como 0.40 m, mientras que sus mediciones se encontraron en el orden de ± 0.30 m y el gobierno de Quebec indica un nivel aceptable de 0.10 m, es decir, el 25 % de sus datos se encontraban en el criterio más estricto, mientras que el 74 y 87% de los casos cumplían los umbrales de 0.30 y 0.40 respectivamente. Concluyeron que la implementación de dato LiDAR presenta mejoras significativas en el modelado de inundaciones utilizando el modelo LISFLOOD-FP.

Recientemente se han reportado la integración de modelos de hidrogramas unitarios sintéticos, HEC-RAS y SIG para la mitigación de inundaciones por Mustamin et al., (2024), quienes aplicaron HUS en la cuenca de Gilireng, Indonesia. Clasificaron la intensidad de la lluvia en base a lo establecido por la Agencia de Meteorología y climatología geofísica de Indonesia, la cual clasifica la intensidad de la lluvia en cinco clases como lluvia ligera (5-20 mm/día), lluvia moderada (20-50 mm/día), lluvia fuerte (50-100 mm/día), lluvia muy fuerte (100-1150 mm/día) y lluvia muy fuerte (>150 mm/día).

Posteriormente, en Mustamin et al., (2024), adaptaron ecuaciones empíricas para la creación del HUS aplicado por periodos de retorno, y simulación los hidrogramas resultantes en HEC-RAS 2D, con el que posteriormente evaluaron el impacto de las inundaciones con propósito de establecer un sistema de precisión y alerta temprana del lugar, así como establecer las rutas óptimas para la evacuación de la población susceptible. Los resultados del HUS aplicado mostraron un caudal máximo de 1511.31 m³/s, mientras que después de la atenuación de inundaciones por aliviadero de la presa Passeloreng, el flujo descendió a 754.48 m³/s, es decir, una reducción del 50.08% de caudal máximo de inundación.

2.5. Estudios regionales

Entre la literatura del área de estudio destaca el trabajo sobre la delimitación de zonas susceptible a inundación en la ciudad de Culiacán a partir de vuelos fotogramétricos con vehículos aéreos no tripulados y puntos de control terrestres con receptores GNSS para la elaboración de MDE que permiten la delimitación de las subcuencas urbanas y caracterizar el orden de los arroyos de los mismos, para posteriormente validar los resultados en comparación con los atlas de riesgos de IMPLAN Culiacán.

Los resultados obtenidos de las zonas propensas a inundación a partir del orden de arroyos concuerdan con los establecidos con la institución, analizando la subcuenca que, por sus parámetros morfológicos resulta tener drenaje suficiente, sin embargo, debido a la transformación antropogénica del paisaje y las obras hidráulicas como el drenaje y alcantarillado resultan insuficiente (Sanhouse-García et al., 2021). A pesar de ello no incluyeron datos de precipitación como insumos en su trabajo, por lo que resulta aún insuficiente en la delimitación de inundaciones.

CAPITULO III. MARCO TEÓRICO

3.1. Hidrología

La hidrología es la ciencia encargada de examinar el ciclo de vida y movimiento del agua en función de las características topografías (Zihua et al., 2020). Se encarga del estudio de características físico-químicas de aguas continentales y marinas, de su movimiento y transformación durante el ciclo hidrológico. En cambio, la hidráulica estudia el equilibrio y movimiento de los fluidos, tanto el comportamiento mecánico del agua en reposo como de su movimiento por conductos cerrados y libres como ríos y canales (Triviño Pérez & Ortiz Rojas, 2004).

Los fenómenos hidrometeorológicos son generados por la acción violenta de fenómenos atmosféricos: ciclones tropicales, lluvias torrenciales, inundaciones, heladas, nevadas, granizadas, entre otras (Secretaría de Desarrollo Agrario Territorial y Urbano, 2015), al que se realizan estimaciones en regiones específicas, éstos datos son recolectados principalmente como información básica para la gestión de los recursos hídricos, se usan además para la operación de embalses y centrales hidroeléctricas, para fines de previsión de inundaciones y sequias a través de una red de estaciones de medición de variables hidrológicas distribuidas en la cuenca (Mejía Marcacuzco, 2006).

3.2. Cuenca hidrográfica

Las cuencas hidrológicas son una fracción de la superficie terrestre delimitado por su propia naturaleza (Rentería-Guevara et al., 2019), donde todas las aguas caídas por precipitación pluvial se unen para formar un solo curso de agua, arroyo, río, lago o mar. Su área está definida por los puntos más altos del relieve que lo comprende, generando una división de aguas, a partir de una línea imaginaria conocida como parteaguas, la cual se delimita sobre el plano de curvas de nivel, siguiendo las líneas de altas cumbres, entendiéndose por superficie de la cuenca al área proyectada en un plano horizontal (Mora, 1989). Así mismo, se establecen como el espacio de captación, control, manejo integrado del recurso hídrico y observaciones del ciclo hidrológico, donde en ella se define el desarrollo hidráulico (Rodríguez López et al., 2010). Por lo que se convierten en entidades geográficas básicas para el estudio de los procesos hidrológicos que generan escurrimiento a partir de la lluvia ocurrida en ella (Francisco, 2013).

La cuenca puede dividirse en espacios definidos por la relación del drenaje superficial e importancia respecto al curso principal, es decir, a un curso principal que llega a un afluente secundario que se denominará como “sub cuenca” la cual presenta características particulares de escurrimiento y extensión, mientras que el curso principal que llega a un afluente terciario queda comprendido por una microcuenca (Villalobos et al., 2004).

La delimitación de la cuenca determina los parámetros de los recursos hídricos, por ejemplo, los totales anuales de precipitación y caudales, además del potencial de inundaciones, con el propósito de evaluar el tipo, forma y aplicación de las medidas de gestión y prevención; de este punto de vista, el tamaño de una cuenca es un parámetro fundamental en el comportamiento hidrológico que al mismo tiempo resulta de los más complicados de modelar (Correa et al., 2017).

El área que se encuentra definida por dos o más cuencas hidrográficas y cuyas aguas fluyen a un cauce natural se le denomina región hidrográfica y se denotan por el prefijo “RH” seguido del número al que pertenece (INEGI, 2010), en México, la cobertura asciende a 37 regiones hidrológicas, numeradas de noroeste a sureste del 1 al 37, iniciando con la región hidrográfica uno Baja California Noroeste; la región hidrológica número diez está comprendida en los estados de Sinaloa, Sonora, Chihuahua y Durango, las cuencas que las conforman, desde el norte con la cuenta río Fuerte, continuando al sur hasta contener la cuenca del río El Quelite.

INEGI maneja claves de caracterización para las unidades hidrográficas de la república mexicana, enumerando las regiones hidrológicas en función de su registro, su abreviatura se emplea el prefijo “RH” seguido del número de identificación. Posteriormente la nomenclatura de las cuencas está definido por el prefijo de la región hidrológica, seguido de una letra alfabética en mayúscula, y por último, la clave de identificación de la sub cuenca se genera de la concatenación de la clave de la región hidrográfica, más la clave de la cuenca y una letra minúscula de la “a” a la “z” (INEGI, 2010).

3.3. Ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico es el foco central de la hidrología, no tiene principio ni fin, donde todos sus procesos ocurren continuamente (VT Chow et al., 1994), el cual se puede conceptualizar como un todo que se encuentra compuesto por el agua atmosférica, superficial y subterránea, entre otros elementos, que se puede agrupar entre los elementos que lo conforman en subsistemas, que pueda facilitar su comprensión (Weber et al., 2010).

Al no tener un inicio por ser cíclico, se puede explicar partiendo del agua que evapora desde los océanos y la superficie terrestre, para posteriormente retornar a la atmosfera. El vapor de agua se transporta y eleva en la atmosfera hasta condensarse y precipita sobre la superficie terrestre u océanos (Hingray et al., 2015). La parte de la precipitación que cae en la superficie terrestre, una parte es interceptada por la vegetación y se convierte en flujo superficial sobre el suelo; otra parte puede infiltrarse en él, correr a través del suelo como flujo sub-superficial y descargar en los ríos como escorrentía superficial que posteriormente regresara a los océanos (Teegavarapu et al., 2019).

La mayor parte del agua interceptada en la superficie terrestres se evapora y regresa a la atmosfera; mientras que el agua infiltrada percola profundamente recargando acuíferos subterráneos, los cuales más tarde emergen en manantiales o fluyen hacia ríos para formar

escorrentía superficial, descargar en mares y océanos e iniciar el ciclo de nuevo (VT Chow et al., 1994).

Sin embargo, con la evolución socioeconómica y las actividades humanas por la construcciones de obras hidráulicas, deforestación, construcción de caminos, cambios de uso de suelo, y otras características principales que han modificado el ciclo hidrológico y alterando el régimen hidrológico de muchos ríos urbanos (Enrique & Vilches, 2015; S. Yang et al., 2022). Sumado a lo anterior, debido al calentamiento global, el ciclo hidrológico se verá afectado, intensificado en la evaporación y precipitación, sin embargo, ese aumento de precipitación no estará distribuida de manera homogénea a lo largo del año hidrológico, como anteriormente de comportaba (González et al., 2011).

3.4. Precipitación

La precipitación es toda forma de humedad que se origina en las nubes, producto de la evaporación de los océanos, y llega a la superficie terrestre en forma de lluvia, granizada y/o nevada (Mejía Marcacuzco, 2006; Mora, 1989).

Corresponde al primer mecanismo para producir inundaciones, ya sean de tipo convectivo, orográfico y/o frontal (Octavio Rojas et al., 2014). Las primeras ocurren debido a las altas temperaturas, este tipo suelen precipitarse durante las tardes, son lluvias rápidas que pueden ir seguidas de tormentas.

Las lluvias orográficas se denominan lluvias de relieve, ya que ocurren cuando existe un impedimento físico, como montañas, que obstruyen la masa de aire húmedo, resultando en la elevación de la altitud de las lluvias que precipitan inmediatamente después.

Las lluvias frontales, reciben su nombre porque las masas de aire frío y caliente chocan entre sí, provocando que el aire caliente suba y el aire frío quede por debajo, debido a la diferencia de densidades entre ambas masas, lo anterior trae como resultado la precipitación del aire frío cuando éste alcance altitudes mayores. Las lluvias frontales también se denominan lluvias ciclónicas, con la característica de tener intensidad moderada y de mayor duración.

El agua recolectada por las precipitaciones alcanza el lecho del río por cuatro vías distintas: (i) escurrimiento o flujo de superficie, (ii) flujo hipodérmico, (iii) flujo subterráneo y (iv) precipitaciones que caen directamente en las capas de agua libres.

La precipitación es una de las entradas más importantes para la simulación de inundaciones empleadas en el modelo hidrológico, principalmente basado a partir de estaciones hidrometeorológicas (Mo et al., 2020), necesita de tres parámetros para definirla: su duración, intensidad y frecuencia (Mejía Marcacuzco, 2006).

La duración de la precipitación (D) hace referencia al tiempo transcurrido entre inicio y fin del evento, generalmente expresado en minutos u horas. La cantidad de lluvia que precipita

en un lapso de tiempo se le denomina intensidad de la precipitación (I), es decir, la altura de precipitación por unidad de tiempo, empleando unidades de mm/min, mm/h o mm/día, la intensidad de lluvia es registrada a través de instrumentos denominados pluviógrafo, y a su registro se le denomina hietograma, que es una gráfica de barras que muestra la variación de altura o intensidad de la precipitación en intervalos de tiempo (generalmente una hora).

Otra forma de medir la intensidad de precipitación, es a través de radar meteorológico, los cuales brindan información espacial de la intensidad de la lluvia, que para el caso de México son empleados por la Unidad del Servicio Meteorológico Nacional, resultando especialmente útiles en el monitoreo de ciclones tropicales (Salas-Salinas & Jiménez-Espinosa, 2007).

La frecuencia (F) se refiere a la probabilidad de que ocurra un evento con características específicas. El término periodo de retorno o periodo de recurrencia (Tr) describe el tiempo, en años, que en promedio debe transcurrir para que se presente un evento de magnitud igual o mayor a un valor determinado, x. Es decir, si un evento de precipitación igual o mayor que x (en mm) ocurre una vez cada Tr años, su probabilidad de ocurrencia (P) es 1 en Tr casos, lo que corresponde al recíproco de la frecuencia expresado en años, como se muestra en la ecuación (1) (Acosta-Castellanos & Sierra-Aponte, 2013; Huerta-Loera & Domínguez-Mora, 2016; López et al., 2019; Mejía Marcacuzco, 2006; Jorge Julián Vélez-Upegui et al., 2013; Wurl et al., 2015).

$$P(X > x) = 1/Tr \tag{1}$$

Las unidades que se emplean es años y la magnitud del escurrimiento denotado como gasto, lámina de precipitación o tirante de inundación.

De esta manera, el periodo de retorno de un evento se extiende a la misma naturaleza estocástica de la precipitación, existiendo cada año la probabilidad de ocurrencia de un evento sea igualado o superado, por ejemplo, una precipitación con una intensidad y duración dada a periodo de retorno de 100 años, tiene una probabilidad de 0.01de que ocurra, en la tabla 1, se muestra la equivalencia entre el periodo de retorno la frecuencia probabilística de ocurrencia.

Tabla 1. Frecuencia y probabilidad correspondiente a cada periodo de retorno

Periodo de retorno (Tr)	Frecuencia (F)	Probabilidad de excedencia (P)
2	0.5	50 %
5	0.2	20 %
10	0.1	10 %
25	0.04	4 %
50	0.02	2 %
100	0.01	1 %
500	0.002	0.2 %

En México, la distribución de la precipitación varía en tiempo y espacio, es heterogénea a lo largo del año hidrológico y geográficamente aumenta en dirección norte-sur debido a distintos factores como la orografía del país, la circulación atmosférica, y la teleconectividad de El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) (Maces & Viera, 2018). La costa del pacifico, presenta un pico en los mes de agosto, reflejando la influencia de las lluvias monzónicas de las costas del Pacífico (Méndez et al., 2008).

El tiempo de concentración (T_c), se define como el tiempo requerido durante una precipitación uniforme para que la cuenca llegue al estado estacionario, en otras palabras, el tiempo necesario para que la cuenca contribuya eficazmente en la generación de un flujo en el punto de desagüe (Jorge Julián Vélez-Upegui & Botero-Gutiérrez, 2011). También conocido como tiempo de respuesta o de equilibrio (Carrera et al., 2013), el tiempo de concentración es una variable empleada en el diseño hidrológico determinante de la capacidad hidráulica máxima de estructuras y diseño de ciudades. Esta variable es particular para cada cuenca, dependiendo de las características geomorfológicas de la cuenca y de la lluvia, que, para cuencas pequeñas y microcuencas, el tiempo de concentración es considerado igual al tiempo de retraso (E. A. Ellis et al., 2012), es decir, el tiempo que tarda entre el pico máximo del hietograma y la aparición del punto máximo del hidrograma en el registro de una precipitación.

En la literatura existen múltiples expresiones para el cálculo del tiempo de concentración (ver tabla 2) propuestas por diferentes autores explicada como el tiempo que tarda una gota de lluvia desde la cabecera de la cuenca hasta llegar a un punto de interés, de manera general la ecuación para el cálculo de T_c está definida por la relación entre la longitud y la pendiente de la cuenca (Carrera et al., 2013; Ortiz-Saenz, 2019).

Tabla 2. Ecuaciones empíricas para el cálculo de Tc

NOMBRE	ECUACIÓN	DATOS	USO
TÉMEZ	$Tc = 0.3 \left(\frac{L}{S_0^{0.25}}\right)^{0.75}$	L: longitud del cauce principal en kilómetros, S ₀ : diferencia de cotas sobre L en porcentaje	
WILLIAMS	$Tc = \frac{LA^{0.4}}{DS_0^{0.2}}$	A: área de la cuenca en millas cuadradas, L: distancias en línea recta desde el sitio de interés al punto más alto en millas, S ₀ : diferencia de cotas entre los puntos más extremos dividida por L en porcentaje, d: diámetro de una cuenca circular con área A en millas	
KIRPICH	$Tc = 0.066 \left(\frac{L}{\sqrt{S}}\right)^{0.77}$	L: longitud desde la estación de aforo hasta la divisoria siguiendo en cauce principal en kilómetros, S: diferencia de cotas entre los puntos extremos de la corriente m/m.	Cuencas rurales de Tennessee con canales bien definidos y pendientes empinadas (3 a 10%).
T.V. CHOW	$Tc = 0.273 \left(\frac{L}{\sqrt{S}}\right)^{0.64}$	L: longitud en kilómetros (km), S: pendiente en metro por metro (m/m)	

NOMBRE	ECUACIÓN	DATOS	USO
CALIFORNIA CULVERTS PRACTICE	$Tc = 0.0195 \left(\frac{L^3}{H}\right)^{0.385}$ $Tc = 0.0185(L^3/H)^{0.385}$	<p>L: longitud del curso de agua más largo (m),</p> <p>H: diferencia de nivel entre la divisoria de aguas y la salida (m).</p> <p>Tc: tiempo de concentración (horas),</p> <p>S: área de la cuenca (km²),</p>	<p>Desarrollada para pequeñas cuencas montañosas en California</p>
GIANDOTTI	$Tc = \frac{4\sqrt{S} + 1.5L}{0.8\sqrt{H}}$ <p>Siempre que</p> $\frac{L}{3600} \geq Tc \geq \frac{L}{3600+1.5}$	<p>L: longitud del cauce principal (km),</p> <p>I: elevación media del cauce o diferencia de nivel principal (m).</p>	<p>Cuencas de uso agrícola, adaptada a pequeñas cuencas urbanas (inferiores a 800 Ha) ideales para cuencas completamente pavimentadas.</p> <p>Áreas mixtas con tendencias a la sobreestimación.</p>
Ecuación de Retardo SCS (1973)	$Tc = \frac{0.0136L^{0.8} \left(\frac{1000}{CN} - 9\right)^{0.7}}{S^{0.5}}$	<p>L: longitud hidráulica de la cuenca mayor trayectoria de flujo (m);</p> <p>CN: Número de curva SCS;</p> <p>S: pendiente promedio de la cuenca (m/m).</p>	<p>La ecuación supone que Tc = 1.6 x retardo de la cuenca</p>

NOMBRE	ECUACIÓN	DATOS	USO
VENTURA-HERAS	$Tc = a \frac{S^{0.5}}{i}$ <p>siendo $0.05 \leq a \leq 0.5$ $a = \frac{L}{\sqrt{S}}$</p>	<p>Tc: tiempo de concentración (horas);</p> <p>i: pendiente media del cauce principal (%);</p> <p>S: área de la cuenca (km²);</p> <p>L: longitud del cauce principal (km);</p> <p>a: alejamiento medio.</p>	
BRANSBY-WILLIAMS	$T = \frac{L}{1.5D} \sqrt{\frac{M^2}{F}}$	<p>T: tiempo de concentración (horas);</p> <p>L: distancia máxima a la salida (km),</p> <p>D: diámetro del círculo de área equivalente a la superficie de la cuenca (km²),</p> <p>M: área de la cuenca (km²);</p> <p>F: pendiente media del cauce principal (%)</p>	
PASSINI	$Tc = a \frac{(SL)^{1/3}}{i^{0.5}}$ <p>siendo $0.04 \leq a \leq 0.13$ $a = \frac{L}{\sqrt{S}}$</p>	<p>Tc: tiempo de concentración (horas),</p> <p>i: pendiente media del cauce principal (%),</p> <p>S: área de la cuenca (km²),</p> <p>L: longitud del cauce principal (km), a: alejamiento medio.</p>	

NOMBRE	ECUACIÓN	DATOS	USO
IZZARD	$Tc = \frac{525(0.0000276 i + c) L^{0.33}}{S^{0.333} i^{0.667}}$	<p>i: intensidad de lluvia (mm/h), c: coeficiente de retardo,</p> <p>L: longitud de la trayectoria de flujo (m),</p> <p>S: pendiente de la trayectoria de flujo (m/m).</p>	<p>Para caminos y áreas de césped: 0.0070 -0.012:</p> <p>Pavimentos muy lisos a concreto 0.06: superficies densamente cubiertas de pasto</p>
Federal Aviation Administration	$Tc = 0.7035 \frac{(1.1 - C)L^{0.50}}{S^{0.333}}$	<p>C: coeficiente de escorrentía del método racional,</p> <p>L: longitud del flujo superficial (m),</p> <p>S: pendiente de la superficie (m/m)</p>	<p>Para cuencas con problemas de drenaje en cuencas urbanas</p>
Ecuaciones De Onda Cinemática Morgali Y Linsley (1965) Aron Y Erborge (1973)	$Tc = \frac{7L^{0.6}n^{0.6}}{I^{0.4}S^{0.3}}$	<p>L: longitud del flujo superficial (m);</p> <p>n: coeficiente de rugosidad de Manning;</p> <p>I: intensidad de lluvia mm/h; S: pendiente promedio del terreno (m/m).</p>	<p>Requiere iteraciones debido a que tanto I como Tc son desconocidos, y la superposición de la curva I-D-F da la solución gráfica directa para Tc.</p>

3.5. Infiltración, Evaporación, Escorrentía

La precipitación que llega a la superficie terrestre es distribuida por distintos medios, una parte es a través de la evapotranspiración desde el suelo y vegetación, otra por escorrentía que viaja sobre y a través del suelo, y alguna más que se infiltra y contribuye al agua subterránea (Pizarro Tapia et al., 2003).

La infiltración es el proceso donde el agua penetra la superficie del terreno hacia el suelo (VT Chow et al., 1994). El volumen de infiltración depende de la capacidad de almacenamiento de agua del suelo, porosidad, humedad, textura, grosor de las capas y edad del mismo, conductividad hidráulica y almacenamiento de agua (Kaykhosravi et al., 2019), aun así, la única fracción de lluvia que tiene potencial a infiltrar es aquella que llega a la superficie del suelo (Schosinsky & Losilla, 2000). Además de la infiltración, la precipitación presenta pérdidas por evaporación, la cual es el proceso donde el agua precipitada y de los cuerpos de agua es transferido a la atmósfera producto de la vaporización. Otro mecanismo de pérdida es por evapotranspiración, que es la pérdida de agua resultante de la evaporación del suelo y la transpiración de las plantas (Ven Te Chow, 1994).

Al movimiento de agua sobre una región o una superficie dada se conoce como escorrentía y se expresa en volumen (m^3) o altura de agua en mm. En relación a la superficie terrestre y entre otros factores que intervienen en el proceso resaltan los del tipo topográfico, es decir, pendiente del terreno, elevaciones, aspecto y área de la cuenca, que provocan cambios hidrológicos de una cuenca a otra, cambiando la velocidad del flujo, volumen de escorrentía, entre otros. Las zonas con grandes elevaciones aumentan la tasa de evacuación de escorrentía, reduciendo su acumulación en el lugar, caso contrario, en áreas de menor elevación y pendientes suaves, la escorrentía se reduce y aumenta la inundación del lugar (Avand et al., 2021).

En este orden de ideas, la escorrentía se convierte en el resultado de las interacciones entre el clima, terreno y uso de suelo de la tierra en una cuenca hidrográfica, donde cualquier alteración de éstas interfiere directamente en la escorrentía efectiva del sistema (Ahmadi-sani et al., 2022).

La cantidad de escurrimiento que pasa por un punto determinado por unidad de tiempo, se le conoce como Caudal o Gasto (Q) y se emplea para determinar el volumen de agua que escurre en un río, cuya principal función es referido al diseño de obras de infraestructura hidráulica (IMTA, n.d.). El término hace referencia al movimiento del agua a través de una sección transversal cualquiera y se expresa en volumen por unidad de tiempo empleando unidades como m^3/s o l/s .

La representación gráfica de éstas variaciones del gasto a través del tiempo se denomina hidrograma, en cada punto del hidrograma se conoce el gasto que pasa en el sitio de medición (Miranda-Aragón et al., 2009; Salas-Salinas & Jiménez-Espinosa, 2007). El gasto de una cuenca,

puede calcularse a partir de ecuaciones empíricas para la aplicación de distintos tipos de cuencas, según las características intrínsecas de esta, en la

Tabla 3 se pueden ver las variaciones de la ecuación y sus aplicaciones.

Tabla 3. Ecuaciones para el cálculo de caudales de la cuenca

Formula	Aplicación	Nombre	Fuente
$Q = \frac{CIA}{3600}$	General	Método racional	(García-Lorenzo & Conesa-García, 2011)
$Q = P * e^{-ETP/P}$	Microcuenca	Budyko	(Pizarro Tapia et al., 2003)
$Q = P - [P/(1 + (P/ETP)^2)^{0.5}]$	Microcuenca	Turc-Pike	(Pizarro Tapia et al., 2003)
$Q = P[1 - e^{-P/ETP}]$	Microcuenca	Pizarro	(Pizarro Tapia et al., 2003)
$Q = \frac{(P - 0.2 S)^2}{P + 0.8 S}$ S = 254 (100/CN-1)	General	Numero de curva	(Fernanda et al., 2007)
$Q = P - ETr$ $ETr = P/\sqrt{(0.9 + P^2/L^2)}$ $L = 300 + 25T + 0.05T^2$	Zonas áridas	Balance hídrico	(Córdoba et al., 2006)

Dónde: Q : escorrentía (m^3/s); P : precipitación media areal anual o mensual (mm); ETr : evapotranspiración (mm); T : es la temperatura media anual en $^{\circ}C$; ETP : evapotranspiración potencial; e : constante de Neper. I : intensidad máxima media para un valor igual al tiempo de concentración, C : el coeficiente de escorrentía para el intervalo en el que se produce I ; A es el área de la cuenca km^2 . CN : número de curva.

3.6. Suelo

El suelo tiene un papel importante a la hora de determinar zonas inundables, ya que es el medio por el cual se transporta tanto el flujo y la escorrentía, y según las características del suelo, éste favorecerá o no, a los procesos de infiltración, percolación, y/o inundación.

Los suelos con cubierta vegetal ejercen influencia directamente en la capacidad de infiltración del suelo disminuyendo la lluvia neta, volumen escurrido y caudal de punta, sin embargo, incrementa el movimiento del flujo a capas subterráneas, que una vez, estas capas se

encuentran en punto de saturación aumentan la susceptibilidad a inundaciones. La existencia de una cubierta vegetal, refuerza la cantidad de evapotranspiración y aumenta la capacidad de almacenamiento del suelo para las siguientes precipitaciones.

Edafológicamente hablando, cuando más antiguo sea el suelo, y por tanto más profundo sea, de manera directamente proporcional aumentará su capacidad de absorber las precipitaciones, minimizando el volumen de escurrimiento, y llevando el flujo a las capas freáticas. Los suelos con mayor conductividad hidráulica favorecen la percolación profunda y, por tanto, la infiltración hacia capas de flujo subterráneo, reduciendo así la susceptibilidad ante inundación.

3.7. Relieve topográfico de la cuenca

El relieve topográfico de una cuenca para estudios geoespaciales de inundaciones está representado por los modelos digitales de elevaciones (MDE o DEM por sus siglas en inglés). Se encuentran definidos como una estructura numérica de datos con los que se representa la distribución espacial de la altitud en la superficie terrestre, georreferenciados en una proyección cartográfica, construyendo una herramienta elemental en la descripción de los rasgos topográficos y representación del relieve en tres dimensiones (Vega & Mas, 2009). Es decir, es la representación de una matriz numérica, en el cual los valores que guarda pertenecen a la elevación, o coordenada Z, y cada celda se encuentra referenciada a un sistema de coordenadas espaciales plano rectangulares X, Y (Fuckner & Moraes, 2019).

Diversos autores hacen referencia al MDE como una representación digital de elevaciones de una superficie topográfica, formada por una cuadrícula georrectificada basada en puntos o áreas que cubren la superficie de la Tierra a través de cuadrículas rectangulares (matrices) y almacenados en formatos de archivos ráster. El término de “modelo” dentro de los MDE, hace referencia a una estructura conveniente para almacenar y analizar los datos de elevación digitalizados, en vez de almacenarlos como elevaciones en listas de vectores y coordenadas. Un MDE es una extracción de la superficie real, sin elementos artificiales, requiriendo un sistema de coordenadas y marco de referencia de las componentes horizontales, verticales y temporales especificados en el metadato. Los MDE de libre acceso son utilizados ampliamente como alternativa a datos comerciales en distintas regiones en Desarrollo donde los datos son escasos y limitados (Ekeu-wei & Blackburn, 2018; Guth et al., 2021).

Un punto importante en la elaboración de los MDE recae en la resolución espacial de los datos de entrada, por ejemplo, en datos originales de imágenes de 90 metros de pixel poseen capacidad limitada para modelar las características de drenaje en sitios planos, que generalmente se localizan en las zonas bajas de la cuenca (Correa et al., 2017). Los MDE se convierten en datos de entrada principal en los procesos de modelado hidrológico e hidráulico, así como diversos procesos en los que se involucran la topografía de la tierra en la gestión de recursos hídricos y análisis de inundaciones, la superficie de la tierra determina la forma de los

escurrimientos y flujos de agua a lo largo de la cuenca (Saito et al., 2015). Además la precisión es sensible a la calidad del MDE, lo que resulta especialmente complejo en las llanuras aluviales y deltas del río (Neal et al., 2021).

3.8. Inundaciones

Según el glosario hidrológico internacional, una inundación es el aumento del agua por arriba del nivel normal del cauce de un río o de cualquier masa de agua, entendiéndose por “nivel normal” al nivel que está acostumbrado sin causar ningún perjuicio (Secretaría de Desarrollo Agrario Territorial y Urbano, 2015). Durante el periodo de 1990 al 2020, más del 50 por ciento de los desastres registrados a nivel mundial estuvieron relacionados a inundaciones (Zúñiga et al., 2020).

Una inundación es un evento provocado por la precipitación, oleaje, marea de tormenta, falla de alguna estructura hidráulica, o deshielo de la parte alta de la cuenca, que produce incremento en el nivel de la superficie libre de agua, provocando invasión del agua en sitios que normalmente no la hay y con potencial de generar daños en la población, agricultura, ganadería e infraestructura (Arriagada et al., 2019; Sánchez-Vélez et al., 2017).

Las inundaciones son uno de los peligros naturales más frecuentes, mortíferos, de mayores pérdidas económicas globalmente hablando y con mayor intensidad en los últimos años. Son resultado de que el agua sobrepasa la capacidad de eliminación por el cauce del río, y se puede esperar a que ocurra por lo menos una vez cada tres años (Knapp, 1979).

Las inundaciones son desencadenadas principalmente por precipitaciones persistentes, lluvias intensas de corta duración, rotura de embalses, entre otras (Octavio Rojas et al., 2014). Afectan a cualquier uso de suelo y vegetación, sin embargo las zonas urbanas son las de mayor afectación económica (Orellana et al., 2017; Pinos et al., 2017).

Se clasifican según su origen, lugar de ocurrencia y/o el tiempo al llegar al tirante máximo. Por su origen, se clasifican en inundaciones pluviales, fluviales y lacustres; por su lugar de ocurrencia: en urbanas y rurales; y por el tiempo se clasifican en lentas o repentinas. En función de la causa y tiempo que tarda un evento de inundación (Barón R. et al., 2017), las clasifican como:

- I) Originadas por lluvia, es decir, inundaciones pluviales. Las cuales son producidas por la acumulación de lluvia por un tiempo prolongado en un lugar geográfico con drenaje deficiente del terreno, o del sistema de alcantarillado, por consiguiente, el agua queda acumulada por lapsos de horas o días
- II) Originadas por ríos, también llamadas inundaciones fluviales, que son consecuencia del exceso de lluvias que provocan un aumento súbito en el volumen del río superior a la capacidad de transporte del cauce, desbordando e inundando las zonas cercanas a este.

- III) Originadas por marejadas, este tipo se presenta en zonas costeras, por el ascenso del nivel del mar que ingresa y cubre grandes extensiones de tierra, normalmente, estos eventos de originan por efectos de la atracción lunar, vientos fuertes de origen hidrometeorológicos, o tsunamis.
- IV) Por falla de estructura hidráulica o inundación por rompimiento de presas, las cuales ocurren al presentarse una falla en la estructura y el agua contenida por ellas pasa a ocupar zonas de influencia.

Las inundaciones se también se clasifican por el tiempo que se tarde en tomar acción en las estrategias de evacuación y mitigación, en este sentido se tienen dos tipos: a) inundación súbita, donde se trata de crecientes que suceden de manera repentina a causa de la pendiente del río o su cuenca, ocasionalmente produce arrastre de material. b) inundación lenta, en el cual se tienen lugar cuando aparece un aumento gradual del nivel del río hasta superar su capacidad máxima, normalmente el tiempo de anticipación en este caso es suficiente para que las entidades operativas coordines las acciones de prevención, respuesta y rescate (Barón R. et al., 2017).

El desbordamiento del agua en una inundación hacia zonas con usos de suelo distinto al transporte del flujo, por ejemplo, vivienda, cultivo, comercio, entre otros. Resultan en un proceso peligroso cuando se destinan usos de suelo a ocupación humana, sin permisos, ni estudios previos, por consiguiente, al materializarse la amenaza, se producen catástrofes, iniciando un conflicto entre el sistema natural y social.

Los sistemas fluviales son esenciales para los humanos, al brindar una serie de servicios y ecosistemas a la sociedad (Arriagada et al., 2019), además de responder al aporte de agua desde la cabecera de la cuenca, produciendo la aceleración de los procesos de erosión, transporte y sedimentación del área afectada. Al intensificarse el proceso de crecida puede terminar en una inundación, en la cual intervienen factores espacio-temporales del evento, que se relacionan con el movimiento del agua aguas abajo, como lo son el tipo de suelo, densidad, cubierta vegetal, uso del suelo, superficie drenada, y jerarquización de la red de drenaje; además de las características propias del cauce principal como morfología del lecho, geometría del cauce, obstrucciones, entre otros (O Rojas et al., 2012).

Uno de los componentes más importantes, topográficamente hablando que afecta los daños por inundaciones es la distancia al río, la cual está inversamente relacionada con la cantidad de daño causado por la inundación, otros factores importantes son el uso de la tierra, pendiente y la densidad de drenaje del lugar por su efecto con la escorrentía del lugar (Avand et al., 2021). Sin embargo, el problema de las inundaciones es en gran parte la planeación inadecuada y las circunstancias económicas de los asentamientos humanos en las llanuras susceptibles a inundación, provocando desencadenamiento del desastre desde una vertiente social, que a su vez modifican al medio ambiente (Vergara Tenorio et al., 2011).

Por tal motivo, la evaluación del riesgo de inundaciones resulta fundamental en el diseño de infraestructura y la planificación de medidas de mitigación, así como para generar políticas

de acción para la mejora de recursos hídricos (Vidrio-Sahagún & He, 2021), con lo cual se necesita de una buena comprensión de las tendencias históricas de inundaciones en el lugar (Ekeu-wei & Blackburn, 2018).

3.8.1. Inundaciones urbanas

La hidrología urbana se establece en términos impermeabilidad, aumento de caudales máximos, volúmenes y riesgo de inundaciones, para la reducción de recarga y gestión de infraestructura de captación de agua subterránea (Valeo et al., 2021).

Lo anterior tiene el propósito de disminuir los impactos negativos de las inundaciones con la sociedad, las cuales están estrechamente relacionadas con el cambio climático, condiciones sociales y civiles, problemas ambientales y pérdidas económicas (Quiroga et al., 2016), las inundaciones urbanas son uno de los riesgos hidrometeorológicos de mayor importancia que enfrentan los asentamientos humanos, que afectan a gran parte de la población y sus actividades económicas.

Las zonas urbanas modifican parte significativa de la cobertura del suelo provocando un aumento de superficies impermeables, es decir, sin la capacidad de filtración, llevando a niveles más altos de escorrentía y por consiguiente a mayor riesgo de inundación que, sumado a infraestructuras de drenaje insuficiente, convierte a las ciudades vulnerables a lluvias intensas, incrementándose más en aquellas zonas bajas de las cuencas urbanas, generando efectos negativos en la población (Kaykhosravi et al., 2019; Octavio Rojas et al., 2014; Zúñiga et al., 2020).

Los efectos negativos de las inundaciones se ven desde un punto de vista natural o social. En el primer caso, tienen como consecuencia la movilización de sólidos a lo largo de la cuenca, la aceleración de los procesos de erosión, transporte y sedimentación de elementos que llegan a formar microformas de relieve, así como también variaciones de geometría a lo largo del cauce y sección transversal. Desde el medio social, los efectos de las inundaciones son en su mayoría negativas, como daños en infraestructura, repercusiones en la vida humana a falta de comunicaciones, aumento en gastos económicos y abastecimiento, efectos psicológicos, sociológicos, problemas de salud y en mayor gravedad, pérdida de la vida (O Rojas et al., 2012), haciendo que la delimitación de zonas inundadas en eventos pasados resulte necesaria para la predicción de futuras inundaciones, empleando diversos métodos iniciando con la revisión de mapas y registro de inundaciones anteriores (Avand et al., 2021).

Existen diversos, enfoques de estimación de inundaciones, entre los que destacan el pronóstico de caudales, que hace referencia a la estimación del caudal y el tiempo de ocurrencia. El pronóstico del caudal del río ($Q_{\text{río}}$) puede estimarse a corto plazo (periodo de horas), a largo plazo (días de anticipación) o pronóstico estacional, registrando precipitaciones aguas arriba y aguas debajo de la cuenca para obtener los caudales del río.

La predicción de caudales es la probabilidad de que ocurra una inundación con base en el análisis de frecuencias de los registros históricos, tanto de precipitación como de caudales. Sin embargo, no se especifica cuándo ocurrirá la inundación y generalmente se emplea para evaluar los escenarios de riesgo de inundación.

A pesar de los avances en el desarrollo de los modelos de inundaciones en países en desarrollo, los estudios de estimación de mapeo de peligro de inundación han sido evitados, debido a la falta de datos topográficos de alta resolución como los LiDAR, y en algunos casos, registros completos de precipitaciones y de volumen de flujo en los distintos ríos. En estas regiones en desarrollo, las inundaciones se han convertido cada vez más desastrosas, principalmente, a la alta vulnerabilidad, infraestructura débil, mentalidad pobre de la población, bajo nivel de resiliencia y falta de medidas de mitigación sólidas y sostenibles (Geravand et al., 2020).

3.8.2. Riesgo, Peligro, Vulnerabilidad

El concepto de riesgo en un evento de inundación, hace referencia a la probabilidad de evento en un espacio determinado ocurra un peligro determinado generando daños potenciales y pérdidas en las actividades y vidas humanas, por lo cual, sólo puede ser definido a partir de cálculos de probabilidades con datos adecuados, independientemente sea cuantitativos o cualitativos. De manera general, el riesgo es el producto del *peligro* de ocurrencia de un evento y la *vulnerabilidad* de las condiciones socioeconómicas de la zona afectada (Octavio Rojas & Martínez, 2011). El término catástrofe y desastre hacen referencia a la materialización del riesgo, el cual se aborda las pérdidas que se esperan ante una amenaza en particular a un elemento específico en un periodo de tiempo futuro particular.

El peligro de inundación lo han definido como la posibilidad de cierto fenómeno ocurra con potencial dañino en un área dada y en un periodo especificado, (DeAlba-Martínez & Márquez-Azúa, 2017; Reyes-Olvera & Gutiérrez-González, 2016), descrito por las características físicas de los eventos como la extensión y profundidad de la inundación (Oubennaceur et al., 2021).

Se estima mediante el uso de modelos hidráulicos a partir de datos históricos, para su estimación es necesario aspectos físicos y estadísticos de la inundación real, es decir, el periodo de retorno, duración e intensidad de la lluvia, el alcance de la inundación, y la profundidad de la crecida, en términos simples, peligrosidad es la fuente con potencialidad de daño, y el riesgo es la consecuencia a la posibilidad de que el evento suceda (CENAPRED-SEGOB, 2014; DeAlba-Martínez & Márquez-Azúa, 2017; Pinos et al., 2017; Octavio Rojas & Martínez, 2011; Russo et al., 2019).

La cartografía de peligrosidad por inundaciones fluviales depende del interés particular del estudio y los datos disponibles, (O Rojas et al., 2012) establece cuatro métodos: botánico, Histórico, Hidráulico y Geomorfológico.

La vulnerabilidad como concepto está definido por la fragilidad o sensibilidad ambiental de un ecosistema a la degradación dependiendo de sus características y de la interacción con el hombre y/o perturbaciones naturales (Arriagada et al., 2019). Estas perturbaciones son generalmente retrocesos temporales, como parte de la recuperación del ecosistema generando espacios de adaptación. La vulnerabilidad pertenece a las características diferenciadas de la sociedad y la predisposición al sufrimiento de los daños frente a un evento físico, que dificultan su posterior recuperación, la cual se genera principalmente por tres factores (i) la ocupación de terrenos que no son adecuados; (ii) la construcción de viviendas precarias; y (iii) la falta de condiciones económicas para satisfacer necesidades (Octavio Rojas & Martínez, 2011).

La vulnerabilidad aborda el tipo de vivienda, calidad de la vida humana en la zona de estudio y la resistencia de los materiales de las edificaciones a diversos niveles de agua. De esta manera algunos estudios se enfocan en evaluar la vulnerabilidad de una zona de inundación, otros exclusivamente a cuantificar la peligrosidad y algunos más estudian el riesgo en los eventos de inundación.

3.9. Medidas de control de inundaciones

Entre las medidas de control de inundaciones, se dividen en dos grandes grupos: medidas estructurales y no estructurales, la primera hace referencia a aquellas obras de ingeniería implementadas para reducir el riesgo de afectación por crecidas entre las que destacan las medidas extensivas, las cuales modifican la intensidad de la precipitación, territorio o caudal; y las medidas Intensivas que modifican geoméricamente el cauce

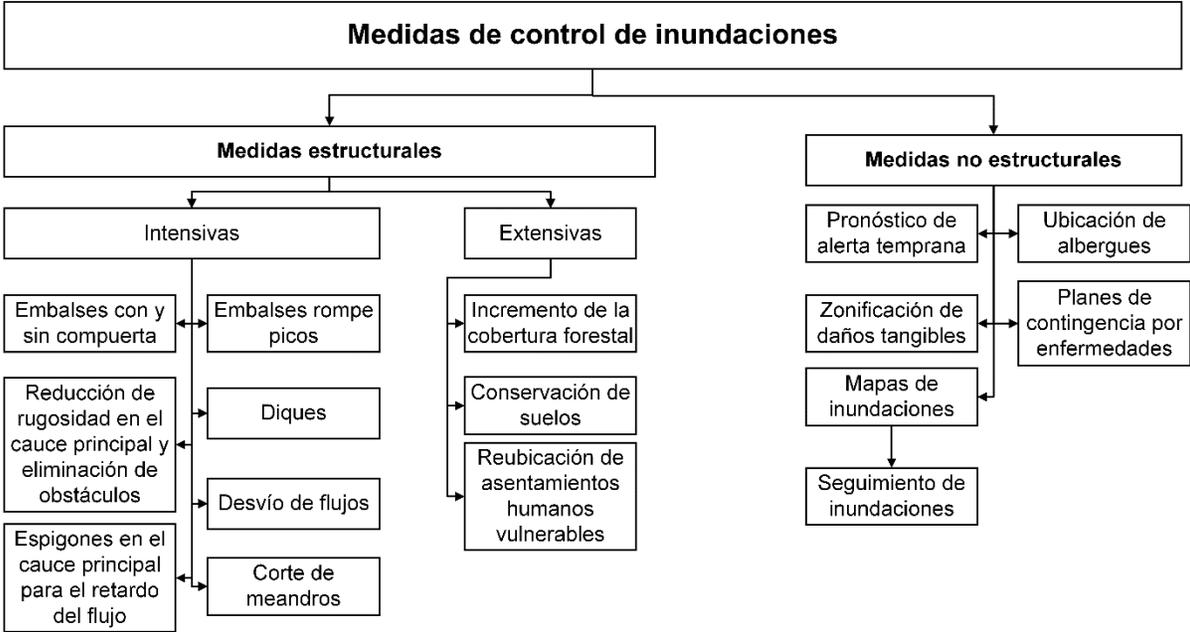


Fig. 1 (Jonoski et al., 2019) (Abdullah et al., 2021).

Por el contrario, las medidas no estructurales son medidas que actúan sobre el fortalecimiento de la resiliencia del sistema ante la ocurrencia de un evento de inundación, es decir, trabajan en modificar la susceptibilidad del territorio inundable, las cuales poseen características preventivas como: i) sistema de pronóstico y alerta temprana, ii) plan de evacuación y ubicación de albergues; zonificación de daños tangibles e intangibles por inundación; iii) sistema de indemnizaciones justas y suficientes para damnificados; iv) planes de contingencia por enfermedades ocasionados por la calidad del agua; v) construcción de fondos de prevención o reparación de daños por inundación, vi) mapas de inundación en los que se derivan seguimiento de inundaciones, vii) planificaciones de emergencia, viii) soluciones de reducción de riesgo (Abdelkarim et al., 2020).

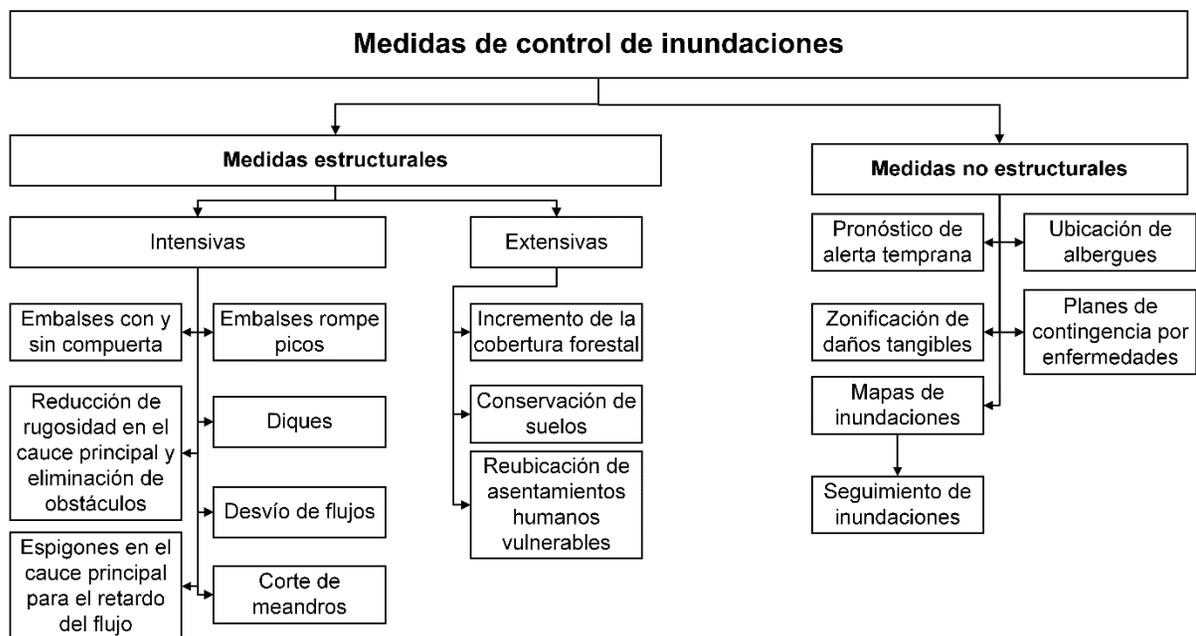


Fig. 1 Clasificación de las medidas de control de inundaciones. Fuente: traducido de (Avila-Aceves et al., 2023).

El principal problema y desafío en la toma de decisiones en la gestión de inundaciones se encuentra el comprender las tendencias y patrones de los desastres, tanto pasados como futuros, los cuales se encuentran en las medidas no estructurales como mitigación y preparación ante eventos de desastres, los cuales necesitan de la investigación y evaluación de desarrollo de mapas de inundaciones y eventos de proyección. Entre los problemas se encuentran la comprensión y selección de criterios, factores y atributos básicos para el plan de gestión de desastres, desarrollo de indicadores o índice para la reducción del riesgo de desastres, factorización de la gestión del riesgo de desastres u establecimiento de prioridades en el desarrollo de políticas, así como la gestión e integración de datos que limitan la capacidad y la usabilidad para respaldar la toma de decisiones (Abdullah et al., 2021).

3.10. Modelación geoespacial

La modelación geoespacial emplea técnicas que están diseñadas para descubrir patrones de datos que incluyen un dato geoespacial, como: especialización, reclasificar, cálculo de distancias y algebra de mapas que, al combinarnos con sistemas de información geográfica, se convierten en herramientas avanzada y especializada en ambiente geoespacial para la modelación de inundaciones a pequeña y gran escala. La selección del tipo de modelo a emplear es un paso importante, ya que repercute en la exactitud del cálculo de caudales, y demás variables que permiten entender las respuestas hidrológicas e hidrográficas de la cuenca (Ocampo & Upegui, 2014; Quintero-Morales et al., 2021; L. Zhao et al., 2021).

En el análisis inundaciones a nivel cuenca se requiere de dos enfoques principales: hidrológico e hidráulico. El enfoque hidrológico aborda el tratamiento de los datos de entrada al sistema, es decir, la precipitación y el proceso de su transformación en escorrentía, tomando en cuenta los distintos mecanismos que intervienen en el proceso. En el enfoque hidráulico, por su parte, interviene el comportamiento del agua durante un evento de inundación, su velocidad, altura de calado, extensión en la llanura aluvial (transferencia de masa) y vórtices. Los modelos geoespaciales, como herramienta en el análisis de inundaciones, en su aplicación tradicional como modelo hidrológico concentrado, por ejemplo, consideran la cuenca hidrográfica como una única entidad, con una sola entrada de lluvia, es decir, la precipitación media, en el cual, el caudal de salida se reproduce por medio de una dinámica global del sistema.

Entre los métodos de modelos de pérdida y vulnerabilidad de inundación se encuentran la relación entre las métricas de intensidad del peligro, que se encargan en medir la profundidad del calado y la velocidad, traduciendo las posibles pérdidas en cantidad monetaria (Pinos et al., 2017). La identificación y evaluación del riesgo de inundación requiere un modelado de la inundación, de la llanura aluvial y del cauce principal, que permita tomar decisiones optimas sobre la gestión del riesgo (Ghimire, 2013).

Entre los modelos geoespaciales para el análisis de inundaciones destacan los modelos: Físico, Conceptual, Empírico y Probabilístico, en función al método implementado, se puede explicar la conexión entre la entrada y salida de los datos (Ocampo & Upegui, 2014; Habtamu Tamiru & Dinka, 2021). Estos modelos traducen las variables meteorológicas de precipitación a flujos de agua (flujos de corriente, altura de calado), excepto cuando la precipitación se emplea como entrada directa en inundaciones pluviales, donde el modelo hidrológico emplea esos datos y calcula con diferentes niveles de complejidad física los flujos de agua en la superficie de suelos, su cobertura y topografía para generar los caudales (Wing et al., 2019).

3.10.1. Modelo probabilístico

El enfoque principal de este tipo de modelo de análisis de inundaciones se encuentra en la estimación de las frecuencias de los datos a partir de series temporales en combinación de métodos estadísticos y determinísticos para analizar datos históricos y predecir los niveles de

agua en ríos, inundaciones en riveras y llanuras aluviales. Se ejecutan a partir de datos de precipitación máxima diaria, mensual o anual, y análisis de frecuencias con base a modelos de distribuciones probabilísticas (Reyes-Olvera & Gutiérrez-González, 2016).

Distribución estadística de Gumbel: es una de las distribuciones más empleadas en el análisis de inundaciones en México (ecuación 9). Los parámetros estadísticos se generan por el método de máxima verosimilitud (Reyes-Olvera & Gutiérrez-González, 2016).

Distribución estadística de Pearson tipo III: este tipo de distribución es aplicada para describir la distribución de probabilidad de picos de decrecientes de máximos anuales, es decir, se aplica cuando la muestra presenta gran asimetría (ecuación 10). Nombrada también distribución gamma de tres parámetros (de localización, ubicación y de escala), la distribución Log-Pearson III consiste en la transformación de los valores extremos en logaritmo en base diez, con el propósito de reducir la asimetría de los datos (Acosta-Castellanos & Sierra-Aponte, 2013).

3.10.2. Modelo empírico

Los modelos empíricos (o de caja negra), es el tipo de modelo más simple para el análisis de inundaciones. Consiste en un conjunto de algoritmos y ecuaciones algebraicas que contienen uno o más parámetros a determinar por el análisis de datos, a nivel de cuenca, por lo que son los menos apropiados en cuencas con escasos datos, ya que sus resultados están regidos por la relación métrica entre los parámetros de entrada y salida (Weber et al., 2010).

Con el aumento de las capacidades computacionales, se vuelven más común el empleo de algoritmos de aprendizaje automático como modelo geoespacial para el análisis de inundaciones. Este tipo de modelos son generalmente aplicados en el pronóstico a corto plazo, su ventaja principal es la rapidez de elaboración y la facilidad para actualizar los parámetros en tiempo real (Buffon & Assis, 2015).

3.10.3. Modelo físico

Los modelos hidrológico de base física, analizan las características físicas complejas y dinámicas de la cuenca en estudio. Generalmente se ejecutan por modelos matemáticos que representan físicamente los procesos hidrológicos de la cuenca, y por consecuencia necesitan mayor integración de estudios y datos de campo en la medición de los parámetros físicos de la cuenca, sus mecanismos intrínsecos asociados al ciclo hidrológico como distribución espacial de la precipitación, evaporación y la influencia de la cobertura vegetal (Schuler et al., 2003).

Los modelos físicos, también denominados modelos de cuenca, permiten la simulación de eventos aislados o de procesos continuos. Los eventos aislados de corto plazo presentan un énfasis en la filtración y escurrimiento de la superficie con el propósito de evaluar el escurrimiento directo. Por otro lado, los procesos continuos consideran todos los componentes del escurrimiento: el flujo superficial como escurrimiento directo; los flujos subterráneo y

subsuperficial como escurrimiento indirecto, considerando además la evapotranspiración y demás abstracciones hidrológicas responsables de la recuperación de humedad a largo plazo (Stehli et al., 2012).

3.10.4. Modelo numérico

Los modelos hidráulicos numéricos en el análisis de inundaciones requieren de aplicar la teoría hidráulica de flujo en lámina libre, así como de métodos numéricos para resolver las ecuaciones de conservación que el problema requiere. El modelo numérico constituye una herramienta poderosa en el conocimiento cuantitativo de procesos físicos de flujos hidrodinámicos, proporcionando variables como la variación de (Alexander et al., 2015; Bladé, Cea, Corestein, et al., 2014).

El modelado de inundaciones cumple una función importante en la obtención de información de distribución espacial sobre patrones de inundaciones como la profundidad del agua y la velocidad del flujo para la descripción del movimiento de los fluidos y la dinámica de la onda de inundación, por medio de resolver ecuaciones basadas en los principios de conservación de masa y momento. Donde el usuario posee la libertad de elegir entre distintas dimensiones (1D y 2D), esquemas numéricos (volumen finito, diferencia finita), representación de malla (estructurado, no estructurado) y ecuaciones como onda cinemática, onda de difusión, entre otras (Nurlan Ongdas et al., 2020).

3.10.4.1. Simulación 1D

Los métodos unidimensionales han sido empleados por su sencillez y facilidad de obtener datos, se aplica principalmente en canales abiertos, empleados en la modelación de ríos desde sus inicios a mediados del siglo XX. El río es considerado como una línea con una serie de puntos calculados como sección transversal, responsables de describir la geometría del canal a lo largo del tramo, estableciendo así la geometría del cauce como una propiedad de cada punto de la sección longitudinal (Amarís Castro et al., 2015; Bessar et al., 2020; Bladé, Cea, Corestein, et al., 2014; Chen et al., 2018).

Las ecuaciones para la modelación en 1D se derivan considerando la conservación de la masa (2) y momento (3) entre las secciones transversales adyacente, produciendo las ecuaciones unidimensionales de Saint-Venant.

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial \left(\frac{Q^2}{A} \right)}{\partial t} + g \frac{\partial h}{\partial t} - g(S_0 - S_f) = 0 \quad (3)$$

Donde Q es gasto del flujo en m^3/s ; t es tiempo en segundos; x , es la distancia longitudinal del tramo del canal; h , es la profundidad del agua para cada sección transversal medida en m; A es el área de la sección transversal; g es la aceleración de la gravedad; S_0 es la pendiente del lecho del canal; S_f , es la pendiente de fricción.

Generalmente, la simulación unidimensional ha sido empleado por su bajo costo computacional, el mínimo de datos de campo que requiere, sino que, además, son computacionalmente eficiente en estudios de grandes ríos, sistemas de canales y otras estructuras hidráulicas, pero incapaces de representar la sinuosidad del ríos y/o la llanura aluvial (Caviedes-Voullième et al., 2014). Éste tipo de modelo resultan útiles en canales artificiales hasta antes de su desbordamiento, donde se transforma en un fenómeno 2D (Quiroga et al., 2016).

La modelación hidrodinámica apropiado a distintos cuerpos de agua receptores es insuficientes, debido a que las mediciones in situ de la descarga del río resulta escasas e indisponibles (Hu et al., 2020).

3.10.4.2. Modelación 2D

Una simulación hidráulica de inundación en 2D permite ver en el tiempo, patrones de inundación en el momento en el que el río se desborda al ser rebasado en su capacidad. La rugosidad del paisaje y la morfología del cauce principal representan los principales factores en la dinámica de propagación del flujo en la llanura de inundación en el modelado en 2D (Peña & Nardi, 2018).

La simulación 2D de aguas someras necesita la representación topográfica lo suficientemente fina de todo el dominio del lecho del río y de la llanura de inundación (Caviedes-Voullième et al., 2014), empleando la descarga como condición de frontera aguas arriba del afluente (Quiroga et al., 2016).

La simulación 2D emplean las ecuaciones de momento y velocidad de las ecuaciones de Saint Venant 2D o las ecuaciones de Navier-Stokes (4) y (5). El primer grupo de ecuaciones se resuelven por medio de onda difusa (Nurlan Ongdas et al., 2020), mientras que las segundas asumen la distribución de la presión hidrostática, despreciando los términos de viscosidad cinética y turbulencia (Hien & An Chien, 2021).

$$-\nabla \cdot v = 0 \quad (4)$$

$$-\nabla p + \mu \Delta v + \rho b = \rho \frac{dv}{dt} \quad (5)$$

Donde v es el campo de velocidades ($v(x, t)$), μ es la viscosidad, ρ es la densidad del fluido, b es el campo de fuerzas básicas y ∇p es el gradiente de presiones.

Estos modelos resaltan la necesidad de una malla bidimensional para la simulación del flujo de inundación en ambas direcciones, que en la práctica es el MDE ejecutándose como una malla estructurada o no estructurada en función de la topografía de la cuenca, de las condiciones del lecho del río, o de la resolución del MDE. Permitiendo ver en el tiempo los patrones de inundación, justo en el momento en el que el río se desborda al ser rebasado en su capacidad. La rugosidad del paisaje y la morfología del cauce principal representan los principales factores en la dinámica de propagación del flujo en la llanura de inundación en el modelado en 2D (Peña & Nardi, 2018).

Las ecuaciones de St. Venant resuelven el modelado de inundaciones sobre cuadrículas del MDE topográfico, donde cada celda de la malla se emplea como cuadrícula de modelación. Recordado que, el flujo en canales es modelado por un enfoque en 1D, éstos son representados generalmente con secciones transversales, y en función del ancho del río en relación con la resolución del MDE empleado, se ejecuta dos enfoques en la modelación, es decir, aplicando un acoplamiento del modelo 1D para el cauce con el modelo de la llanura aluvial en 2D, donde se emplea una cuadrícula de mallado más fino en el afluente (Choné et al., 2021), lo que en la literatura se le conoce como acoplamiento 1D-2D.

Los modelos 2D son empleados principalmente en el mapeo de extensiones de inundaciones y su estimación de riesgos, esto al ser más detallados y confiables en simulaciones de flujo complejas, resolviendo ecuaciones completas en aguas poco profundas, teniendo la capacidad de simular el momento y duración de la inundación con alta precisión, con el inconveniente de necesitar muchos datos y una alta demanda computacional. Convirtiendo estas desventajas en restrictivas para su uso en predicciones en tiempo real y poco viables en áreas mayores a los 1000 km² si se requiere resolución menor a los 10 m o múltiples corridas de los modelos (Nurlan Ongdas et al., 2020).

En HEC-RAS, el área delimitada para el flujo en 2D es quien define el límite por donde se ejecutan los cálculos 2D, creando una mallado computacional, que también puede ser una cuadrícula computacional, dentro del área del flujo. De esta manera cada una de las celdas que compone el área 2D contiene tres propiedades: a) centro celular, el cual es donde se calcula la elevación de la superficie del agua para la celda, el cual no es necesariamente el centroide de la misma; b) caras de la celda, estas son las caras de los límites de la celda que, generalmente son líneas rectas, que pueden contener múltiples puntos en la malla de flujo 2D en HEC-RAS admite celdas de 3 a 8 caras; c) Puntos de cara de celda (FP), estos son los extremos de las caras, los números FP para el límite exterior de la mallado son empleados para conectar el área de flujo 2D a elementos 1D así como condiciones de contorno (Brunner., 2023).

De forma general, el tamaño de la celda de malla de simulación debe de realizarse en función de la pendiente de la superficie del agua en el área determinada, el mismo caso en las

barreras para fluir en el terreno. Es decir, en terrenos planos, se recomienda mallado grueso, mientras que en pendientes pronunciadas y áreas localizadas, requieren de celdas de cuadrículas pequeñas que permitan capturar dichos cambios (Brunner., 2023).

Como el mallado de Hec-Ras puede tener de tres hasta ocho lados, las celdas de las mallas 2D no se generan con una elevación única, sino que están construidas a partir de una relación de volumen/área de elevación detallada que permite representar los detalles del terreno subyacente. De manera que cada cara de la celda es una sección transversal detallada que procesa a detalla la relación entre la elevación respecto al área, perímetro mojado y rugosidad (Brunner., 2023).

3.10.4.3. Simulación 3D

Los modelos numéricos de simulación de inundaciones en 3D emplean diversos tipos de discretización espacial relacionada con el método usado en el tratamiento de lámina libre, en el cual se emplean capas sigma para general la desratización vertical, la cual consiste en una malla 2D horizontal a partir de la cual se genera un número determinado de capas en dirección vertical. Estas capas poseen un espesor variable distribuidas entre el fondo y la lámina libre. Una distinta manera de emplear los modelos 3D es empleando una malla tridimensional fija estructurada o no estructurada, y definir la posición de la lámina de agua en función del valor de una variable en cada elemento de la malla, de esta manera se otorga la ventaja de poder capturar formas de la lámina de agua muy compleja, es decir, la presencia de vórtices propios del flujo turbulento (Bladé, Cea, & Corestein, 2014).

3.10.4.4. Modelación Hidrológica-Hidráulica Acoplada

La simulación de inundaciones por modelos hidrológicos-hidráulicos acoplados es la metodología convencional de modelar un evento de inundación cuando no se tiene datos de aforo. Esta metodología se realiza con modelos hidrológicos concentrados, semidistribuidos o distribuidos, mientras que el modelo hidráulico se puede realizar tanto unidimensional como bidimensional, en cualquiera de las combinaciones de software que se encuentran disponibles. La razón de lo anterior, radica en la ejecución de ambos modelos, donde primero se ejecuta el modelo hidrológico y al obtener sus resultados se ejecuta el modelo hidráulico, siendo el primero independiente del segundo, y donde la ubicación de las estaciones pluviométricas no afecta directamente al modelo hidráulico y sus resultados.

3.10.4.5. Modelación Hidrológica-Hidráulica Integrada (2D-SWE)

El cambio de paradigma en la metodología de simulación de inundaciones que propone los modelos hidrológicos-hidráulicos integrados, el cual se realiza en la modelación hidráulica

2D a partir de datos de precipitación y su principal aplicación es en cuencas urbanas, e inundaciones urbanas.

Al modelar inundaciones urbanas, los modelos hidrológicos deben contemplar la infraestructura antropogénica, es decir, drenaje, edificios, carreteras pavimentadas, entre otros. Las inundaciones pluviales urbanas son consecuencia de precipitaciones de alta intensidad sobre superficies poco permeables. De ahí que los modelos hidráulicos utilizados para simular inundaciones urbanas pluviales necesitan una representación topográfica representación topográfica y de las infraestructuras urbanas (Palla et al., 2018). Estos modelos son resueltos por las ecuaciones de Saint-Venant 2D, empleando elementos finitos y simulan procesos de precipitación-escorrentía, así como la conducción del flujo de agua por medio de sistema de drenaje natural (Cosco et al., 2020; Martins et al., 2017; Rubinato et al., 2017).

A pesar de que los modelos hidrológicos han mostrado un rendimiento, no proporcionan información sobre las variaciones espaciales que se producen en el sistema. Actualmente, se investigan más los modelos distribuidos totalmente dinámicos ya que proporcionan una descripción completa del fenómeno modelizado. Estos modelos describen la topografía de la cuenca en detalle y calculan la profundidad de las aguas poco profundas así como la variación espacial de la precipitación y la infiltración (Fernández-Pato et al., 2016).

Los modelos hidrológico-hidráulicos integrados consisten en evaluar los componentes hidrológicos por separado de los hidráulicos. Los modelos hidrológico-hidráulicos se definen en tres grupos principales: (i) modelos de cuencas hidrográficas, que representan el fenómeno de lluvia-escorrentía y predicen los hidrogramas en las salidas de las cuencas o en los puntos de aforo. (ii) modelos 1D de trazado de ríos, que calculan el hidrograma de crecida y luego se utilizan para generar la crecida desde aguas arriba hasta aguas abajo del cauce. Y (iii) modelos de inundación, que predicen la extensión de inundación y su impacto en las llanuras aluviales. Los modelos de inundación que se basan en ecuaciones de aguas poco profundas (SWE) o en ecuaciones bidimensionales de ondas difusas (Xia et al., 2019). Los intervalos computacionales definen la resolución temporal de los cálculos de estos modelos (Zeiger & Hubbart, 2021).

Los modelos integrados de inundación son modelos bidimensionales de aguas poco profundas utilizados para el cálculo del flujo superficial y el proceso lluvia-escorrentía, que se utiliza para cuencas urbanas (Xia et al., 2019). Este enfoque simula los procesos hidrológicos e hidráulicos en un único modelo hidrodinámico 2D. Sin embargo, la ejecución óptima de las SWE-2D requiere una alta resolución DEM y la creación de mallas numéricas muy finas (menos de 50 m) para la parametrización del flujo 2D (Cea & Bladé, 2015).

El principal inconveniente de este método es la necesidad de un modelo topográfico del terreno de alta resolución espacial, debido a que la configuración de la malla está limitada por la topografía y el tamaño de las celdas en la malla debe ser igual o inferior a la resolución espacial del DEM (García-Alén et al., 2022).

3.10.5. Simulación de inundaciones

Las inundaciones recientes provocan preocupación general por el riesgo de inundación, así como la necesidad de un enfoque sostenible para la gestión del riesgo. Los modelos de inundaciones desempeñan un papel importante en la producción de mapas de riesgo, convirtiéndolos en un elemento clave con la capacidad de proporcionar información de eventos pasados y creando series de tiempo sobre el inicio, duración del evento, que eventualmente se convierte en información fundamental en la planificación estratégica de medidas de defensa contra inundaciones (Ghimire, 2013).

Las herramientas principales para el mapeo de inundaciones son los modelos hidráulicos-hidrodinámicos, empleando principalmente la estimación de áreas vulnerables, la planificación de la gestión de inundaciones y la determinación de variables distribuidas espacialmente (Nurlan Ongdas et al., 2020).

El proceso de mapeo de inundaciones es distinto para cada proyecto y cada país. De manera general consta de tres pasos principales: (i) estimar la frecuencia de inundaciones, es decir, la probabilidad de ocurrencia de una magnitud a una magnitud específica y su probabilidad que sea superada en un cierto periodo de retorno; (ii) modelado hidrodinámico, esto significa, la función del caudal esperado en un río y/o escorrentía, con el propósito de determinar la profundidad, velocidad y extensión de la inundación; (iii) mapeo de riesgos, expresa la determinación mediante el análisis de diversas componentes como: paisaje, uso y cobertura de suelo, infraestructura, densidad de población, entre otras (Ekeu-wei & Blackburn, 2018).

Los niveles de flujo de los ríos se convierten en datos de entrada esencial como condiciones iniciales y de contorno para la modelación hidrodinámica de inundaciones, y la validación ayuda a revelar qué tan fiable son los resultados de un modelo comparándolo con la realidad, relacionándolo directamente con la confianza en la inundación.

Entre los datos de entrada para la estimación de peligro por inundación resaltan: profundidad del agua, tiempos de alerta, presencia de olas, época del año, día de la semana, hora del día, topografía, tipo de propiedad de riesgo, es decir, si es urbana o agrícola, precipitación pluvial, duración, intensidad y tiempo de concentración (Pinos et al., 2017).

3.10.6. Programas de simulación hidráulica

Un modelo hidráulico es una construcción digital de una condición natural o de un proyecto en específico que permite reproducir y proveer su comportamiento, para realizar pruebas y fijar soluciones. El uso práctico de un software con aplicación hidráulica radica en permitir hacer pruebas de “*qué es lo pasaría si...*” sin grandes inversiones de tiempo y dinero, reduciendo el costo computacional en el caso de estudios de simulación en 2D y 3D.

3.10.6.1. HEC-HMS

El Sistema de Modelación Hidrológico del Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE.UU. (HEC-HMS por sus siglas en inglés). Es un programa computacional gratuito de amplia utilización internacional, aplicado en el estudio de avenidas, que provee opciones para la simulación del proceso precipitación-escorrentía y tránsito de caudales (Estrada-Sifontes & Pacheco-Moya, 2012).

HEC-HMS Simula el proceso de precipitación y escorrentía, además de pronosticar el caudal en cuencas a distintas escalas hidrográficas naturales o urbanas. HMS permite clasificarse como un modelo hidrológico determinístico de tipo evento y/o continuo, distribuido y/o agregado. En este modelo, la cuenca se describe a través de una serie de elementos interconectados como subcuencas, canales de tránsito, nodos, fuentes y sumideros (Rodríguez et al., 2007).

La estructura del modelo se estructura en cuatro módulos: i) modelo de cuenca, el cual se encarga de estimar las pérdidas hidrológicas y simula la transformación de lluvia-escorrentía basado en la infiltración de áreas permeables; ii) modelo meteorológico; iii) sub-rutina de especificación de control, que especifica el paso del tiempo, el inicio y periodos de simulación y iv) sub-rutina de datos de entrada, que proporciona las variables hidrológicas observadas en el modelo (Filianoti et al., 2020).

3.10.6.2. HEC-RAS

El Sistema de Análisis de Ríos del Centro de Ingeniería Hidrológica (HEC-RAS), y su aplicación para el entorno SIG de ArcGIS, HEC-geoRAS, es un programa de cómputo para la modelación numérica en 1D y 2D para flujos de agua en canales en diferentes tipos de flujo, desarrollado por el centro de Ingeniería Hidrológica del cuerpo de Ingenieros de la Armada de Estados Unidos. HEC-RAS es una aplicación que permite la modelación hidráulica en régimen de flujo permanentemente y no permanente, transporte de sedimento, análisis de calidad del agua en causas abiertos como ríos y canales artificiales. Adicionado en un entorno SIG, es usado para delinear las zonas de inundación con datos de eventos históricos; este programa es de licencia libre y uno de los más empleados por su fácil aplicación y rápidos resultados (Ben Khalfallah & Saidi, 2018; Kheradmand et al., 2018).

HEC-RAS es desarrollado para modelar ríos que fluyen a canales naturales abiertos, utilizado para calcular el perfil de la superficie de agua. Las geometrías de los ríos, designados como líneas centrales, de ribera, caminos de flujos y de secciones transversales son los principales parámetros para el procesamiento de la información y generar áreas propensas a inundación a partir de MDE (Habtamu Tamiru & Dinka, 2021). Al ser desarrollado inicialmente para modelos “estáticos” unidimensionales, sus principales aplicaciones fueron para el cálculo de avenidas sobre canales y sistemas de presas (Huerta-Loera & Domínguez-Mora, 2016; Psomiadis et al., 2021)

El programa resuelve el método de pasos estándar para el cálculo del perfil de la superficie de agua a través de procesos iterativos equilibrando la ecuación de la energía para calcular la elevación de la superficie del agua en cada sección transversal. Además resuelve el método del equilibrio de momento con el fin de calcular el perfil de la superficie del agua, donde los equilibrios de impulso se calculan en las aperturas de puentes tanto aguas arriba como aguas debajo de la obstrucción (Tanouchi et al., 2019).

HEC-RAS es capaz de simular en una, dos dimensiones y flujo inestable, combinando un acoplamiento 1D-2D a través de una red completa de canales abiertos y llanuras aluviales. El componente de flujo inestable se utiliza para realizar cálculos de régimen de flujo subcrítico, supercrítico y mixto. Su objetivo es obtener las alturas de calado del agua en canales con regímenes permanentes o de flujos discontinuos calculando el área mojada de secciones transversales partiendo de información fisiográfica como datos geométricos del cauce, flujos de agua y especificaciones técnicas de la simulación (Triviño Pérez & Ortiz Rojas, 2004).

El programa HEC-RAS tiene la capacidad de realizar mapas de inundaciones a partir de los resultados de la modelación numérica y de los resultados del perfil de la superficie del agua, usando la geometría del cauce natural, de la topografía del terreno y los perfiles calculados de la superficie del agua, crea conjuntos de datos de la profundidad de la inundación de igual manera los límites de la llanura aluviales mediante la herramienta de RAS Mapper que, además puede generar datos geoespaciales adicionales a la velocidad, esfuerzo cortante, potencia de corriente y datos de invasión de los cauces de inundación. Para utilizar RAS Mapper se necesita tener un MDE en formato *flt* y el conjunto de datos de límites se almacena en formato *shapefile* para su posterior uso en análisis geoespaciales.

HEC-RAS es utilizado además para la simulación hidráulica para sitios cercanos a puentes, con el propósito de evaluar los efectos de curvas de remanso y su comportamiento hidráulico tanto aguas arriba como aguas abajo (Tanouchi et al., 2019), a partir de su versión 5.0 (2015), HEC-RAS posee la capacidad de realizar modelación en 2D, a partir de rejilla escalonada y la selección de ecuaciones que permiten resolver el algoritmo implícito de volumen finito con solución de flujo inestable (Quiroga et al., 2016).

3.10.6.3. IBER

Por otro lado, Iber es un modelo hidrodinámico bidimensional para simular caudales superficiales libres, además de procesos de transporte y hábitat en río y estuarios. Fue desarrollado por el Grupo de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (GEAMA), de la universidad de A Coruña y el instituto Flumen de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) y el Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE). La simulación de Iber es basado en la última generación de esquemas de volumen finito de tipo celda definidas en triángulos de la malla original y las distintas variables son almacenados en el centro de la misma,

adaptable a las características de los ríos torrenciales (Bladé Castellet et al., 2014; González-Aguirre et al., 2016).

Iber posee tres elementos principales TURBILLON, el cual es un simulador numérico 2D para canales abiertos, desarrollado por el grupo GEAMA. GiD, es un software de pre y post procesamiento desarrollado por CIMNE. Y CARPA el cual es un modelo numérico 1D-2D para la simulación del caudal de agua en cauces naturales, desarrollado por Flumen. De esta manera, la principal ventaja de Iber frente Hec-Ras, resalta en la capacidad de mostrar resultado, aún si haber terminado el procesamiento.

3.11. Observación de la tierra

Percepción remota, teledetección u observación de la tierra (EO por sus siglas en inglés), junto con los avances en tecnológicos en la rama de la geomática, permiten una recopilación de datos de la superficie terrestre de manera más eficiente, las herramientas de EO, como los sensores terrestres y aéreos proporcionan condiciones para el modelado y mapeo de inundaciones más efectivos (Peña & Nardi, 2018), éste último es un proceso que describe la extensión prevista donde las aguas de la inundación alcanza zonas de tierra secas, producto de una precipitación intensa o del desbordamiento de un río causado por factores naturales o antropogénicos (Ekeuwei & Blackburn, 2018).

Para la simulación de inundaciones, la entrada de datos de precipitación es uno de los insumos más importantes para el modelado hidrológico previo, sin embargo, las estaciones hidrometeorológicas deben de abordarse con algunas limitaciones, la representación espacial resulta insuficiente cuando las estaciones son escasas para una cuenca dada. Con el fin de mejorar la precisión de los datos de precipitación a través de mediciones de lluvia por satélite, a través de imágenes de radar, las cuales emplean la medición de radar de lluvia por satélite para recibir señales a las nubes con tecnología de microondas activa y convertirlos en datos de dispersión de lluvia (Mo et al., 2020). Sin embargo, los eventos hidrometeorológicos que provocan inundaciones ocurren durante cielos nublados que limitan el uso de la teledetección (Quiroga et al., 2016).

3.12. Proyectos de observación terrestre

La EO proporciona observaciones de la superficie terrestre y marinas en longitudes de onda visible, infrarrojo, térmico y microondas, en instrumentos montados sobre plataformas aeroespaciales. De esta manera, la descripción de las relaciones entre la precipitación, temperatura, humedad del suelo, infiltración, recarga de aguas subterráneas, evapotranspiración y escorrentía se hace posible con modelos de distribución geoespacial (Mendoza et al., 2002).

3.12.1. Misiones de observación terrestre

La misión satelital de observación terrestre de mayor trayectoria es la misión Landsat, generador de imágenes de la tierra desde 1972 a la actualidad a partir de nueve misiones a lo largo de su historia, en la que actualmente se encuentran activos los dos últimos.

La constelación Landsat ha llevado a bordo distintos instrumentos a lo largo de su historia, evolucionando con el propósito de buscar captar más información de la superficie terrestre, con mayor precisión y detalle. El primer sensor a bordo, fue conocido como Multispectral Scanner Sensor (MSS), el cual fue llevado a bordo de las primeras tres misiones; posteriormente, el sensor Thematic Mapper (TM) que poseía mayor sensibilidad radiométrica, iba montado sobre los satélites 4 y 5, éste sensor ha sido el de mayores datos proporcionó a lo largo de la misión, por la extensión de la vida útil del Landsat 5; el sensor Enhanced Thematic Plus (ETM+) es el primero en presentar una banda espectral pancromática con mayor resolución que las bandas multiespectrales el cual estaba montado sobre el Landsat 7. El último sensor se encuentra montado sobre los últimos dos satélites lanzados, los sensores de imágenes Operational Land Imager (OLI) y Thermal Infrared Sensor (TIIRS).

En conjunto, esta misión ofrece una resolución temporal de 16 días para imágenes históricas, y de 8 días a partir del funcionamiento del Landsat 9 que lleva una órbita opuesta al Landsat 8. Resolución espacial de 30 m en la banda multiespectral y 15 m en la pancromática, resolución radiométrica de 8 bits en las imágenes históricas tomadas por el sensor TM, y de 12 bits en las imágenes del sensor OLI/TIIRS este último con resolución espectral de 12 bandas. Los datos de los satélites Landsat se descargan de forma gratuita para el respaldo de mapeo del uso de tierra y monitoreo de cultivos entre otras aplicaciones (Run et al., 2022).

Por otro lado, las imágenes de radar de apertura sintética (SAR), forman parte de los sensores con mayor demanda para el mapeo de inundaciones. Gracias a que son sensores activos, es decir, proporcionan su propia fuente de iluminación en el rango de microondas, lo cual se caracterizan por su capacidad de observación terrestre en cualquier condición climática independientemente de las condiciones atmosféricas (Schumann et al., 2023).

En una imagen de radar, los cuerpos de agua son fácilmente detectables, ya que generalmente se visualizan como regiones oscuras (o valores digitales menores) (Schumann et al., 2023). Por desgracia, para el caso particular de Sinaloa, la resolución temporal de misiones con este tipo de sensores aún es muy grande (> 10 días), lo cual queda sujeta a las condiciones del azar si el paso del satélite por la zona de estudio, coincide con un evento de precipitación.

3.12.2. Misiones de Medición de Lluvias

La hipótesis detrás de los pluviómetros recita que éstos proporcionan la precipitación terrestre verdadera en un punto determinado, sin embargo, no siempre son representativos en áreas grandes para precipitaciones convectivas.

En este sentido, los radares meteorológicos ofrecen diversas resoluciones espaciales que van del orden de kilómetro o inferior, y resoluciones temporales que pueden llegar hasta los 5 minutos. No obstante sus principales limitaciones radican en que sólo estiman la precipitación a través de la reflectividad en altitud, con mediciones sujetas a errores y limitaciones causados por factores propios de los instrumentos de observación terrestre, mientras que los radares suelen mostrar mejores resultados cualitativo al mostrar la forma de la estructura de la precipitación espacialmente distribuida, pero poseen malos valores cuantitativos en comparación con los pluviómetros (Rigo et al., 2021).

La misión de medición de lluvias tropicales Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM por sus siglas en inglés) es una misión en conjunto de la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA) y la agencia de Exploración espacial de Japón (JAXA) con el objetivo de estudiar y monitorear la lluvia en la región entre trópicos 35° N a 35° S y cuenta con cinco instrumentos principales: una suite de tres sensores (PR, TMI, VIRS) y dos instrumentos relacionados (LIS y CERES), entregando así, imágenes de microondas, radar de precipitación y escáner visible e infrarrojo. La misión fue lanzada en noviembre de 1997 y concluyó el 15 de abril de 2015, produciendo así más de 17 años de datos de lluvias (Asurza et al., 2018; Fu et al., 2020; Keating, 2007).

El conjunto de datos TRMM es un estándar para la medición de la precipitación y condujo investigaciones para mejorar el entendimiento de la estructura y evolución de ciclones tropicales, relaciones entre tormenta y relámpagos, modelado del clima y tiempo e impactos humanos sobre la lluvia, también respalda aplicaciones operativas de monitoreo de inundaciones, sequías y pronóstico del tiempo. En la actualidad proporciona información de datos históricos.

La misión TRMM llenó los vacíos en la comprensión de la lluvia y su variación, incluido la distribución de frecuencia de la intensidad de la lluvia; la cobertura de área, la división de la lluvia en categoría convectivas y estratiformes; la distribución vertical de los hidrometeoros; y la variación del momento de las lluvias más intensas. TRMM permitió el mapeo de variaciones más grande en tiempo y espacio de la lluvia en anomalías de circulación cuasi-periódicas, como EL Niño-Oscilación del sur (ENSO) en el pacífico.

En cambio, la misión de Medición de Precipitación Global (GPM por sus siglas en inglés) es una red internacional de satélites que proporciona las observaciones de lluvia y nieve a escala global. Con el antecedente de la misión TRMM. Lanzada el 27 de febrero de 2014, GPM tiene como objetivo el despliegue del satélite *Core* que carga un sistema avanzado de radar/radiómetro para medir la precipitación desde el espacio y sirve como estándar de referencia para unir las mediciones de precipitación desde una constelación de satélites. Esta misión amplía las capacidades actuales en el uso de la información precisa y oportuna de la precipitación (Asurza et al., 2018; Fu et al., 2020).

GPM es un proyecto iniciado por la NASA y JAXA como un sucesor de TRMM, comprende un consorcio de agencias espaciales (CNES), la Organización de Investigación

Espacial de la India (ISRO), la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA), la Organización Europea para la Explotación de Satélites Meteorológicos (EUMETSAT), entre otras.

IMERG es el producto de GPM, recolecta las estimaciones de precipitación multisatélite global a tiempo casi real. Este algoritmo es destinado a intercalaba, fusionar e interpolar las estimaciones de precipitación de microondas por satélite, junto con las estimadas por satélites de infrarrojo, medidores de precipitación y otros estimadores de precipitación a escalas precisas, tanto para TRMM como para GPM. El sistema se ejecuta repetidas ocasiones para distintos intervalos de tiempo, primero proporcionando estimaciones rápidas a través de IMERG (Early Run) y sucesivamente para proporcionar mejores estimaciones a medida que obtiene más datos, el último paso utiliza datos de calibración mensuales para crear productos a nivel de investigación, es decir la ejecución final de IMERG. El conjunto de datos de GPM incluye datos de la misión TRMM desde junio de 2000. Posee una latencia (tiempo que tarda un paquete de datos en ser transmitido por la red) mínima de datos de 4 horas, resolución espacial de 0.1° (10km).

La base de datos del Rainfall Estimates from Rain Gauge and Satellite Observation (CHIRPS), es una base de datos de precipitación infrarroja, del grupo de peligros climáticos, el cual se basa en técnicas previas de interpolación y estimaciones de precipitación de alta resolución de observaciones infrarrojas de nubes frías (CCD por sus siglas en inglés) (Bai et al., 2018; Funk et al., 2015).

CHIRPS es desarrollado con el objetivo de apoyar a la red de Sistemas de Alerta Temprana contra la Hambruna, por parte de la Agencia de Estados Unidos, para el Desarrollo Internacional (FEWS NET). Contiene y funciona con tres tipos e información: climatología global, estimaciones satelitales y observaciones *in situ* (Bai et al., 2018).

Tiene una resolución espacial de 0.05° (~5 km), con registro cuasi global, que va de 50°N a 50°S y observaciones desde 1981 hasta el presente, CHIRPS incorpora la estructura de correlación espacial de estimaciones CCD para asignar pesos de interpolación (Funk et al., 2015). Cuenta con registros diarios, pentadal y mensual. Combina datos de estación en tierra para producir estimaciones preliminares del producto, con una latencia de 2 días aproximados, y un producto final con una latencia media de 3 semanas en promedio (Funk et al., 2015; Harrison et al., 2022).

CHIRPS utiliza el Análisis de Precipitación Multisatélite de la Misión de Medición de Lluvias Tropicales (TMPA 3B42 v7) para calibrar las estimaciones de precipitación de duración de nubes frías, que, además, emplea un enfoque de “interpolación inteligente”, el cual trabaja con anomalías de una climatología de alta resolución (Bai et al., 2018; Funk et al., 2015)(Ali et al., 2024).

Además, CHIRPS incorpora los datos de estaciones terrestres en dos fases los cuales generan dos productos únicos. La primera fase, se genera un producto de lluvia preliminar con

latencia de 2 días a partir de los datos de medidores del Sistema Global de Telecomunicaciones de la Organización Meteorológica Mundial combinada con las estimaciones CCD pentadal. Esta fase, también incluye estaciones mexicanas, debido a que estos datos también se obtienen en tiempo casi real. En la segunda fase, produce el producto final con latencia de hasta 3 semanas, que reflejan ser los mejores datos disponibles con estaciones de precipitación mensual y pentadal basada en CCD (Funk et al., 2015).

En general, CHIRPS presenta mejor rendimiento en zonas húmeda, de mayor precipitación, en comparación con zonas áridas y semiáridas, y su relación con los monzones (Bai et al., 2018). Está compuesto por la observación de nubes frías en infrarrojo térmico calibrado con observaciones terrestres in situ de informes de estaciones meteorológicas globales, CHIRPS incorpora una red densa de lugares no representados como Etiopía, Somalia, África del sur, América Central, Europa occidental, Sudáfrica, Australia, Estados Unidos y México (Harrison et al., 2022).

3.12.3. Misiones de representación vertical del terreno

Las misiones de altimetría de radar poseen la capacidad de medir el nivel del agua tanto oceánica como continental, es decir, medir la elevación de la superficie de agua dulce en grandes ríos. Estos datos son adquiridos al medir la distancia entre el satélite en órbita y la superficie del agua en relación con un datum de referencia, sin embargo, este tipo de productos comparados con nivelaciones topográficas y batimétricas, puede haber una discrepancia hasta de 2 metros. Por tal motivo, la precisión del MDE con el que se define el cauce del río y la llanura aluvial influye en la precisión del resultado del modelado de inundaciones (Ekeu-wei & Blackburn, 2018).

Los MDE derivados del instrumento la misión topográfica de radar a bordo del transbordador Shuttle Radar Topography Mission (SRTM por sus siglas) a bordo del transbordador espacial Endeavour, proyecto conjunto entre la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA), la Agencia Nacional de Inteligencia Geoespacial (NGA), éste instrumento tiene como objetivo crear un MDE global con una resolución espacial de 30 segundos de arco (Parrens et al., 2019). SRTM se recopiló durante una misión de 11 días en febrero del 2000, por medio de la colaboración de la NASA, el Servicio Nacional de la Agencia de Inteligencia Geoespacial (NGA) y el Centro de Aeroespacial Alemán (DLR), proporcionando una cobertura aproximada del 80% de la Tierra en datos de elevación (Ekeu-wei & Blackburn, 2018).

El sistema LiDAR es un método para obtener datos que permiten producir MDE con mayor precisión de lo observado, integradnos tres tecnologías: laser, sistema de posicionamiento global y sistema de navegación inercial (Barón R. et al., 2017).

3.13. Cobertura de suelo y vegetación

La ocurrencia, severidad y aumento de las inundaciones se deben según expertos debido a la influencia de cambios abruptos en las condiciones hidroclimáticas y otras perturbaciones, además del cambio de uso de la tierra y el de actividades socioeconómicas en áreas ribereñas a ríos y llanuras propensas a inundaciones (Nurlan Ongdas et al., 2020).

El uso de la tierra es un parámetro crucial que afecta el ciclo hidrológico, cambia sus patrones, afecta directamente a la infiltración, interceptación, evapotranspiración del suelo, que posteriormente cambia los niveles de escorrentía que genera el suelo (He et al., 2021), debido a la composición y estructura de la vegetación (Gaughan et al., 2022).

El cambio de cobertura de suelo (LUCC por sus siglas en inglés) afecta el proceso del ciclo hidrológico al cambiar la transpiración y confluencia superficial en el cambio de coberturas de suelo impermeables, posteriormente, esto afecta la escorrentía y su distribución en el territorio y sus promedios anuales (He et al., 2021). La disponibilidad del agua en una cuenta está directamente relacionada con la cobertura de suelo de la misma, puesto que el impacto del primero afecta en el caudal del segundo, llegando a estimar el aumento de la escorrentía en zonas con aumento en pastizales y disminución de superficie forestal (W. Yang et al., 2019).

Debido a la urbanización y los cambios en las características hidrológicas, se encuentran en estrecha relación, incluyendo además la disminución de la infiltración, aumento de escorrentía y altura de las inundaciones, que integrado al crecimiento poblacional agrava el riesgo de inundación en zonas urbanas (Salazar-Briones et al., 2018). El LUCC en el análisis de riesgo de inundaciones es complejo debido a las pérdidas económicas directas en un edificio inundado y no sólo dependen de la profundidad del agua, sino también del uso del mismo, sus características y variables socioeconómicas (Reyes-Olvera & Gutiérrez-González, 2016).

3.14. Algebra de bandas espectrales

El índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI) relaciona el uso de suelo con la presencia de cobertura vegetal, los valores son adimensionales con intervalo de -1 a 1, un valor cercano a 0 indica menor vigorosidad en la vegetación, mientras que valores cercanos indican lo contrario (Rojas et al., 2015).

Para la delimitación y delineación de cuerpos de aguas se emplea el Índice de Agua Diferencial Normalizada (NDWI por sus siglas en inglés), el cual emplea bandas del verde visible e infrarrojo cercano de las imágenes satelitales para la detección remota (Habtmu Tamiru & Dinka, 2021).

En cambio, el índice de humedad topográfica (TWI) es un indicativo para mostrar la afectación por inundación en un área, muestra en cada pixel la cantidad de agua almacenada en el área de estudio, así las inundaciones son más comunes en sitios con alta humedad topográfica. Los índices se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Ecuaciones de índices usados en modelos de inundaciones.

ÍNDICE	FORMULA	DATOS
Índice de vegetación diferencial normalizado	$NDVI = \frac{RED - NIR}{RED + NIR}$	RED: banda del rojo visible NIR: banda del infrarrojo cercano
Índice de agua diferencial normalizado	$NDWI = \frac{GREEN - SWIR}{GREEN + SWIR}$	GREEN: banda del verde visible SWIR: banda del infrarrojo de onda corta
Índice de humedad de diferencia normalizado	$NDMI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$	NIR: banda del infrarrojo cercano SWIR: banda del infrarrojo de onda corta
Índice de humedad topográfica	$TWI = \frac{\ln(A_s)}{\tan\beta}$	A_s : área de captación específica (m^2m^{-1}) $Tan\beta$: pendiente de la cuenca en grados

3.15. Validación

La incertidumbre en fenómenos de inundación pueden ser productos de la falta de conocimiento o desacuerdo sobre el estado futuro del sistema climático, esto se ve reflejado en errores de datos, conceptos ambiguos o estimaciones inciertas de conductas humanas. De forma general, la incertidumbre se manifiesta en medida de la capacidad de representación de la realidad del modelo matemático, estadístico o probabilístico, así como también de los datos empleados para desarrollar y calibrar tales modelos (Barón et al., 2017).

La validación del modelo empleado es un proceso que evalúa la capacidad predictiva del mismo, confrontando los valores reales con lo predichos por los modelos (Núñez López et al., 2014). Sólo puede ejecutarse mediante la evaluación comparativa con las observaciones del fenómeno simulado. Para poder llevar a cabo los modelos hidráulicos, estos deben replicar eventos del mundo real en lugar de mapas de inundaciones basados en frecuencia (Wing et al., 2021). En la Tabla 5 se muestran las ecuaciones de validación de los diferentes métodos explicados a continuación.

Tabla 5. Métricas estadísticas empleadas para la comparación de los modelos empleados.

Métrica estadística	Ecuación	Valor ideal
Prueba Kolmogorov-Smirnov (D)	$D = \max_{1 \leq i \leq n} \hat{F}_n(x_i) - F_0(x_i) $	0
Desviación estándar (σ)	$\sigma_f = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (f_n - \bar{f})^2} \text{ ó } \sigma_r = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (r_n - \bar{r})^2}$	0
Coefficiente de correlación de Pearson (CC)	$CC = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (f_n - \bar{f})(r_n - \bar{r})}{\sigma_f * \sigma_n}$	1
Sesgo estadístico (BIAS)	$BIAS = \frac{\frac{1}{N} * \sum_{n=1}^N (f_n - \bar{f})^2}{\sum_{n=1}^N r_n} * 100$	0
Raíz del error medio cuadrático (RMSE)	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (f_n - r_n)^2}$	0
Raíz del error medio cuadrático centrado (RMSD)	$RMSD = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [(f_n - \bar{f})(r_n - \bar{r})]^2}$	0
Índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE)	$NSE = 1 - \frac{\sum_{n=1}^N (r_n - f_n)^2}{\sum_{n=1}^N (r_n - \bar{r})^2}$	1
Índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe logarítmico (NSEL)	$NSEL = 1 - \frac{\sum_{n=1}^N (\ln(r_n) - \ln(f_n))^2}{\sum_{n=1}^N (\ln(r_n) - \ln(\bar{r}))^2}$	1
Porcentaje de BIAS	$PBIAS = \frac{\sum_{n=1}^N f_n - \sum_{n=1}^N r_n}{\sum_{n=1}^N r_n}$	0
Erro medio	$ME = \frac{1}{N} - \sum_{n=1}^N (f_n - r_n)$	0

Donde n : es el número de la muestra; f_n : la variable a comparar; f : representa la estimación de la lluvia satelital o el caudal simulado; r_n : es la variable de referencia; r : representa la lluvia de estación o caudal observado. Para la prueba Kolmogorov-Smirnov donde D es la diferencia absoluta observada entre la frecuencia acumulada observada $\hat{F}_n(x_i)$ y la frecuencia a cumulada teórica $F_0(x_i)$ que se obtiene por las distribuciones de probabilidad (Gumbel, Pearson III, entre otras). Fuente: (Asurza et al., 2018).

Para modelos probabilísticos, la prueba Kolmogorov-Smirnov (K-S) permite calcular la relación existente entre la distribución muestra y la teórica. La prueba K-S está definida como la distancia vertical máxima entre ambas distribuciones. Es particularmente útil en procesos físicos no lineales e interactivos que conducen a distribuciones no gaussianas y se aplica para contrastar la hipótesis de normalidad de la población (Tapia-Flores & Cevallos-Flores, 2021).

Las pruebas de bondad de ajuste tienen el propósito de determinar si los datos empleados se ajustan a las distribuciones de probabilidad utilizadas (Acosta Castellanos & Sierra APonte, 2013). La desviación estándar (σ) es una medida de dispersión que indica qué tan dispersos se encuentran los datos con respecto a la media, se puede utilizar para establecer valores de referencia para estimar la variación general de un proceso o de una simulación. Por otro lado, el coeficiente de correlación (r), o también llamado coeficiente de determinación, mide la bondad de ajuste y asociación lineal entre los valores estimados en comparación con los medidos. En cambio, el error medio cuadrático (RMSE) se utiliza para medir la magnitud del error promedio que resulta en extremo sensible a valores atípicos (Walpole et al., 2012; Wang et al., 2018).

La corrección del sesgo estadístico (BIAS) resulta un requisito previo para aplicarse en datos de precipitaciones espaciales a modelos hidrológicos, el cual puede variar desde una correlación lineal hasta una comparación de histogramas más compleja, con la capacidad de corregir múltiples momentos de la distribución a la vez (Wang et al., 2018). BIAS tiene la capacidad de estimar el porcentaje de subestimación o sobrestimación entre las variables (Asurza et al., 2018), es decir, indica la tendencia promedio de los datos simulados de ser mayores o menores a los datos observados (Coaquira-Quispe, 2018).

Mientras que, la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) es utilizado como criterio en la evaluación del poder reproductivo de modelos hidrológicos, el cual consiste en la comparación de la magnitud relativa de la varianza residual, en este caso sería el caudal simulado, con la variación de los datos de medición, es decir, caudal observado (Coy-Murcia, 2017).

Métricas estadísticas para evaluar el comportamiento de los CHIRPS (f_n en las ecuaciones) respecto a los pluviómetros *in situ* (r_n en las ecuaciones). PBias, representa el sesgo estadístico de manera resumida, para todo el conjunto de datos. El error medio (ME), se emplea para cuantificar la diferencia entre los CHIRPS y pluviómetros. Otras métricas de validación de la precipitación satelital es el coeficiente de Pearson, y el error medio cuadrático (Bai et al., 2018).

Zhao et al. (2021) y Aronica et al. (2002) proponen en un nivel más simple, la validación de patrones de inundación calculada por el modelo hidráulico a partir de una clasificación binaria entre el límite húmedo-seco con valores de 1 y 0 respectivamente entre el modelo y la referencia observada, el cual puede ser obtenido desde imágenes SAR. De manera que se obtiene una matriz de cuatro estados posibles, los cuales se muestran en la tabla 6, en el cual las celdas que componen la diagonal de la matriz representan los elementos espaciales correctamente clasificados por el modelo. El estadístico de rendimiento del modelo $F^{(2)}$ (ecuaciones 6 y 7), es

una medida agregada simple de rendimiento del modelo, del dominio de clasificación correcta del modelo.

Tabla 6. Matriz de combinaciones posibles en una clasificación binaria, Fuente: (Aronica et al., 2002)

	Ausencia en el modelo (M ₀)	Presencia en el modelo (M ₁)
Ausencia en los datos observados (D ₀)	D ₀ ,M ₀	D ₀ ,M ₁
Presencia en los datos observados (D ₁)	D ₁ ,M ₀	D ₁ ,M ₁

$$F^{(2)} = \frac{Pi_{obs} \cap Pi_{mod}}{Pi_{obs} \cup Pi_{mod}} \quad (6)$$

$$F^{(2)} = \frac{\sum_i Pi^{D_1M_1}}{\sum_i Pi^{D_1M_1} + \sum_i Pi^{D_1M_0} + \sum_i Pi^{D_0M_1}} \quad (7)$$

Donde Pi son los pixeles tanto del modelo (M) como de los datos observados (D), M_1 y D_1 representa pixeles con inundación. M_0 y D_0 representan pixeles secos en el modelo y datos observados respectivamente.

En este sentido, los valores esperados para $F^{(2)}$ que satisfacen el criterio general de la medida de rendimiento se encuentra entre 0 y 1, donde los valores mas cercanos a la unidad, en el cual indican que el modelo presenta correctamente las zonas de inundación.

El coeficiente kappa (ecuación 8) es el reflejo de la concordancia inter-observador, el cual es calculado a partir de tablas donde se contrastan dos observaciones (modelo vs observado). Kappa toma valores entre -1 a +1, en el cual, entre más cercano sea el valor a 1, mayor es el grado de concordancia. Caso contrario, cuando kappa tiene valor de 0, refleja la concordancia observada esperada por caudas exclusivamente del azar (Cerdeja Lorca & Villarroel Del P., 2008).

$$\kappa = \frac{[(\sum \text{concordancias observadas}) - (\sum \text{concordancias atribuidas al azar})]}{[(\text{total de observaciones}) - (\sum \text{concordancias atribuidas al azar})]} \quad (8)$$

CAPITULO IV: METODOLOGÍA

Las inundaciones son un fenómeno natural que ha ocurrido en el pasado y que se repetirá en el futuro (Andrea Petroselli et al., 2020). En ecosistemas naturales, las inundaciones de las riveras de un río representan resultado positivo para su conservación. Sin embargo, en situaciones de desarrollo urbano intensivo en las mismas, la respuesta a las inundaciones naturales de las llanuras aluviales del río, se convierten en potenciales daños considerables. En simulación de inundaciones urbanas, la caracterización de elementos topográficos de avenidas como calles y obstáculos como edificios, manzanas, puentes tiene un impacto significativo en la propagación de inundaciones (Zhao et al., 2021).

La respuesta a la pregunta sobre qué tan detallado debe ser un modelo para obtener resultados aceptables, continuamente se responde de manera pragmática en función de los recursos y datos disponibles (Apel et al., 2008).

4.1. Área de estudio

La cuenca hidrográfica del río Culiacán (ver Fig. 2) se localiza al noroeste del país y cuenta con una superficie aproximada de 15,731 km², presenta una longitud media desde el parteaguas de 875 km. Es la segunda cuenca más importante de toda la región Hidrológica No. 10 (RH10), después de la cuenca del río Fuerte. Se encuentra ubicada entre las coordenadas 105° 41' y 108° 4' longitud Oeste, y entre los paralelos 24° 24' y 26° 24' latitud Norte.

Está compuesta por tres principales afluentes: Humaya, Tamazula y Culiacán, este último inicia en la confluencia de los dos primeros, dentro de la ciudad del mismo nombre. Dentro de los límites de la cuenca, se localizan dos cuerpos de agua, los embalses Adolfo López Mateos y Sanalona dentro de las afluencias de los ríos Humaya y Tamazula respectivamente.

La subcuenca hidrológica río Culiacán se ubica en el estado de Sinaloa, comprendiendo parcialmente los municipios de Culiacán, Navolato, Cosalá, Badiraguato y Mocorito, ocupando el municipio de Culiacán más del 68 por ciento de la cuenca (INEGI, 2019). Limita con las cuencas río San Lorenzo al sur, río Humaya al norte, río Tamazula y río San Lorenzo 2 al este, río pericos 1 y 2 al oeste, todo dentro de RH10. Posee un área de 18,737.63km² con altitudes que varían entre los 0 y los 1144 m.s.n.m. (Gómez Palacio, 2019; INEGI, 2019; Rentería-Guevara et al., 2019).

El cauce principal, el río Culiacán, presenta poca pendiente, alrededor de 0.09 % (INEGI, 2019), su inicio se sitúa en la confluencia de los ríos Humaya y Tamazula, posee una longitud de 89.12 km, y presenta suelos aluviales tipo vertisol.

El inicio del río Tamazula radica en la sierra madre occidental en el estado de Durango, en su trayecto recorre 107 km desde su origen hasta la estación hidrométrica en Sanalona, la superficie de la cuenca aguas arriba de la presa es de 3,657 km² y desde el puente Cañedo hasta la confluencia con el río Humaya en la zona urbana de Culiacán es de 4,095 km². La profundidad

del río es de 7.87 metros y una anchura de 150 m. Aguas arriba de la presa Sanalona, la estación climatológica “Tamazula” registra un volumen promedio anual de 611.9 (millones) $\text{mm}^3/\text{año}$, mientras que la estación “Sanalona” ubicado aguas abajo de la compuerta, registra 862.6 millones $\text{mm}^3/\text{año}$.

En la parte baja de la cuenca, confluye junto con el río Humaya para dar el nacimiento del río Culiacán, en la Fig. 2 se puede observar la unión de los tres ríos (Íñiguez-Ayón et al., 2015; Secretaría de Desarrollo Agrario Territorial y Urbano, 2015). La parte baja de la cuenca se encuentra ubicada en el estado de Sinaloa, comprendiendo mayormente el municipio de Culiacán, y una parte del municipio de Cosalá, entre los paralelos $24^\circ 58'$ Norte, y $107^\circ 24'$ longitud oeste, con una altitud media de 216.72 msnm.

En la ciudad de Culiacán, los ríos y sus riveras han sufrido diversas transformaciones desde 1991 con la implementación del proyecto urbano Desarrollo Urbano Tres Ríos, con trabajos de dragado de los cauces, deforestación y ocupación de las zonas de inundación en las riveras, así como de construcción de vialidades, puentes, zonas habitacionales, turísticas y comerciales (Íñiguez-Ayón et al., 2015).

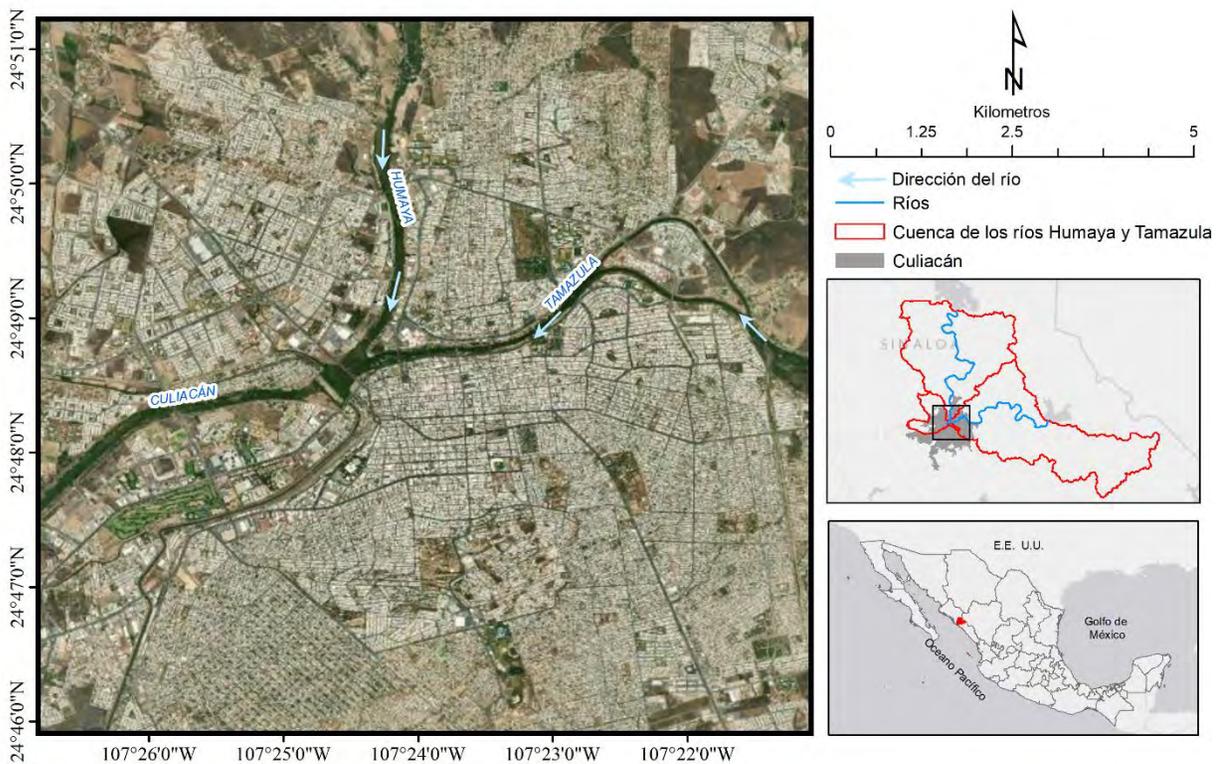


Fig. 2 Ubicación de la zona de estudio.

4.2. *Clima*

La clasificación de climas se realiza bajo el supuesto de la existencia en la Tierra de regiones naturales con climas semejantes que comparten características comunes en términos de vegetación y suelos (INEGI, 2005).

El sistema de clasificación climática mundial, establecida por el climatólogo alemán Wladimir Köppen en 1884, describe los tipos de clima a partir de una serie de normalmente tres letras, las cuales indican el comportamiento de las temperaturas y precipitaciones (medias anuales y mensuales, así como la estacionalidad de la precipitación) basado con la relación íntima que tienen éstos con la distribución de vegetación, dividiendo los climas del mundo en cinco grupos principales, identificados por la primera letra mayúscula; dividiendo los grupos en subgrupos según el tipo de clima identificándolo con un símbolo de dos o tres letras. La clasificación climática de Köppen fue modificada por (Enriqueta García, 1964) con el propósito de reflejar mejor las características climáticas de la república mexicana agregando dos subdivisiones en climas cálidos semisecos.

La ciudad de Culiacán es de tipo Bs1(h')w(e), correspondiente a clima semiseco y cálido con régimen de lluvias en verano y escasa precipitación en invierno, por lo que se puede diferenciar dos épocas: lluviosa (de julio a septiembre) y de estiaje, que se observa de octubre a junio (JAPAC, 2008).

En cambio, toda la cuenca del río Culiacán es muy variable, en la parte alta predomina el clima semiseco con primavera seca y semifrío extremo, con régimen de lluvias de verano fresco y prolongado y temperaturas entre 20.1 y 31.2 °C (CONAGUA, 2024). En la parte baja, se observa clima muy seco con humedad deficiente en todas las estaciones y cálido sin estación invernal, con lluvias en verano, lluvias invernales menores al 13% del total anual y temperaturas que oscilan entre 18.8 y 29.4°C. mientras que en la zona intermedia se reconoce un clima seco, con primavera seca y cálida con invierno suave (CONAGUA (Comisión Nacional Del Agua), 2018).

El río Culiacán está ubicado en la llanura costera del Pacífico, es una región semiárida, con lluvias en verano, entre los meses de junio a septiembre, con una precipitación media anual de 640 mm y evapotranspiración anual de 2100 mm (Ruiz-Fernández et al., 2002).

4.2.1. Presas

La cuenca del río Culiacán posee 4 vasos de almacenamiento y presas derivadoras de tipo vertedero con el fin de almacenar la captación de agua sobre los cauces de los ríos para propósitos de riego agrícola, consumo humano e industrial.

La presa Sanalona se encuentra ubicada en el cauce del río Tamazula, localizando la cortina como el punto de drenaje de la subcuenca. La construcción de Sanalona se construyó durante el periodo de 1941 y 1948, la presa se extiende sobre 5,410 ha y tiene capacidad de embalse de 673 (millones) m³ aproximadamente (Vazquez-Ontiveros et al., 2021).

El río Humaya, es un humedal clasificado como río superficial perenne localizado después de la compuerta de la presa Adolfo López Mateos, hasta la confluencia con el río Tamazula, cubriendo una superficie aproximada de 6.58 km² (INEGI, 2019). Topográficamente cuenta con sierras, valles y llanuras, proporcionando un sistema de transición entre bosque y selva baja caducifolia (INEGI, 2019).

La Presa Derivadora *Ing. Carlos Carvajal Z.* localizada en el río Culiacán, a 625m. aguas debajo de la confluencia de los ríos Humaya y Tamazula. Cuando se construyó se localizaba en las periferias de la ciudad, sin embargo, debido al crecimiento de la misma, ha quedado localizada en el centro de la mancha urbana. Ésta presa posee un nivel máximo de vertedor necesario para elevar el agua a fin de ser transportar hacia aguas de cultivos; la descarga de los escurrimientos procedentes de la ciudad sobre los ríos se desvían a partir de la presa derivadora hacia canales de riego que nacen desde este punto, sin embargo, esto repunta en problemas de inundación en las zonas como el malecón Niños Héroe, además de taponamiento de las descargas de colectores y canales pluviales durante las grandes avenidas en los ríos Humaya y Tamazula (IMPLAN, 2007).

4.3. Materiales

Los materiales e insumos empleados para el modelo y simulación de inundaciones resaltan:

- Registros de precipitaciones en la cuenca río Culiacán de la Comisión Nacional del Agua.
- Registros históricos de aforo de los cauces principales de la cuenca río Culiacán de la Comisión Nacional del Agua.
- Precipitaciones diarias CHIRPS, con resolución espacial de 0.05° de arco.
- Cartografía de uso de suelo y vegetación escala 1:250 000 formato vectorial (INEGI).
- Cartografía de suelos edafológicos escala 1:250 000 formato vectorial (INEGI).
- Modelo Digital de Elevaciones con una resolución de 5 m LiDAR (INEGI).
- Modelo Digital de Elevaciones con una resolución de 0.10 m proveniente de Catastro de Culiacán.
- Imágenes Landsat y Sentinel-1 de distintas fechas de adquisición que coincidan con las fechas de inundaciones históricas en la ciudad de Culiacán, para elaborar cartografía de uso de suelo y vegetación, y la máscara de agua.
- Programas de cómputo para la simulación 1D y 2D: *HEC-RAS e IBER*.
- Programas de cómputo de ambiente SIG: *ArcGIS, Idrisi, Envi, Qgis*.
- Equipo de cómputo Hp con procesador Intel Core i7-8750H, RAM 24 GB, Windows 10.

Los datos de precipitación y modelo digital de elevaciones se emplearon como variables independientes. En la tabla 7 se muestran las variables dependientes e independiente, así como el propósito de cada una. La cartografía nacional escala 1:250 000 de edafología y de uso de suelo y vegetación se utilizaron como información complementaria en el proceso de modelación.

Tabla 7. Variables independientes y fuentes de adquisición.

Variable independiente	Resolución	Fuente	Propósito
Modelo digital de elevaciones	0.10 m	Catastro Culiacán	Obtener relieve urbano a nivel zonas propensas a inundación
	5 m	LiDAR INEGI https://www.inegi.org.mx/	Obtener el relieve a nivel cuenca urbana
Precipitaciones	diarias	SMN CONAGUA ventanillaunica.smn@conagua.gob.mx https://smn.conagua.gob.mx/	Generar los modelos de lluvia-escorrentamiento que servirá en el modelo hidráulico de inundaciones
	diarias	CHIRPS https://www.chc.ucsb.edu/data/chirps	Obtener distribución espacio-temporal de las precipitaciones
Cartografía Nacional: - Edafología - Uso de suelo y Vegetación	Escala 1/250 0000	INEGI https://www.inegi.org.mx/temas	Establecer los valores de rugosidad en las llanuras de inundación

4.4. Métodos

El proceso metodológico inicial se plantó siguiendo la línea metodológica sugerida por S. Fu; F. Asurza; J. Wurl, mostrado en Fig. 3 (Ben Khalfallah & Saidi, 2018; Fu et al., 2020; Wurl et al., 2015). Sin embargo, conforme los resultados reflejaron la insuficiencia de esas metodologías, la propuesta fue moldeándose a las necesidades topográficas, climáticas, pluviométricas y de disponibilidad de datos reales que se contaban. Es importante aclarar entonces, que la metodología propuesta en esta tesis es inédita y la principal contribución a la ciencia.

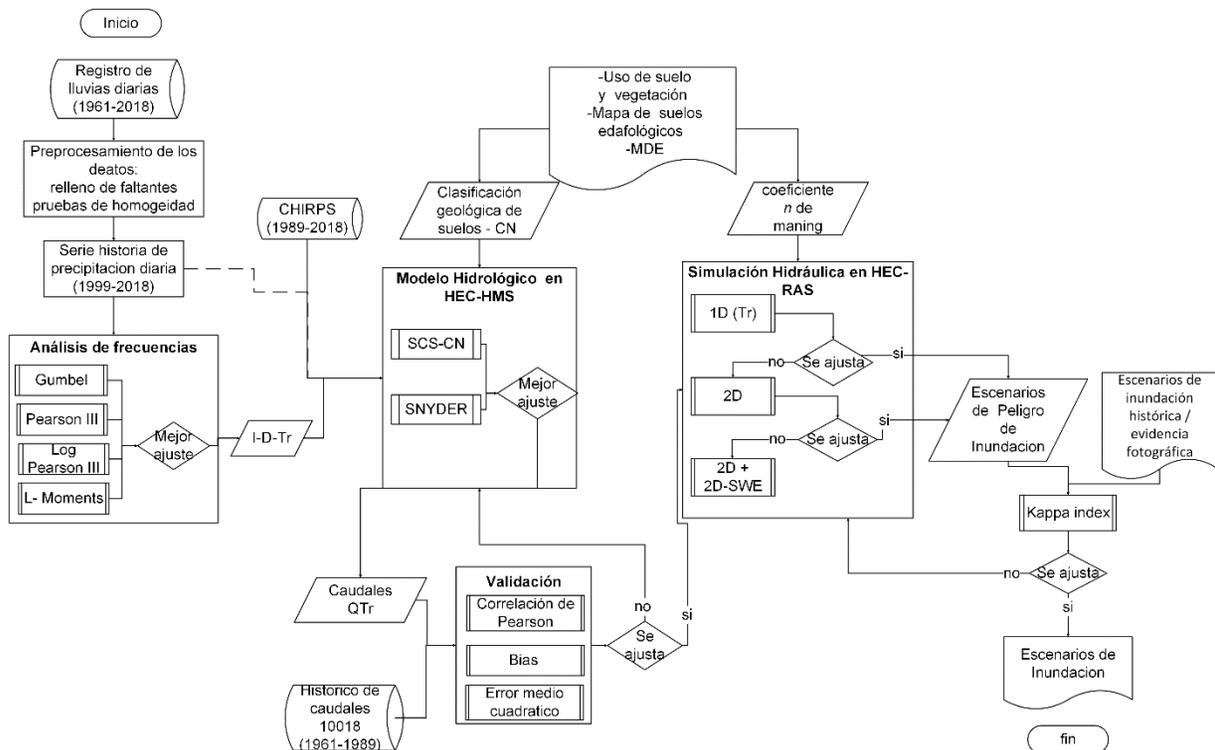


Fig. 3 Esquema de metodológico. Fuente: Elaboración propia.

Un primer enfoque metodológico, fue ejecutar el modelo hidrológico para la simulación de inundaciones por medio de análisis de frecuencias y simulación hidráulica unidimensional. En este enfoque se inicia con el modelo probabilístico de análisis de frecuencias y periodos de retorno de precipitaciones y lluvia efectiva a partir de diseño de tormenta.

En el modelo probabilístico de precipitaciones se encargó de establecer el tipo de distribución estadística como las distribuciones Gumbel, Pearson III, Log Pearson III, entre otras que presentaron mejor ajuste a los datos empíricos pluviométricos, con los que posteriormente se construyeron las curvas IDF implementadas en los modelos hidrológicos a partir de los datos históricos de precipitación de las 20 estaciones pluviométricas dentro de la cuenca.

Se implementaron los modelos hidrológicos con métodos de transformación de SCS, Snyder y Témez a nivel subcuenca para las afluentes de los ríos Humaya, Tamazula y Culiacán de manera independiente como modelos concentrados. El parteaguas se delimitó con los productos vectoriales de limitación de cuenca de INEGI y CONAGUA, mientras que el MDE LiDAR de 5m de resolución espacial se utilizó para el cálculo de la pendiente del cauce.

El modelo hidráulico radicó en la simulación 1D de los afluentes Humaya y Tamazula, así como de su confluencia en la ciudad como resultado del complemento de ambas afluentes. Se implementó el MDE LiDAR de 5m para la configuración topográfica y se simuló con secciones transversales de tres kilómetros de longitud con una separación de 500 metros entre

ellas, desde los ríos Humaya y Tamazula a partir de los límites externos de la ciudad hasta la salida del río Culiacán hasta la presa derivadora.

El segundo enfoque que se abordó fue la implementación de análisis geoespacial de la modelación hidrológica comparando diferentes insumos de precipitación, como lo son los datos pluviométricos y datos CHIRPS. Mientras que la simulación hidráulica se ejecutó en 2D.

Los datos pluviométricos fueron analizados e interpolados para tener series temporales completas de más de 38 años de precipitaciones diarias. Además de contar con la misma longitud de la serie temporal con la precipitación satelital CHIRPS.

Se ejecutó un modelo hidrológico semidistribuido con datos diarios de precipitación con el propósito de obtener una serie de caudales a nivel diario con el que se pudo simular inundaciones históricas. En el proceso del modelo hidrológico se emplearon como método de transformación el método SCS y Snyder, para datos pluviométricos y CHIRPS respectivamente.

La simulación hidráulica se ejecutó en 2D totalmente, en el cual se establecieron zonas de reforzamiento y se agregaron condiciones de contorno aguas arriba para el ingreso de los caudales de los ríos y aguas abajo del río Culiacán para establecer las condiciones de salida del modelo. A continuación, se enlista detalladamente los procedimientos dispuesta en cada uno de los procesos desarrollados de la metodología general.

4.4.1. Delimitación del parteaguas

Se generó el mosaico a partir de 163 escenas escala 1:10 000 de LiDAR tipo terreno de INEGI con la herramienta de generar mosaico de ArcGIS. Posteriormente, se corrigieron errores de pixeles con elevaciones erróneas (elevación menor a 0), o sin datos en zonas donde no correspondían. La corrección se procedió creando un filtrado e interpolación por la media de alturas de las celdas vecinas al pixel de valor irregular o pixel con falta de información por medio del algebras de mapas de ArcGIS creando condicional para generar una máscara con los pixeles a eliminar y por medio de condicionales rellenar el valor de las celdas con la media aritmética de diez de las celdas vecinas.

A partir del modelo digital de superficie por medio de las herramientas de Arc Hydro Tools de ArcGIS se procedió a delimitar el parteaguas de la cuenca, aguas debajo de las cortinas de almacenamiento Adolfo López Mateos y Sanalona hasta su desembocadura.

Un inconveniente que se presenta en la delimitación de cuencas, es la capacidad de delimitar parteaguas en zonas de pendientes suaves y diversificación del río principal. Por lo tanto, siguiendo la misma línea de Rentería-Guevara et al. (2019), se utilizó la delimitación de la cuenca a partir de los productos vectoriales de INEGI y CONAGUA para efectuar el primer enfoque metodológico.

Para la delimitación de la cuenca se interseccionó los productos vectoriales de delimitación de la cuenca río Culiacán emitido por el responsable cartográfico (INEGI) y por el organismo responsable del recurso hídrico (CONAGUA). En el que ambos comparten la misma delimitación en la parte alta de la cuenca y el mismo sistema de referencia, sin embargo, sus diferencias se localizan en la parte media y baja, es decir, en la ubicación de la ciudad de Culiacán (ver fig. 4).

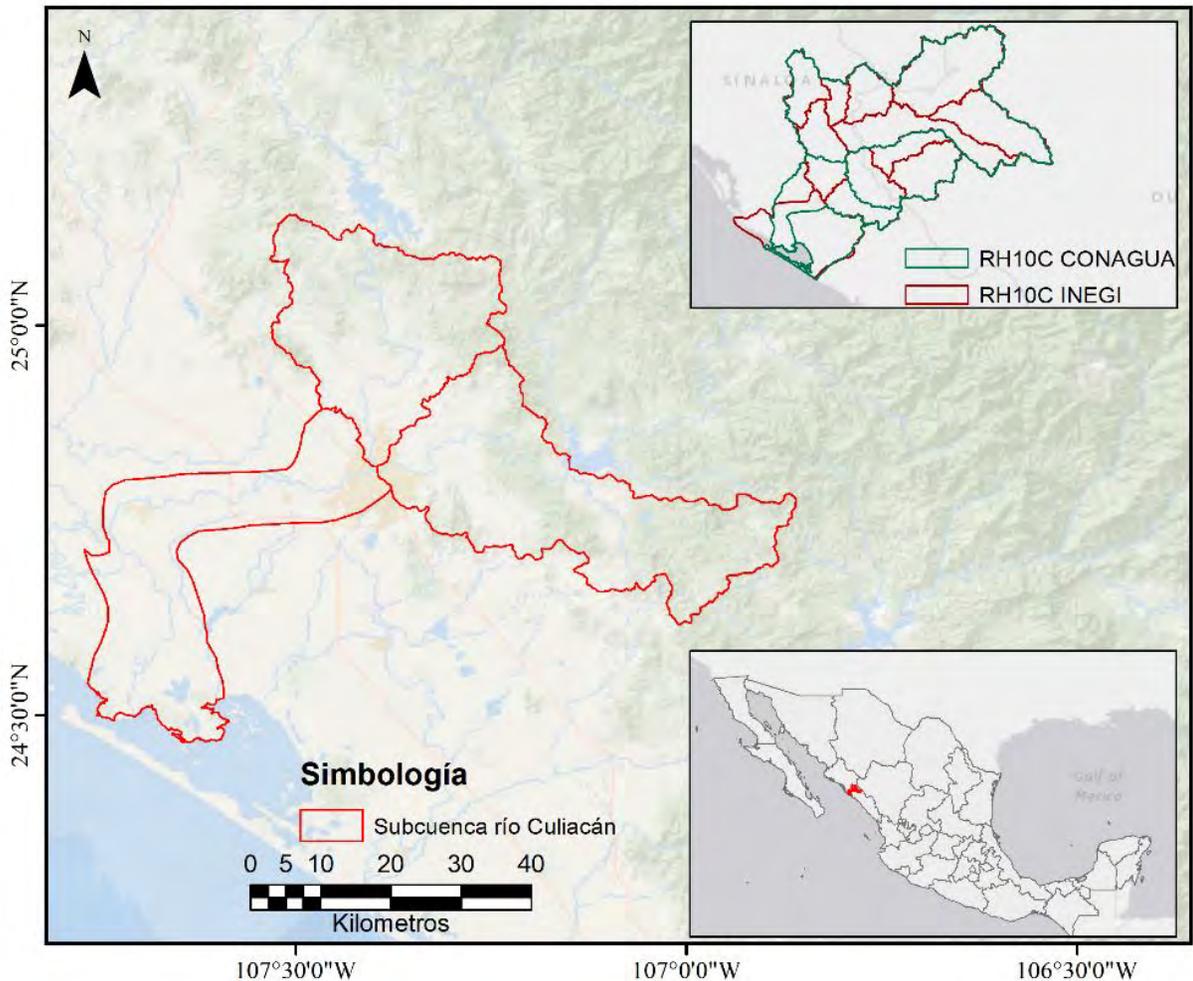


Fig. 4 Delimitación del parteaguas de la cuenca para el modelo hidrológico. Fuente: Elaboración Propia.

De la intersección de ambas delimitaciones en la ciudad, se tomó como parteaguas para la cuenca baja del río Culiacán, que delimita aguas arriba con las cortinas de los embalses, creando las subcuencas para el río Humaya y Tamazula hasta su confluencia, dentro de la ciudad, y creando una tercera subcuenca, la del río Culiacán. En ese mismo punto hasta su desembocadura, se delimitó su subcuenca, discrepando aquellas zonas que pertenecen a pabellones de drenaje en la ciudad como se observa en la figura 4.

4.4.2. Pre procesamiento de la serie histórica de precipitaciones

La metodología consistió en evaluar la calidad de los datos pluviométricos con los que se trabajó, realizando pruebas de homogeneidad e independencia. Se eligió un periodo donde la mayoría de los pluviómetros presenten datos, con no más del 30% de datos perdidos.

La interpolación de las series temporales, se realizó por medio de crear zonas homogéneas, las cuales se calculó el valor interpolado de los datos faltantes por el método de inversa de la distancia. Posteriormente se evaluó la independencia por medio de la prueba de Anderson y homogeneidad de las series temporales por diversas pruebas como t-Student, Helmert, Cramer y Mann-Kendall en una segunda fase que garantizó la correcta interpolación. En la figura 5 se muestra el esquema metodológico específico para la evaluación de la serie histórica.

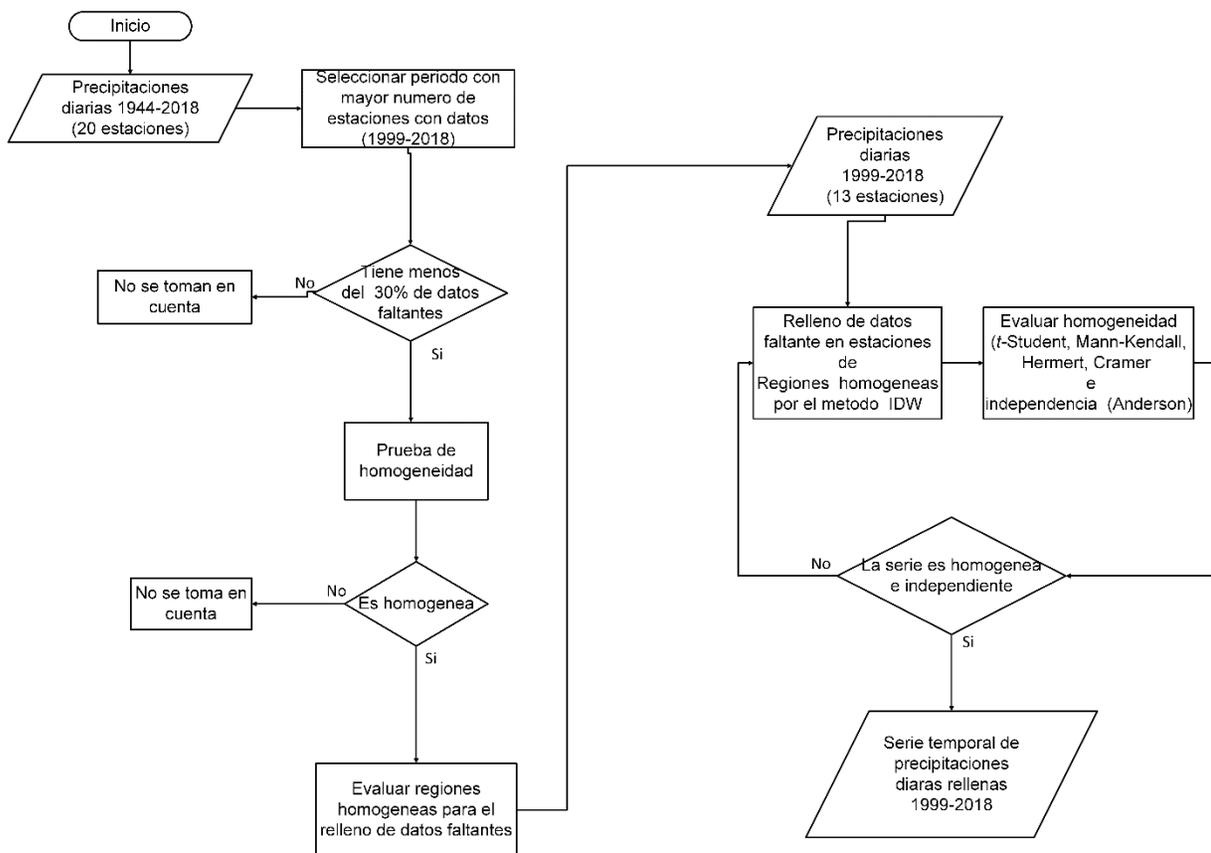


Fig. 5 Esquema metodológico de las pruebas de homogeneidad e independencia de las estaciones pluviométricas.

4.4.3. Análisis de precipitaciones, cálculo de precipitación media para cada periodo de retorno

En los modelos hidrológicos-hidráulicos, se le denomina periodo de retorno al lapso de tiempo en años que en promedio se espera que ocurra un evento extremo de magnitud igualada o excedida (Gutiérrez Lozano et al., 2011). La magnitud del fenómeno se encuentra inversamente relacionado con la frecuencia de ocurrencia (Hidalgo-Mayo et al., 2019). El propósito del procesamiento estadístico de las series de máximos anuales es determinar los valores más probables de precipitaciones con duración de 24 horas para periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años.

El análisis o modelo estadístico de precipitaciones es un paso previo al modelo hidrológico, el cual brinda las pautas probabilísticas a periodos de retorno que se empleados. Para realizar el cálculo de probabilidad de ocurrencia de eventos extremos se generarán a partir de datos máximos anuales de los registros en las estaciones pluviométricas en la cuenca. Asumiendo que los datos se ajustan de manera teórica a funciones de probabilidad de valor extremos tipo I, mejor conocido como Gumbel, la cual se muestra en la ecuación 9 (Rincón & González, 2011).

$$F(x|\mu\beta) = e^{-e^{-\frac{x-\mu}{\beta}}} \quad (9)$$

La distribución de valores extremos I (EVI), o mejor conocido como distribución Gumbel, se utiliza para el análisis de frecuencias en valores extremos (tanto máximos como mínimos). Es una distribución aplicable para variables aleatorias positivas. Para inundaciones, se considera que cada máximo anual corresponde al valor superlativo en una muestra de un año, y posee en cuenta dos parámetros: de ubicación (u), escala (α), además de un coeficiente de asimetría fijo de 1.139 (Acosta Castellanos & Sierra APonte, 2013).

En cambio, la distribución Log Pearson III (10), también conocida como distribución gama de tres parámetros: de localización (δ), de ubicación (β) y de escala (α) y $\Gamma(\beta_1)$ es la función Gamma. Se emplea para el análisis probabilístico de eventos extremos. Consiste en la transformación de dichos valores en logaritmos en base 10 con el propósito de eliminar la asimetría de los mismos. Se ejecuta con la misma ecuación de función empleada para Pearson III.

$$F(x) = \frac{1}{\alpha_1 \Gamma(\beta_1)} * \left\{ \frac{x - \delta_1}{\alpha_1} \right\}^{\beta_1 - 1} * e^{-\frac{x - \delta_1}{\alpha_1}} \quad (10)$$

Para la primera fase, se eligieron cuadro de 20 estaciones pluviométricas. Las cuales contaron con registros de máximos anuales continuos durante el periodo de 1961 a 2018, debido

a la intermitencia de las estaciones ya que algunas contaban registros incompletos, con un número de años inferior a 30, es decir, menor a lo recomendado hidrológicamente para realizar los estudios probabilísticos. Posteriormente se dividió la serie temporal en dos de 1961 a 1989 y de 1990 a 2018, la primera para calibración, y la segunda para validación. Las series históricas de cada estación se analizó mediante el análisis de distribución Normal, Gumbel, Pearson III, Log Pearson III por medio de la herramienta Hydrognomon.

Posteriormente se analizó el ajuste de bondad de las distribuciones teóricas por medio de la prueba Kolmogorov-Smirnov. La cual determina la diferencia (D_{max}) entre las distribuciones teóricas y observadas, de manera que el contraste si las observaciones pueden asemejarse a una distribución en específico, por consiguiente, la distribución teórica de menor coeficiente D_{max} será la de mejor ajuste a los datos observados.

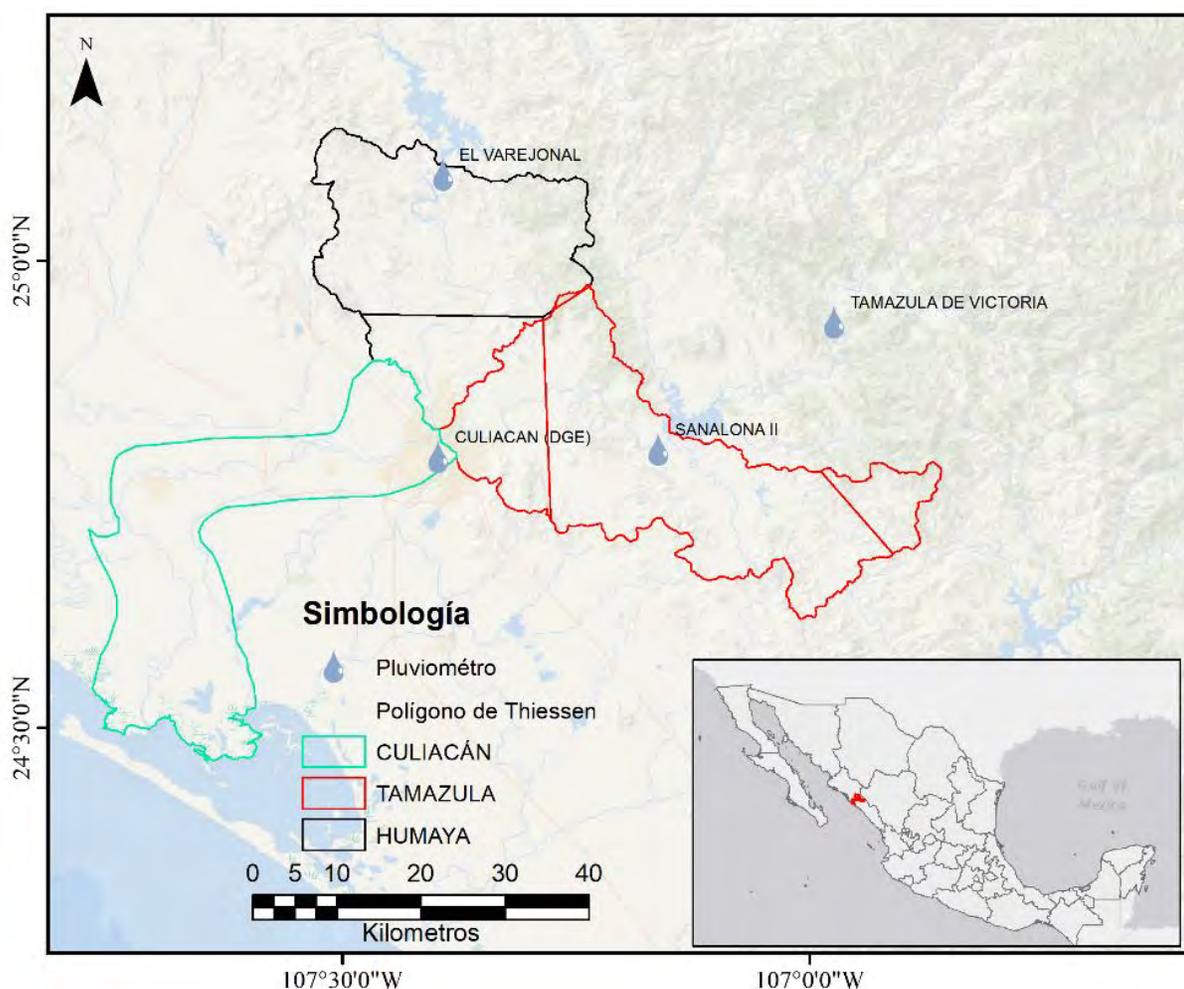


Fig. 6 Polígonos de Thiessen. Fuente: Elaboración propia.

La base de datos de las estaciones pluviométricas contaba con coordenadas geográficas, las cuales fueron proyectadas a coordenadas planas UTM e importadas en el ambiente SIG en formato vectorial. La ubicación de las estaciones se usó para la creación de los polígonos de

Thiessen con la herramienta de proximidad de ArcGis, en la Fig. 6 se muestran los polígonos elaborados para cada subcuenca, mismos que fueron empleados en para el cálculo de la precipitación media. Posteriormente se calculó la precipitación media para las cuencas de los ríos Humaya y Tamazula de manera independiente, para cada periodo de retorno.

Se construyeron las curvas de intensidad-duración-periodo de retorno (I-D-TR) a partir de los valores de precipitación de la distribución teórica de mejor ajuste, y por mínimos cuadrados se elaboraron la ecuación de intensidad de la forma (8) para las cuencas Humaya y Tamazula de manera independiente.

$$I = \frac{\alpha Tr^\beta}{t^{\bar{\beta}}} \quad (11)$$

Donde I es la intensidad de la precipitación en mmh^{-1} , Tr es el periodo de retorno, t es la duración de la tormenta en minutos u horas, α es la ordenada al origen, β es el exponente de resultante en la ecuación de línea de tendencia y $\bar{\beta}$ es el promedio de los exponentes resultantes de las líneas de tendencia de las curvas de las gráficas de dispersión por mínimos cuadrados de los periodos de retorno analizados.

4.4.4. Geomorfología, parámetros de forma y constantes de escurrimiento de la cuenca

Se calcularon algunos parámetros físicos de las cuencas Humaya y Tamazula por medio del MDE y los productos vectoriales en un ambiente SIG, como el área total de la cuenca, longitud y pendiente del cauce principal, densidad de corrientes, coeficiente de número de curva, índice de compactación de cuenca.

El método de conservación de suelos usando el número de curva (SCS- CN) es un modelo empírico desarrollado por el servicio de conservación de suelos de los Estados Unidos el cual determina el umbral de escorrentía superficial por medio de un número hidrológico o número de curva agregado de la cuenca. El CN se establece entre 0 y 100 en función de la capacidad de la superficie de generar escorrentía, así valores cercanos a cero representan condiciones de permeabilidad muy alta, mientras que valores próximos a cien significan condiciones de impermeabilidad, lo que se traduce a alta escorrentía (Francisco-nicolás et al., 2010), de tal manera que en cuencas naturales, el CN suele estar en el rango $50 \leq \text{CN} \leq 100$ (Dinu et al., 2022; Elaji & Ji, 2020; Fadhliani et al., 2021; Fernanda et al., 2007; Prama et al., 2020; Said et al., 2021; Zeiger & Hubbart, 2021).

Es ampliamente utilizado para la estimación precisa de la escorrentía de las cuencas hidrográficas, ya que toma en cuenta factores como la topografía, precipitaciones, uso y cobertura de suelo, así como la integración de todos estos en el parámetro de numero de curva.

CN está en función del uso del suelo, los tratamientos y condiciones de la humedad antecedente (Ahmadi-sani et al., 2022).

El método SCS-CN asume que, para un evento de lluvia, la relación entre la retención real de agua del suelo después de haber comenzado la escorrentía y la retención máxima potencial del suelo es igual a la relación entre la escorrentía directa y la precipitación. Lo anterior da como resultado la ecuación de escorrentía (ec 6) donde el número de curva ($30 \leq CN \leq 100$) representa la retención máxima potencial del suelo (Ahmadi-sani et al., 2022). CN está en función de las características del suelo. Mismos que se constituyen en cuatro grupos hidrológicos del suelo divididos en:

- A: con potencial de escorrentía bajo, es decir, de fácil infiltración, principalmente son texturas gruesas como los arenosos.
- B: potencial de escorrentía moderadamente bajo, estos suelos tienen capacidad de infiltración moderadamente alta, los cuales pertenecen a suelos de textura media, como los francos.
- C potencial de escorrentía moderadamente alto, significa que son suelos con baja capacidad de filtración, con granulometría de media a fina como los franco arcilloso o franco arcillo limoso.
- D potencial de escorrentía alto, son suelos de textura fina como las arcillas que impiden el paso de agua a profundidades del suelo, por lo que el agua queda en la superficie y genera mayor escorrentía (Tabla 8).

Tabla 8. Clasificación de grupos hidrológicos en función de la textura de suelo para el cálculo de CN. Fuente: (Perez-Luna, 1998).

Grupo hidrológico del suelo	Infiltración en estado de humedad	Características	Textura
A	Rápida	Alta capacidad de infiltración > 76 mm/h	Arenoso
			Areno limoso
B	Moderada	Capacidad de infiltración 76 -38 mm/h	Franco
			Franco arcillo arenoso
			Franco limoso
C	Lenta	Capacidad de infiltración 36 - 13 mm/h	Franco arcilloso
			Franco arcillo limoso
D	Muy lenta	Capacidad de infiltración < 13 mm/h	Arcillo arenoso
			Arcilloso

El procedimiento para obtener el CN requiere: i) clasificar la leyenda geológica a grupos hidrológicos del suelo (Tabla 8 y Tabla 9), ii) clasificar los usos del suelo de acuerdo a la leyenda de usos que aparecen en las tablas originales del SCS y asignar a cada uso el código de uso de suelo denominado *Landuse* (tabla 9).

Tabla 9. Clasificación geológica de suelos para el cálculo de CN. Fuente: (Perez-Luna, 1998).

Descripción	Grupo de Suelo Hidrológico
Aluviones y coluviones actuales	A
Conos de deyección	
Arenas y margas	
Calizas recristalizadas cremas	
Calizas tableadas azules	
Coluvial	B
Cuarcitas clancas, micaesquitos plateados y gneises albíticos	
Dolomías negras calizas	
Margas y areniscas	
Terraza	
Areniscas rojas, filitas, cuarcitas y pizarras	
Basaltos	
Filitas, cuarcitas y calcoesquitos	C
Glacis. Limos negros y rojos y cantos encostrados	
Indiferenciado *	
Limos y arcillas rojas con episodios de caliche	
Margas arenosas y margas	
Marmoles calizos y dolomíticos	
Marmoles fajeados y marmoles blancos y crema	
Micacitas con granates	
Micaesquitos y cuarcitas	

Yesos	
Cuarcitas micaceas	
Diabasas	D
Margas blancas	
Margas grises	
Pizarras micaceas y micacitas	

Las clasificaciones del tipo de suelo edafológico, así como de uso y cobertura de suelo procedente no son compatibles con las tablas de correspondencia de número de curva tradicionales (Uribe-Alcántara et al., 2010). Así pues, estas dos cartográficas se complementan para generarlas, la primera para establecer el grupo hidrológico de suelo, mientras que la segunda, asigna el valor de número de curva correspondiente al uso de suelo asignado al grupo hidrológico, en la tabla 10, se enlistan los suelos edafológicos para la cuenca del río Culiacán según la cartografía nacional.

Tabla 10. Unidades de suelo edafológicas y su grupo de suelo hidrológico para el coeficiente de CN. Fuente: (Perez-Luna, 1998).

Clave	Unidad	Tipo	Clave	Unidad	Tipo
Af	Acrisoles férricos	D	Lc	Luvisoles crómicos	C-D
Ag	Acrisoles gléicos	D	Lf	Luvisoles férricos	C-D
Ah	Acrisoles húmicos	C	Lg	Luvisoles gléicos	C-D
Ao	Acrisoles órticos	C	Lo	Luvisoles órticos	C-D
Ap	Acrisoles plinticos	C	Lp	Luvisoles plínticos	C-D
Th	Andasoles húmicos	A-B	Lv	Luvisoles vérticos	C-D
Tm	Andasoles mólicos	A-B	Nd	Nitsoles distnicos	C
To	Andasoles ócricos	A-B	Ne	Nitsoles eútricos	C
Tr	Andasoles vítricos	A-B	Nh	Nitsoles húmicos	C
Qa	Arenosoles álbicos	A-B	Hc	Phaeozems calcáreos	C
Qc	Arenosoles cámbicos	B	Hg	Phaeozems gléicos	D
Qf	Arenosoles ferráticos	A-B	Hh	Phaeozems háplicos	C
Ql	Arenosoles lúvicos	A-B	Hj	Phaeozems lúvicos	C
Bk	Cambisoles cálcicos	C	Wd	Planosoles districos	D
Bc	Cambisoles cromicos	C	We	Planosoles eútricos	D

Clave	Unidad	Tipo	Clave	Unidad	Tipo
Bd	Cambisoles dísticos	D	Wh	Planosoles húmicos	D
Be	Cambisoles eútricos	C	Wm	Planosoles mólicos	D
Bf	Cambisoles ferrálicos	C	Ws	Planosoles solódicos	D
Bx	Cambisoles gélicos	D	Pg	Podzoles glélicos	A-B
Bg	Cambisoles glélicos	D	Ph	Podzoles húmicos	A-B
Bh	Cambisoles húmicos	C	Po	Podzoles órticos	A-B
Ck	Chernozem cálcicos	B	Pp	Podzoles plácicos	A-B
Ch	Chernozem háplicos	B	Dd	Podzoluvisol dísticos	B
Cl	Chernozem lúvicos	C	De	Podzoluvisol eútricos	B
Fa	Ferrasoles acrícos	D	Dg	Podzoluvisol gélicos	B
Fh	Ferrasoles húmicos	D	LL	Ranker	C
Fp	Ferrasoles olínticos	D	Rc	Regosoles calcáreos	B
Fo	Ferrasoles órticos	D	Rd	Regosoles dísticos	B
Fr	Ferrasoles ródicos	D	Re	Regosoles eútricos	B
Fx	Ferrasoles xáticos	D	Rx	Regosoles gélicos	D
Jc	Fluvisoles calcáreos	B	E	Rendzinas	C
Jd	Fluvisoles dísticos	B	Zg	Solochaks glélicos	D
Je	Fluvisoles eútricos	B	Zm	Solochaks mólicos	D
Jg	Fluvisoles glélicos	C	Zo	Solochaks órticos	D
Jt	Fluvisoles tíónicos	B	Zt	Solochaks taquiricos	D
Gc	Gleysoles calcáreos	D	Sa	Solonetz albico	D
Gd	Gleysoles dísticos	D	Sm	Solonetz mólico	D
Ge	Gleysoles eútricos	D	So	Solonetz órtico	D
Gh	Gleysoles húmicos	D	Sg	Solonetz taquiricos	D
Gm	Gleysoles mólicos	D	Vc	Vertisoles crómicos	C-D
Gp	Gleysoles plínticos	D	Vp	Vertisoles pélicos	C-D
Od	Histosoles dísticos	D	Xk	Xerosoles cálcicos	B-C
Oe	Histosoles eútricos	D	Xo	Xerosoles gipsicos	B-C

Clave	Unidad	Tipo	Clave	Unidad	Tipo
Ox	Histosoles gélicos	D	Xh	Xerosoles háplicos	B-C
Kk	Kastanozems cálcicos	C-D	Xl	Xerosoles lúvicos	D
Kh	Kastanozems háplicos	C-D	Yk	Yermosoles cálcicps	C
Kl	Kastanozems lúvicos	C-D	Yh	Yermosoles háplicos	C
I	Litosoles	D	Yl	Yermosoles lúvicos	D
La	Luvisoles álbicos	C-D	Yg	Yermosoles qipsicos	C
Lk	Luvisoles cálcicos	C-D	Yt	Yermosoles taquíricos	D

Se determinó el coeficiente de número de curva a partir de la asignación del grupo hidrológico de la cartográfica de suelos edafológicos, que posteriormente se intersectó con la cartografía de uso de suelo y vegetación, para establecer, según el caso el número correspondiente a la cobertura y grupo hidrológico, posteriormente se calculó el coeficiente siguiendo la ecuación (12), de manera independiente para las cuencas Humaya y Tamazula. Donde CN_i es el número de curva para cada uso de suelo, y A_i es el área de cada uso de suelo.

$$CN = \frac{\sum CN_i \cdot A_i}{\sum A_i} \quad (12)$$

4.4.5. *Calculo de tiempo de concentración*

El tiempo de concentración es un parámetro fundamental en el uso de los modelos de lluvia-escorrentía y se define como el tiempo que toma una gota de agua precipitada desde la parte más alejada de la cuenca hasta llegar al punto de desagüe de la misma. Otra manera de discernirlo es como el tiempo después de la lluvia en el que todas las afluentes de la cuenca contribuyen simultáneamente al punto de cierre (Castillo García et al., 2021). Su objetivo es el determinar el tiempo (en horas o minutos) que se utilizará como el tiempo de una tormenta de diseño en la ejecución de los procesos subsecuentes.

De esta manera, se evaluaron cinco modelos de tiempo de concentración SCS (13), T. V. Chow (14), kirpich (15), california (16) con características físicas similares al de las cuencas Humaya y Tamazula, es decir cuencas grandes (634.08 y 817.32 km² respectivamente) con pendientes inferiores al 1%. La importancia del cálculo de tiempo de concentración radica en que este parámetro se convierte en la duración de tormenta de diseño para la simulación de avenidas extremas.

$$T_c = \frac{0.0136 L^{0.8} \left(\frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0.7}}{S^{0.5}} \quad (13)$$

$$T_c = 0.273 \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.64} \quad (14)$$

$$T_c = 0.066 \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.77} \quad (15)$$

$$T_c = \left(\frac{0.871 L^3}{H} \right)^{0.385} \quad (16)$$

Donde L es la longitud de cauce principal en km, CN es el coeficiente de número de curva, S es la pendiente promedio de la cuenca en m/m y H es el desnivel máximo de la cuenca en m.

4.4.6. Hidrograma unitario sintético

El Hidrograma Unitario Sintético (HUS) es un gráfico donde se representa la escurrimiento directa producida en la salida de la cuenca al presentarse una precipitación efectiva. Se determina por medio de registro pluviométricos e hidrométricos, con los cuales se generan un homólogo al hidrograma unitario al de una cuenca en específico con características morfométricas propias y un régimen de caudales inherente (VT Chow et al., 1994).

El objetivo del HUS es el generar un valor de respuesta hidrológica de una cuenca a raíz de un evento de precipitaciones, asociado a periodos de retorno. Se constituye por una serie de fórmulas empíricas que se basan en las características morfométricas como superficie, pendiente media, longitud del cauce de la cuenca para proporcionar la estimación del hidrograma o el caudal pico para periodos de retorno establecidos.

Existen diversas fórmulas empíricas para el desarrollo de hidrogramas sintéticos que permitan el cálculo del gasto pico (Q_p). El Q_p es un hidrograma de escurrimiento directo que se expresa como el producto de la altura de precipitación efectiva (P_e) por el gasto de un hidrograma unitario (q_p).

El método desarrollado por el SCS (17) de Estados Unidos, también llamado “método de Número de Curva”, consta de dos partes. En la primera parte se realiza una estimación del volumen de escurrimiento resultante de la precipitación – escurrimiento directo, y en la segunda parte se determina el tiempo de distribución del escurrimiento, incluyendo el caudal de punta (Vargas Garay et al., 2019). Este hidrograma se desarrolló a partir de hidrogramas de cuencas

rurales en Estados Unidos de un rango de 0.25 a 1 000 km² y de amplio rango de zonas climáticas húmedas y desérticas.

$$Q_p = \frac{0.208A}{\sqrt{t_c} + (0.6 * t_c)} * \frac{\left(P - \frac{508}{N} + 5.08\right)^2}{P + \frac{2032}{N} - 20.32} \quad (17)$$

Donde Q_p es el caudal pico, A es el área de la cuenca en km², P es la precipitación máxima designada por el tiempo de concentración y la intensidad de tormenta de diseño para cada periodo de retorno, N es coeficiente de numero de curva, t_c es el tiempo de concentración y la intensidad de tormenta de diseño para cada periodo de retorno.

Por otra parte, Snyder introdujo el concepto de hidrograma unitario sintético (HUS), por medio del análisis de condiciones de escurrimiento en varias cuencas. Con eso, desarrolló valores para la duración de la escorrentía y los niveles máximos de inundación para distintas cuencas en condiciones variables. Este procedimiento permite analizar cuencas de drenaje con áreas que oscilan entre los 10 y los 10 000 km² donde los registros no están disponibles o son fiables (Monroy-Rincón, 2010).

Snyder definió el HUS estándar como aquel donde la duración de lluvia t_r se encuentra relacionada con el retardo de la cuenca t_p . De acuerdo a las unidades de la ecuación (25) es necesario dividir entre diez para expresar los valores introducidos en la ecuación (18) en m³/s, sin embargo, previo a la ejecución de esa ecuación se deben de seguir una serie de cálculos para la obtención de caudal pico por área q_p (19), tiempo tipo t_p (20), tiempo de retardo t_r (21), tiempo tico regularizado t_{pR} (22), caudal pico Regularizado por unidad de drenaje, del hidrograma sintético unitario q_{pR} (23), tiempo base t_b (24), precipitación efectiva P_e (25) y ancho en horas del hidrograma a un caudal igual al 75 o 50% del caudal pico W_{50} y W_{75} (26 y 27) respectivamente.

$$Q_p = q_{pR} * A * \frac{P_e}{10} \quad (18)$$

$$q_p = \frac{2.75C_p}{t_p} \quad (19)$$

$$t_p = 0.75 \frac{1.65}{(\sqrt{S})^{0.38}} * (L * Lc)^{0.3} \quad (20)$$

$$t_r = \frac{t_p}{5.5} \quad (21)$$

$$t_{pR} = t_p + \frac{t_R - t_r}{4} \quad (22)$$

$$q_{pR} = \frac{q_p * t_p}{t_{pR}} \quad (23)$$

$$t_b = \frac{5.56}{q_{pR}} \quad (24)$$

$$P_e = \frac{\left(P - \frac{508}{N} + 5.08\right)^2}{P + \frac{2032}{N} - 20.32} \quad (25)$$

$$W_{50} = 2.14q_{pR}^{-1.08} \quad (26)$$

$$W_{75} = 1.22q_{pR}^{-1.08} \quad (27)$$

Donde A es el área de la cuenca en km^2 , S es la pendiente del cauce en m/m , L es la longitud de cauce principal desde la divisoria de aguas hasta el punto de interés en km , L_C es la distancia entre la estación de salida y el centro de gravedad de la cuenca en km , q_p es el caudal pico expresado en $\text{m}^3/\text{s}/\text{mm}$, C_p es el coeficiente adimensional, establecido por Linsley y varía entre 0.56 y 0.69 el cual a menor pendiente menor valor del coeficiente, P_e es la precipitación efectiva, t_p es el tiempo pico en horas, t_b es el tiempo base en horas, q_{pR} es el caudal pico regularizado por unidad de drenaje del hidrograma unitario sintético, t_{pR} es el tiempo pico regularizado en horas, P es la precipitación máxima designada por el tiempo de concentración y la intensidad de tormenta de diseño para cada periodo de retorno, N es coeficiente de numero de curva.

En cambio, el hidrograma de Témez es similar al de SCS (28), diferenciándose de este por la apreciación del tiempo de retardo a partir del tiempo de concentración. Su validez ha sido probada en distintos ambientes climáticos en España y en cuencas de tamaño inferior a $2\,000\text{ km}^2$. Para lo cual requiere del desarrollo de los cálculos del tiempo de retardo t_r (29), tiempo pico t_p (30) y tiempo base t_b (31).

$$Q_p = \frac{P * A}{1.8t_b} \quad (28)$$

$$t_r = \frac{3}{8}t_c - \frac{1}{8}\frac{t_c}{5} \quad (29)$$

$$t_p = 0.5\frac{t_c}{5} + t_r \quad (30)$$

$$t_b = \frac{t_c}{5} + t_c \quad (31)$$

4.4.7. Modelación hidrológica semidistribuido

Al contrario que en los modelos hidrológicos concentrados los cuales funcionan por la teoría de hidrograma unitario sintético, que en resumen son un promedio general de la cantidad de agua precipitada en la cuenca y convertida en escorrentía. En los modelos semidistribuidos, se delimita el área total de la cuenca en sub áreas, en las cuales se evalúan todos los elementos necesarios para determinar la escorrentía efectiva como pendiente, centroide de la sub cuenca, longitud más larga del cauce desde el centroide, tiempo de concentración, entre otros.

En la figura 7 se muestra una representación de ambos métodos. Donde en a), se representa el modelo concentrado, el cual, toma el área total de la cuenca y toma los valores generales en áreas extensas. En cambio, en b) los modelos semidistribuidos, se sub-divide la cuenca, en elementos más pequeños, es decir, en sub cuencas donde a cada una de ellas, se evalúa por separado y se calcula el valor de escorrentía efectivo para cada una.

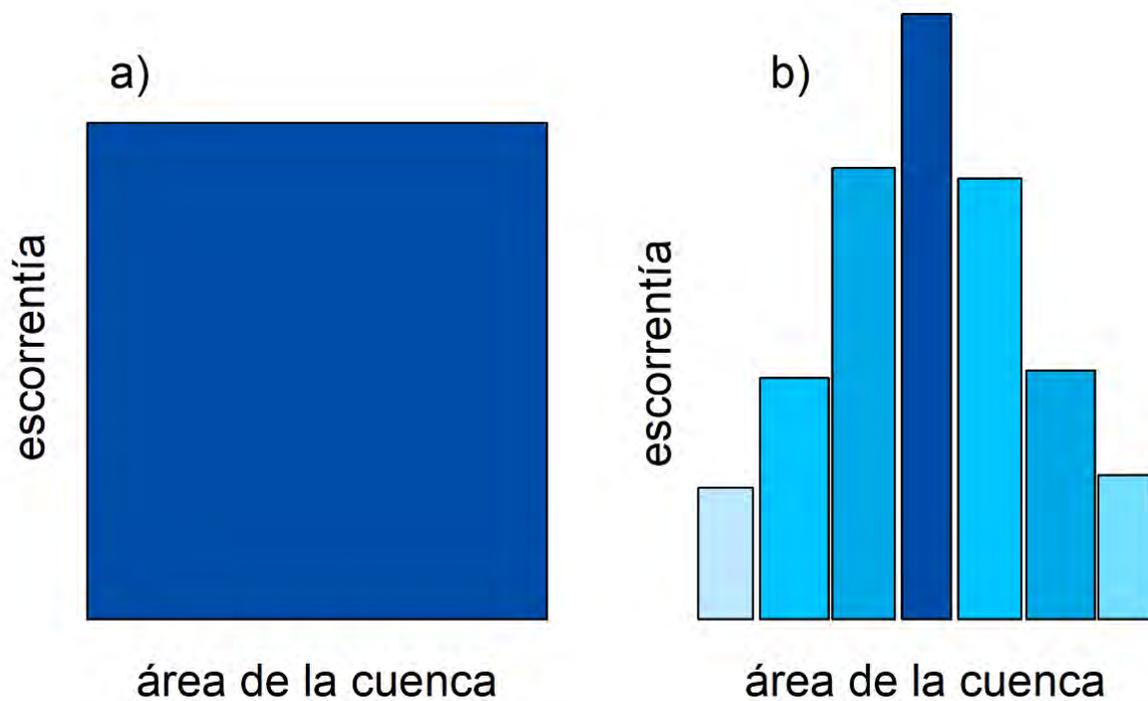


Fig. 7 Representación de modelos hidrológicos a) concentrado y b) semidistribuido, en el proceso de transformar la lluvia en escorrentía en unidad espacial.

El modelo hidrológico semidistribuido se realizó en HEC-HMS y su extensión para ArcGIS HEC-geoHMS. En ArcGIS, se ingresó del DEM LiDAR que cubría el área de la cuenca hidrológica del río Culiacán empleado en el modelo hidrológico concentrado, y con la extensión HEC-geoHMS, se realizó el i) pre-procesamiento, ii) inicio de proyecto, iii) procesamiento de cuencas, iv) características, v) parámetros y vi) HMS.

En el primer apartado, se realiza todo lo concerniente con el modelo digital de elevaciones: rellenar pixeles vacios o con discontinuidad con pixeles vecinos, delimitar las acumulaciones, segmentar, y delimitar el área de la cuenca, sub cuencas y corrientes principales de las mismas. En el inicio de proyecto se establece el punto de evaluación, el cual es el punto de aforo final del modelo. Durante el procesamiento de la cuenca permite unir o dividir sub cuencas, en función del criterio del evaluador. En el apartado de características, se calculan y registran en la tabla de atributos de los shapefile tanto de sub cuenca y ríos, las características de pendiente, longitud, centroide, longitud más larga de la cuenca, longitud más larga del centroide la cuenca.

El coeficiente de numero de curva, el cual proviene desde la clasificación de uso de suelo de las imágenes Sentinel para los años, 2018 y 2022 descargado desde (<https://livingatlas.arcgis.com/landcover/>) con 10 m de resolución espacial, se calculó en el apartado de parámetros, junto con otros elementos como el nombre de cada unidad de sub cuenca y ríos, así como seleccionar el método de pérdida y transformación que se ejecutará en el modelo. Por últimos, en HEC-geoHMS se crea y exporta el modelo HMS para ejecutarlo en HEC-HMS.

Desde HEC-HMS, se agregan los valores de las precipitaciones, de cada pluviómetro con influencia en el área en formato de hietograma de bloque alterno para el caso de análisis de frecuencias. Por último, se establece el tiempo del hidrograma, y el componente de control que establece los modelos evaluados, es decir, los periodos de retorno a evaluar. Se computa simultáneamente el modelo para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años. Los resultados de escorrentía son los que se ingresan en HEC-RAS para la modelación hidráulica.

En el segundo caso, se agregan los valores de precipitación diaria de toda la serie temporal de los pluviómetros con la perspectiva del caso anterior, y de datos CHIRPS, en el cual se agrega la precipitación media por subcuenca diaria, así como un punto de validación en el cual se agregaron los valores de caudal. Y al igual que en el enfoque estático, se ajusta el tiempo de simulacion, componentes de control. Además de establecer el método de tranformación tanto SCS como Snyder. Dando como resultado cuatro distintos hidrogramas que se simulacion en HEC-RAS. Los hidrogramas resultates fueron calibrados por iteraciones en el mismo HEC-HMS, y se validadon a partir del punto de validación entro de las herramientas de calibración y validación del mismo programa.

4.4.8. Simulación hidráulica

El Sistema de Análisis de Ríos del Centro de Ingeniería Hidrológica (HEC-RAS) es un software de modelado hidráulico desarrollado por el cuerpo de ingenieros del ejército de Estados Unidos (Namara et al., 2021). El programa resuelve las ecuaciones de St Venant para 1 y 2 dimensiones como las ecuaciones de onda difusa por medio de volumen finito (Shustikova et al., 2019).

Los datos geométricos para llevar a cabo la simulación partieron del DEM empleado en el modelado hidrológico, delimitado para la zona urbana de Culiacán con proyección cartográfica plana UTM. El coeficiente de rugosidad de Manning se calculó empleando la clasificación de uso de suelo de las imágenes Sentinel utilizada anteriormente en el modelo hidrológico.

4.4.8.1. Simulación 1D

Las características del flujo, no se establecieron desde el inicio, por lo que se establece inicialmente como flujo mixto con la capacidad de cambiar a flujo subcrítico, crítico o supercrítico posterior a un primer análisis de resultados, que establecerá el comportamiento de la simulación. Los datos de flujo que requiere HEC-RAS fueron los valores de Q_p de los tres modelos hidrológicos concentrados y uno mas distribuido, para los periodos de retorno 2, 5, 10, 25, 50, 100 para las cuencas del Humaya y Tamazula.

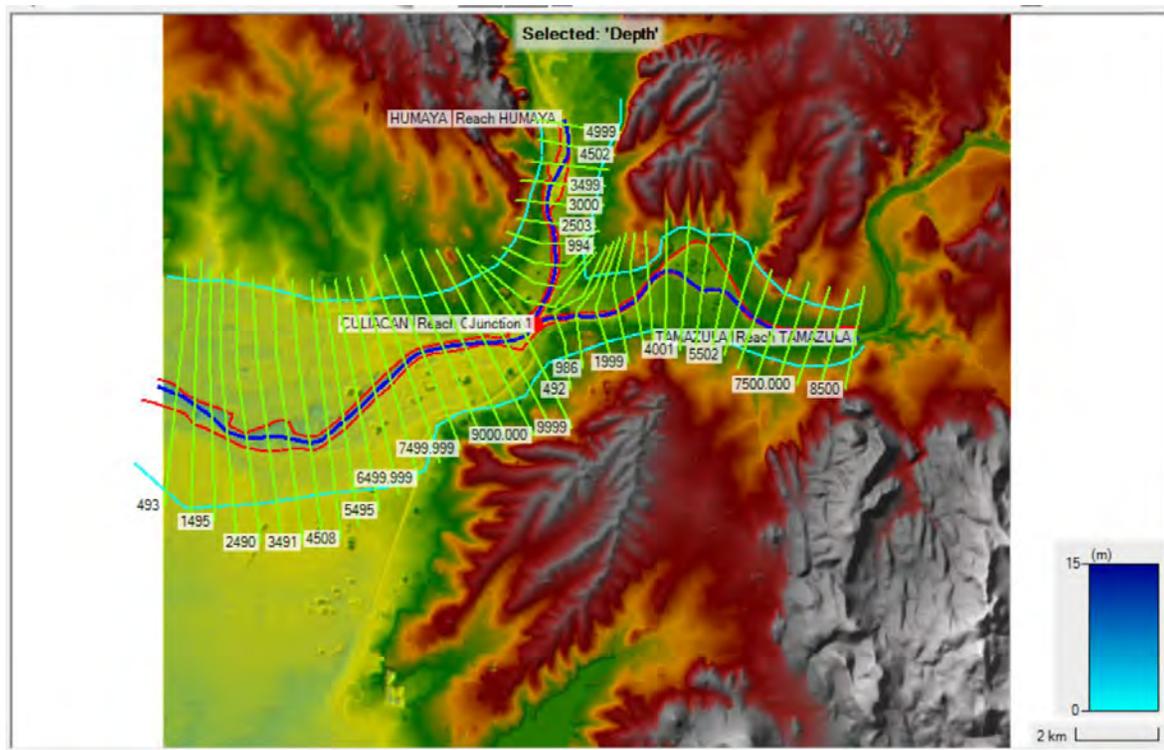


Fig. 8 Geometría para la simulación hidráulica 1D.

Se realizó la simulación hidráulica 1D de los ríos Humaya, Tamazula y Culiacán con la herramienta HEC-RAS 6.3.1 en su componente de sistemas de información geográfica RASmaper (figura 8). El fragmento libre del río Culiacán ubicado desde la confluencia hasta la presa derivadora se simuló con la suma de las aportaciones calculadas individualmente para los ríos Humaya y Tamazula. Se asignó un ancho de tres kilómetros de franja marginal para cubrir

la zona de las llanuras de inundación de los tres ríos. Se estableció una separación entre secciones transversales de 500 metros para ambos ríos y de 100 metros en particular para el río Culiacán.

Se establecieron condiciones de flujo estacionario como condiciones de contorno aguas arriba de las afluentes Tamazula y Humaya flujo estacionario y se agregaron los caudales calculados para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años. Posteriormente se ejecutó la simulación en régimen mixto.

4.4.8.2. Simulación 2D modelo acoplado

El número de Courant es el parámetro que relaciona la discretización en el espacio y el tiempo de un modelo computacional. En este sentido, para lapsos de tiempo diarios, se requiere mallas de computo igualmente grandes.

Ejecutar la simulación 2D con una malla de computo más fina (figura 9), induce dos puntos importantes, el primero radica en el aumento del costo computacional para ejecutar la simulación, mientras que la segunda está en función del lapso utilizado como datos de flujo independientemente si son caudales o precipitaciones, esto debido a que se debe de mantener el número de Courant entre 0.6 y 1.

Para la simulación hidráulica bidimensional se utilizó una malla de computo de simulación, con dimensiones de 100 *100 m para correr la simulación a hidrogramas diarios o dimensiones de la malla de 30 * 30 m para hidrogramas a cada hora. Esto para mantener el coeficiente de Courant el cual sirve para mantener la estabilidad del modelo hidráulico, se necesitaba una malla gruesa (Hydrologic Engineering Center, 2023). Sin embargo, se crearon áreas de reforzamiento con una malla fina de 10 *10 en los afluentes de los ríos Humaya, Tamazula y Culiacán, así como otras regiones de arroyos conocidos dentro de la ciudad.

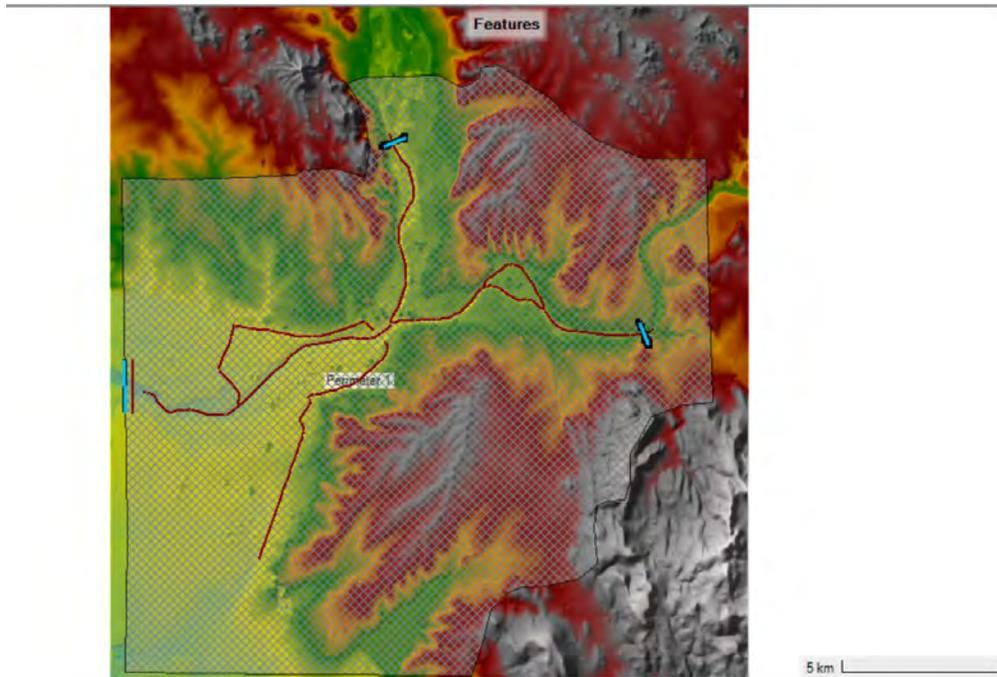


Fig. 9 malla de simulación 2D en HEC-RAS

En la figura 10 se observan los distintos tamaños de malla, de la cuadrícula principal, y la generada por las áreas de reforzamiento. Se estableció otra área de reforzamiento para asignar las condiciones de contorno aguas abajo del sistema, y poder dar salida al flujo simulado, así como para hacer más eficiente el modelo hidráulico con una malla de 20 * 20 m.

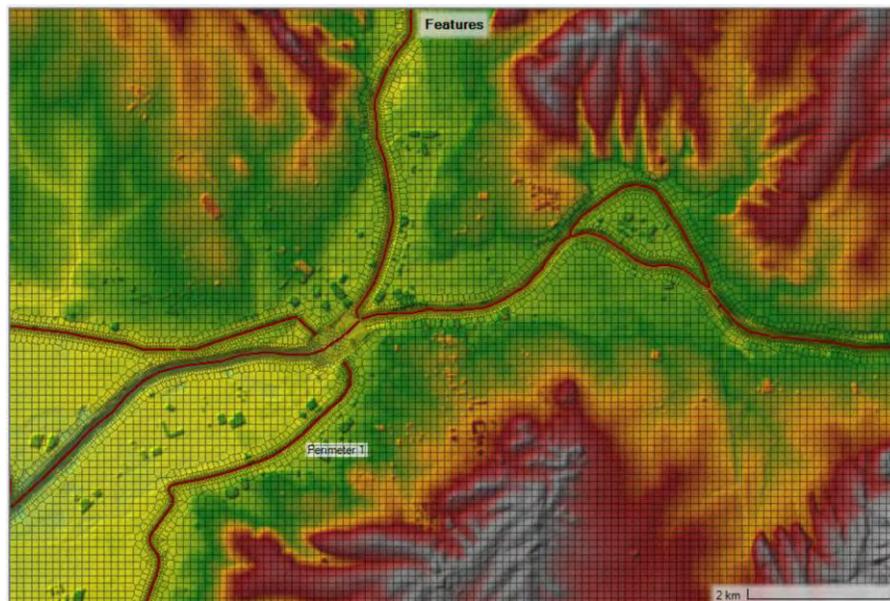


Fig. 10 Mallado 2D de 100 *100 y áreas de reforzamiento en los río de 10*10 m.

Las condiciones de contorno aguas arriba de entrada fueron internas para los 2 afluentes Humaya y Tamazula, y externa para el río Culiacán, con el área de en forzamiento antes

mencionado. La asignación del coeficiente de rugosidad de Manning para las diferentes coberturas de suelo dentro de la ciudad de Culiacán, se muestran en la tabla 11, los valores fueron determinadas siguiendo las características de Barnes, (1967) y supervisado por expertos del IMTA.

El tiempo simulado del hidrograma fue del 27 de junio al 18 de noviembre del 2013, el cual corresponde al periodo de lluvias registrado en la región. Se simularon dos eventos de máxima precipitación, el primero correspondiente al huracán Manuel ocurrido en octubre del 2013, y el segundo proporcionado a la depresión tropical 19-E sucedido en septiembre de 2018.

Tabla 11. Coeficiente de rugosidad n de Manning asignado a cobertura de suelo de la clasificación de Sentinel. Fuente: (HARRY H. BARNES, 1967)

Nombre de la cobertura Sentinel	NLCD	Nombre de la cobertura NLCD	Valor de Manning inicial sugerido	Porcentaje de impermeabilidad
No Data	0	No Data	0.035	100
Unclassified	11	Open Water	0.12	0
Developed-High Intensity	43	Mixed Forest	0.04	0
Developed - Low Intensity	52	Scrub	0.15	90
Developed- Open Space	82	Cultivated Crops	0.05	0
Pasture-Hay	24	Developed, High Intensity	0.035	100
Grassland-Herbaceous	95	Emergent Herbaceous Wetlands	0.06	75
Mixed Forest	71	Grassland, Herbaceous	0.08	0

4.4.8.3. Simulación 2D-SWE Modelo hidrológico-hidráulico integrado

Similar que en la simulación 2D acoplado (tradicional), en el modelo integrado (2D-SWE) en HEC-RAS, requiere de la malla de cálculo, la cual se creó de 100 *100 m para lograr la estabilidad de la simulación (figura 11), al ingresar precipitaciones de lapso diario, que corresponden con los datos obtenidos tanto por los pluviómetros como CHIRPS.

Los valores de precipitación se agregaron a los datos de flujo inestable (simulación 2D). Al no tener puntos de almacenamiento, el programa permite ingresar valores de precipitación, para el general simultáneamente el proceso de la modelación hidrológica y la simulación hidráulica en el mismo computo. Se establecieron los valores de rugosidad y tiempo de simulación para mismos eventos que la simulación anterior.

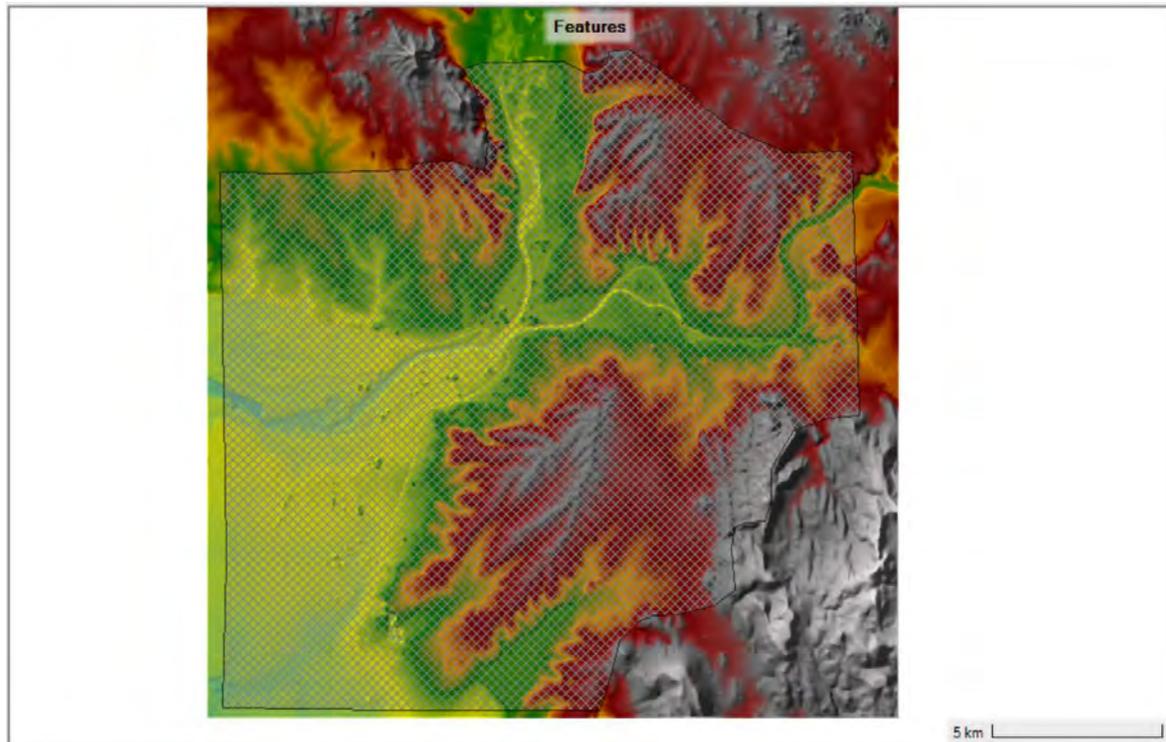


Fig. 11 Geometría de cálculo para la ejecución del modelo hidrológico-hidráulico acoplado en HEC-RAS.

4.4.8.4. Simulación conjunta 2D+2D-SWE

La simulación conjunta 2D+2D-SWE incorpora tanto el modelo hidrológico-hidráulico acoplado y el integrado en el mismo proceso en HEC-RAS. Teóricamente, esta simulación permitiría esclarecer mejor el comportamiento hidráulico de con topografía completa, con una red de ríos y arroyos como la ciudad de Culiacán. Además de presentar una división hidrográfica delimitada por las afluencias de los ríos Tamazula, y Culiacan, con respecto a las otras corrientes, que no aportan directamente a los ríos, creando una división hidrológica dentro de la misma zona urbana. Esta particularidad ha sido un inconveniente al momento de simular adecuadamente un evento de inundación para la ciudad.

A diferencia de los modelos anteriores, la simulación conjunta propone ejecutar al mismo tiempo y con la configuración geométrica de mallado 2D anteriormente utilizada, en el cual se simula los flujos de hietograma e hidrograma en el mismo tiempo computacional, es decir, simular simultáneamente el H-H acoplado y H-H integrado SWE.

Se establecen datos de flujo inestable (simulación 2D), que se ingresan en hidrogramas resultantes del modelo hidrológico HMS de las subcuencas correspondientes del Humaya y Tamazula localizada en las periferias de la zon a urbana.

Al igual que en las variantes separadas de esta propuesta, se debe de mantener la estabilidad del cálculo. La malla de computo 2D se mantiene de 100 * 100 m. con áreas de reforzamiento de 10 * 10 m en ríos, y principales arroyos como se muestra en la figura 12.

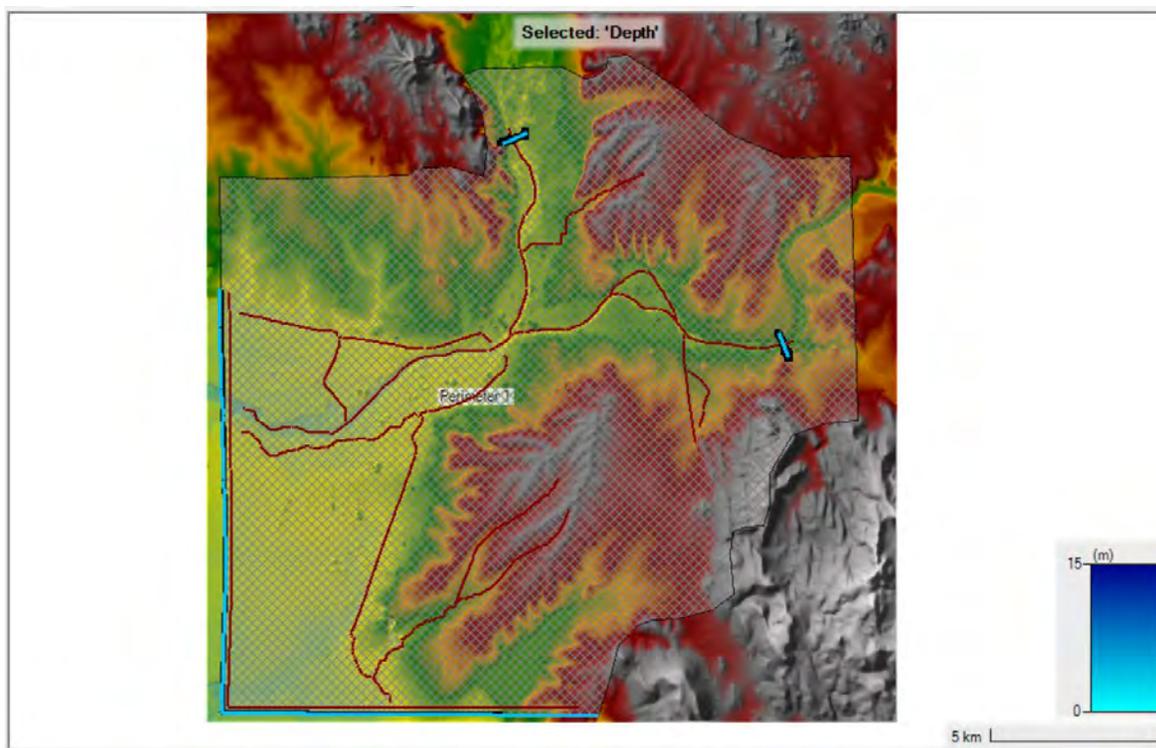


Fig. 12 Configuración de la geometría para la simulación conjunta de los modelos 2D.

Se establecen las condiciones de contorno de entrada aguas arriba en el Tamazula y Humaya, donde se ingresa los hidrogramas y las condiciones de contorno de salida aguas abajo en el Culiacán. Sin embargo, también se agrega sobre la malla de simulación 2D la condición de contorno de entrada en la cual se agrega el hidrograma de precipitación de lapso de tiempo diario. El hidrograma de salida en HMS de lapso de 1 hora, permite modificar el intervalo de computo de la simulación en HEC-RAS a cada minuto, y generar hidrogramas de salida de una hora.

Se generaron diversas alternativas para la simulación geoespacial de inundaciones, que varían en i) el tipo de datos de lluvia de entrada al modelo, los cuales pueden ser pluviométricos o CHIRPS. ii) el tipo de transformación de lluvia-escorrentía, en los que se derivan el método de transformación del SCS y de Snyder. iii) el tipo de simulación hidráulica, que resaltan unidimensionales y bidimensionales, además que en este último resultan tres tipos diferentes como H-H acoplado, H-H integrado y H-H conjunta. Las combinaciones entre los modelos hidrológicos e hidráulicos para la simulación geoespacial de inundaciones se muestran en la figura 13, el cual refleja los resultados posibles de las combinaciones entre los datos de precipitación, método de transformación y simulación hidráulica.

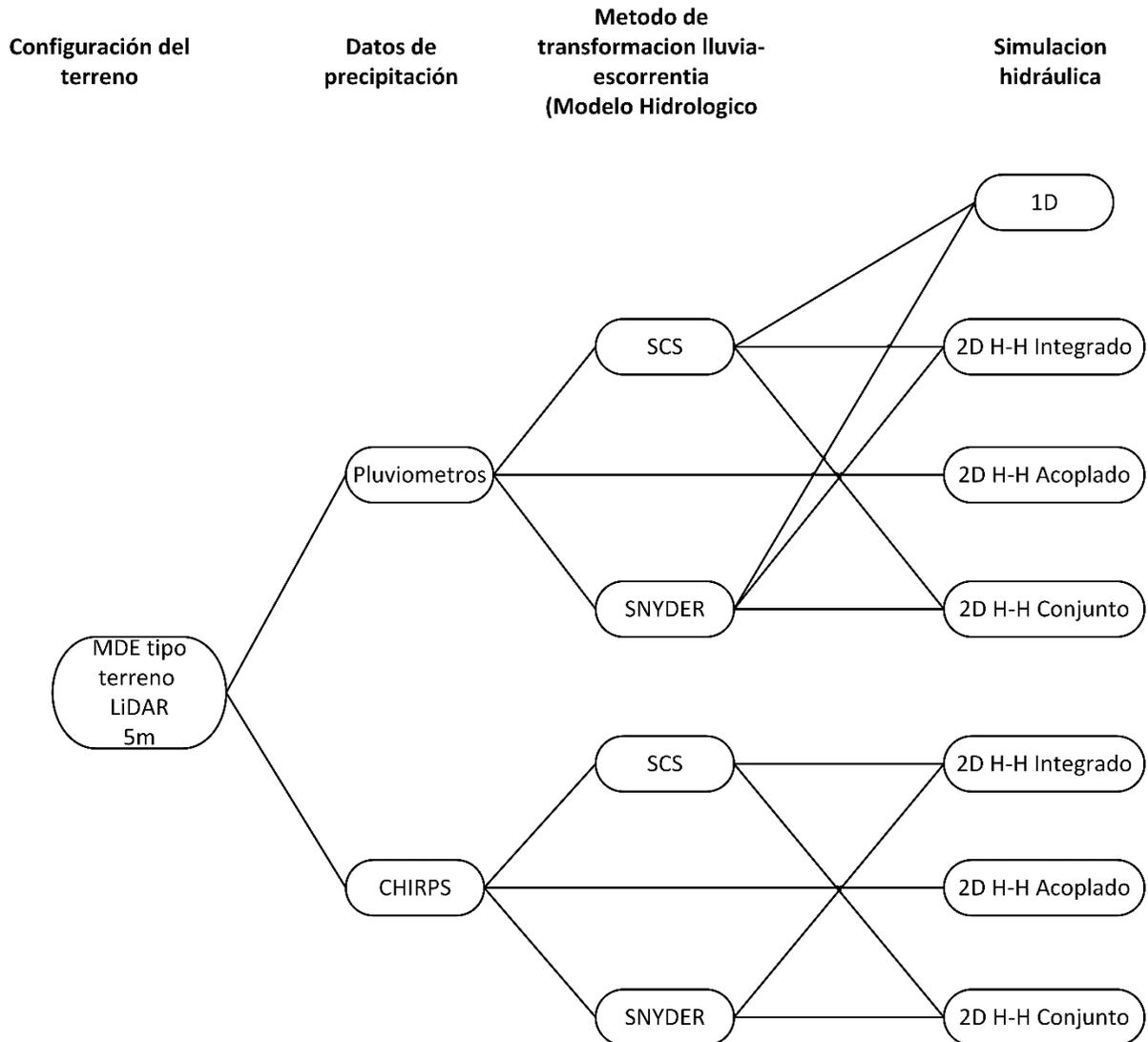


Fig. 13 Flujo de trabajo de la combinación de modelos empleados. Fuente: Elaboración propia.

Cada combinación es validada en su proceso correspondiente con el propósito de reducir la incertidumbre. La combinación de mayor ajuste es la seleccionada para la generación del índice de peligro final. En la tabla 12, se entista las combinaciones resultantes y la nomenclatura asignada según el dato de precipitación, método de transformación lluvia-escorrentía y simulación hidráulica.

Tabla 12. Código de las combinaciones de modelo hidrológico-hidráulico.

Núm.	MODELO H-H
1	P -SCS-1D
2	P -SND-1D
3	P -SCS-2D-H-H A
4	P -SCS-2D-H-H C
5	P -SWE-2D-H-H I
6	P -SND-2D-H-H A
7	P -SND-2D-H-H C
8	C-SCS-2D-H-H A
9	C-SWE-2D-H-H I
10	C-SCS-2D-H-H C
11	C-SND-2D-H-H A
12	C-SND-2D-H-H C

Donde *P* es dato de precipitación por pluviómetro, *C* es dato de precipitación por CHIRPS. *SCS* es método de transformación lluvia a escorrentía SCS-CN, *SND* indica transformación por el hidrograma de Snyder *SND*. *SWE* significa que el modelo de inundación se resolvió por las ecuaciones para aguas poco profundas en HEC-RAS. *A* es la combinación del modelo hidrológico-hidráulico acoplado, *I* es la combinación del modelo hidrológico-hidráulico Integrado y *C* es la combinación del modelo hidrológico-hidráulico conjunto (acoplado e integrado). En este sentido, la combinación 5 *P -SWE-2D-H-H I* no se realizará al no contar con el suficiente número de pluviómetros que garantice una interpolación homogénea en el área de estudio.

4.4.9. Validación

Se validó los resultados de cada proceso, es decir, interpolación de la serie histórica de precipitación, análisis de frecuencia y periodo de retorno, calidad de los datos CHIRPS, los hidrogramas resultantes de los modelos hidrológicos, y las manchas de inundación resultantes de la simulación hidráulica.

La interpolación de datos de precipitación se evaluó por pruebas de independencia de Anderson y homogeneidad de Helmet, t-student y Cramer. Las distribuciones teóricas para el análisis de periodo de retorno se evaluaron por las pruebas de X^2 y Kolmogorov-Smirnov. En cambio, la calidad de los datos CHIPS se evaluó por las R^2 , error típico, RMSE, y BIAS (Escalante Sandoval & Reyes Chávez, 2002).

Los hidrogramas resultantes de los modelos hidrológicos, se validaron con el punto de aforo ubicado en el puente negro, y se analizaron con las métricas, NSE, R^2 y PBIAS. Las métricas de rendimiento y valores esperados se muestran en la tabla 13.

Tabla 13. Métricas del rendimiento de los modelos hidrológicos. Fuente: (Rocha et al., 2023).

Calificación del rendimiento	NSE	R ²	PBIAS
Muy bueno	0.65 < NSE < 1.0	0.65 < R ² < 1.0	PBIAS < ± 15
Bueno	0.55 < NSE < 0.65	0.55 < R ² < 0.65	±15 < PBIAS < ±20
Satisfactorio	0.40 < NSE < 0.55	0.40 < R ² < 0.55	±20 < PBIAS < ±30
insatisfactorio	NSE ≤ 0.40	R ² ≤ 0.40	PBIAS ≥ ±30

La simulación hidráulica se validó a partir de la comparación con imagen de radar del sensor sentinel-1 evaluado por kappa (tabla 14) y F⁽²⁾. Además, se comparó las extensiones de la mancha de inundación de los modelos respecto con zonas de inundación publicadas por el atlas de riesgo de Culiacán (GEOLMEX - Geología y Servicios de Ingeniería, 2020) y también evidencia fotográfica tomada durante los eventos de la DT 19-E.

Tabla 14. Valoración del coeficiente kappa. Fuente (Cerdeira Lorca & Villarroel Del P., 2008).

Coefficiente kappa	Fuerza de concordancia
0	Pobre
0.01 – 0.20	Leve
0.21 – 0.40	Aceptable
0.41 - 0.60	Moderada
0.61 – 0.80	Considerable
0.81 – 1.00	Casi perfecta

4.4.10. Índice de Peligro de inundación

El nivel de peligro que produce un evento de inundación está directamente relacionado con la altura de calado (d) y la velocidad (\vec{v}) del flujo resultante. En la figura 14 se muestra un diagrama de resistencia al vuelco, que resume el comportamiento del agua a diferentes alturas de calado y velocidad de inundación y la capacidad de ésta en generar diferentes niveles de daños.

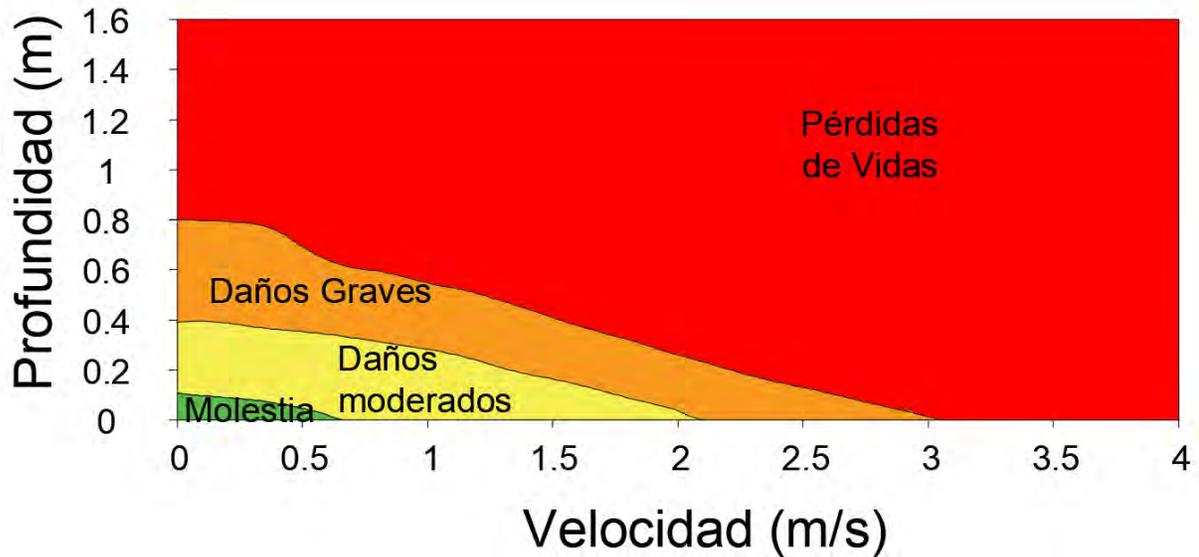


Fig. 14 Daños asociados de una inundación en función de la relación entre la profundidad y velocidad del flujo. Fuente: (Cardona Orozco et al., 2007).

El índice de peligro (HR por sus siglas en inglés) se obtiene de la ecuación (32), en la cual relaciona la velocidad máxima y la altura de calado máxima obtenida de la simulación hidráulica.

$$HR = d(\vec{v} + 0.5) + DF \quad (32)$$

Donde HR es el índice de inundación, d es la profundidad del agua, \vec{v} es la velocidad de corriente del flujo y DF es el coeficiente adimensional que está en relación con la cobertura de suelo inundado y la altura de calado que se muestra en la tabla 15.

Tabla 15. Coeficiente DF para el cálculo del índice de peligro

Calado (d)	Cultivo	Bosque	Urbano
0.0 - 0.25 m	0	0	0
0.25 – 0.75 m	0	0.5	1
$d > 0.75$	0.5	1	1

En este sentido, el HR toma valores que van de 0 a > 2.5 , en el cual, entre menor será el HR representa mayor seguridad para la población de volcadura o arraste del flujo, en la tabla 16, se resume los valores de HR, la descripción y nivel de peligrosidad asociado. Valores de HR por encima de 0.75 sugiere preligro para transeúntes, con dificultad para caminar y mantener el equilibrio como lo son las infancias y adultos mayores, mientras que $1.5 < HR < 2.5$ indica peligro potencial para toda la población, ya sea por la profundidad de la altura de calado, como la velocidad del flujo que llega a transitar por las calles.

Tabla 16. Índice de peligro (HR) y descripción por nivel.

Valor de HR	Descripción	Nivel de peligrosidad
0	Seguridad	Ninguno
0 – 0.75	Precaución	Bajo
0.75 – 1.50	Peligro para algunos (niños y adultos mayores)	Moderado
1.50 – 2.50	Peligro para la mayoría de la gente	Significativo
> 2.5	Peligroso para todos	Extremo

CAPITULO V: RESULTADOS Y DISCUSIONES

La modelación geoespacial de inundaciones se ofrece como una medida de control, para mitigar los daños que ésta pueda generar a la población. En la actualidad existen diversas métodos y enfoques de realizar estos modelos. Sin embargo, todo depende de la cantidad y calidad de datos que se tenga para ingresar. En este sentido, el desarrollar y evaluar distintas metodologías que permitan simular inundaciones es una manera de garantizar el mejor camino metodológico para dicho fin, sobre todo en aquellas cuencas no aforadas, o regiones donde no se cuente con insumos suficientes para emplear otros métodos. A continuación se presentan y discuten los resultados obtenidos

5.1. Delimitación del parteaguas

A raíz de la discrepancia en la delimitación del parteaguas de la cuenca río Culiacán por INEGI y CONAGUA como se muestra en la figura 4, donde no coinciden las líneas divisorias de la misma cuenca en cuestión, que tal como lo dice (Rentería-Guevara et al., 2019).

La delimitación y subdivisión de la cuenca realizada por INEGI es morfológica y topográficamente correcta en su parte alta, sin embargo, en la parte baja (y área de estudio), omite el principal concepto de cuenca hidrográfica, el cual dice que una cuenca es *una región donde todos los escurrimientos escurren hacia un mismo punto de desfogue* (Laura Madery, 2005; Mora, 1989; Rosas, 2009; Villalobos et al., 2004), el cual no se cumple al contemplar otros escurrimientos dentro de la misma subcuenca del río Culiacán.

En cambio, la delimitación realizada por CONAGUA, su delimitación y subdivisión de subcuencas obedece las necesidades de distribución del agua a los distritos de riego (Rentería-Guevara et al., 2019). En ambos casos, surge el inconveniente de que la zona urbana de Culiacán no presenta escurrimientos en la misma cuenca hidrográfica, por lo que nació la necesidad de establecer la delimitación del parteaguas de la cuenca, ubicando el punto de aforo de manera que cubra la zona urbana.

Se creó un mosaico con las 163 escenas de DEM LiDAR 1: 10 000, que posteriormente se empleó para la delimitación de cuencas en arcgis, por medio del módulo de HEC-geoHMS. En la figura 15, se muestra la delimitación de la cuenca desde las cortinas de las presas ubicadas en los ríos Tamazula y Humaya.

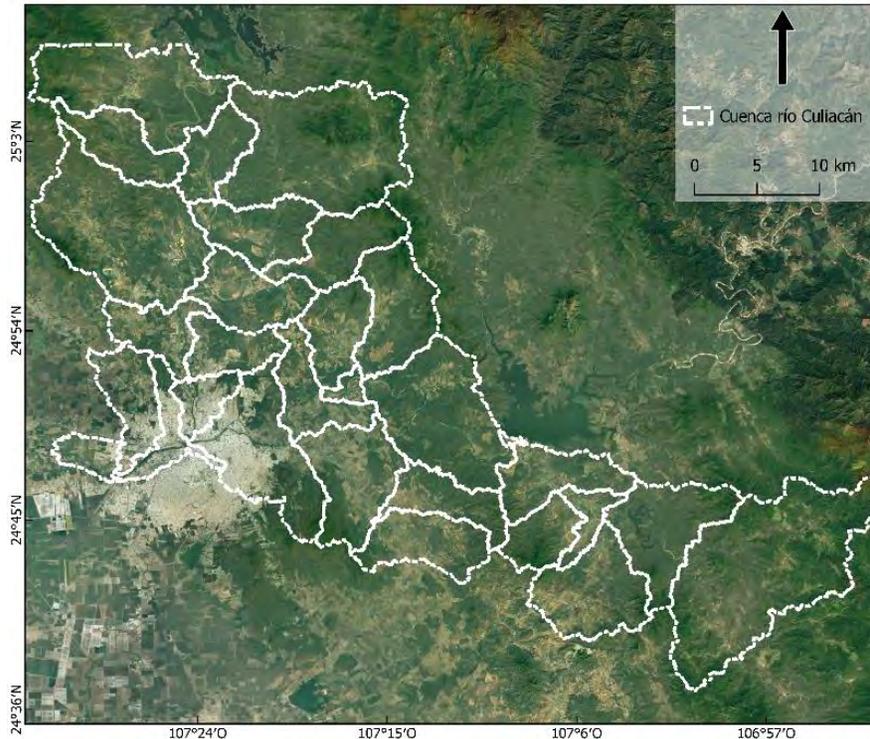


Fig. 15 cuenca río Culiacán delimitada por HEC- geoHMS.

El punto de desfogue final se situó en la zona conurbana Culiacán-Navolato. El objetivo de localizarlo en ese lugar y no hasta la desembocadura se deriva en la deficiencia que presenta la delimitación automática de cuencas, tanto por geo-HMS como por el módulo de ArcHidroTools de arcGIS. Este inconveniente se asume a la resolución espacial del DEM deficiente para delimitar diferencia de alturas en llanuras. Sin embargo, para la aplicación de la metodología, la delimitación de la cuenca en la salida de la zona urbana resulta suficiente.

5.2. Pre-procesamiento de la serie histórica de datos de precipitación

Se obtuvieron datos de 20 estaciones pluviométricas distribuidas en la cuenca del río Culiacán con registros diarios en el periodo de 1944 al 2018, proporcionado por medio de la ventana única de atención de CONAGUA. Sin embargo, esos datos no cuentan con registros completos y homogéneos que permitan realizar el análisis hidrológico para la simulación de inundaciones. Por lo que a continuación se muestran los resultados del pre-procesamiento realizado para garantizar la calidad de los datos empleados.

5.2.1. Datos pluviométricos

Se seleccionó el periodo donde la mayoría de las estaciones tuvieran registros, a partir del análisis de máximos. El periodo seleccionado fue de 1999 al 2018, dando un periodo de 20 años de registros, que, si bien en la bibliografía se indica que para estudios hidrológicos se

requiere un mínimo de 25 años (Mora, 1989; Sánchez, 2016; Villón Béjar, 2004), la calidad de la información no era la adecuada para garantizar el correcto análisis. Por tanto, se procedió a utilizar el periodo más óptimo. Se seleccionaron aquellas estaciones que presentaran menos del 30% de datos faltantes. Con lo anterior quedaron seleccionadas 13 estaciones con registros diarios entre el 1 de enero de 1999 al 31 de diciembre de 2018.

Posteriormente se evaluaron las estaciones, creando regiones homogéneas, para determinar aquellas estaciones con comportamiento similar, además de realizar las primeras pruebas de homogeneidad e independencia a las estaciones antes del relleno de datos faltantes, en la tabla 17 se presentan los resultados de las evaluaciones. Las trece estaciones presentan independencia y homogeneidad excepto por la prueba de Helmert.

Se establecieron 4 regiones homogéneas empleando el método de momentos-L, sin embargo, la calidad de los datos de las estaciones no es lo suficientemente buena como para establecer cuatro regiones y rellenar datos faltantes para las 4 regiones, por lo que se sólo se establecieron sólo 2 regiones homogéneas de manera que se tuvieran registros de al menos 2 estaciones, para realizar el relleno de los datos faltantes de las demás. En la figura 16 se presenta la gráfica en la cual se delimitan las regiones homogéneas por el método de momentos-L de manera de solo establecer dos regiones.

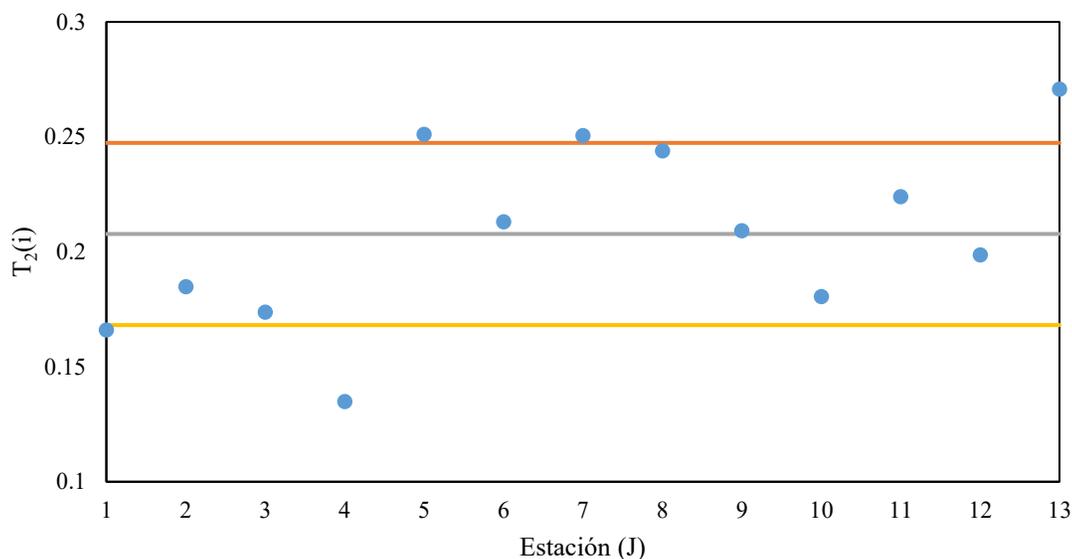


Fig. 16 Regiones homogéneas

Tabla 17 prueba de homogeneidad antes del relleno de precipitación de las 13 estaciones.

J	Clave	Nombre	T2(i)	Región	Mann-Kendall	Helmert	T-Student	Cramer	Anderson
1	25015	CULIACÁN (DGE)	0.166	1	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
2	25033	EL VAREJONAL	0.185	2	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
3	25081	SANALONA II	0.174	2	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
4	25102	ESCUELA DE BIOLOGÍA U.A.S.	0.135	1	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
5	25121	VINORAMAS	0.251	4	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
6	25171	NAVOLATO	0.213	3	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
7	25110	BADIRAGUATO (DGE)	0.251	4	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
8	10003	CANELAS	0.244	3	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
9	10050	EL OJITO DE CAMELLONES	0.209	3	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
10	25041	GUATENIPA	0.180	2	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
11	10037	LA HUERTA	0.224	3	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
12	25093	SURUTATO	0.199	2	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
13	10082	TAMAZULA DE VICTORIA	0.271	4	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente

Las regiones homogéneas quedaron Región 1: 20115-Culiacan (DGE), 25033-El Varejonal, 25081-Sanalona II, 25102-Escuela de Biología (UAS), 25041-Guatenipa, 25096-Surutato. Mientras que en la Región 2: 25121-Vinoramas, 25171-Navolato, 25110-Badiraguato (DGE), 10003-Canelas, 10050-El Ojito de Camellones, 10037-La Huerta, 10082-Tamazula de Victoria. En la figura 17, se muestra la ubicación espacial de las estaciones, donde se puede observar que las estaciones de una misma región homogénea están compuestas por su comportamiento, y que, además, coincide con su ubicación espacial.

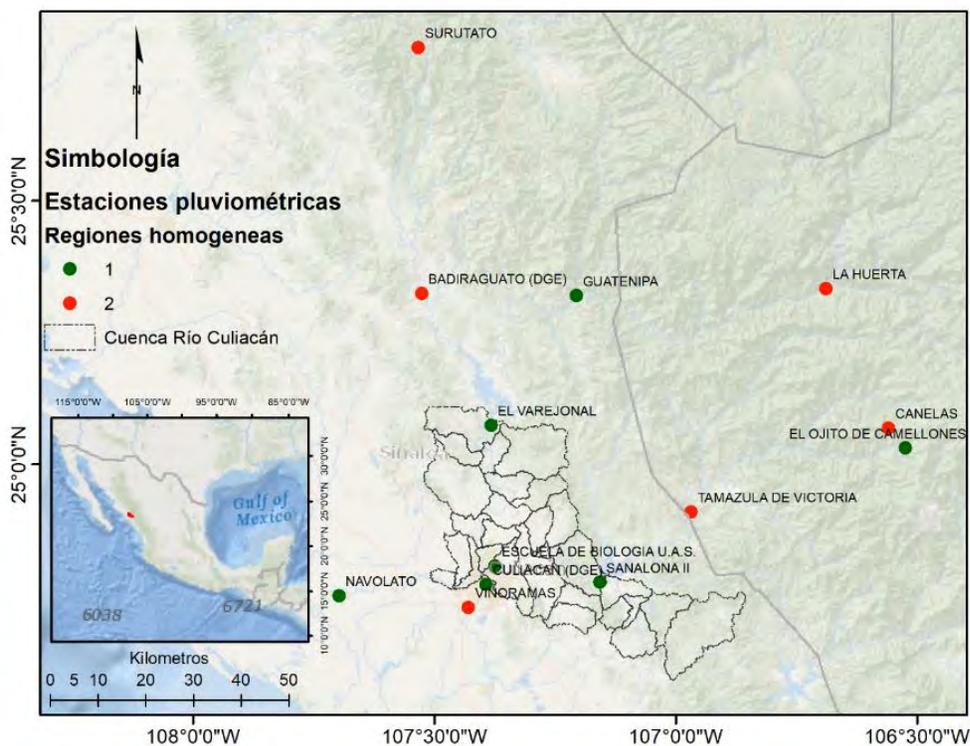


Fig. 17 Ubicación de las estaciones pluviométricas, y región homogénea.

La figura 18 muestra el comportamiento temporal de la precipitación a partir de las series temporales rellenas por el método de inversa de la distancia.

Se rellenaron las trece series temporales, con la cual se presenta una estación de lluvia, la cual coincide con el clima de la región. Además, se observa la presencia de estaciones de sequías ocurridas en 2002, 2011, 2012, 2014. Y, por otro lado, se muestra seis eventos de precipitación superior a los 150 mm, en 2013 se muestra el evento de mayor precipitación de la serie temporal, el cual corresponde al Huracán Manuel, el cual generó 412 mm acumulados, según los reportes (Cirilo & Lujano, 2013), que coincide con picos en las estaciones Culiacan (DGE), Culiacán (OBS), Navolato, Sanalona y el Varejonal.

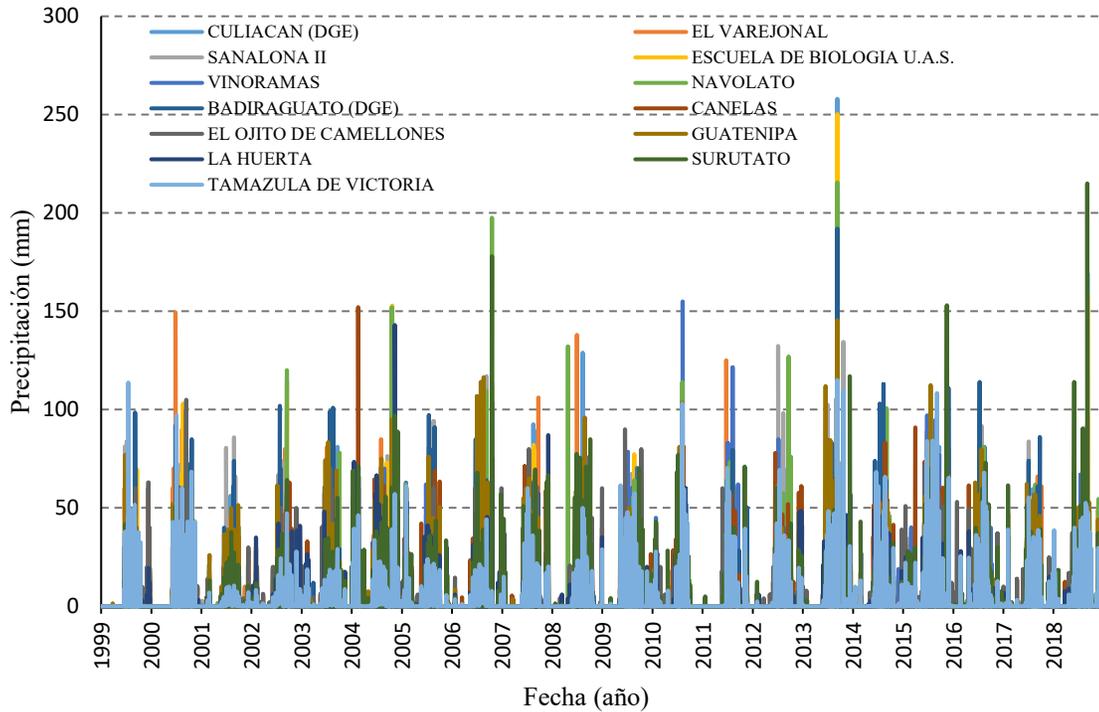


Fig. 18 serie temporal de datos rellenos de estaciones pluviométricas

Mientras que, en 2018, se encuentra el segundo evento de mayor precipitación, la depresión tropical 19-E (Mancera-González, 2021), un evento devastador que tocó en la ciudad de Culiacán. La particularidad de este evento, consistió en ser un evento de rápida formación en el pacífico, que además se mantuvo estacionado, provocando el colapso del sistema de drenaje de la ciudad y provocando inundaciones que no hubo tiempo de generar los planes de acción de contingencia y prevención.

Por otro lado, se volvió a analizar homogeneidad e independencia a las series temporales rellenas. En la tabla 18 se observa cómo las series se comportan de manera homogénea en todas pruebas, con excepción de la estación Vinoramas que en la prueba de Cramer salió como no homogénea. Mientras que, en la prueba de independencia, las estaciones se conservaron como estaciones independientes.

Tabla 18 Pruebas de homogeneidad e independencia de las estaciones

J	Clave	Nombre	Región	Mann-Kendall	Helmert	T-Student	Cramer	Anderson
1	25015	CULIACÁN (DGE)	1	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
2	25033	EL VAREJONAL	1	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
3	25081	SANALONA II	1	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
4	25102	ESCUELA DE BIOLOGÍA U.A.S.	1	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
5	25121	VINORAMAS	2	Homogénea	Homogénea	Homogénea	No homogénea	Independiente
6	25171	NAVOLATO	2	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
7	25110	BADIRAGUATO (DGE)	2	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
8	10003	CANELAS	2	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
9	10050	EL OJITO DE CAMELONES	2	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
10	25041	GUATENIPA	1	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
11	10037	LA HUERTA	2	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
12	25093	SURUTATO	1	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
13	10082	TAMAZULA DE VICTORIA	2	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente

5.2.1.1. Análisis de frecuencia para modelo hidrológico concentrado

Una vez que las series temporales se encontraron completas, homogéneas e independientes, se evaluaron las distribuciones teóricas a las cuales se ajustaban con la herramienta Hydrognomon. Se evaluó el ajuste de las distribuciones por la prueba Kolmogorov-Smirnov y se seleccionó la distribución con mayor ajuste de manera independiente para cada estación. En la tabla 19 se muestran los valores correspondientes a los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años, de cada estación respecto a la distribución teórica de mejor ajuste.

Tabla 19 Distribuciones teóricas de ajuste y periodos de retorno calculados

Estación	Distribución teórica	Tr2	Tr5	Tr10	Tr25	Tr50	Tr100
BADIRAGUATO	Gamma	83.8382	115.731	135.168	158.082	174.117	189.383
CANELAS	EV1-Max (Gumbel)	63.5651	194.693	105.813	127.076	142.851	158.509
CULIACÁN DGE	GEV-Max (L-Moments)	71.0787	104.897	138.885	201.971	269.579	361.532
EL OJITO DE CAMELLONES	Normal	59.995	76.0685	84.4703	93.43	99.2179	104.424
EL VAREJONAL	Gamma	89.7296	121.39	140.51	162.928	178.553	193.388
ESCUELA DE BIOLOGÍA	EV2-Max	74.3911	105.658	133.289	178.76	222.249	275.873
GUATENIPA	Pareto (L-Moments)	74.0883	101.378	118.178	136.286	147.433	156.776
LA HUERTA	EV1-Max (Gumbel, L- Moments)	45.6257	69.8575	85.901	106.172	121.21	136.138
NAVOLATO	Exponential	84.54	127.868	160.645	203.973	236.75	269.526
SANALONA II	EV1-Max (Gumbel, L- Moments)	83.8918	111.641	130.013	153.227	170.448	187.542
SURUTATO	GEV-Max (L-Moments)	67.6265	102.921	135.252	190.269	244.585	313.415
TAMAZULA DE VICTORIA	EV1-Max (Gumbel, L- Moments)	62.3052	87.9923	104.999	126.488	142.429	158.253
VINORAMAS	Normal	76.55	101.78	114.969	129.032	138.118	146.29

La tabla 19 presenta las distribuciones de mejor ajuste respecto al prueba Kolmogorov-Smirnov. Las precipitaciones para el periodo de retorno de 2 años, oscilan entre los 45 y 89 mm, mientras que, para el periodo de retorno de 100 años, las precipitación máximas oscilan entre los 104 y 313 mm.

Así mismo, se crearon polígonos de Thiessen de las estaciones con relleno de datos para determinar aquellas con injerencia en la cuenca del río Culiacán. Las estaciones con influencia son El Varejonal, Sanalona II, Escuela de Biología, Culiacán (DGE), Vinoramas. En la figura 20 se observa la ubicación de cada una y el área de la cuenca que tiene influencia de la precipitación.

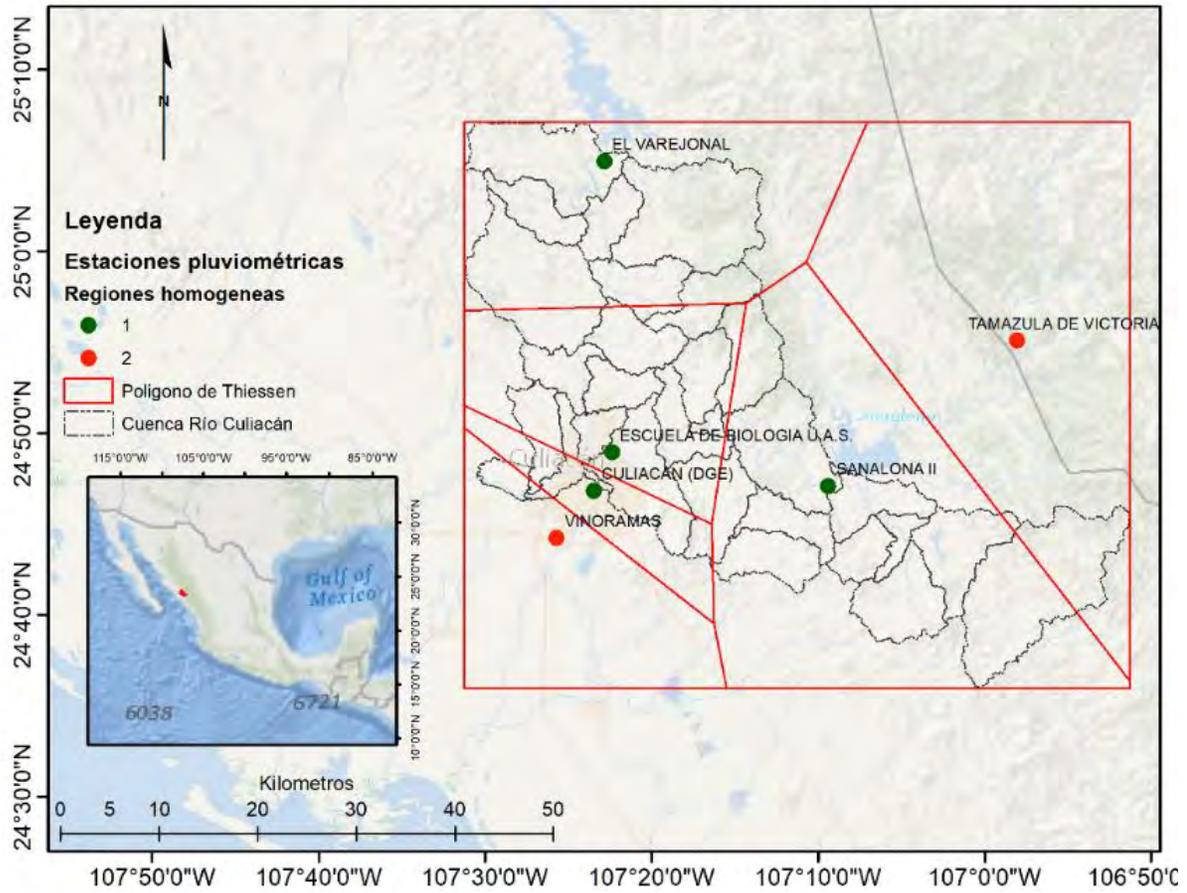


Fig. 19 Pluviómetros de influencia por subcuenca delimitados por polígonos de Thiessen.

5.2.1.2. Serie temporal para modelo hidrológico distribuido

En el modelo hidrológico semidistribuido por Hec-HMS, se emplearon los valores de precipitación diarios desde 1 de enero 1980 al 31 de diciembre de 2018 de las series temporales de los pluviómetros. Con ayuda de polígonos de Thiessen se estableció las subcuencas de influencia para cada estación como se observa en la figura 19. Mientras que en la figura 20, presenta las precipitaciones diarias desde 1980 al 2018, que se emplearon para la modelación hidrológica.

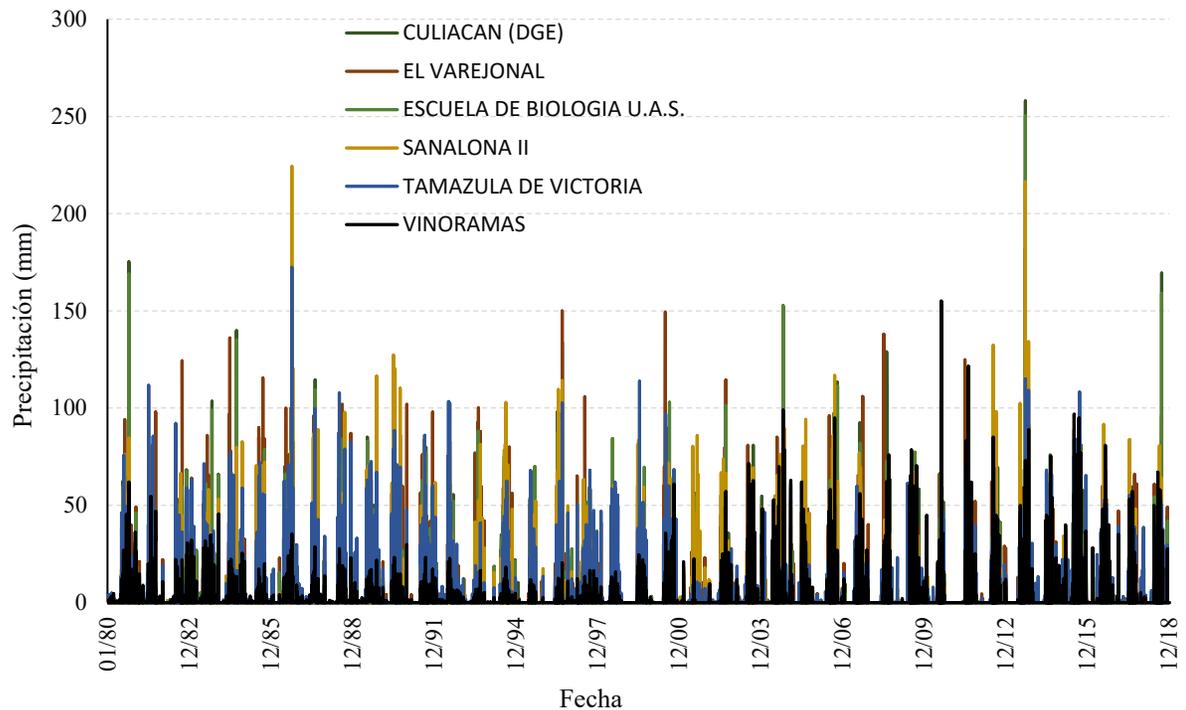


Fig. 20 pluviómetros de influencia para las sub cuencas hms por polígonos de thiesen

Aun con el aumento de la extensión de la serie temporal, el 2013, continúa presentándose como el evento de mayor precipitación correspondencia al evento de huracán Manuel, el cual fue devastador para el estado de Sinaloa.

5.2.2. Malla de precipitación satelital de datos CHIRPS

Se emplearon los productos CHIRPS en formato NDF, en particular los años que coinciden con las series temporales anteriores, es decir, de 1980 al 2023. En la figura 20 se muestra un ejemplo de la malla de precipitación para el año 2018, con la ubicación de las estaciones pluviométricas utilizadas anteriormente.

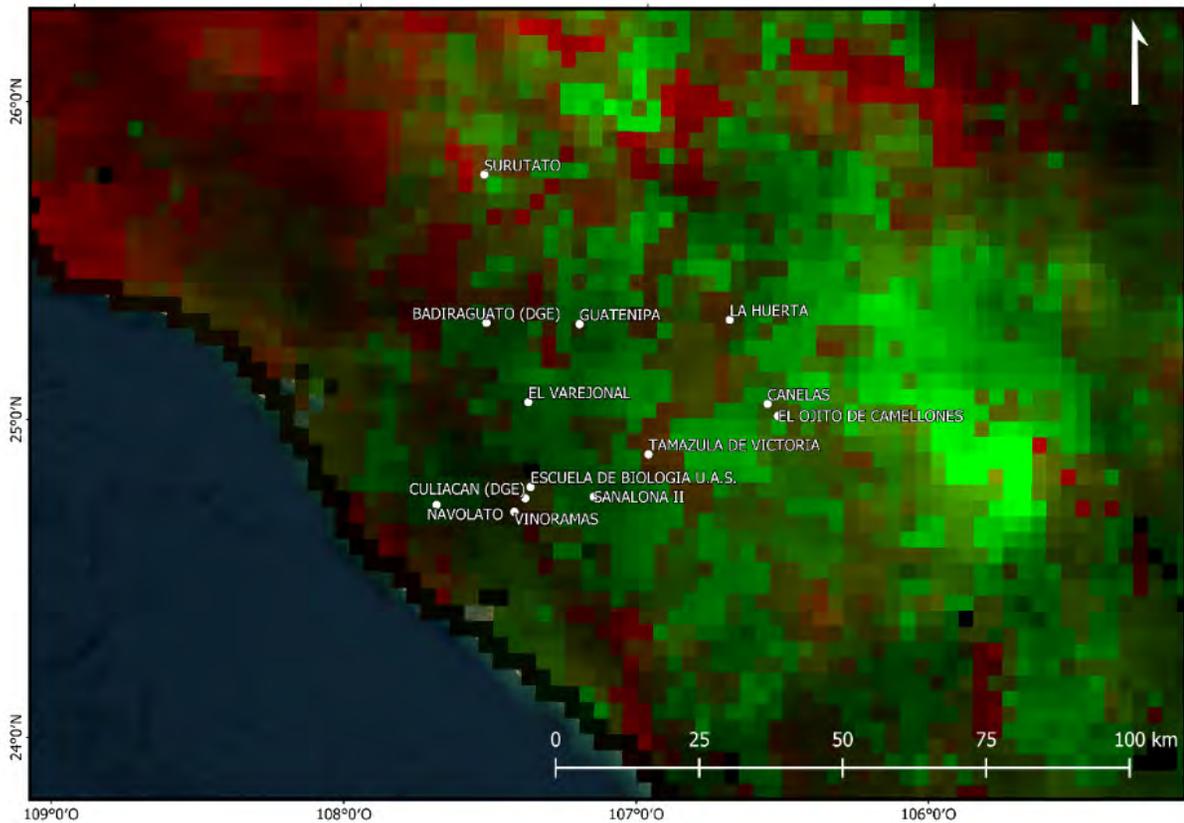


Fig. 21 malla de precipitación CHIRPS del año 2017 y la ubicación de las estaciones empleadas en el proyecto.

Se extrajeron el valor de precipitación diaria para cada pixel en cada una de las subcuencas HMS, calculando posteriormente el promedio aritmético espacial de la precipitación diaria para cada sub cuenca HMS. Posteriormente se compararon los valores de los CHIRPS con la de los pluviómetros (figura 23) y evaluaron por las métricas estadísticas de error típico, RMSE, NSE, R^2 , BIAS y PBIAS, este último además evalúa si las dos series tienen comportamiento satisfactorio (<10 o <-10) o insatisfactorio (>10 , o > -10), si tiende a la sobreestimación (signo -) o subestimación (signo +).

En la tabla 20 se muestra que la evaluación de la precipitación estimada por CHIRPS si bien presenta magnitudes pequeñas en RMS, NSE y BIAS, la correlación entre ambas series temporales es muy vana (< 0.4), mientras que en PBIAS, CHIPS presenta representaciones satisfactorias en relación con los pluviómetros *in situ* para las estaciones Culiacán (DGE), Escuela de Biología UAS, Badiraguato (DGE), Guatenipa y Tamazula de Victoria.

Sin embargo, presentan sub-estimación en la mayoría de las trece estaciones analizadas con excepción en las estaciones La Huerta y Tamazula de Victoria, mismo comportamiento que se puede observar en la figura 23.

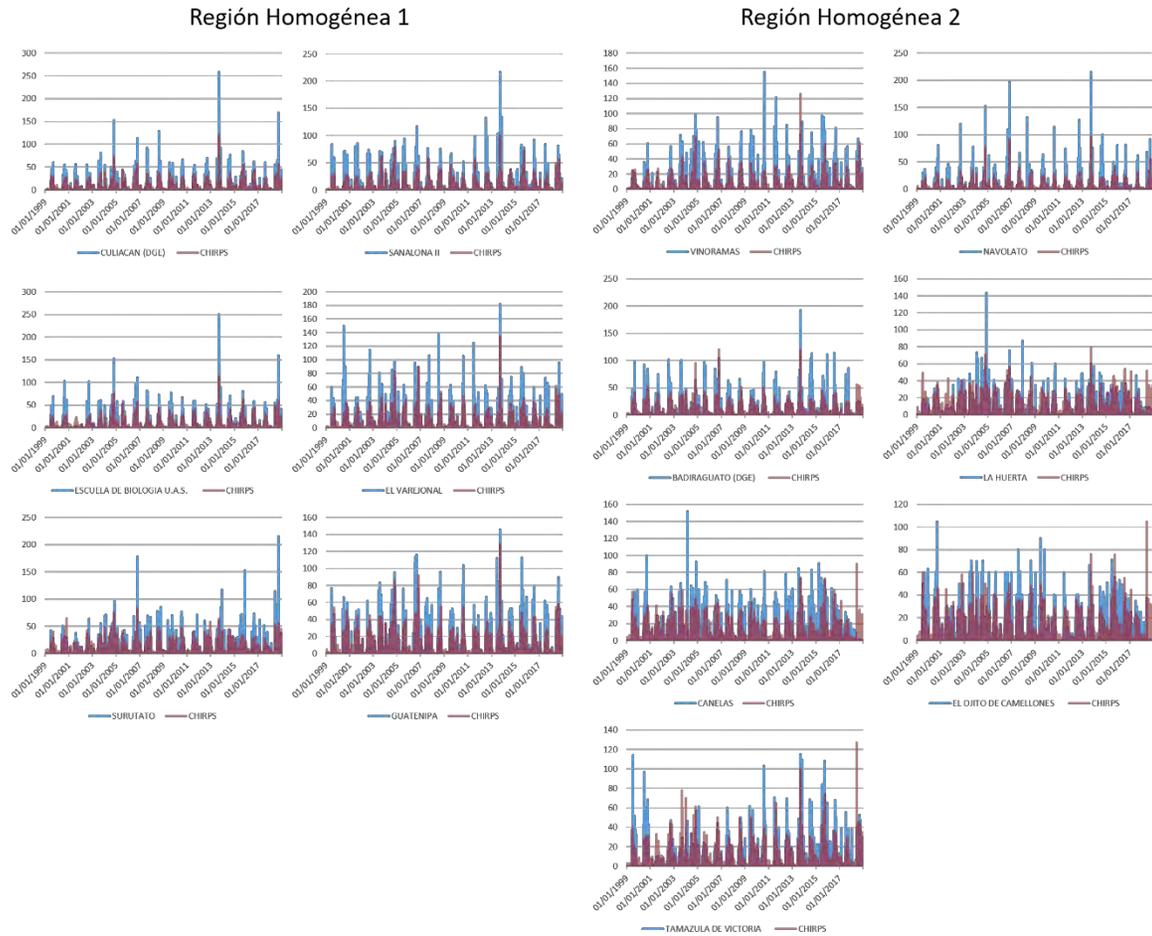


Fig. 22 Comparación de precipitación en las estaciones y la información de CHIRPS v2.0

Aquí surge una interrogante, la cual pone en duda qué característica será la de mayor importancia en la metodología de simulación geoespacial de inundaciones: los valores in situ, los cuales pueden no reflejar correctamente un evento de precipitación, o emplear datos de precipitación satelital, que reportan ser inferiores a los pluviómetros, pero que, en comparación a estos, presentan distribución espacial de la precipitación, los cuales llevan a resultados diferentes en el modelado hidrológico, ya que en lugar de emplear los valores de precipitación de una misma estación para más de una sub cuenca, cada subcuenca presenta su propia precipitación registrada por área.

Tabla 20 Evaluación de la precipitación estimada (CHIRPS) con la precipitación observada por estación

ESTACIÓN	ERROR TÍPICO	RMSE	NSE	R ²	BIAS		PBIAS	
CULIACÁN (DGE)	4.69	8.01	0.17	0.19	0.2	9.51	Muy buenos	Subestimación
SANALONA II	5.13	9.13	0.08	0.13	0.18	18.49	Insatisfactorios	Subestimación
ESCUELA DE BIOLOGÍA U.A.S.	4.27	6.75	0.37	0.37	0.22	0.74	Muy buenos	Subestimación
VINORAMAS	4.59	8.1	0.02	0.1	0.17	21.99	Insatisfactorios	Subestimación
NAVOLATO	3.82	7.4	0.18	0.19	0.18	10.41	Insatisfactorios	Subestimación
BADIRAGUATO (DGE)	5.81	8.97	0.08	0.16	0.23	5.81	Muy buenos	Subestimación
EL VAREJONAL	5.23	8.75	0.13	0.17	0.2	12.6	Insatisfactorios	Subestimación
SURUTATO	5.72	9.01	0.06	0.14	0.18	11.4	Insatisfactorios	Subestimación
GUATENIPA	6.29	9.78	-0.03	0.1	0.22	7.78	Muy buenos	Subestimación
LA HUERTA	5.72	6.99	-0.21	0.15	0.27	-32.22	Insatisfactorios	Sobreestimación
CANELAS	6.36	9.67	-0.08	0.09	0.18	18.73	Insatisfactorios	Subestimación
EL OJITO DE CAMELLONES	6.27	8.37	-0.13	0.12	0.19	11.39	Insatisfactorios	Subestimación
TAMAZULA DE VICTORIA	6.24	8.45	-0.12	0.12	0.25	-1.75	Muy buenos	Sobreestimación

Se crearon hidrogramas de paso diario en formato *dss* para cada sub cuenca con el valor promedio espacial y se asignó las precipitaciones diarias como hietograma específico de cada sub cuenca, que posteriormente se ejecutó la simulación hidráulica con las mismas especificaciones técnicas anteriores con las que se ejecutó para los valores pluviométricos.

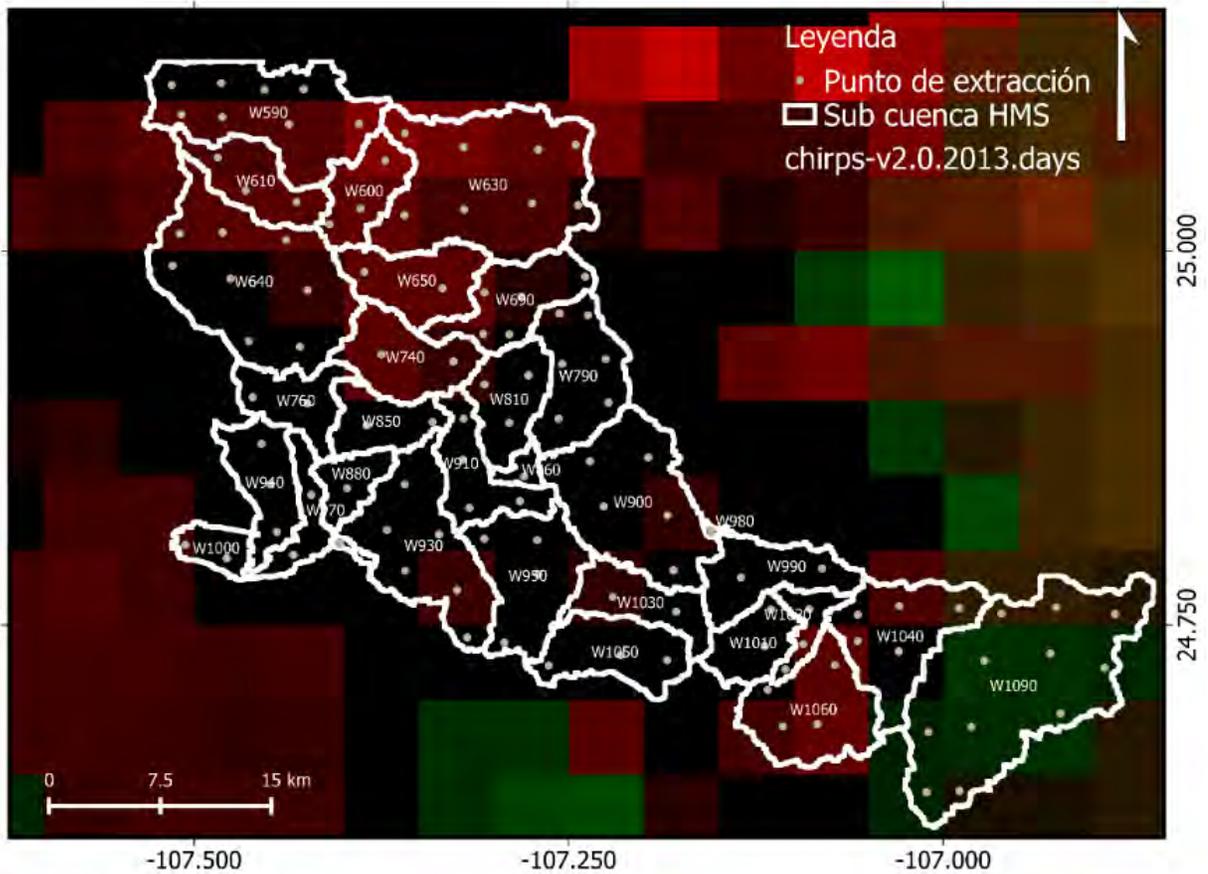


Fig. 23 Puntos de extracción de valores de precipitación para cada pixel de la malla.

5.3. Geomorfología y parámetros de forma de la cuenca

El análisis de geomorfología y parámetros de forma de la cuenca hidrográfica se realizaron en ArcGIS con la extensión de Hec-geoHMS de manera automática siguiendo cada módulo continuo de la extensión en ArcGIS.

Para el cálculo de número de curva se empleó la clasificación de uso de suelo global a partir de imágenes Sentinel de la figura 25 para el 2018 y 2022. Se creó el mapa de grupo hidrológico (figura 26). El cálculo de CN (figura 27) se realizó en Hec-geoRas, donde se obtuvo un ráster con la clasificación para cada sub-cuenca, que posteriormente se vectorizó y la tabla de atributos se ingresó en RStudio para obtener el valor de CN para cada sub-cuenca (anexo 4) siguiendo la ecuación 12.

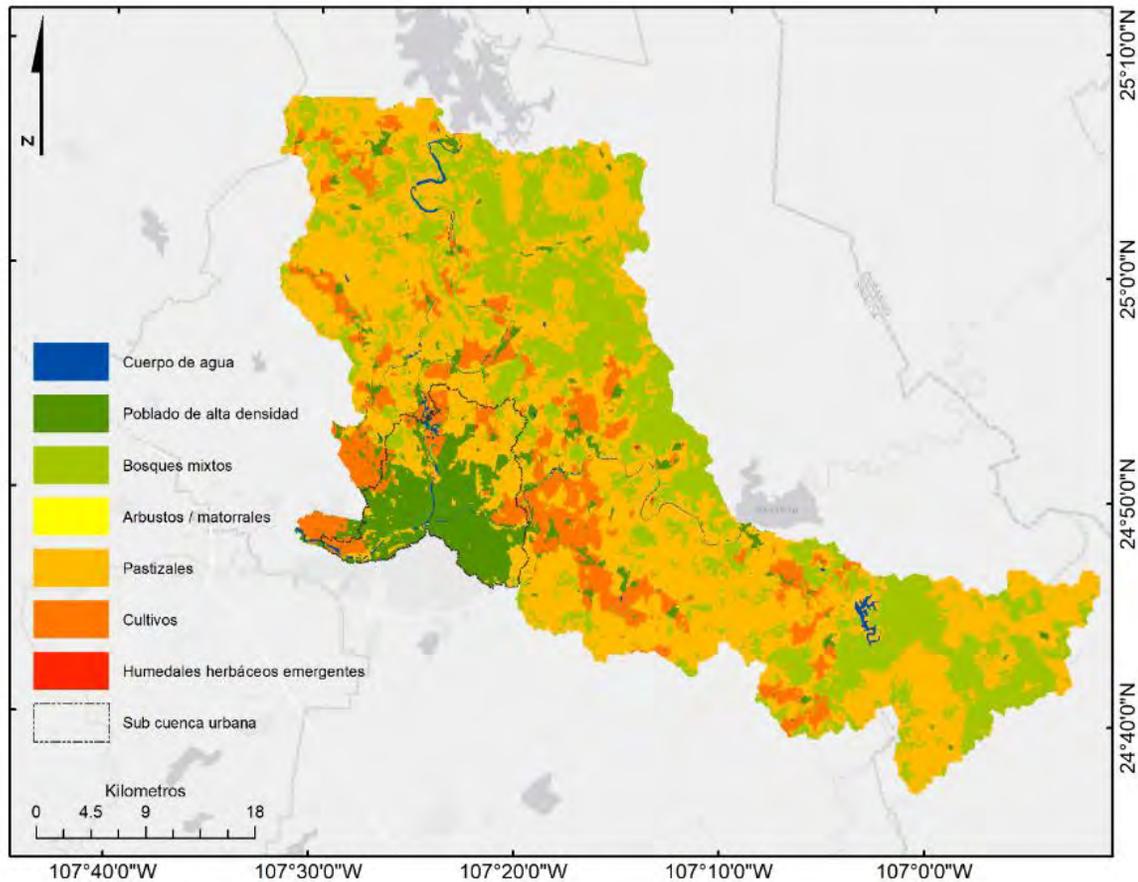


Fig. 24 Uso de suelo Sentinel, año 2022.

La cuenca presenta coberturas suelo diversos, como cuerpos de agua, poblados de alta densidad, bosques mixtos, arbustos, pastizales, cultivos y humedales herbáceos, según la clasificación global de uso de suelo y vegetación de Sentinel (<https://livingatlas.arcgis.com/landcover/>) a partir de imágenes Sentinel. Esta clasificación resulta más detallada espacial y temporalmente en comparación con el uso de suelo y vegetación de INEGI, el cual, en este último presenta sólo una mancha urbana que cubre la ciudad, mientras que en la figura 25 presenta otras coberturas en la zona urbana de Culiacán que corresponden a parques, zonas verdes en las riberas, entre otros.

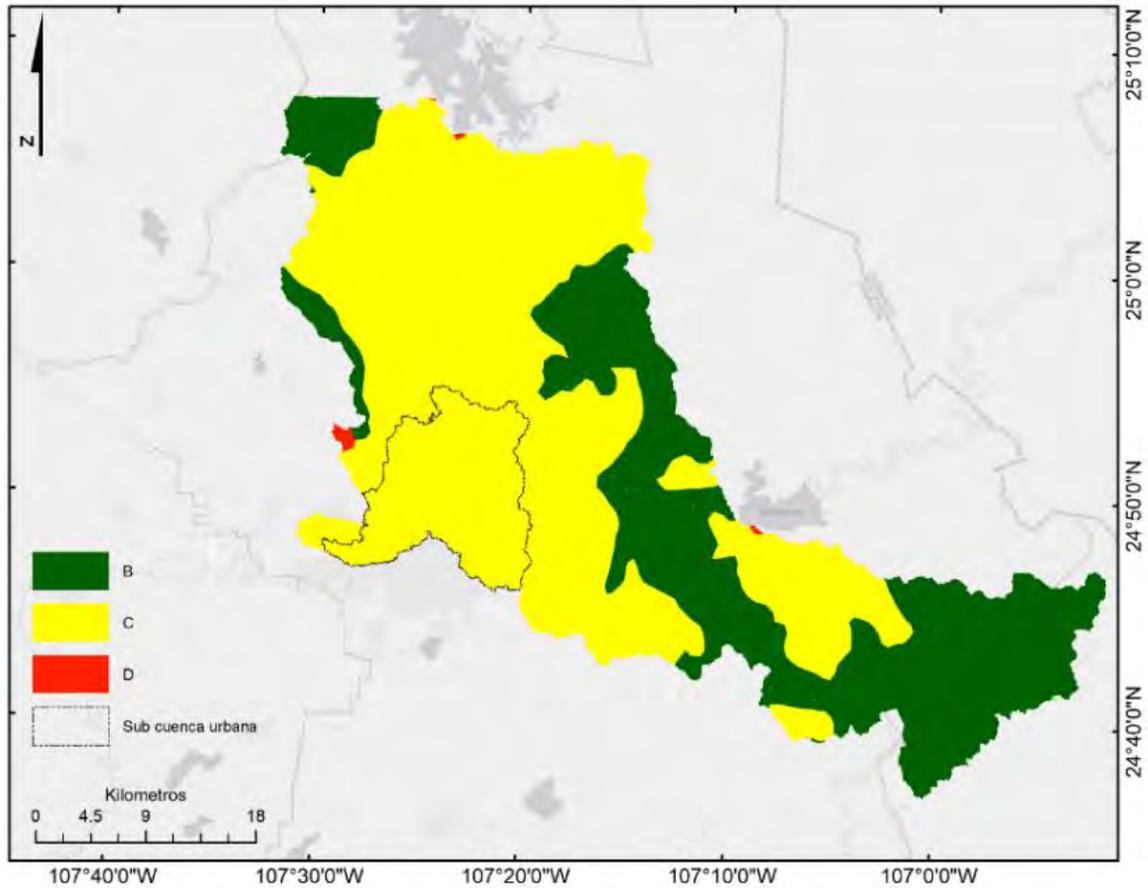


Fig. 25 Grupo hidrológico a partir de mapas edafológicos y geológicos nacionales.

En general, la cuenca presenta el grupo hidrológico C, B y en menor extensión D. la totalidad de la zona urbana se cataloga como grupo C, por la presencia de suelos geológicos regosoles, litosoles, feozem haplico, vertisol pelico, que otorgan una textura media y fina al suelo, lo que se traduce en una deficiencia del suelo en filtrar y percolar la lluvia, dejando láminas de agua en la superficie, es decir, inundación.

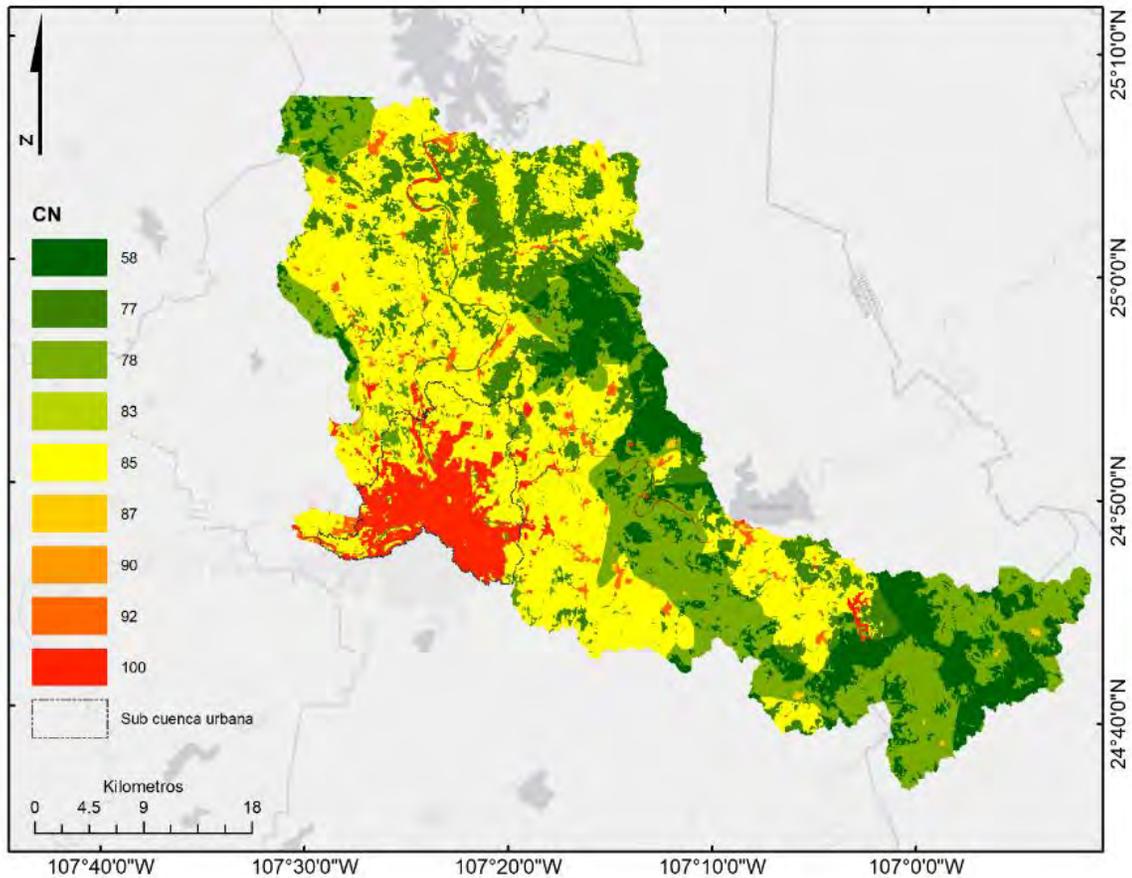


Fig. 26 Coeficiente de número de curva

En el área urbana de la cuenca, el número de curva es 100, es decir, todo el volumen de agua que cae al suelo, se convierte en lámina de escorrentía, lo cual puede atribuirse a que el suelo está cubierto por cemento y asfalto, es decir, materiales impermeables, que no dejan que el agua se infiltre y llegue a mantos subterráneos, sino que inmediatamente se crea la lámina de agua y la inundación resultante al evento de lluvia.

Naturalmente, en cambio, las zonas alejadas a la ciudad, el número de curva desciende y oscila entre 58 y 92, siendo de menor magnitud en la zona alta cerca de la serranía y los valores medios y altos se localizan justo en las zonas que coinciden con usos de suelo de cultivos y pastizales, en la tabla 21 se resume los valores de CN de cada subcuenca.

5.3.1. Tiempo de concentración

El tiempo de concentración se obtuvo para cada subcuenca, la cual se resume en la tabla 21. El Tc, se calculó de manera automática con el módulo GeoHMS. Los tiempos de concentración de las subcuencas oscilaron entre 0.5 y 2.3 horas con el tc promedio entre las subcuencas es de 1.3 horas. El tiempo de retraso, o lag time, es el 60 por ciento del Tc.

Tabla 21 tiempo de concentración y CN para cada sub cuenca HMS

Sub cuenca	BasinLag	BasinSlope	BasinCN	Tc	Area Ha
W630	0.912983	9.816822	90.49004	1.521638	10.174675
W650	0.77265	11.420824	85.123422	1.28775	8.912625
W660	0.609102	20.55092	88.346393	1.015169	6.1959
W670	1.0449	10.983917	84.27151	1.7415	10.656175
W720	1.145501	9.912923	93.578268	1.909168	11.67025
W730	0.706959	9.881747	92.948639	1.178265	7.164925
W750	1.401209	9.583061	85.98708	2.335348	37.021875
W770	1.598079	14.678366	85.631685	2.663466	58.29565
W780	0.648063	12.18705	95.464969	1.080105	6.57635
W800	1.207476	5.394262	92.587144	2.01246	5.21995
W840	0.683331	3.996908	99.276841	1.138885	5.34675
W850	1.121402	8.042016	88.886678	1.869004	11.204125
W860	0.625459	6.97994	87.719137	1.042432	3.004475
W870	0.334507	11.635924	98.983504	0.557512	3.41525
W880	1.063322	2.770319	92.82013	1.772203	2.719425
W890	0.451151	4.623036	97.76813	0.751919	1.8815
W930	0.573152	8.137261	99.442805	0.955254	9.67055
W940	1.309689	5.696425	85.540099	2.182815	4.53
W960	1.246461	3.743955	96.585973	2.077435	8.03925

Sub cuenca	BasinLag	BasinSlope	BasinCN	Tc	Area Ha
W980	0.563925	8.797425	99.93364	0.939875	4.240175
W990	0.46145	6.464371	94.503923	0.769084	2.074725
W1000	0.756549	10.97325	90.58744	1.260915	6.771525
W1010	0.330538	6.908637	97.040238	0.550896	1.51915
W1050	0.599441	9.010108	99.006458	0.999068	3.531
W1070	1.165729	4.560459	95.250603	1.942881	7.896475
W1090	0.498886	7.558414	99.971034	0.831477	3.491925
W1100	0.431808	9.394921	99.27064	0.719679	5.063325
W1110	0.473799	21.331476	91.40977	0.789665	4.511
W1120	1.127267	3.742554	88.709585	1.878778	4.16655

5.4. Modelo hidrológico

La modelación hidrológica es la clave para la simulación hidráulica de inundaciones. Sin este proceso no se puede obtener los caudales que entran en la ciudad de Culiacán por los afluentes Tamazula y Humaya, esto debido a la falta de aforos de estos cuerpos de agua a lo largo de su travesía hacia su desembocadura.

5.4.1. Modelo hidrológico concentrado

Una prueba rápida, fue la ejecución del modelo hidrológico de manera concentrada, la cual permitió obtener los caudales de los afluentes Humaya y Tamazula en distintos periodos de retorno. Para ello se asignaron parámetros únicos para las cuencas de Humaya y Tamazula.

Se asignaron valores de CN (tabla 22) calculado para las cuencas de los ríos Humaya y Tamazula como una unidad, mismos que se emplearon en los procesos de tiempo de concentración e hidrograma unitario sintético.

Tabla 22. Coeficiente de numero de curva calculado.

Humaya	Tamazula
CN = 75.38	CN = 74.95

También, se calculó el tiempo de concentración por los métodos de SCS, T. V. Chow, Kirpich y California. Se eligió al método que estadísticamente se encontró más cerca de la media. En la tabla 24 se muestran los resultados, se eligió el método de SCS, por lo que en la cuenca Humaya se obtuvo un tiempo de concentración de 26.95 horas, mientras que para el Tamazula es de 24.19 horas.

Tabla 23. Resumen del cálculo de tiempo de concentración para

Método	Humaya	Tamazula
Método del SCS	26.95	24.19
T. V. CHOW	30.52	30.43
KIRPICH	19.24	19.16
CALIFORNIA	26.19	32.61
\bar{x}	25.73	26.60

Se resolvieron las ecuaciones del hidrograma unitario sintético por los métodos de SCS, Snyder y Témez para toda la cuenca del río Tamazula y Humaya. En la tabla 25 se muestran los resultados para las cuencas Humaya y Tamazula, mientras que para Culiacán se sumaron los gastos de los dos afluentes para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años.

Tabla 24. Caudales pico para las cuencas Humaya, Tamazula y Culiacán, calculado por los métodos SCS, Snyder y Témez a diferentes periodos de retorno.

Tr	Humaya			Tamazula			Culiacán		
	SCS	Snyder	Témez	SCS	Snyder	Témez	SCS	Snyder	Témez
2	645.7	243.6	1139.0	784.5	387.4	1402.7	1430.2	631	2571.7
5	727.3	274.4	1282.8	968.8	478.4	1732.3	1696.1	752.8	3015.1
10	795.6	300.1	1403.2	1135.4	560.7	2030.2	1931	860.8	3433.4
25	895.4	337.8	1579.3	1398.8	690.8	2501.0	2294.2	1028.6	4080.3
50	978.9	369.3	1726.6	1636.6	808.2	2926.4	2615.5	1177.5	4653
100	1069.9	403.6	1887.2	1913.9	945.2	3422.2	2983.8	1348.8	5309.4

5.4.2. Modelo hidrológico distribuido

El modelo hidrológico semidistribuido, admite calcular de manera integral, los parámetros morfológicos de la cuenca anteriormente calculados y presentados, la cual al encontrarse subdivida en subcuencas permite obtener valores más óptimos de cada subdivisión que a su vez obtener resultados más integrados.

Una vez obtenido las series temporales, se procedió a correr el modelo hidrológico en HEC-HMS con los métodos de transformación SCS-CN y Snyder, con el propósito de comparar los resultados con los primeros resultados obtenidos.

El análisis de ríos se transformó por el método de Muskingun, se empleó la misma configuración de cuenca, meteorología y control tanto para los datos pluviométricos como los datos CHIRPS.

El modelo se ejecutó desde el 1 de enero de 1980 al 31 de diciembre de 2018 con los datos pluviómetros y 1 enero de 1981 al 31 de diciembre de 2023 con los datos CHIRPS. La diferencia de las fechas modeladas resulta de la disponibilidad en cada uno de los datos.

La figura 27 se muestra el Hietograma resultante de la modelación hidrológica con datos pluviométricos y métodos de transformación lluvia-escorrentía de SCS (línea verde) y Snyder (línea naranja).

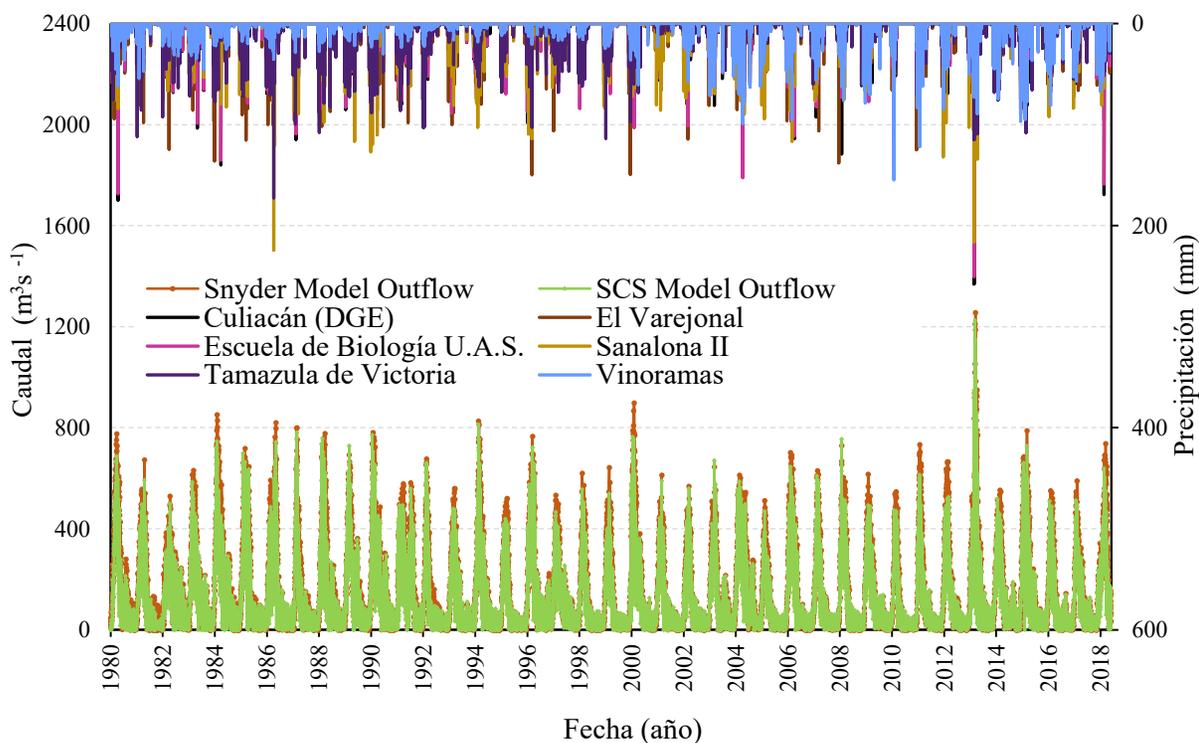


Fig. 27 Hietograma resultante por las transformaciones Snyder (naranja) y SCS (verde) del modelo HMS.

Los hietogramas resultantes presentan el mismo comportamiento de manera general. Sin embargo, en la transformación de Snyder se observan valores de caudales superiores a los presentados por SCS. El mayor pico de caudal, superior a los $1200 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ se encuentra en el 2013, el cual coincide con el mayor pico de precipitación asociado al huracán Manuel, mismo comportamiento que se mostraba desde el análisis de la serie temporal de precipitaciones.

Los caudales mostrados en la figura 27 corresponden al punto de confluencia del río Humaya con el río Tamazula, en el río Culiacán, es decir, se presentan los aforos del río Culiacán a paso diario, a partir de los resultados de la modelación hidrológica. Al no contar con aforos in situ de los ríos, la modelación muestra resultados que oscilan entre los 0 y $1256 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. No obstante, son los valores máximos los de importancia en esta investigación, y sobre todo aquellos asociados a eventos extremos e históricos, los cuales permiten evaluar el comportamiento del modelo.

5.5. Simulación hidráulica unidimensional

La simulación hidráulica es el proceso final para la modelación geoespacial de inundaciones, la cual permite obtener los escenarios de inundación para tormentas de diseño, en los diferentes procesos de modelación.

5.5.1. Simulación hidráulica 1D modelo concentrado

Se simularon distintos escenarios de inundación para los afluentes Humaya y Tamazula, así como su confluencia en el río Culiacán hasta la presa derivadora, 600 m aguas abajo de la unión de los ríos. La figura 28 muestra los escenarios de inundación, los cuales son el producto del resultado de los modelos lluvia-escorrentía por los métodos SCS, Snyder y Tamez.

En la Figura 28 se muestran los escenarios simulados. La profundidad mínima de inundación para las llanuras de inundación es de 1 mm en la zona urbana, sin embargo, en el canal principal del río Tamazula alcanza hasta los 13.6 m de profundidad, según los resultados del modelo de Tamez.

Las simulaciones unidimensionales muestran desbordamiento sobre el río Tamazula, a la altura de la Isla de Musalá. En el modelo SCS el desbordamiento se presenta a partir del Tr de 10 años, mientras para Snyder sucede en el Tr de 100 años. Caso contrario ocurre en el modelo de Tamez, que presenta grandes desbordamientos desde periodos de retorno de 2 años. Esto sólo demuestra que el hidrograma triangular de Tamez presenta sobreestimación en los cálculos de caudales para la cuenca del río Culiacán, y por tanto no es apto para la simulación de inundaciones en la zona de estudio.

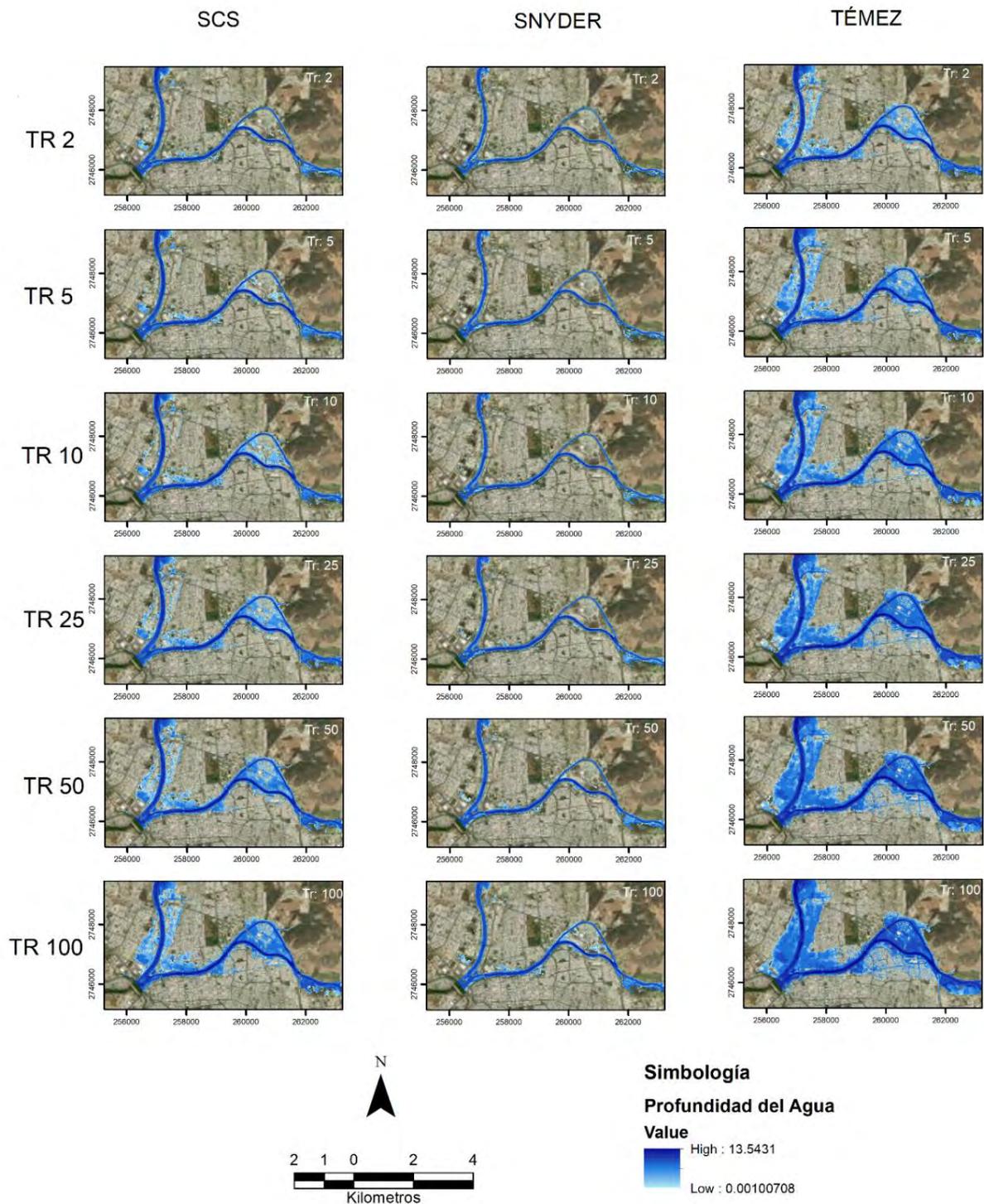


Fig. 28 Escenario de inundación 1D en HEC-RAS a periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años, para los modelos SCS, Snyder y Téméz.

5.5.2. Simulación hidráulica 1D modelo semidistribuido

Posteriormente de la ejecución del modelo hidrológico semidistribuido en HEC-HMS con el método de transformación SCS-CN, se simuló en HEC-RAS 1D, el resultado del modelo se muestra en la figura 29. La profundidad de inundación osciló entre 0.001 m y 9.32 m sobre el afluente del río Tamazula para Tr de 100 años. En general, los resultados de la simulación de inundación en el modelo semidistribuido es menor en comparación con los resultados de los modelos concentrados.

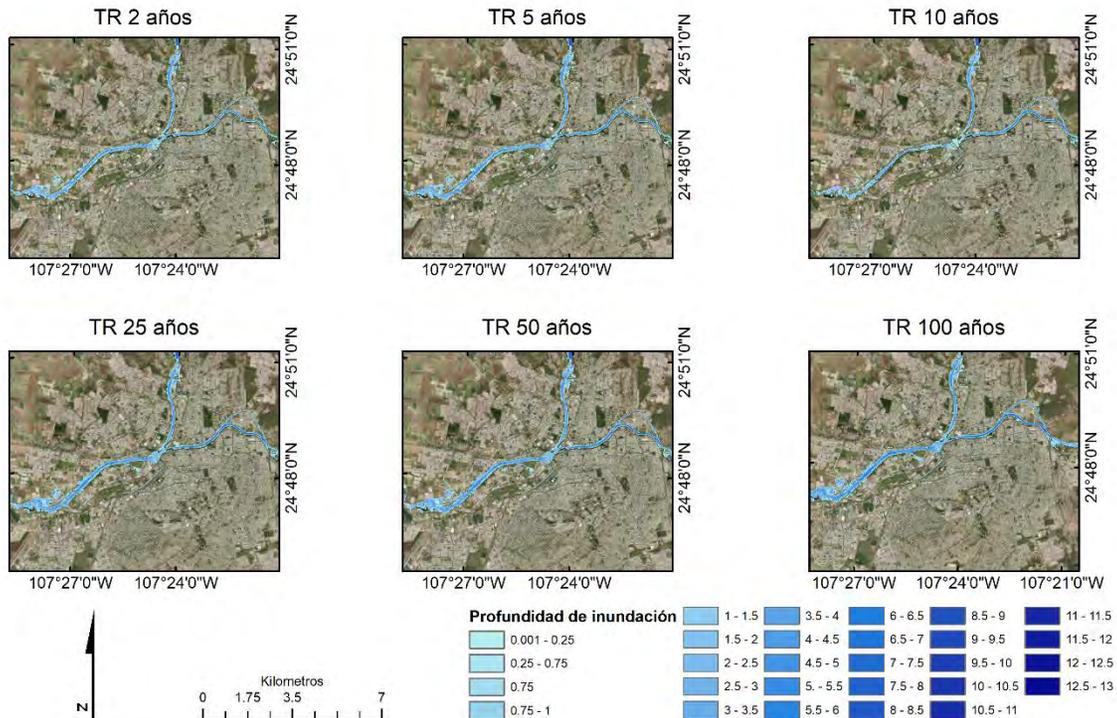


Fig. 29 Simulación de escenarios de inundación modelo semidistribuido HEC-HMS por el método de transformación SCS.

Los escenarios muestran desbordamiento sobre el río Tamazula en la zona centro de la ciudad, así como también en las inmediaciones de la confluencia de los ríos. Otra zona donde se observa desbordamiento es sobre el río Culiacán, a las afueras de la ciudad a la altura de las colonias de Valle Alto.

De manera general esta simulación refleja el agua que transita por los ríos dentro de la ciudad, sin embargo, no muestra el flujo sobre los canales derivadores y arroyos que cruzan por la ciudad. Entonces, si bien, si puede representar la altura de nivel de aguas máximas extraordinarias, en un punto específico y estático de una tormenta de diseño, hidrológicamente correcto, esto no significa que sea físicamente correcto. Ya que se tiene el conocimiento empírico de zonas con problemas de inundación que no se encuentran necesariamente en las llanuras de inundación de los ríos.

No obstante, se simuló un evento en específico con el propósito de comparar el poder predictivo de la combinación de modelos hidrológicos y simulación hidráulica unidimensional. Se eligió la inundación ocasionada por la depresión tropical 19-E. En la figura 30, se muestra el resultado del momento de máxima precipitación de dicho evento modelado en Hec-HMS, con las transformaciones de SCS y Snyder, al ser de las de menores sobreestimación en la modelación anterior.

Los escenarios muestran niveles de inundación superiores a los 0.50 m tanto en los ríos como en las zonas de desbordamientos sobre la isla de Musalá, en la zona de las Quintas, llanura de inundación del río Tamazula, así como en la zona del desarrollo urbano tres ríos. Sin embargo, el modelo de transformación SCS, presenta mayores zonas de desbordamiento al norte sobre el río Humaya en comparación al método de Snyder. En la figura 31, además de las zonas inundables, se muestran los puntos críticos revisados en el atlas de riesgo de Culiacán (GEOLMEX - Geología y Servicios de Ingeniería, 2020).

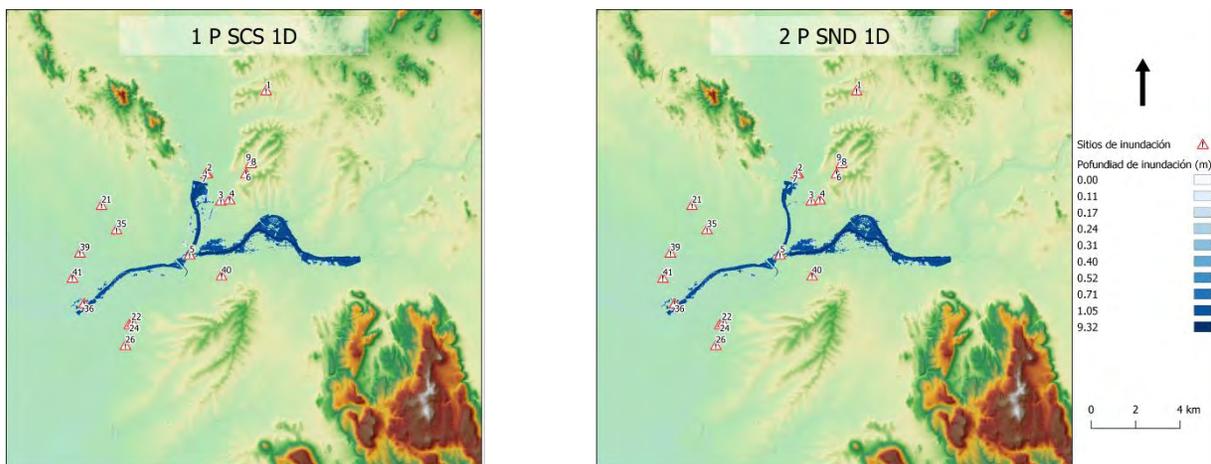


Fig. 30 Simulación hidráulica 1D para el evento de la depresión tropical 19-E a partir de los resultados del modelo hidrológico semidistribuido por la transformación 1) SCS y 2) Snyder.

En la tabla 25 se enlistan la ubicación y problema de cada punto críticos y conflictivos de riesgo hidrometeorológico e inundación en el atlas de riesgo del municipio de Culiacán (GEOLMEX - Geología y Servicios de Ingeniería, 2020). En el se presentan diversos problemas ocasionados en la población producto de las mayores inundaciones actuales ocurridas en Culiacán, es decir, las inundaciones ocurridas por el huracán Manuel en 2013, y la depresión tropical 19-E en 2018. Las ubicaciones enlistadas en la tabla reflejan los resultados negativos a la población que traen consigo los eventos hidrometeorológicos de gran magnitud, los cuales varían como inundaciones puntuales, el ingreso del agua en las viviendas y la pérdida de muebles y objetos materiales, pero también refleja problemas estructurales en las construcciones debido al deslizamiento de tierras que ocurre por los efectos erosivos de la lluvia.

Tabla 25 identificación de los puntos problemáticos de inundación en el huracán Manuel y depresión tropical 19-E. Fuente:(GEOLMEX - Geología y Servicios de Ingeniería, 2020)

ID	Lugar	Evento
1	Relleno sanitario	Zona de recarga, peligro de contaminación por lixiviados. Deslizamiento.
2	Col. Las Cucas	Inundación por compuerta en calle.
3	Col. Ignacio Allende	Inundación por desbordamiento
4	Lomas del Pedregal	Deslizamiento.
5	Asta bandera	Convergencia de ríos.
6	Col. Jesús Valdez	Inundación. Muro caído por inundación en 2018, poste de evidencia.
8	Col. Jesús Valdez	Inundación. Evidencia de depósitos fluviales
9	Col. Jesús Valdez	Inundación y hundimiento. Casa cuarteada por hundimiento.
21	Fraccionamiento Barcelona	Manantial de agua termal.
22	PEMEX	Convergencia de drenes de agua. Casa con marcas de inundación.
24	La isla	Inundación.
35	La conquista	Inundación. Incapacidad del dren de desagüe para contener flujo de agua.
36	Valle alto verde	Zona aislada por inundaciones de colonias aledañas.
39		Puente sobre río que se desborda con erosión en sus cimientos.
40	Loc. La Sanalona	Inundación y hundimientos.
41	Col. Valle Alto	Inundación y hundimientos.

5.6. Simulación hidráulica 2D

Debido a la deficiencia en mostrar la variabilidad del flujo en el tiempo para un evento de inundación en los modelos hidráulicos unidimensionales, se realizó la simulación bidimensional de inundaciones para la ciudad de Culiacán. Esta simulación tiene la capacidad de mostrar las variaciones del flujo en las direcciones X y Y, para un lapso de tiempo estimado, que en este caso fueron simulaciones de 24 hr de tiempo mínimo de los datos de entrada.

Se propusieron tres configuraciones de simulación: acoplada (HHA), integral (HHI) y conjunta (HHC). Se simularon dos eventos históricos, aquellos que permitieron simular las

inundaciones más catastróficas que ha pasado la ciudad y que, además, son lo suficientemente recientes que permitieron obtener otras fuentes de información para evaluar y validar lo simulado. A continuación, se muestran los resultados de cada una.

5.6.1. Simulación 2D acoplado

Se simuló el evento de inundación provocado por el huracán Manuel en 2013 (figura 31) que, por la intensidad y duración corresponde a un evento con periodo de retorno de 100 años. Se simuló la combinación de modelo hidrológico-hidráulico 8-C-SCS-2D-HHA, es decir, a partir de datos CHIRPS, se realizó la transformación lluvia-escorrentía por el método SCS y se simuló en 2d de manera acoplada, donde se ingresaron los hidrogramas sintéticos con lapso de tiempo a la hora, provenientes del modelo hidrológico HMS.

La simulación se realizó del 17 al 21 de septiembre, tiempo que el hidrograma marcó el fin de la escorrentía resultante. La configuración de esta simulación tomó 19 minutos para completar el procesamiento del flujo no estacionario en simulación completamente en 2D, una vez computada la geometría del modelo. La simulación presenta un error global de contabilización del volumen del 0.00029 por ciento, lo cual se considera bueno.

En la figura 32 se observan profundidades que llegan hasta los 10 m sobre el río Tamazula, 8.5 m en el Humaya y 13.3 m sobre el río Culiacán dentro de las inmediaciones de la ciudad. Los desbordamientos en el río Tamazula se presentan en zonas como la isla de Musalá con profundidades simuladas superiores a 1.5 m, mientras que, en las afueras de la ciudad sobre el mismo afluente hacia el norte, presenta otras regiones de desbordamiento del Tamazula sobre la zona marginal del río, con alturas de inundación de 4.5 m, generados por el arroyo El piojo.

A medida que el río se acerca a la zona de confluencia en el centro de la ciudad, se observan desbordamientos en ambos márgenes. Este desbordamiento se sugiere como producto del cambio de dirección del cauce principal del Tamazula a medida que se acerca al Humaya. Lo anterior provoca desbordamiento del Tamazula sobre las principales avenidas del malecón en ambas márgenes.

El principal desbordamiento del río Humaya se localiza en las afueras de la ciudad, a la altura de Loma de Rodriguera, sobre los márgenes de inundación del río. De manera general el nivel de aguas máximas del río Humaya se extiende hasta cubrir las márgenes de inundación del mismo. En la confluencia, las estructuras para la mitigación de inundaciones muestran contención del flujo.

El río Culiacán se desborda a medida que se aleja del centro urbano, inundando zonas cercanas del aeropuerto. Esto se puede atribuir a la falta de estructuras de contención como las que se encuentran en el centro de la ciudad hasta el sector de Valle Alto.

Profundidad de inundación del Huracán Manuel (2013)

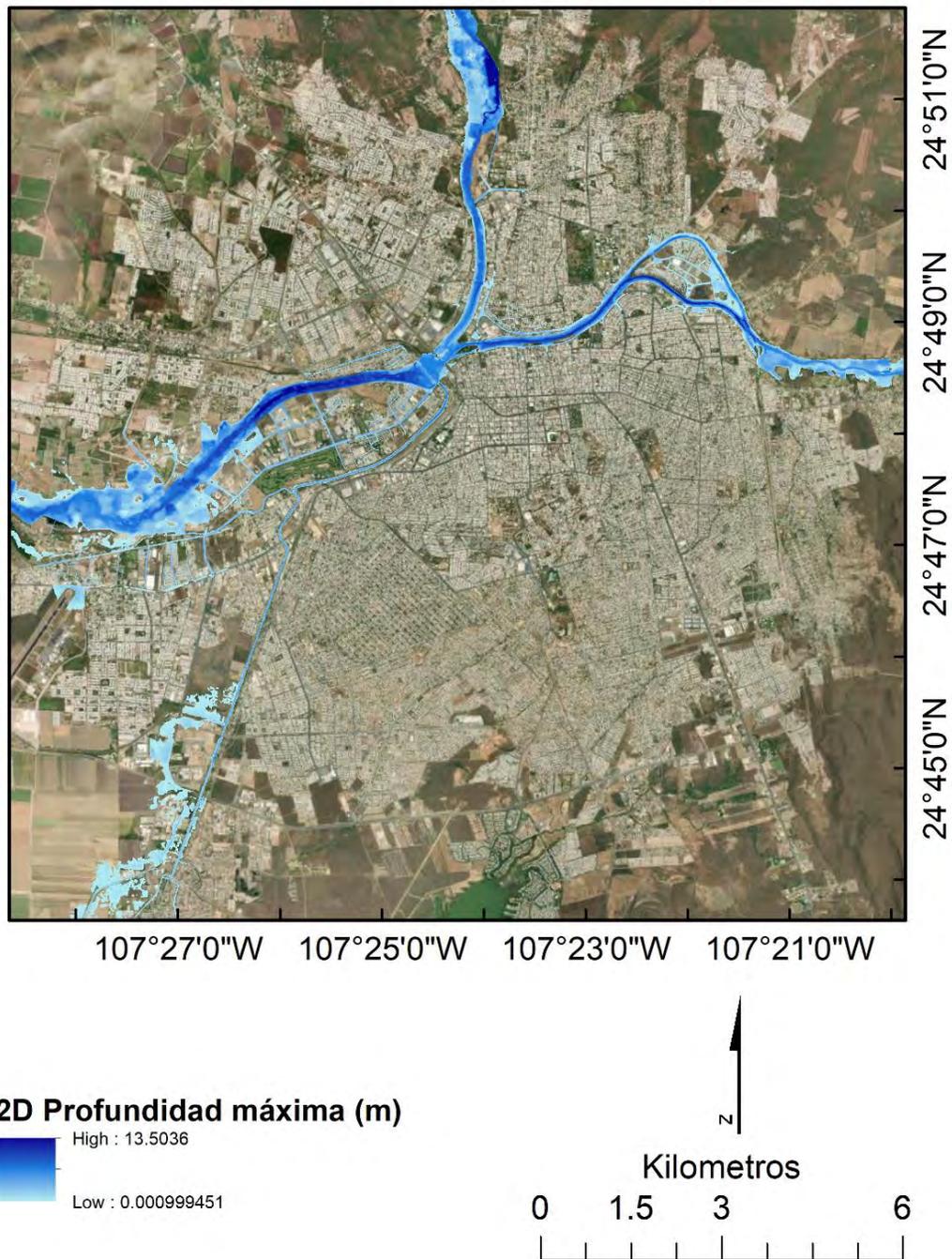


Fig. 31 Resultado de la simulación hidráulica 2D en HEC-RAS en el modelo H-H acoplado datos pluviométricos y transformación SCS.

Debido a que en 2013 no están disponibles datos satelitales para generar las validaciones por métodos de percepción remota, los escenarios simulados hasta el momento carecen de

estadísticas que permitan determinarlo como el modelo mas adecuado para la simulación de escenarios de inundación para la ciudad de Culiacán. Por lo tanto, se decidió a generar los escenarios del segundo evento de mayor intensidad mas reciente, es decir, la inundación producida por la depresión tropical 19-E.

Con el objetivo de evaluar las variaciones en los escenarios generados, se simularon las combinaciones producidas por las variaciones de datos de entrada de precipitación, metodos de trasformación lluvia-escorrentía y simulados de manera acoplada.

En la figura 32 se muestran los escenarios generados por las combinaciones de los modelos hidrológicos-hidráulicos en un esquema acoplado, es decir, ejecutando el modelo hidrológico por separado del hidráulico, en el que los resultados del primero sirven de insumo inicial para las condiciones de contorno en la simulación HEC-RAS 2D.

La imagen muestra que la combinación *3-P-SCS-HHA*, el agua sólo circula por los ríos principales, generando un desbordamiento al norte del río Humaya. Mientras que el escenario *6-P-SND-HHA*, muestra mayor profundidad de inundación que oscila entre 0.75 y 9.3 m sobre el cauce del río Tamazula, con desbordamientos en la isla de Musalá, al norte sobre el río Humaya, y sobre el río Culiacán, en la zona del Congreso y el canal lateral localizado justo aguas abajo de la presa derivadora.

Los escenarios *8-C-SCS-HHA* y *11-C-SND-HHA* producido por los datos CHIRPS, muestra similares áreas inundadas, con mínimas variaciones de altura de inundación, reflejan zonas de desbordamiento del río Tamazula, en las periferias de la ciudad e inundación en la isla Musalá, así mismo, el desbordamiento sobre el desarrollo urbano tres ríos, a medida que se acerca a la confluencia con el río Humaya.

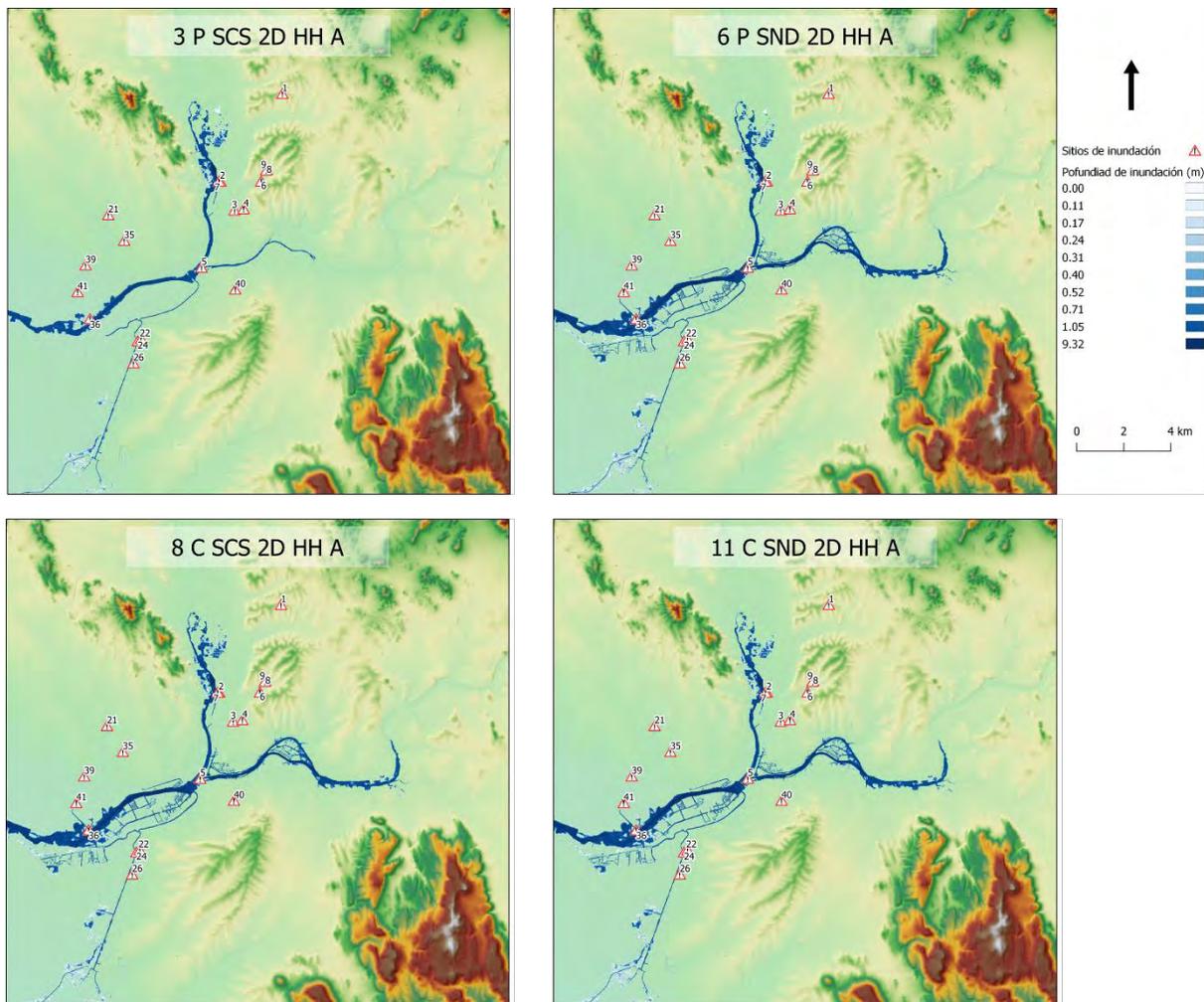


Fig. 32 Simulación 2D acoplado; 3 datos pluviométricos y transformación SCS. 6 simulación con datos pluviométricos y transformación Snyder. 8 simulación con datos CHIRPS y transformación SCS y 11 simulación de datos CHIRPS y transformación Snyder.

Por su parte el río Humaya muestra el desbordamiento en la periferia norte, y a la altura de la confluencia con el arroyo El piojo y confluencia con el río Tamazula. Mientras que el río Culiacán, se desborda en la zona sur. El modelo muestra el tránsito del agua sobre el canal lateral y la zona de congreso.

Sin embargo, al comparar la extensión de inundación de las cuatro combinaciones con la ubicación de los puntos problemáticos publicados en el atlas de riesgo de la tabla 25, se percibe que a pesar de presentar mejor la extensión de inundación que las simulaciones 1D, muestran la misma deficiencia en mostrar todas las zonas inundables en la ciudad de Culiacán.

Este fenómeno puede responderse por dos razones y ambas tienen que ver con la morfología de la ciudad. La primera se debe a que la ciudad de Culiacán está fisiográficamente dividida en dos cuencas, la primera la del río Culiacán, y la segunda que se localiza en la

subcuenca de corrientes intermitentes, las cuales provocan que el drenaje pluvial de la ciudad circule por dos redes independiente.

La segunda razón, deriva de la topografía misma de la ciudad, que, al tener elevaciones topográficas, crean una red de arroyos intermitentes, en las que no todas son aportaciones de la cuenca del río Culiacán, como se explicó en el primer punto, sino que, además, son arroyos que aparecen y crecen en un evento de precipitación, mismos cuyas entradas no son consideradas en la modelación hidrológica-hidráulica acoplada, ya que en esta configuración sólo toma la entrada las condiciones de contorno, los hidrogramas de las corrientes principales.

Y si partimos del hecho que ni las corrientes principales, es decir, los ríos Tamazula, Humaya y Culiacán no se encuentran aforadas en las cercanías de la zona urbana, con el propósito de conocer el tránsito de avenidas para evitar posibles inundaciones, mucho menos lo están la red de arroyos intermitentes, y ante ese hecho, el modelo H-H acoplado, no puede aportar mucho en la simulación geoespacial de inundaciones, al menos no para la ciudad de Culiacán o asentamientos urbanos similares.

Si bien, esta metodología no es mala o deficiente por si sola, ya que se ha demostrado su poder predictivo en (Chate & Nimbalkar, 2019; El Bilali et al., 2021; Mustamin et al., 2024; Nguyen et al., 2015; N. Ongdas et al., 2020; Salman et al., 2021; Surwase et al., 2019; Wojtek et al., 2019; J. Yang et al., 2006; Zainalfikry et al., 2020), la falta de datos no la hace aceptable en el contexto histórico y geoespacial de la zona de estudio, de ahí la necesidad de buscar otras configuraciones que permitan modelar los más acercado a la realidad un evento de inundación en Culiacán.

5.6.2. Simulación 2D integrado

El modelo hidrológico-hidráulico integrado (HHI) generado en HEC-RAS para el evento de inundación provocado por el huracán Manuel en 2013 usó la misma configuración de malla de simulación que el modelo acoplado, con la discrepancia de eliminar las condiciones de contorno de entrada para los flujos de Humaya y Tamazula. En cambio, se empleó el hietograma diario de precipitaciones CHIRPS diarias medias generadas para la malla de computo. El tiempo de simulación fue el mismo que el modelo anterior, del 17 al 21 de septiembre del 2013.

El tiempo de computo fue de 27 minutos, ocho minutos más tardado que el modelo H-H acoplado, tomando en consideración, que no se toma en cuenta el tiempo de procesamiento de la geometría. La simulación se resolvió como flujo inestable 2D por las ecuaciones de ondas de difusión no estacionarias (SWE), que garantizan una respuesta más rápida de cálculo, en 20 iteraciones. Los resultados de la simulación presentan un porcentaje de error general de 0.0092%.

En la figura 33, se muestran las profundidades de inundación que oscilan entre 1 mm hasta 15 m ubicados sobre el río Humaya, así como en unas fosas en las afueras de la ciudad en la zona sur, en el poblado El Diez.

La principal diferencia que se observa en esta configuración de simulación respecto a la anterior es la presencia de arroyos como resultado de la simulación hidráulica. Esto es debido a que el programa cuenta con toda la malla de dominio de cómputo, y emplea toda el área de cálculo creando las interacciones entre todas las celdas en las distintas direcciones. De esta manera, el software detecta las diferencias de alturas y orientaciones de las pendientes para establecer los arroyos intermitentes y vialidades que virtualmente funcionan como arroyos durante las precipitaciones.

En la simulación se observan como las vialidades se convierten en corrientes de flujo. Se presentan las mismas zonas de desbordamiento sobre los tres ríos que se mostraban en el modelo H-H acoplado. La zona norte de la ciudad, zona cercana al aeropuerto, y la zona conurbada Culiacán-Navolato presentan en general mayor afectación en la simulación, con alturas de inundación que llegan hasta 1.6 m.

Profundidad de inundación del Huracán Manuel (2013)

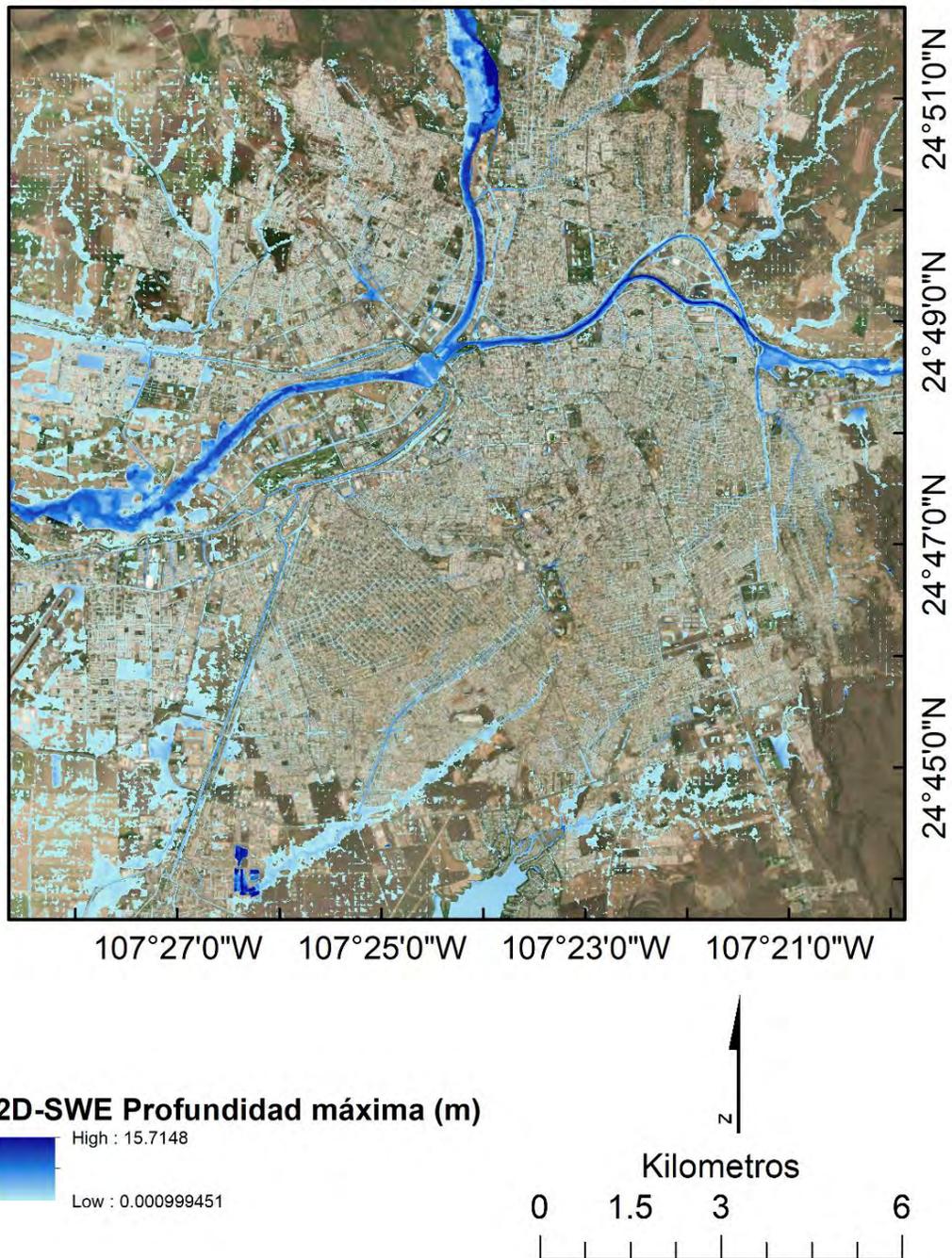


Fig. 33 Resultado de la simulación hidráulica 2D en HEC-RAS en el modelo H-H integrado.

El modelo HHI permitió simular el flujo de agua de los arroyos ubicado tanto en la cuenca que sirve como aportaciones de los ríos Humaya y Tamazula, como también a aquellos que por

la división de parteaguas que genera la orografía de la ciudad, no entran en la cuenca. Tal es el caso de las corrientes que se visualizan en la zona sur de la ciudad, que tanto en la simulación 1D como en la simulación 2D del modelo H-H acoplado, no permitieron visualizar.

Al extender la malla de computo siguiendo las líneas del parteaguas de la ciudad, modificando solo lo suficiente para cubrir el área urbana, aparece en la simulación el Dique La Primavera, la cual queda excluida en las discusiones de este trabajo. El principal motivo radica en que el modelo digital de elevación tipo terreno tiene la cota de espejo de agua en el momento en que fue tomada la escena del DEM, y el relieve de este cuerpo de agua no tiene borde libre como en el caso de los canales y ríos, por tanto, las alturas de lámina simuladas no corresponden a lo real.

Se simuló el escenario de inundación creado por la depresión tropical 19-E (figura 34), con la misma configuración de modelo hidrológico-hidráulico. Esta configuración sólo se ejecutó con datos CHIPS, esto debido a la heterogeneidad espacial que presentan estos datos en comparación con los datos pluviométricos, en el que la malla de simulación quedaría en los valores promedios de dos estaciones.

El escenario generado por la combinación del modelo *10-C-SWE-HHI* refleja las aportaciones que generan los arroyos intermitentes, en la misma extensión que en la figura 34, sin embargo, las profundidades varían y se presentan en menor magnitud.

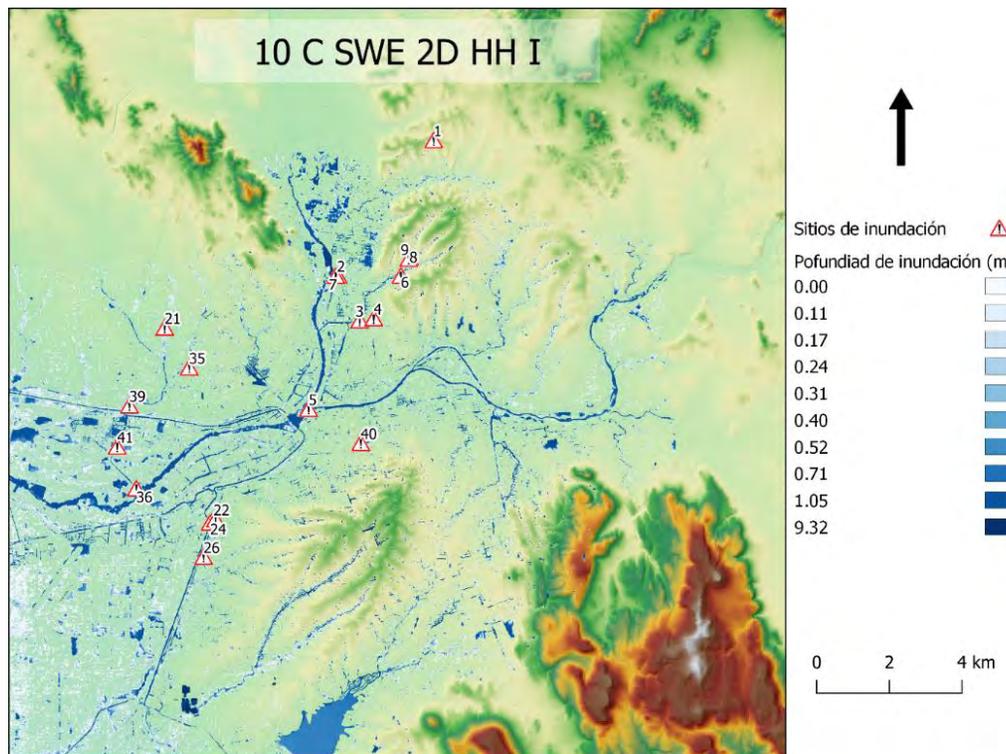


Fig. 34 Simulación 2D integrado de la depresión tropical 19-E, empleando datos CHIRPS.

La primera diferencia observada radica al no mostrarse zonas de desbordamiento sobre los afluentes Tamazula, Humaya y Culiacán, sino que contrario a las hipótesis principales, se presentan dos fenómenos. El primero, la topografía de la ciudad de Culiacán, no presenta llanuras de inundación en el centro de la ciudad sino hacia la salida norte en la zona conurbana, en la cual bien podría ahí atenderse con las combinaciones de modelos anteriormente presentados.

El segundo fenómeno está en función de los trabajos realizados en las llanuras de los ríos, las labores del desarrollo urbano tres ríos así obras de control y mitigación de inundaciones que se han realizado en el parque las riberas, mismas que fueron modificadas en el modelo digital de terreno en HEC-RAS y muestran la delimitación del flujo de los afluentes, al contener el nivel del agua dentro de las llanuras aluviales, y no desbordamiento de los mismos. En todo caso, la inundación que se presenta en las avenidas vecinas de los ríos, proviene directamente del escurrimiento superficial del agua precipitada aguas arriba del lugar.

5.6.3. Simulación 2D conjunto

La propuesta de preparar simultáneamente la simulación hidráulica 2D en HEC-RAS de los modelos H-H acoplado e integrado para el evento del Huracán Manuel del 17 al 21 de septiembre de 2013 en una simulación conjunta (HHC), se realizó bajo las mismas condiciones de contorno, geometría, y tiempo requerido en cada simulación por separado. Es decir, se establecieron las condiciones de contorno aguas arriba de los ríos Humaya y Tamazula para ingresar los hidrogramas sintéticos resultantes del modelo hidrológico HMS y el hidrograma diario generada por las precipitaciones CHIRPS del modelo H-H integrado.

De manera general, el programa resuelve las simulaciones por medio de las ecuaciones 2D de onda difusa, iniciando primero por aquellas que tiene condiciones de contorno aguas arriba, es decir el modelo acoplado, para posteriormente simular la malla 2D a partir de las precipitaciones. El tiempo total de la simulación es de 28 minutos en ejecutar ambas simulaciones de flujo no estacionario. Los resultados presentan un porcentaje de error volumétrico de 0.016%.

En la figura 35 se presenta las profundidades de inundación de la simulación conjunta, en la cual los cuerpos de agua principales revelan profundidades de inundación máxima entre 10.3 m sobre el Tamazula, 12.23 m en el Humaya y 12.18 m en el río Culiacán. Al igual que en el modelo HHI (2D-SWE) destacan las fosas a las fuera de la ciudad en las cercanías del poblado El Diez con profundidades que alcanzan hasta los 8.1 m, las cuales pueden atribuirse a discrepancias de alturas en el DEM.

De manera general, esta configuración muestra desbordamientos en los ríos en los límites de la ciudad. El río Culiacán presenta desbordamiento a la altura de la zona de Valle Alto. Así como también zona de inundación en la Isla Musalá, con profundidades de 0.8 a 1.5 m sobre las vialidades, al igual que en la zona de Las Quintas. Este modelo mantiene profundidades similares a la del modelo HHA, y a la vez reduce el impacto de las zonas inundadas que presenta el modelo

HHI, esto debido a que la simulación inicia con las condiciones de contorno del modelo HHA, es decir, la simulación convencional y posteriormente continua con la estimación del flujo inundado por los cálculos de la malla de precipitación del 2D-SWE, reduciendo así el impacto de este último sobre los resultados.

Profundidad de inundación del Huracán Manuel (2013)

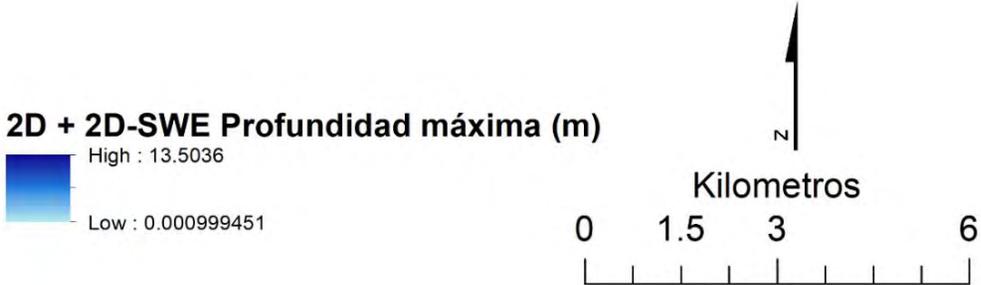
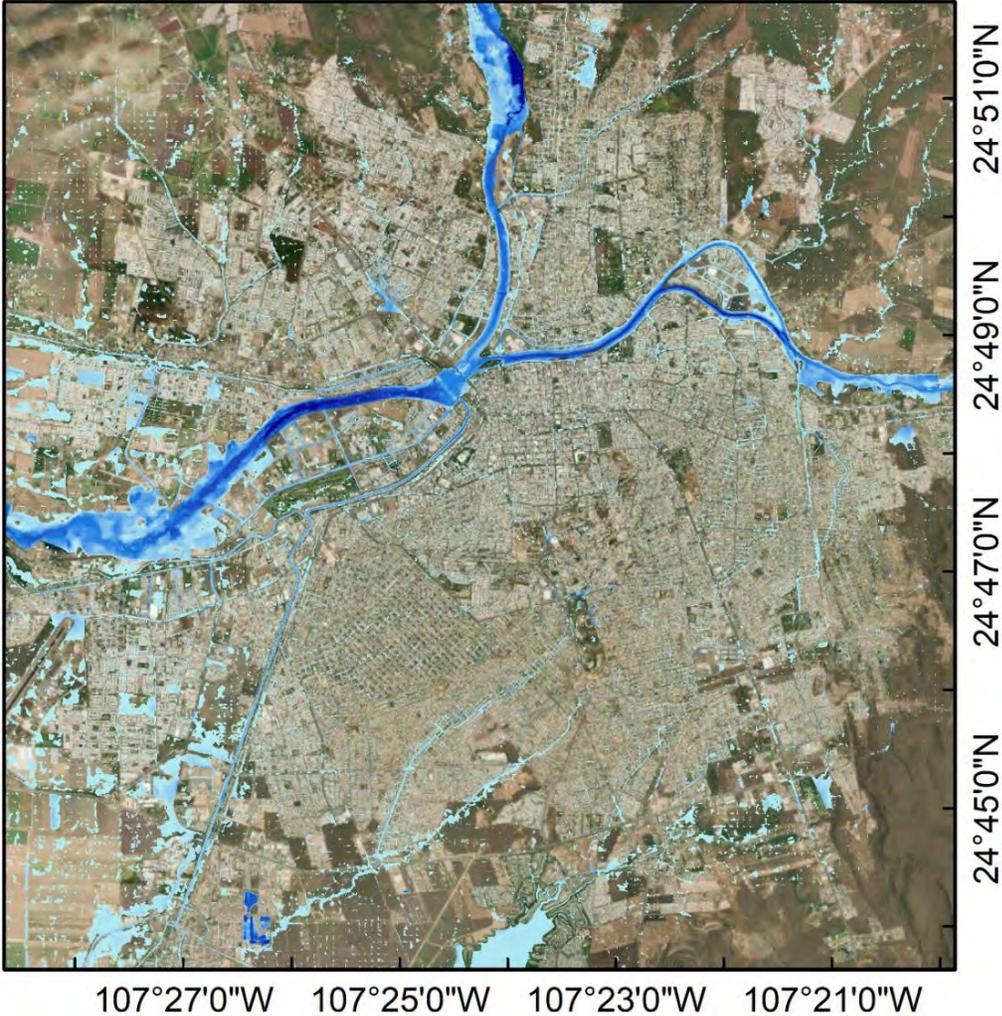


Fig. 35 Resultado de la simulación hidráulica 2D en HEC-RAS en el modelo H-H conjunto datos pluviométricos y transformación SCS.

Los escenarios HHC coinciden con el HHI (2D-SWE) en resaltar el arroyo “El Piojo” con escurrimientos, al igual que en los otros arroyos en la zona sur de la ciudad y desbordamiento en el canal lateral del margen izquierdo del río Culiacán. Otro punto conflictivo se localiza sobre el boulevard José Limón en el paso a desnivel, en el cual cruza un arroyo de aportación al río Culiacán.

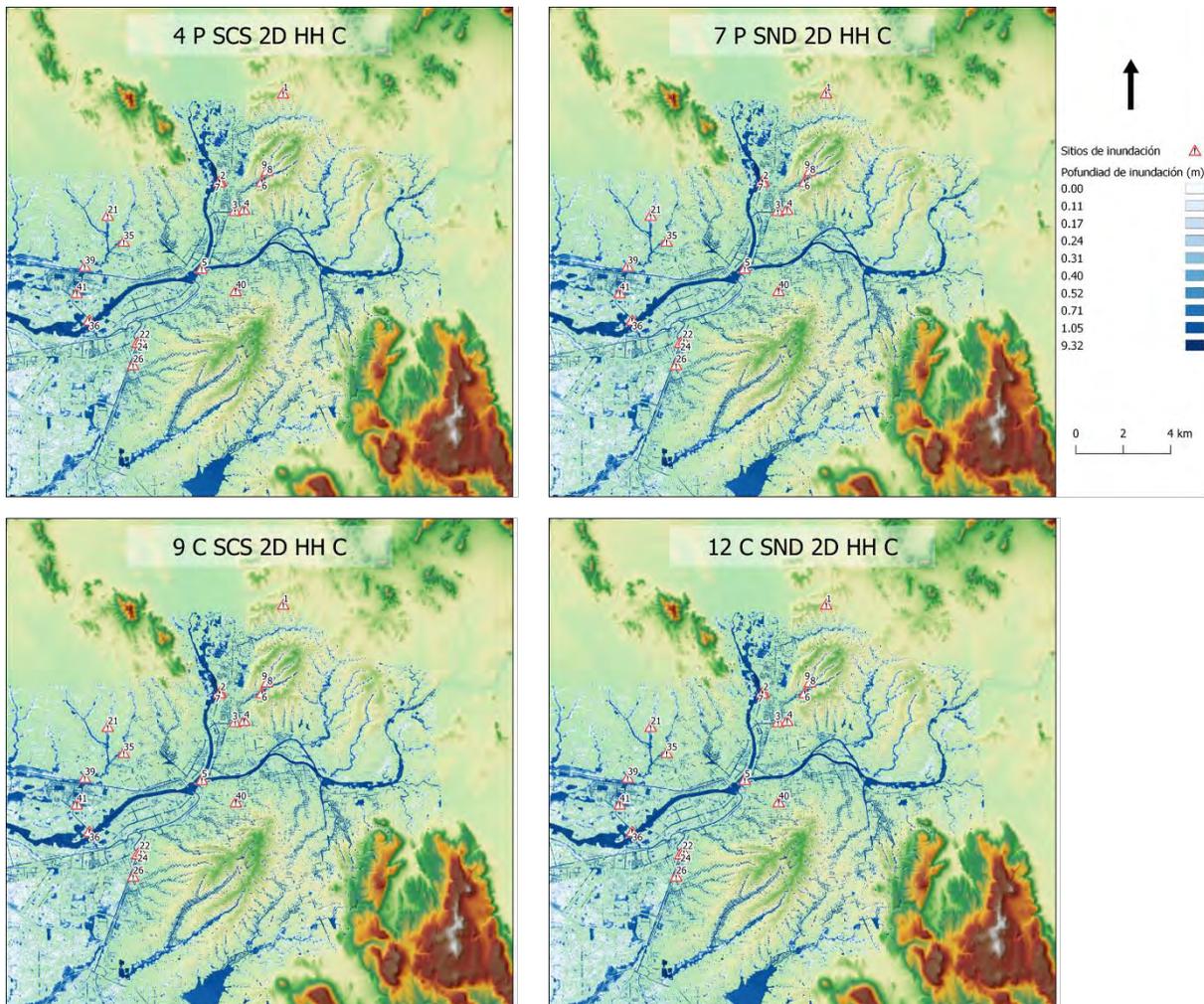


Fig. 36 Simulación 2D conjunta; 4 datos pluviométricos y transformación SCS. 7 simulación con datos pluviométricos y transformación Snyder. 9 simulación con datos CHIRPS y transformación SCS y 12 simulación de datos CHIRPS y transformación Snyder.

Las velocidades simuladas del flujo en las vialidades se mantuvieron por debajo de 1 ms^{-1} , las velocidades por entre 1 y 3 ms^{-1} en el área urbana se localiza en zonas elevadas y pendientes pronunciadas. En los afluentes principales (Humaya, Tamazula y Culiacán), el incremento de las velocidades se da en el cambio de dirección del flujo y en la presencia de

obstáculos como puentes, los cuales provocan un cambio en la dirección de la partícula del flujo y, por consiguiente, modificaciones en la velocidad, característico del flujo turbulento.

En cuanto al escenario simulado para la DT 19-E de la figura 36 con combinación de modelos, es en esta simulación, donde se encuentran menos discrepancias en la extensión de las áreas inundadas. La diferencia entre las combinaciones *4-P-SCS-HHC*, *7-P-SND-HHC*, *9-C-SCS-HHC* y *12-SND-HHC* se encuentra en la altura de inundación, y ligeramente en el área de desbordamiento del río Culiacán. La principal razón de esta semejanza radica en que las cuatro combinaciones emplean la misma malla de cálculo 2D SWE, es decir, se usan los mismos datos de precipitación CHIRPS en la misma fecha y, por tanto, los resultados del flujo que transcurre por los arroyos es prácticamente el mismo, haciendo que la diferencia sea entonces, las alturas de inundación que fluyan por los ríos Tamazula, Humaya y Culiacán, y sus posibles desbordamientos.

Sin embargo, por lo comentado en la simulación integrada, los ríos de la ciudad no desbordan completamente, al menos no en su confluencia y la zona céntrica de la urbanización, sino bien, en las periferias de las mismas, las cuales han sido ampliamente descritas en el modelo acoplado.

5.7. Validación

Se generaron diversos escenarios geoespaciales de inundación, realizados a partir de diversas fuentes y metodologías. Por tanto, es necesario evaluar la calidad predictiva de cada uno de ellos. En este sentido, se validaron cada uno de los escenarios con diversas técnicas y fuentes de información de manera de garantizar la calidad de cada una de los escenarios simulados.

5.7.1. Validación de modelo estático, simulación 1D

Se tomaron los valores calculados para los modelos concentrados de SCS, Snyder y Témez, así como el resultado del modelo distribuido en HMS por el método de transformación SCS y se evaluaron por las métricas de RMSE, NSE e índice kappa, este último sólo para el periodo de retorno de 100 años que se presentan en la tabla 26.

Se tomaron los valores de caudal observados del punto de aforo localizado en el puente negro para el proceso de validación de los modelos, para las simulaciones unidimensionales, se seleccionó el periodo de 1966 a 1980, que posteriormente, se comparó con el lapso que coincidió con la serie histórica de precipitación, así como también se realizó el análisis de frecuencias. Para los modelos concentrados, se sumaron los aportes de los ríos Humaya y Tamazula, mientras que, para el modelo semidistribuido, se tomó el valor de la confluencia ubicada en el área del punto de aforo.

Tabla 26. Métricas de validación de los modelos con valores de caudal observados

Modelo		σ	R2	RMSE	NSE	Kappa
	SCS	583.85	0.9428	1162.4	-51.12	0.8534
concentrado	Snyder	312.40	0.9414	144.76	0.19	0.9895
	Témez	1040.1	0.9427	2890.6	-321.28	0.7155
semidistribuido	HEC-HMS (SCS)	155.41	0.972	358	-3.945	0.9447

En una primera aproximación se observa que el modelo de mayor rendimiento es el modelo concentrado de Snyder, con menor error RMSE y NSE, así como índice Kappa mayor. Sin embargo, es importante observar la disminución significativa de los errores para el modelo concentrado SCS y el modelo semidistribuido SCS, en lo cual se observa mejor desempeño del modelo HMS-SCS en contra parte de su metodología concentrada.

Con lo anterior se puede demostrar un aumento en el rendimiento de los resultados por métodos semidistribuidos que por métodos concentrados. Se espera entonces que el modelo hidrológico en HMS por el método de transformación de Snyder sea de mejor ajuste incluso que su contraparte concentrada.

5.7.2. Validación de modelo dinámico, simulación 2D

En HEC-HMS se agregaron los valores de la estación de aforo del puente negro en el periodo de 1981 a 1992, en el cual contenía valores de aforo diario, con el que validaron los resultados de las cuatro combinaciones de modelos hidrológicos, generados a partir de los datos pluviométricos (P) y CHIRPS (C), así como también con el método de transformación lluvia-escorrentía SCS y Snyder.

Se asignaron los valores del aforo en la confluencia de los ríos Humaya y Tamazula, debido a que el punto de aforo se localizaba en el puente negro, justo en la ubicación del *juntion J163* del modelo HMS. En la fig. 37 se muestra los hidrogramas de paso diario del punto de aforo en comparación con los resultados de las modelaciones hidrológicas.

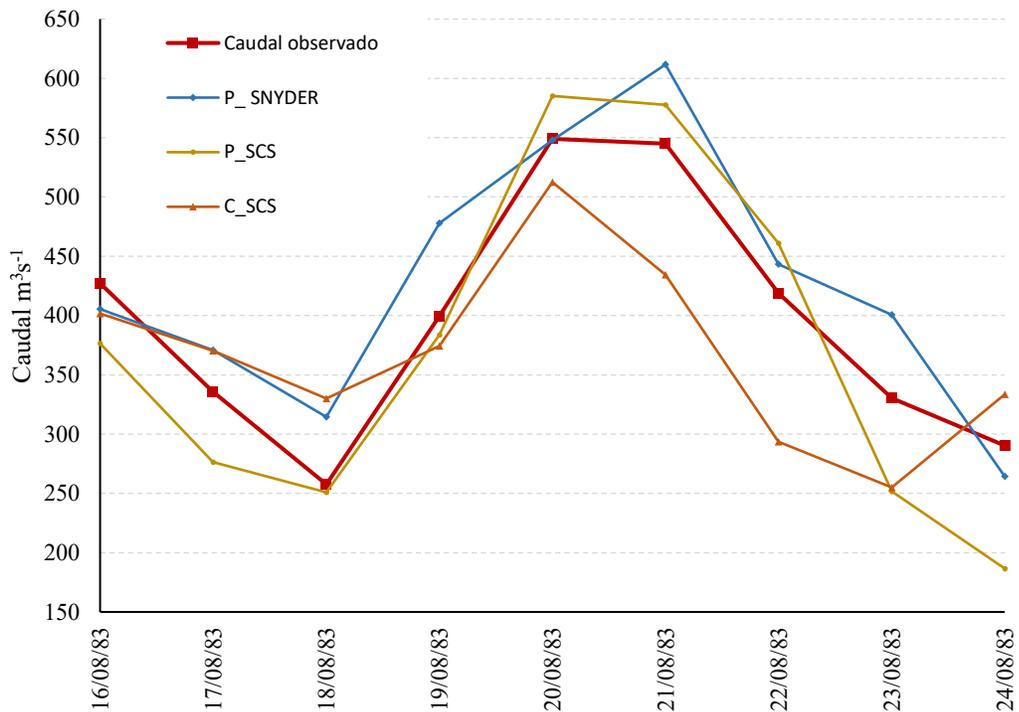


Fig. 37 evaluación predictiva de un evento de precipitación de los modelos SCS y Snyder a partir de datos pluviométricos y CHIRPS.

En línea roja se muestra el hidrograma de la estación de aforo 10018-El puente negro, mientras que con línea azul se representa el modelo de datos pluviométricos con transformación de Snyder, la línea amarilla delimita el hidrograma de datos pluviométricos con transformación por el método SCS, mientras que, en naranja representa el hidrograma a partir de datos CHIRPS y transformación SCS.

El aforo del puente negro, en algún momento de la toma de sus datos proviene de valores obtenidos de manera indirecta por la suma de los caudales medidos aguas arriba de las afluentes Tamazula y Culiacán, por lo que se empleó un evento tipo para validar los modelos y evaluar su comportamiento.

En este sentido, entonces, las métricas de validación de la tabla 27, fueron analizadas del periodo 1981 a 1992, obtenidas del módulo de validación de HEC-HMS. Sin embargo, la gráfica de la figura 32, sólo representa un evento tipo. La principal causa surge, en el tipo de entrada que se ingresa al modelo HMS, donde en la zona de estudio sólo se tiene una temporada de lluvia, dentro del tiempo de monzón del pacífico. No obstante, los ríos transportan agua durante todo el año, en mayor o menor medida, dependiendo de la temporada de sequías, en función del agua que liberan desde las presas para ser administradas por el distrito de riego.

Por tanto, el aforo del río Culiacán es constante, mientras que los modelos simulan una temporada de lluvias y otra de aforo cercana a cero, resultado de hacer la modelación con el

menor número de datos de entradas posibles. Esta decisión no altera los resultados debido a que el interés principal es modelar los escenarios de máximas avenidas, por tanto, para los fines de esta investigación son despreciables.

Tabla 27. Métricas de validación de los modelos hidrológicos semidistribuidos en HEC-HMS.

Modelo		R ²	NSE	RMSE	PBIAS (%)
Pluviómetros	SCS P-SCS	0.927	0.678	2.1	12.06
	Snyder P-SND	0.865	0.745	2.3	23.84
CHIRPS	SCS C-SCS	0.559	0.479	1.6	- 4.94
	Snyder C-SND	0.179	-0.927	1.5	- 3.58

Las métricas de validación de los modelos HMS de la tabla 27, muestran las métricas de R², NSE, RMSE y PBIAS, para la combinación P-SCS, se obtuvieron valores de 0.927 de R², 0.678 de NSE, 2.1 en RMSE y 12.06 de PBIAS, la combinación P-SND presentó una R² de 0.865, NSE de 0.75, RMSE 2.3 y 23.84 en PBIAS. La combinación C-SCS mostró un comportamiento en R² de 0.55, 4.79 en NSE, 1.6 en RMSE y -4.94 en PBIAS, mientras que la combinación C-SND tiene 0.17 en R², -0.92 en NSE, 1.5 en RMSE y -3.58 en PBIAS.

Lo anterior se traduce en la combinación de mayor correlación es P-SCS, mientras que la de mejor eficiencia de Nash-Sutcliffe fue P-SND, NSE es el marcador de eficiencia de modelos hidrológicos por excelencia en modelos hidrológicos (Burnama et al., 2023; Fadhliani et al., 2021; Gomes Calixto et al., 2020; Janabi et al., 2021; F. Kachholz & Tränckner, 2021; Frauke Kachholz & Tränckner, 2021; Kastridis et al., 2020; Schubert et al., 2022; Segura-Beltrán et al., 2016; Habtamu Tamiru & Dinka, 2021). En cambio, en PBIAS, se tiene la combinación P-SCS en mejor ajuste con sobreestimación, mientras que la combinaciones en CHIRPS están en mejor ajuste pero en subestimación. Los resultados presentados se encuentran en el rango de valores presentados por (Dhanapala et al., 2022; Kastridis et al., 2020; Loi et al., 2019; Puno et al., 2016; H. Tamiru & Dinka, 2021).

Por otro lado, en la figura 38 se muestra la comparación fotográfica tomada en la depresión tropical 19-E. En la imagen, se compara las combinaciones de los modelos con las imágenes emitidas por El Debate (2018) de diferentes partes de la ciudad y los ríos. Así pues, se

logra discriminar entre las combinaciones de modelos, cual es la de mejor ajuste. Las combinaciones acopladas, al sólo tener la entrada del hidrograma de los ríos, no simulan en toda la extensión 2D, que en la evidencia fotográfica se logra apreciar. En cambio, la combinación integrada, si muestra la inundación en las colonias alejadas a los ríos, pero como se mencionó anteriormente, no simula correctamente todo el flujo que transita en ellos al no simular el transporte de agua que cargan los ríos desde las aportaciones aguas arriba de la zona urbana.

Las combinaciones conjuntas entonces, muestran en la evidencia fotográfica lo que ya se hacía mención anteriormente, presenta lo mejor de las combinaciones, al tener el hietograma e hidrograma simulado al mismo tiempo. En la tabla 28 se muestran las alturas del agua de iundación sobre los ríos Humaya, Tamazula y Culiacán, así como también las calles inundadas, que en las fotografías también se visualizan afectadas.

Tabla 28 resumen de los modelos H-H en comparación con la evidencia fotográfica disponible.

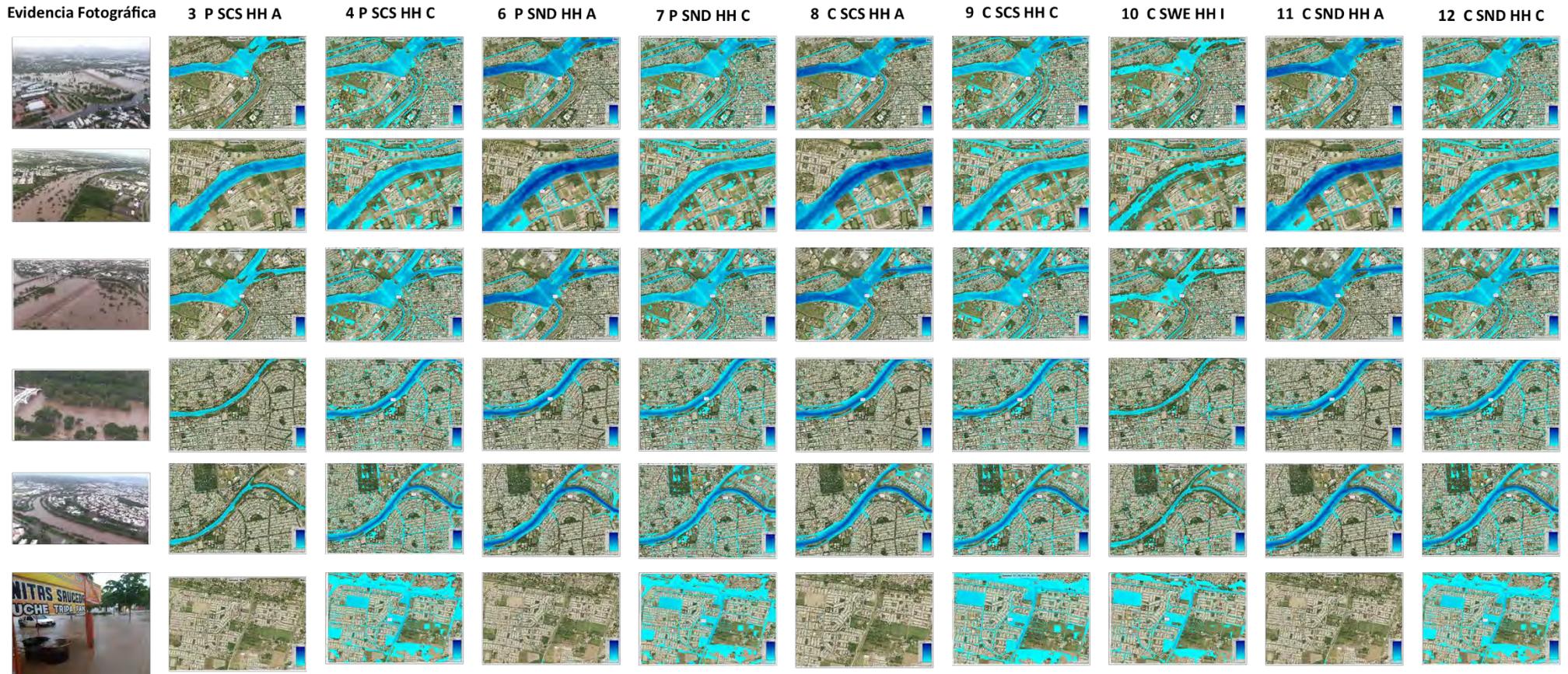


Fig. 38 modelos H-H en comparación con la evidencia fotográfica disponible.

Modelo						
3 P SCS HH A	1.84	2.92	Na	Na	3.70	Na
4 P SCS HH C	2.95	3.60	3.18	1.55	2.59	0.96
6 P SND HH A	6.05+	6.41+	4.76 +	1.76	8.08+	Na
7 P SND HH C	2.97	3.66	2.68	1.56	2.69	0.96
8 C SCS HH A	6.01+	6.15+	4.35+	3.41+	8.06+	Na
9 C SCS HH C	3.23	3.63	3.82	1.09	2.61	0.64
10 C SWE HH I	0.13	2.29	Na	Na	Na	0.24
11 C SND HH A	6.27+	6.41+	4.21+	1.55	7.66+	Na
12 C SND HH C	3.06	3.66	3.46	1.51	2.61	0.77

En la tabla 28 el signo (+) que acompaña el numero indica la sugerencia de sobreestimación en las alturas de inundación, mientras que la leyenda Na indica que el modelo no refleja inundación en la zonada donde fue tomada la imagen de referencia, la cual corresponde a la inundación provocada por la depresión tropical 19-E ocurrido en los días 19 al 21 de septiembre de 2018. las imágenes de referencia fueron tomadas de (El Debate, 2018).

En la tabla 29, se resumen los resultados de las validaciones de las combinaciones de los modelos, tanto para el modelo hidrológico como el modelo hidráulico por separado. En esta tabla se observa que los datos chirps presentaron mejor ajuste en el modelo hidrológico en comparación que los datos pluviométricos, tanto en el NSE como en el PBIAS. En cambio, las validaciones en el modelo hidráulico muestran diferencia entre las combinaciones de modelos hidrológico-hidráulico. La evaluación de kappa y $F^{(2)}$ se realizó con la comparación de una máscara de inundación a partir de una imagen de radar Sentinel de la depresión tropical 19-E. Por desfortuna, no pasó el satélite en la zona justo en el día del evento de inundación, sino que pasó días después. Por tanto, se trató la imagen analizando la extensión de los cuerpos de agua antes y después del evento, obteniendo la extensión de humedad relativa del suelo.

Tabla 29 Resumen de resultados de prueba de simulación hidrológico e hidráulico para las combinaciones de modelos.

MODELO	<i>HIDROLÓGICO</i>			<i>HIDRÁULICO</i>		COMPARACIÓN FOTOGRÁFICA
	PBIAS	RMSE	NSE	KAPPA	$F^{(2)}$	
3 P SCS HH A	12.06	2.1	0.678	0.27	0.702	NO
4 P SCS HH C	12.06	2.1	0.678	0.34	0.7101	SI
6 P SND HH A	23.84	2.3	0.745	0.16	0.721	NO
7 P SND HH C	23.84	2.3	0.745	0.34	0.7108	SI
8 C SCS HH A	-4.94	1.6	0.479	0.16	0.722	NO
9 C SCS HH C	-4.94	1.6	0.479	0.34	0.710	SI
10 C SWE HH I				0.41	0.601	NO
11 C SND HH A	- 3.58	1.5	-0.927	0.17	0.809	NO
12 C SND HH C	- 3.58	1.5	-0.927	0.37	0.706	SI

Por tal razón se presentan valores bajos de kappa, no obstante, se encuentran valores aceptables en función de la tabla 14, obteniendo valores considerables. Para reforzar esos resultados, se evaluó también por la fracción $F^{(2)}$, donde se evalúa el poder predictor del modelo por los pixeles que se modelaron correctamente. En este sentido entonces, los valores son aceptables y moderados en comparación con kappa, que también analiza los pixeles sin inundación simulados.

Como la imagen de radar empleada para la evaluación no corresponde exactamente a la fecha del evento, sumado a esto que no se tiene imagen satelital de calidad que permita la evaluación para los eventos de mayor magnitud, se tomaron las evidencias fotográficas publicadas para evaluar el comportamiento de las combinaciones de modelos, en el cual, sólo las

combinaciones conjuntas mostraron ser las de mayor comparación frente a la evidencia fotográfica, en comparación con las otras comparaciones. Entonces, uniendo la evidencia de las distintas pruebas, las combinaciones de mejor desempeño fueron *4-P-SCS-HHC*, *7-P-SND-HHC* y *12-C-SND-HHC*. Donde los modelos de mejor ajuste son *4-P-SCS-HHC* para datos de pluviómetros y *12-C-SND-HHC* partiendo de datos chirps.

5.8. Índice de peligro de inundación

Se generó el índice de peligro ante inundación a partir de la profundidad y velocidad de flujo simulada bajo la configuración conjunta 2D + 2D-SWE. La figura 39 presenta la inundación producida por el huracán Manuel, el cual ha sido el evento de mayor magnitud de toda la serie temporal analizada. En cambio, en la figura 40 se presenta el índice de peligro generado por el huracán Manuel por la combinación *4-P-SCS-HHC*, en el cual se observa la relación profundidad –velocidad del flujo en función de los daños asociados por el mismo. De esta manera, los ríos presentan un índice extremo de peligro con capacidad de pérdidas de vidas humanas, como se explica en la figura 13 y se explica en la tabla 22. Los canales laterales, y las principales vialidades comprendidas entre los cuerpos de agua, así como las zonas bajas de los arroyos intermitentes presentan índice de peligro extremo, esto principalmente debido por la altura de la lámina de escurrimiento, así como la velocidad del flujo que supera los 0.8 ms^{-1} . Otro punto que reflejan peligro extremo son aquellas vialidades con paso a desnivel, que en el DEM representa una diferencia de altura en distancias pequeñas, reflejando pendientes pronunciadas.

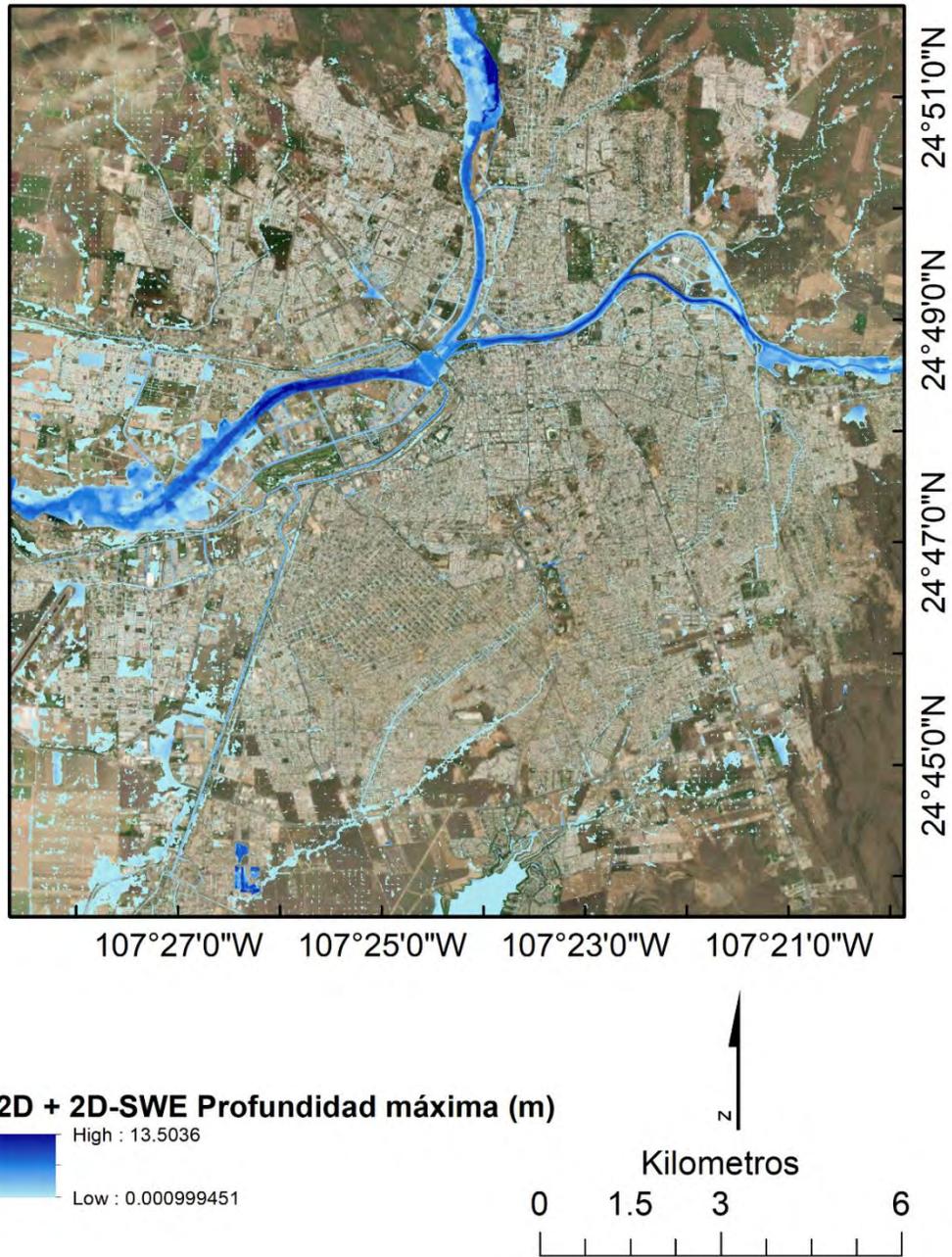
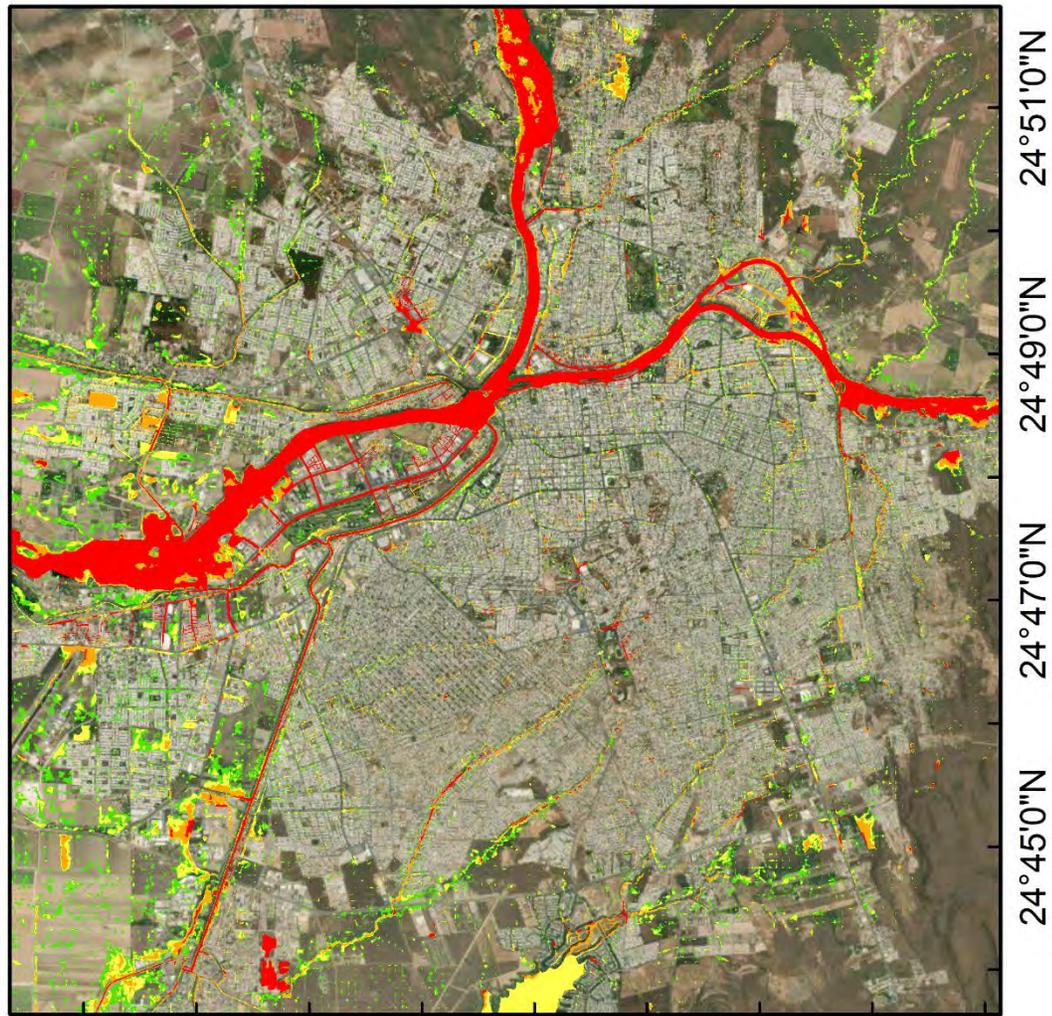


Fig. 39 Simulación de inundación del Huracán Manuel, por el modelo *4-P-SCS-HHC*.



107°27'0"W 107°25'0"W 107°23'0"W 107°21'0"W

24°51'0"N
24°49'0"N
24°47'0"N
24°45'0"N

Índice de Peligro de inundación

- IP: 0.0- 0.75 = Peligro Bajo
- IP: 0.75 - 1.5 = Peligro Moderado
- IP: 1.5 - 2.5 = Peligro Significativo
- IP: >2.5 = Peligro Extremo

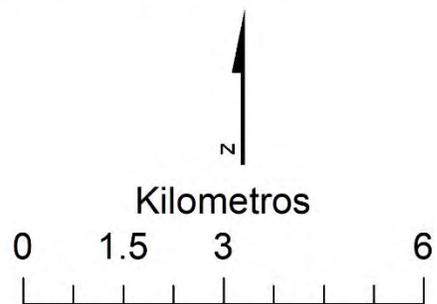
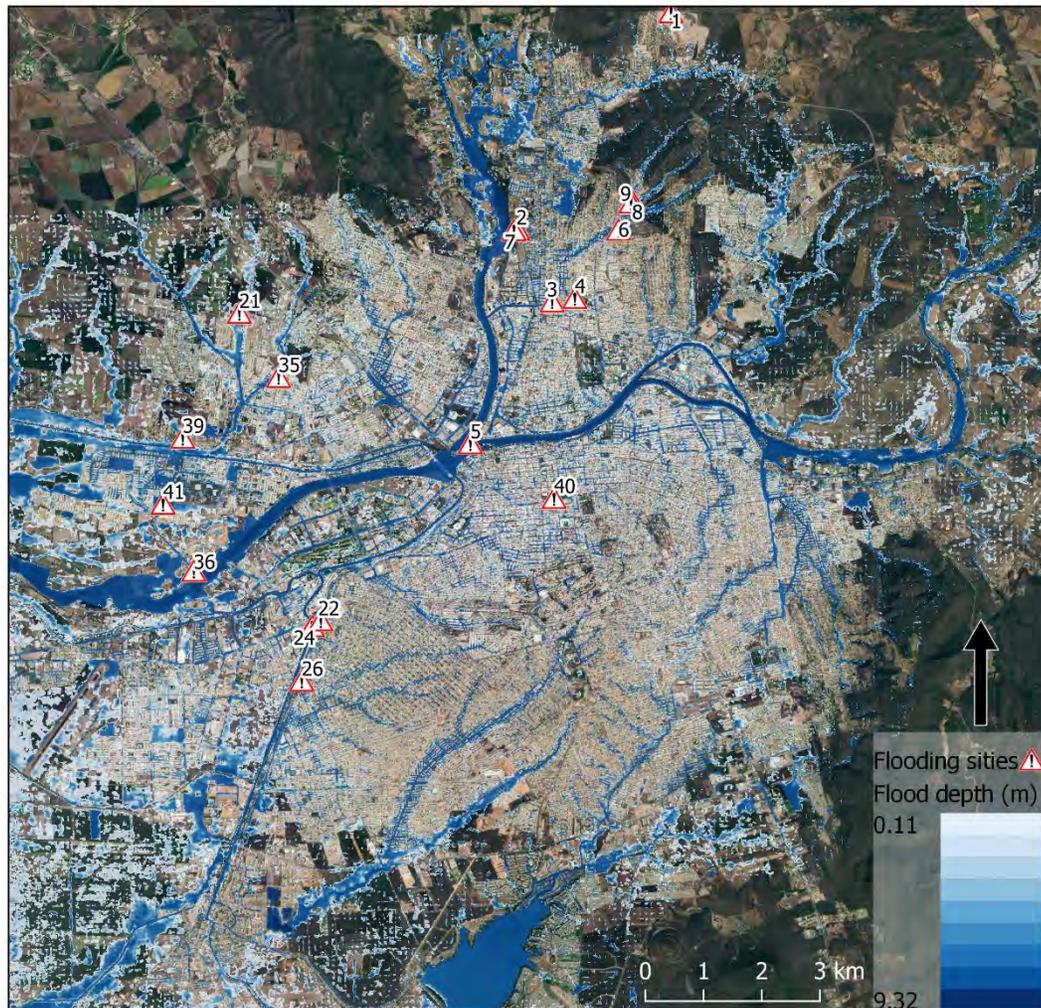


Fig. 40 Índice de peligro ante inundación por el huracán Manuel, modelo *4-P-SCS-HHC*.



ID	Event	ID	Event
1	Recharge zone, danger of leachate contamination. Landslide.	21	Thermal water spring.
2	Flooding due to floodgate in street.	22	Convergence of water drains. House with flood marks.
3	Flooding due to overflow.	23	Flooding due to outflow of water.
4	Slippage.	24	Flooding
5	Convergence of rivers.	26	Flooding and subsidence.
6	Flooding. Wall down due to flooding in 2018, evidence post.	27	Drainage to drainage and flood-damaged buildings.
7	Flooding by floodgates.	35	Flooding. Inability of the drainage drain to contain water flow.
8	Flooding. Evidence of fluvial deposits.	36	Isolated area due to flooding of surrounding neighborhoods.
9	Flooding and subsidence. House cracked by subsidence.	38	Pluvial drain flows into the Culiacán river.
21	Thermal water spring.	39	Bridge over overflowing river with erosion in its foundations.

Fig. 41 simulacion de inundacion de la depresión topial 19-E por el modelo *4-P-SCS-HHC* .

En cambio, en la figura 41 se visualiza la simulación de inundaciones por la depresión tropical 19-E, elaborado por la combinación *4-P-SCS-HHC*. Con alturas del espejo de agua que

oscilan entre los 0.11 m hasta los 1.5 m sobre las vialidades y profundidades mayores a los 9.3 m en los afluentes Tamazula y Humaya, en las afueras de la ciudad. Mientras, en la figura 42 se presenta el índice de peligro que generó la inundación de la depresión tropical 19-E.

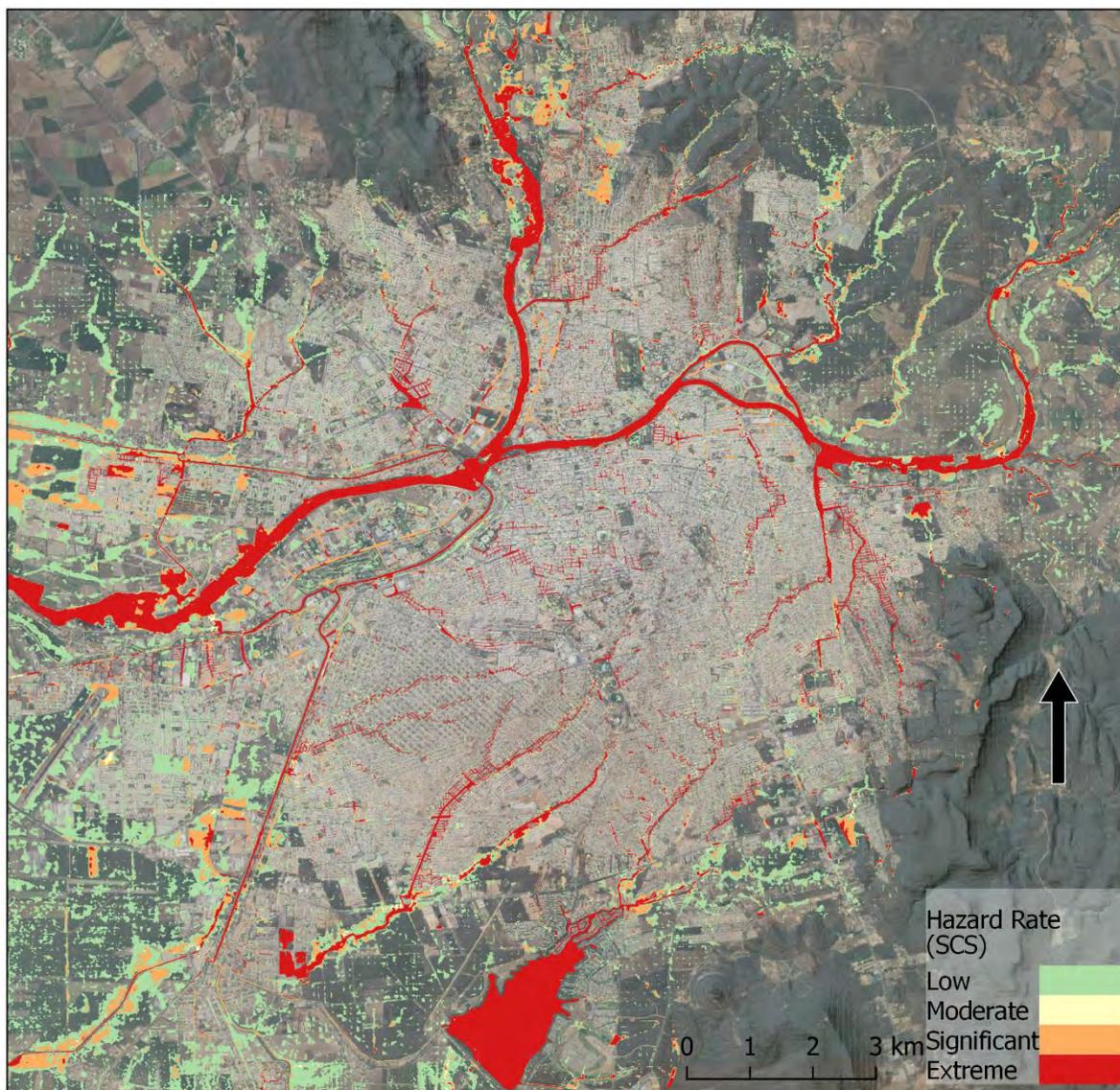


Fig. 42 índice de peligro de inundación por la depresión tropical 19-E, modelo *4-P-SCS-HHC*.

Al igual que en el huracán Manuel, las zonas de peligro categorizado como extremo son las afluentes de los ríos Tamazula, Humaya, Culiacán y el dique en La Primavera. En cambio, se presenta una diferencia en la zona del Congreso y la llanura de inundación del río Culiacán, que presentan nivel de peligro caracterizado significativo, el cual se atribuye a la diferencia de intensidad entre ambas, donde la inundación producida por el Huracán Manuel es de mayor magnitud comparada con la de la depresión tropical 19-E.

CAPITULO VII: CONCLUSIONES

La simulación geoespacial de inundaciones por medio de combinaciones de modelos hidrológicos – hidráulicos permite detectar los puntos críticos de inundación ante fenómenos hidroclimáticos. Estas combinaciones de distintos enfoques, metodologías e insumos iniciales permitieron encontrar el modelo de mejor ajuste para la simulación de inundaciones en la ciudad de Culiacán compuesta por la confluencia de tres ríos en el centro de la ciudad, además de una red de arroyos intermitentes no aforados que generan inundaciones ante precipitaciones.

Se desarrolló e implementó una metodología de manera integral para el análisis geoespacial de inundaciones por medio de tecnologías de la información geográfica aplicado a modelos hidrológicos e hidráulicos en combinaciones acoplados, integrados y conjuntos. Para la ciudad de Culiacán, se desarrollaron 12 combinaciones de modelación hidrológica – hidráulica a partir de diferentes elementos como: 1) valores de insumo principal, como datos pluviométricos y datos de precipitación de radar CHIRPS. 2) método de transformación lluvia escurrentía, es decir modelo SCS-CN y modelo Snyder. 3) modelo hidráulico, unidimensional y bidimensional, y 4) combinación entre modelos, es decir, modelo hidrológico-hidráulica acoplado, integrado y conjunto.

Se emplearon valores de precipitación diaria de 20 estaciones pluviométricas obtenidas por la ventana de atención única de la CONAGUA, de las cuales sólo seis resultaron útiles debido a la discontinuidad del registro de las mismas. Las estaciones empleadas fueron analizadas la independencia espacial y temporal de los valores, así como la interpolación de la serie temporal para el análisis hidrológico. Adicionalmente, se emplearon valores de precipitación satelital producto de radar CHIRPS con el cual se emplearon productos geoespaciales para el modelo hidrológico.

La evaluación del comportamiento de los datos de lluvia en el modelo hidrológico encontró que los datos CHIRPS tienden a la subestimación en comparación de los datos pluviométricos. Sin embargo, la espacialidad espacial y la regularidad temporal de CHIRPS es un aspecto importante que no se debe de desatender en relación con los resultados de esta investigación, sino que, al contrario, deberá de ser analizado más a profundidad como una opción de datos iniciales ante la falta de información in situ que debe de ser proporcionado por las dependencias gubernamentales encargadas del manejo del agua.

Conforme al modelo hidrológico, se compararon dos métodos de transformación de lluvia-escurrentía, los cuales, desde sus consideraciones iniciales, son las de mejor ajuste a las características fisiográficas y morfológicas de la cuenca hidrográfica del río Culiacán. Los métodos del SCS-CN y Snyder mostraron eficiencias similares entre ellas en RMSE con valores de 2.1 y 2.3 respectivamente para datos pluviométricos, así como RMSE de 1.6 y 1.5 para datos CHIRPS, mientras que en PBIAS los valores obtenidos fueron de 12.06 para el modelo SCS-CN y 23.84 para el modelo Snyder a partir de los datos pluviométricos, y de -4.94 y -3.58 para SCS-CN y Snyder respectivamente con los datos pluviométricos, mientras que NSE el modelo

SCS-CN obtuvo 0.678 y Snyder 0.75 para datos pluviométricos. Lo anterior confirma que el modelo SCS-CN con datos pluviométricos es la mejor combinación al presentar menor sesgo estadístico y RMSE.

La simulación hidráulica 1D es adecuada para modelar un evento de inundación por desbordamiento de un río. Este proceso de simulación radica en asemejar el movimiento del flujo desde aguas arriba hasta aguas abajo del canal, e incrementar la altura de calado hasta el punto de desbordamiento. Esta configuración asume que el agua sube hasta inundar las llanuras ubicadas en los márgenes del río. Sin embargo, la principal limitante de esta simulación, radica justo en su diseño, que, al ser una simulación estática, no refleja el comportamiento del flujo durante el evento de inundación, sin embargo, es aplicable para análisis de puentes y aplicaciones de ingeniería.

La principal carencia de la simulación unidimensional de inundaciones se encuentra en no poder simular un evento de inundación a tiempo real. Sin embargo, esto no es una limitante por sí sólo, pero si a eso se le agrega que no es del todo compatible con la topografía de la ciudad de Culiacán, la cual es irregular, con aumento de altura inversamente proporcional a la distancia de los ríos, esto se traduce que el fenómeno simulado no es naturalmente similar para la zona de estudio.

La particularidad y complejidad de las inundaciones en la zona urbana de Culiacán, está en su misma topografía. Las pendientes y red de arroyos intermitentes, los cuales se reactivan con la precipitación y aportan a los ríos Humaya y Tamazula. Por tanto, en la simulación 1D, no se logra incluir las zonas inundables producto de precipitación, las cuales están distribuidas por toda la superficie de la ciudad y se dan por factores como la pendiente, dirección de la pendiente, altura y precipitación que son heterogéneas en toda la zona urbana.

En este sentido, realizar una simulación bidimensional, se presenta como una mejor alternativa para en estudios de crecidas en tiempo real, debido a que ofrece la visualización del movimiento del flujo de agua como una partícula en el tiempo, así como su movimiento en el terreno. Sin embargo, este tipo de simulación no resulta tan conveniente cuando se simula por periodos de retorno, debido a la mayor incertidumbre que se va acumulando desde el modelo hidrológico previo. Por lo que es recomendable emplear la simulación 2D a partir de Hietograma en lapsos subdiarios, con preferencia al tiempo real.

Con lo cual se representaron un total de 9 combinaciones de simulaciones 2D, de los cuales uno es la simulación de aguas poco profundas SWE y los otros ocho son productos de los 4 hietogramas de combinaciones resultantes entre los insumos iniciales y métodos de transformación en el modelo hidrológico, que se introdujeron como datos de flujo en la simulación bidimensional. Distinguiéndose entre ellos por el insumo inicial de datos de lluvia, método de transformación y la simulación entre acoplado, integrado y conjunto.

La combinación de modelo hidrológico hidráulico acoplado, como método tradicional, al ser un modelo dinámico, la entrada de los datos del hidrograma, simula el comportamiento

espacio-temporal de un evento de inundación. Las combinaciones resultantes (*3-P-SCS-HHA*, *6-P-SND-HHA*, *8-C-SCS-HHA*, *11-C-SND-HHA*) mostraron ser combinaciones en las que sólo se representa el flujo sobre los ríos y su posible desbordamiento, pero que no logran responder completamente la interrogante sobre las inundaciones en la ciudad de Culiacán sobre su propia red de arroyos.

Por su parte, los modelos hidrológicos-hidráulicos integrados 2D-SWE en la combinación *10-C-SWE-HHI*, logran simular el evento de inundación por medio del fenómeno de precipitación sobre la malla de computo por medio de una sola entrada de datos, los cuales recaen en los datos de precipitación. No obstante, no logra ser suficiente para mantener el flujo base del canal en los tres ríos, que, por razones obvias, no simula el flujo de los tres ríos que circula desde aguas arriba. Además de que tienden a la sobreestimación de los caudales simulados sobre la malla de simulación.

La propuesta de modelo hidrológico-hidráulico conjunto, en el cual se ejecuta en un mismo tiempo de simulación el hietograma e hidrograma sobre la malla de simulación 2D. Las combinaciones *4-P-SCS-HHC*, *7-P-SND-HHC*, *9-C-SCS-HHC*, *12-C-SND-HHC* permitieron visualizar de una manera holística el comportamiento del flujo en un evento de precipitación. Simularon no sólo el aporte del río, sino que, al mismo tiempo la simulación hidráulica. Tanto en la cuenca del río Culiacán, como en zona de la ciudad que no pertenece a la misma área de captación. Esto permitió en un mismo proceso visualizar aquellas zonas de arroyos intermitentes que se generan ante dicho evento, que en las combinaciones y modelos anteriores no permitían visualizar. La validación mostró que las combinaciones *4-P-SCS-HHC* para datos pluviométricos, *12-C-SND-HHC* para datos de radar son los más efectivos tanto por los valores kappa, la fracción $F^{(2)}$ así como la evidencia fotográfica.

En tanto al índice de peligro (HR), generado por los ráster de profundidad de inundación y velocidad de flujo que salieron de la simulación hidráulica, permitió visualizar, identificar, y delimitar las zonas con distintos grados de peligro que genera una inundación, en función de la fuerza de empuje y volcadura que presenta el flujo del agua. Las regiones de mayor peligrosidad generadas por HR son los afluentes de los ríos Tamazula, Humaya, y Culiacán, así mismo los canales laterales y el dique la primavera, el principal peligro de estas zonas se sugiere por las profundidades del agua. Así también en las intersecciones de principales calles y Avenidas, cuyo HR alto es representado por las pendientes inclinadas, donde las calles funcionan como arroyos virtuales, que, aunado a arroyos intermitentes, aumenta el flujo de agua, superando la capacidad de las coladeras para el desfogue del agua.

Por último se sugiere continuar con la línea de investigación, enriqueciéndolo con los datos de lluvia actuales, así como emplear otras fuentes de datos. Del mismo modo, analizando otros modelos hidrológicos distribuidos y cambios en la representación del terreno en el modelo hidráulico acorde con las modificaciones del terreno natural que se están realizando sobre el río Humaya.

BIBLIOGRAFÍA

- Abdelkarim, A., Al-Alola, S. S., Alogayell, H. M., Mohamed, S. A., Alkadi, I. I., & Youssef, I. Y. (2020). Mapping of gis-flood hazard using the geomorphometric-hazard model: Case study of the al-shamal train pathway in the city of qurayyat, kingdom of saudi arabia. *Geosciences (Switzerland)*, *10*(9), 1–32. <https://doi.org/10.3390/geosciences10090333>
- Abdullah, M. F., Siraj, S., & Hodgett, R. E. (2021). An overview of multi-criteria decision analysis (McdA) application in managing water-related disaster events: Analyzing 20 years of literature for flood and drought events. *Water (Switzerland)*, *13*(10). <https://doi.org/10.3390/w13101358>
- Acosta-Castellanos, P. M., & Sierra-Aponte, L. X. (2013). Evaluación de métodos de construcción de curvas IDF a partir de distribuciones de probabilidad y parámetros de ajuste. *Revista Facultad de Ingeniería*, *22*(35), 25–33. <https://doi.org/https://doi.org/10.19053/01211129.2512>
- Acosta Castellanos, P. M., & Sierra APonte, L. X. (2013). Evaluación de métodos de construcción de curvas IDF a partir de distribuciones de probabilidad y parámetros de ajuste. *Revista Facultad De Ingeniería*, *22*(35), 25. <https://doi.org/10.19053/01211129.2512>
- Ahmadi-sani, N., Razaghnia, L., & Pukkala, T. (2022). Effect of Land-Use Change on Runoff in Hyrcania. *Land*, *11*(2), 1–14. <https://doi.org/10.3390/land11020220>
- Alexander, E., Battikk, M., Castillo, C., Mendoza, A., Poveda, J., & Vásquez, E. (2015). Métodos Numéricos para la Predicción de Inundaciones. Numerical Methods for Predicting Floods. *Revista de Iniciación Científica*, *1*(1), 28–33. <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/ric/article/view/345>
- Ali, M., Rahman, K. U., Ullah, H., Shang, S., Mao, D., & Han, M. (2024). Land Reforestation and Its Impact on the Environmental Footprints Across Districts of Khyber Pakhtunkhwa in Pakistan. *Water*, *16*(20). <https://doi.org/10.3390/w16203009>
- Amarís Castro, G. E., Guerrero Barbosa, T. E., & Sánchez Ortiz, E. A. (2015). Comportamiento de las ecuaciones de Saint-Venant en 1D y aproximaciones para diferentes condiciones en régimen permanente y variable. *Revista Tecnura*, *19*(45), 75. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.3.a06>
- Apel, H., Aronica, G. T., Kreibich, H., & Thielen, A. H. (2008). Flood risk analyses - How detailed do we need to be? *Natural Hazards*, *49*(1), 79–98. <https://doi.org/10.1007/s11069-008-9277-8>
- Aronica, G., Bates, P. D., & Horritt, M. S. (2002). Assessing the uncertainty in distributed model predictions using observed binary pattern information within GLUE. *Hydrological Processes*, *16*(10), 2001–2016. <https://doi.org/10.1002/hyp.398>
- Arriagada, L., Rojas, O., Arumí, J. L., Munizaga, J., Rojas, C., Farias, L., & Vega, C. (2019). A new method to evaluate the vulnerability of watersheds facing several stressors: A case study in mediterranean Chile. *Science of the Total Environment*, *651*, 1517–1533. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.237>

- Asurza, F., Ramos, C., & Lavado, W. (2018). Assessment of Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) and Global Precipitation Measurement (GPM) products in hydrological modeling of the Huancane river basin, Peru. *Scientia Agropecuaria*, 9(1), 53–62. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2018.01.06>
- Avand, M., Moradi, H. R., & Lasboye, M. R. (2021). Spatial prediction of future flood risk: An approach to the effects of climate change. *Geosciences (Switzerland)*, 11(1), 1–20. <https://doi.org/10.3390/geosciences11010025>
- Avila-Aceves, E., Plata-Rocha, W., Monjardin-Armenta, S. A., & Rangel-Peraza, J. G. (2023). Geospatial modelling of floods: a literature review. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 1(ix), 1–20. <https://doi.org/10.1007/s00477-023-02505-1>
- Bai, L., Shi, C., Li, L., Yang, Y., & Wu, J. (2018). Accuracy of CHIRPS satellite-rainfall products over mainland China. *Remote Sensing*, 10(3). <https://doi.org/10.3390/rs10030362>
- Barón R., H. I., Bedoya L., S. j., & Mejía., G. (2017). Desarrollo e innovación en ingeniería. In E. Serna M. (Ed.), *Desarrollo e innovación en ingeniería* (pp. 704–720).
- Ben Khalfallah, C., & Saidi, S. (2018). Spatiotemporal floodplain mapping and prediction using HEC-RAS - GIS tools: Case of the Mejerda river, Tunisia. *Journal of African Earth Sciences*, 142, 44–51. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2018.03.004>
- Bessar, M. A., Matte, P., & Anctil, F. (2020). Uncertainty analysis of a 1D river hydraulic model with adaptive calibration. *Water (Switzerland)*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/w12020561>
- Bladé Castellet, E., Cea, L., & Corestein, G. (2014). Numerical modelling of river inundations. *Ingeniería Del Agua*, 18(1), 68. <https://doi.org/10.4995/ia.2014.3144>
- Bladé, E., Cea, L., & Corestein, G. (2014). Modelización numérica de inundaciones fluviales. *Ingeniería Del Agua*, 18(1), 71–82. <https://doi.org/10.4995/ia.2014.3144>
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J., & Coll, A. (2014). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Metodos Numericos Para Calculo y Diseno En Ingenieria*, 30(1), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004>
- Brunner., G. W. (2023). *HEC-RAS 2D User's Manual*. HEC-RAS 2D User's Manual. <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/r2dum/latest>
- Buffon, F. T., & Assis, F. De. (2015). Previsão de curto prazo de níveis no rio acre no município de rio branco-ac com modelos hidrológicos empíricos na enchente de 2015. *XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, 1–8.
- Burnama, N. S., Rohmat, F. I. W., Farid, M., Kuntoro, A. A., Kardhana, H., Rohmat, F. I. W., & Wijayasari, W. (2023). The Utilization of Satellite Data and Machine Learning for Predicting the Inundation Height in the Majalaya Watershed. *Water*, 15(17). <https://doi.org/10.3390/w15173026>
- Cardona Orozco, Y. M., Toro, F. M., Vélez, J. I., & Otero Díaz, L. J. (2007). Estimación de la amenaza por inundación generada por ondas de tsunami considerando la altura y velocidad de la lámina de agua inundante para el municipio de Tumaco. *Boletín Científico CCCP*,

14(January), 19–30. https://doi.org/10.26640/01213423.14.19_30

- Carrera, J., Méndez, W., & Rivas, L. (2013). Modelaje hidrológico de escenarios para eventos de inundaciones en la planicie de desborde del río Patanemo, estado Carabobo, Venezuela. *Revista de Investigación*, 37(80), 247–267.
- Castillo García, C. L., Abreu Franco, D. E., & Alvarez González, M. (2021). Evaluación de distintas fórmulas empíricas para el cálculo del tiempo de concentración en la cuenca urbana del río Bélico y Cubanicay, ciudad de Santa Clara. *Enfoque UTE*, 12(3), 51–64. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.729>
- Caviedes-Voullième, D., Morales-Hernández, M., López-Marijuan, I., & García-Navarro, P. (2014). Reconstruction of 2D river beds by appropriate interpolation of 1D cross-sectional information for flood simulation. In *Environmental Modelling and Software* (Vol. 61, pp. 206–228). <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.07.016>
- Cea, L., & Bladé, E. (2015). A simple and efficient unstructured finite volume scheme for solving the shallow water equations in overland flow applications. *Water Resources Research*, 51(7), 5464–5486. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/2014WR016547>
- CENAPRED-SEGOB. (2014). Diagnóstico de peligros e identificación de riesgos de desastres en México. In *Atlas Nacional de Riesgos de la República Mexicana* (Vol. 1).
- Cerda Lorca, J., & Villarroel Del P., L. (2008). Evaluación de la concordancia inter-observador en investigación pediátrica: Coeficiente de Kappa. *Revista Chilena de Pediatría*, 79(1), 54–58. <https://doi.org/10.4067/s0370-41062008000100008>
- Chadli, K., Kirat, M., Laadoua, A., & El Harchaoui, N. (2016). Runoff modeling of Sebou watershed (Morocco) using SCS curve number method and geographic information system. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2(3), 1–8. <https://doi.org/10.1007/s40808-016-0215-6>
- Chate, S. J., & Nimbalkar, P. T. (2019). Development of flood routing model using hec-ras software for mutha river in Pune City. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 8(5), 2302–2307. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85070480490&partnerID=40&md5=5cdb2771c0ade59bf9de271edabc8384>
- Chen, S., Garambois, P. A., Finaud-Guyot, P., Dellinger, G., Mosé, R., Terfous, A., & Ghenaim, A. (2018). Variance based sensitivity analysis of 1D and 2D hydraulic models: An experimental urban flood case. *Environmental Modelling and Software*, 109(October 2017), 167–181. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.08.008>
- Choné, G., Biron, P. M., Buffin-Bélanger, T., Mazgareanu, I., Neal, J. C., & Sampson, C. C. (2021). An assessment of large-scale flood modelling based on LiDAR data. *Hydrological Processes*, 35(8), 1–13. <https://doi.org/10.1002/hyp.14333>
- Chow, Ven Te. (1994). *Ven Te Chow Hidrologia Aplicada.pdf* (p. 299).
- Chow, VT, Maidment, D., & Mays, L. (1994). Hidrología aplicada. In *Hidrologia aplicada* (p. 575 pp). <http://bases.bireme.br/cgi-bin/wxislind.exe/iah/online/?IsisScript=iah/iah.xis&src=google&base=REPIDISCA&lang=p&nextAction=lnk&exprSearch=158911&indexSearch=ID%5Cnhttp://www.sidalc.net>

/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=BINAI.xis&method=post&formato=2&cantidad=

- Cirilo, M. G., & Lujano, B. (2013). *Reseña del huracán “ Manuel ” del Océano Pacífico* (pp. 1–9).
- Coaquira-Quispe, Y. (2018). Análisis comparativo de precipitaciones medias mensuales, utilizando datos de satélite TRMM y estaciones meteorológicas en la cuenca Huancané-Puno [Universidad Nacional del Altiplano]. In *Repositorio institucional UNA-PUNO*. <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/3276958>
- Comisión Nacional del Agua. (2011). *Manual para el control de inundaciones* (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (ed.); 2011th ed.). <https://bpo.sep.gob.mx/#/recurso/634/document/1>
- CONAGUA (Comisión Nacional Del Agua). (2018). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Río Culiacán (2504), Estado de Sinaloa. *Diario Oficial de La Federación*, 22. https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/sinaloa/DR_2504.pdf
- CONAGUA (Comisión Nacional Del Agua). (2024). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero río Culiacán (2504), estado de Sinaloa. *Diario Oficial de La Federación*, 2504, 40. [efaidnbmnnnibpajpcglclefindmkaj/https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/sinaloa/DR_2504.pdf](https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/sinaloa/DR_2504.pdf)
- Córdoba, S., Zea, J., & Murillo, W. (2006). Estimación de la precipitación media, evaluación de la red pluviométrica y cuantificación del balance hídrico en la cuenca del río Quito en el departamento de Choco, Colombia. *Meteorología Colombiana*, 10(1970), 100–110. http://webigacl.igac.gov.co/mapas.htm%0Ahttp://ciencias.bogota.unal.edu.co/fileadmin/content/geociencias/revista_meteorologia_colombiana/numero10/10_09.pdf
- Correa, N. F., Ribeiro, V. de O., Mioto, C. L., & Filho, A. C. P. (2017). Obtaining of corrected DEM to watershed delimitation with the aid of free geotechnologies. *Anuario Do Instituto de Geociencias*, 40(1), 217–225. https://doi.org/10.11137/2017_01_217_225
- Cosco, C., Gómez, M., Russo, B., Tellez-Alvarez, J., Macchione, F., Costabile, P., & Costanzo, C. (2020). Discharge coefficients for specific grated inlets. Influence of the Froude number. *Urban Water Journal*, 17(7), 656–668. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2020.1811881>
- Coy-Muricia, L. C. (2017). *Ajuste y validación del modelo precipitación – escorrentía GR2M aplicado a la subcuenca nevado*. 11. <https://hdl.handle.net/11634/2857>
- DeAlba-Martínez, H., & Márquez-Azúa, B. (2017). Hacia la creación de un índice de riesgo para diseñar y evaluar un servicio ecosistémico de regulación de inundaciones en microcuencas urbanas. *Tecnogestión*, 14(1).
- Dhanapala, L., Gunarathna, M. H. J. P., Kumari, M. K. N., Ranagalage, M., Sakai, K., & Meegastenna, T. J. (2022). Towards Coupling of 1D and 2D Models for Flood Simulation—A Case Study of Nilwala River Basin, Sri Lanka. *Hydrology*, 9(2). <https://doi.org/10.3390/hydrology9020017>
- Dinu, C., Sîrbu, N., & Drobot, R. (2022). Delineation of the Flooded Areas in Urban

- Environments Based on a Simplified Approach. *Applied Sciences*, 12(6), 3174. <https://doi.org/10.3390/app12063174>
- Domínguez Mora, R., Arganis-Juárez, M. L., Carrizosa Elizondo, E., & Esquivel Garduño, G. (2016). Caracterización de las pérdidas por infiltración con análisis estadístico de precipitación y escurrimiento. *Ribagua*, 3(1), 18–24. <https://doi.org/10.1016/j.riba.2016.04.001>
- Dong, B., Xia, J., Zhou, M., Deng, S., Ahmadian, R., & Falconer, R. A. (2021). Experimental and numerical model studies on flash flood inundation processes over a typical urban street. *Advances in Water Resources*, 147(August 2020), 103824. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2020.103824>
- Ekeu-wei, I. T., & Blackburn, G. A. (2018). Applications of open-access remotely sensed data for flood modelling and mapping in developing regions. In *Hydrology* (Vol. 5, Issue 3). <https://doi.org/10.3390/hydrology5030039>
- El Bilali, A., Taleb, A., & Boutahri, I. (2021). Application of HEC-RAS and HEC-LifeSim models for flood risk assessment. *Journal of Applied Water Engineering and Research*, 9(4), 336–351. <https://doi.org/10.1080/23249676.2021.1908183>
- El Debate. (2018). *Imágenes sorprendentes de las inundaciones en Culiacán 2018*. <https://www.debate.com.mx/culiacan/imagenes-sorprendentes-de-las-inundaciones-en-culiacan--20180920-0224.html>
- Elaji, A., & Ji, W. (2020). Urban runoff simulation: How do land use/cover change patterning and geospatial data quality impact model outcome? *Water (Switzerland)*, 12(10), 1–19. <https://doi.org/10.3390/w12102715>
- Ellis, C., Visser-Quinn, A., Aitken, G., & Beevers, L. (2021). Quantifying uncertainty in the modelling process; future extreme flood event projections across the UK. *Geosciences (Switzerland)*, 11(1), 1–20. <https://doi.org/10.3390/geosciences11010033>
- Ellis, E. A., Romero, J. A., Hernández, I. U., Gallo, C. A., & Alanís, J. L. (2012). Evaluación geográfica de áreas susceptibles a inundación en la cuenca del río Tuxpan, Veracruz. *Avances En Investigación Agropecuaria*, 16(1), 7–28.
- Enrique, O., & Vilches, R. (2015). *Cambios Ambientales y Dinámica de Inundaciones Fluviales en una Cuenca Costera del Centro Sur de Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias Ambientales con mención en Sistemas Acuáticos Continentales OCTAVIO ENRIQUE ROJAS VILCHES CONCEPCIÓN-CHILE* [Universidad de Concepción]. <http://repositorio.udec.cl/jspui/handle/11594/1773>
- Enriqueta García. (1964). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de köppen (para adaptarlo a las condiciones de la republica mexicana)*. <https://www.igg.unam.mx/geoigg/biblioteca/archivos/memoria/20190917100949.pdf>
- Escalante Sandoval, C. A., & Reyes Chávez, L. (2002). *Técnicas Estadísticas en Hidrología* (F. de I. UNAM (ed.); Primera Ed).
- Fadhliani, Zulkafli, Z., Yusuf, B., & Nurhidayu, S. (2021). Assessment of streamflow simulation for a tropical forested catchment using dynamic topmodel—dynamic fluxes and

connectivity for predictions of hydrology (Decipher) framework and generalized likelihood uncertainty estimation (glue). *Water (Switzerland)*, 13(3), 1–16. <https://doi.org/10.3390/w13030317>

- Fernanda, J., Gabriela, E., Raúl, M., & Ventana, L. (2007). Relación precipitación - escorrentía y número de curva bajo diferentes condiciones de uso del suelo. Cuenca modal del sistema serrano de La Ventana, Argentina. *Revista de La Facultad de Ciencias Agrarias*, XXXIX(1), 21–28.
- Fernández-Pato, J., Caviedes-Voullième, D., & García-Navarro, P. (2016). Rainfall/runoff simulation with 2D full shallow water equations: Sensitivity analysis and calibration of infiltration parameters. *Journal of Hydrology*, 536, 496–513. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.03.021>
- Finaud-Guyot, P., Delenne, C., Guinot, V., & Llovel, C. (2011). 1D-2D coupling for river flow modeling. *Comptes Rendus - Mécanique*, 339(4), 226–234. <https://doi.org/10.1016/j.crme.2011.02.001>
- Flores, D. B. (2015). *Crecimiento Urbano Como Estrategia para Prevenir Inundaciones*.
- Francisco-nicolás, N., Turrent-fernández, A., Flores-lópez, H. E., Roberto, M., & Javier, M. (2010). Estimación Del Escurrimiento Superficial Con El Método Scs-Cn En El Trópico Subhúmedo De México. *Terra Latinoamericana*, 28(1), 71–78.
- Francisco, C.-A. D. (2013). Estimación de la creciente media anual en la Región Hidrológica Núm. 10 de México con base en ecuaciones de regresión potencial. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 14(4), 563–574.
- Fu, S., Xing, Z., Ji, Y., Zhao, Y., Sun, M., Li, H., & Fu, Q. (2020). Improved flood simulation accuracy by downscaling remotely sensed precipitation data in the Qixing Wetland Watershed. *Ecological Engineering*, 158(August). <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.106038>
- Fuckner, M. A., & Moraes, E. C. (2019). *ASTER em áreas com configuração topográfica distinta. December*.
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2(1), 150066. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- García-Alén, G., González-Cao, J., Fernández-Nóvoa, D., Gómez-Gesteira, M., Cea, L., & Puertas, J. (2022). Analysis of two sources of variability of basin outflow hydrographs computed with the 2D shallow water model Iber: Digital Terrain Model and unstructured mesh size. *Journal of Hydrology*, 612, 128182. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128182>
- García-Lorenzo, R., & Conesa-García, C. (2011). Estimación De Caudales De Avenida Y Delimitación De Áreas Inundables Mediante Métodos Hidrometeorológicos E Hidráulicos Y Técnicas S.I.G., Estudio Aplicado Al Litoral Sur De La Región De Murcia. *Papeles de Geografía*, 0(53–54), 107–123.

- Gaughan, A. E., Kolarik, N. E., Stevens, F. R., Pricope, N. G., Cassidy, L., Salerno, J., Bailey, K. M., Drake, M., Woodward, K., & Hartter, J. (2022). Using Very-High-Resolution Multispectral Classification to Estimate Savanna Fractional Vegetation Components. *Remote Sensing*, *14*(551), 1–19. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/rs14030551>
- GEOLMEX - Geología y Servicios de Ingeniería. (2020). *Sistema de atlas de peligros y/o riesgos del municipio de Culiacán, Sinaloa* (Issue CLN-LIR-021-2020, p. 330). <https://implanculiacan.mx/Atlas de Riesgos Culiacán 2020/>
- Geravand, F., Hosseini, S. M., & Ataie-Ashtiani, B. (2020). Influence of river cross-section data resolution on flood inundation modeling: Case study of Kashkan river basin in western Iran. *Journal of Hydrology*, *584*(February), 124743. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124743>
- Ghimire, S. (2013). Application of a 2D hydrodynamic model for assessing flood risk from extreme storm events. *Climate*, *1*(3), 148–162. <https://doi.org/10.3390/cli1030148>
- Gomes Calixto, K., Wendland, E. C., & Melo, D. D. C. D. (2020). Hydrologic performance assessment of regulated and alternative strategies for flood mitigation: a case study in São Paulo, Brazil. *Urban Water Journal*, *17*(5), 481–489. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2020.1773509>
- Gómez Palacio, D. (2019). Universidad Autónoma Chapingo IV Congreso Internacional y XV Congreso Nacional sobre Recursos Bióticos de Zonas Áridas “Innovaciones para mitigar sequía y desertificación.” *IV Congreso Internacional y XV Congreso Nacional Sobre Recursos Bióticos de Zonas Áridas “Innovaciones Para Mitigar Sequía y Desertificación,”* 87–88.
- González-Aguirre, J. C., Vázquez-Cendón, M. E., & Alavez-Ramírez, J. (2016). Simulación numérica de inundaciones en Villahermosa México usando el código IBER. *Ingeniería Del Agua*, *20*(4), 201. <https://doi.org/10.4995/ia.2016.5231>
- González, D., Sordo, A., Garrote, L., & Iglesias, A. (2011). *Evaluación de la escorrentía anual obtenida a partir de fórmulas climatológicas y modelos regionales de clima*. 2(1), 10. http://oa.upm.es/13554/1/INVE_MEM_2011_114083.pdf
- Guth, P. L., Van Niekerk, A., Grohmann, C. H., Muller, J. P., Hawker, L., Florinsky, I. V., Gesch, D., Reuter, H. I., Herrera-Cruz, V., Riazanoff, S., López-Vázquez, C., Carabajal, C. C., Albinet, C., & Strobl, P. (2021). Digital elevation models: Terminology and definitions. *Remote Sensing*, *13*(18). <https://doi.org/10.3390/rs13183581>
- Gutiérrez Lozano, J., Vargas Tristán, V., Romero Rodríguez, M., Plácido de la Cruz, J. M., Aguirre Bortoni, M. de J., & Silva Espinoza, H. T. (2011). Periodos de retorno de lluvias torrenciales para el estado de Tamaulipas, México. *Investigaciones Geográficas*, *76*, 20–33. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112011000300003&lng=es&tlng=es
- Harrison, L., Landsfeld, M., Husak, G., Davenport, F., Shukla, S., Turner, W., Peterson, P., & Funk, C. (2022). Advancing early warning capabilities with CHIRPS-compatible NCEP GEFS precipitation forecasts. *Scientific Data*, *9*(1), 375. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01468-2>

- HARRY H. BARNES, J. (1967). Roughness Characteristics of Natural Channels. *US Geological Survey*.
- He, J., Wan, Y. R., Chen, H. T., & Wang, W. C. (2021). Study on the impact of land-use change on runoff variation trend in luojiang river basin, China. *Water (Switzerland)*, 13(22). <https://doi.org/10.3390/w13223282>
- Hidalgo-Mayo, A., Hernández-Orozco, N., & Perigó-Román, E. (2019). Períodos de retorno para las inundaciones costeras y los eventos extremos de viento y oleaje en la costa nororiental de Cuba. *Revista Cubana de Meteorología*, 25(2).
- Hien, L. T. T., & An Chien, N. (2021). Investigate impact force of dam-break flow against structures by both 2d and 3d numerical simulations. *Water (Switzerland)*, 13(3). <https://doi.org/10.3390/w13030344>
- Hingray, B., Picouet, C., & Musy, A. (2015). HYDROLOGY A Science for Engineers. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 11, Issue 1). CRC Press. http://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1091/RED2017-Eng-8ene.pdf?sequence=12&isAllowed=y%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2008.06.005%0Ahttps://www.researchgate.net/publication/305320484_SISTEM_PEMBETUNGAN_TERPUSAT_STRATEGI_MELESTARI
- Hu, S., Fan, Y., & Zhang, T. (2020). Assessing the Effect of Land Use Change on Surface Runoff in a Rapidly Urbanized City: A Case Study of the Central Area of Beijing. *Land*, 9(17), 1–15.
- Huerta-Loera, S. F., & Domínguez-Mora, R. (2016). Metodología para la estimación del riesgo aguas abajo de una presa en función de las políticas de operación a largo plazo. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 17(3), 343–356. <https://doi.org/10.1016/j.riit.2016.07.005>
- Hydrologic Engineering Center. (2023). *HEC-RAS User 's Manual* (p. 769).
- IMPLAN. (2007). *Plan Parcial Culiacán Zona Centro*.
- INEGI. (2005). *Guía para la interpretación de cartografía. Climatología*.
- INEGI. (2010). Documento Técnico Descriptivo De La Red Hidrográfica Escala 1:50 000. *Dirección General de Geografía y Medio Ambiente*, 106. http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/hidrologia/regiones_hidrograficas.aspx
- INEGI. (2019). *Informe técnico de la cuenca hidrológica Río Culiacán: humedales*. https://www.inegi.org.mx/contenido/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825190934.pdf
- Íñiguez-Ayón, Y. P., Peña-Salmón, C. Á., & Sicairos-Avitia, S. E. (2015). Ecosistema fluvial urbano: evaluación ecológica y visual del río Tamazula en la ciudad de Culiacán, Sinaloa. *Quivera*, 1, 75–97. <http://weekly.cnbnews.com/news/article.html?no=124000>
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). (n.d.). Programa contra contingencias hidráulicas para la zona urbana de Tequisquiapan, Querétaro. In *Programa contra contingencias hidráulicos por organismos de cuenca para las principales ciudades del país (etapa 1)*.

- Janabi, F. A., Ongdas, N., Bernhofer, C., Reyes Silva, J. D., Benisch, J., & Krebs, P. (2021). Assessment of topkapi-x applicability for flood events simulation in two small catchments in saxony. *Hydrology*, 8(3). <https://doi.org/10.3390/hydrology8030109>
- JAPAC. (2008). *Estudio de impacto ambiental del colector de aguas pluviales Las Torres-Los Helechos, zona sureste Culiacán*. <http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/sin/estudios/2009/25SI2009HD097.pdf>
- Jonoski, A., Popescu, I., Zhe, S., Mu, Y., & He, Y. (2019). Analysis of flood storage area operations in Huai River using 1D and 2D river simulation models coupled with global optimization algorithms. *Geosciences (Switzerland)*, 9(12). <https://doi.org/10.3390/geosciences9120509>
- Kachholz, F., & Tränckner, J. (2021). A model-based tool for assessing the impact of land use change scenarios on flood risk in small-scale river systems—part 1: Pre-processing of scenario based flood characteristics for the current state of land use. *Hydrology*, 8(3). <https://doi.org/10.3390/hydrology8030102>
- Kachholz, Frauke, & Tränckner, J. (2021). A model-based tool for assessing the impact of land use change scenarios on flood risk in small-scale river systems—part 1: Pre-processing of scenario based flood characteristics for the current state of land use. *Hydrology*, 8(3). <https://doi.org/10.3390/hydrology8030102>
- Kastridis, A., Kirkenidis, C., & Sapountzis, M. (2020). An integrated approach of flash flood analysis in ungauged Mediterranean watersheds using post-flood surveys and unmanned aerial vehicles. *Hydrological Processes*, 34(25), 4920–4939. <https://doi.org/10.1002/hyp.13913>
- Kaykhosravi, S., Abogadil, K., Khan, U. T., & Jadidi, M. A. (2019). The low-impact Development Demand Index: A new approach to identifying locations for LID. *Water (Switzerland)*, 11(11), 11–15. <https://doi.org/10.3390/w11112341>
- Kaykhosravi, S., Khan, U. T., & Jadidi, M. A. (2020). The effect of climate change and urbanization on the demand for low impact development for three Canadian cities. *Water (Switzerland)*, 12(5), 1–23. <https://doi.org/10.3390/W12051280>
- Keating, T. (2007). Tropical Rainfall Measuring Mission (Trmm). In *EASCON Record: IEEE Electronics and Aerospace Systems Convention*. <https://doi.org/10.1002/9780471743989.vse10190>
- Kheradmand, S., Seidou, O., Konte, D., & Barmou Batoure, M. B. (2018). Evaluation of adaptation options to flood risk in a probabilistic framework. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 19(July), 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.07.001>
- Knapp, B. (1979). Elements of Geographical Hydrology. In *Elements of Geographical Hydrology*. <https://doi.org/10.4324/9780203333211>
- Kordrostami, S., Alim, M. A., Karim, F., & Rahman, A. (2020). Regional flood frequency analysis using an artificial neural network model. *Geosciences (Switzerland)*, 10(4), 1–15. <https://doi.org/10.3390/geosciences10040127>

- Laura Madery. (2005). *Principios de hidrogeografía. Estudio del ciclo hidrológico* (p. 18). <https://books.google.com.ec/books?id=0S3XDWsDzSAC&pg=PA18&lpg=PA18&dq=ci+nturon+ecuatorial&source=bl&ots=2S3Gqsg4YG&sig=ACfU3U0EkFcsRmxhvc7WG3d>
- León Ochoa, R., Portuguese Maurtua, D., & Chávarri Velarde, E. (2019). Modelación de la disponibilidad hídrica del río Piura - Perú, considerando la incidencia del cambio climático. *Journal of High Andean Research*, 21(3), 182–193. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.18271/ria.2019.476> Journal
- Li, Z., Zhang, Y., Wang, J., Ge, W., Li, W., Song, H., Guo, X., Wang, T., & Jiao, Y. (2021). Impact evaluation of geomorphic changes caused by extreme floods on inundation area considering geomorphic variations and land use types. *Science of the Total Environment*, 754(100). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142424>
- Loi, N. K., Liem, N. D., Tu, L. H., Hong, N. T., Truong, C. D., Tram, V. N. Q., Nhat, T. T., Anh, T. N., & Jeong, J. (2019). Automated procedure of real-time flood forecasting in vu gia – thu bon river basin, vietnam by integrating swat and hec-ras models. *Journal of Water and Climate Change*, 10(3), 535–545. <https://doi.org/10.2166/wcc.2018.015>
- López, J. J., Goñi, M., San Martín, I., & Erro, J. (2019). Análisis regional de frecuencias de las precipitaciones diarias extremas en Navarra. Elaboración de los mapas de cuantiles. *Ingeniería Del Agua*, 23(1), 33. <https://doi.org/10.4995/ia.2019.10058>
- Maces, S. G. V., & Viera, M. A. D. (2018). Geostatistical estimation of the spatial distribution of mean monthly and mean annual rainfall in Nuevo León, Mexico (1930-2014). *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 9(5), 106–127. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-05-05>
- Mancera-González, O. (2021). EL CICLÓN QUE NADIE VIO: RIESGOS QUE POTENCIARON UN DESASTE EN EL NOROESTE DE MÉXICO. *Revista de Estudios Latinoamericanos Sobre Reducción Del Riesgo de Desastres REDER*, 5(1), 110–125. <http://www.revistareder.com/ojs/index.php/reder/article/view/66/77>
- Manfreda, S., Samela, C., Refice, A., Tramutoli, V., & Nardi, F. (2018). Advances in large-scale flood monitoring and detection. *Hydrology*, 5(3), 5–8. <https://doi.org/10.3390/hydrology5030049>
- Martins, R., Leandro, J., Chen, A. S., & Djordjević, S. (2017). A comparison of three dual drainage models: shallow water vs local inertial vs diffusive wave. *Journal of Hydroinformatics*, 19(3), 331–348. <https://doi.org/10.2166/hydro.2017.075>
- Mejía Marcacuzco, J. A. (2006). *Hidrología Aplicada*. <https://es.scribd.com/document/348674200/Hidrologia-Aplicada-Abel-Mejia-UNA-LA-MOLINA-2006>
- Méndez, J., De Jesús, J., & González, V. (2008). Análisis de tendencias de precipitación (1920-2004) en México. *Investigaciones Geográficas*, 65(900), 38–55.
- Mendoza, M., Bocco, G., Bravo, M., Siebe, C., & Ortiz, M. (2002). Modelamiento hidrológico espacialmente distribuido: una revisión de sus componentes. *Investigaciones Geográficas, Boletín Del Instituto de Geografía*, 47, 36–58.

- Mind'je, R., Li, L., Kayumba, P. M., Mindje, M., Ali, S., & Umugwaneza, A. (2021). Article integrated geospatial analysis and hydrological modeling for peak flow and volume simulation in rwanda. *Water (Switzerland)*, *13*(20), 1–23. <https://doi.org/10.3390/w13202926>
- Miranda-Aragón, L., Ibáñez-Castillo, L. A., Valdez-Lazalde, J. R., & Hernández-de la Rosa, P. (2009). Empirical-based hydrologic modeling of the 100-year return period of overland flow in the Rio Grande watershed, Tlalchapa, Guerrero, using two land use scenarios. *Agrociencia*, *43*(4), 333–344.
- Mo, C., Zhang, M., Ruan, Y., Sun, G., & Xing, Z. (2020). Accuracy Analysis of IMERG Satellite Rainfall Data and Its Application in Long-term Runoff Simulation. *Water (Switzerland)*, *12*(2177), 1–22. <https://doi.org/10.3390/w12082177>
- Monroy-Rincón, J. C. (2010). *Análisis del ajuste, sensibilidad e incertidumbre de los parámetros del modelo del SCS* [Pontifica Universidad Javeriana]. <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/7150>
- Mora, W. C. (1989). *HIDROLOGIA para estudiantes de ingeniería civil* (P. universidad C. del Peru (ed.)).
- Mustamin, M. R., Maricar, F., Lopa, R. T., & Karamma, R. (2024). Integration of UH SUH, HEC-RAS, and GIS in Flood Mitigation with Flood Forecasting and Early Warning System for Gilireng Watershed, Indonesia. *Earth*, *5*(3), 274–292. <https://doi.org/10.3390/earth5030015>
- Namara, W. G., Damisse, T. A., & Tufa, F. G. (2021). Application of HEC-RAS and HEC-GeoRAS model for Flood Inundation Mapping, the case of Awash Bello Flood Plain, Upper Awash River Basin, Oromiya Regional State, Ethiopia. *Modeling Earth Systems and Environment*. <https://doi.org/10.1007/s40808-021-01166-9>
- Neal, J., Hawker, L., Savage, J., Durand, M., Bates, P., & Sampson, C. (2021). Estimating River Channel Bathymetry in Large Scale Flood Inundation Models. *Water Resources Research*, *57*(5). <https://doi.org/10.1029/2020WR028301>
- Nguyen, H. Q., Degener, J., & Kappas, M. (2015). Flash flood prediction by coupling KINEROS2 and HEC-RAS models for tropical regions of Northern Vietnam. *Hydrology*, *2*(4), 242–265. <https://doi.org/10.3390/hydrology2040242>
- Núñez López, D., Javier, E., Garza, T., Manuel, V., Gómez, R., Alfonso, C., Robles, M., Alberto, O., Calderón, A., & Jiménez Pérez, J. (2014). Uso de modelos de regresión para interpolar espacialmente la precipitación media mensual en la cuenca del río Conchos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, *5*(2), 201–213. <http://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v5n2/v5n2a3.pdf>
- Ocampo, O. L., & Upegui, J. J. V. (2014). Análisis comparativo de modelos hidrológicos de simulación continua en cuencas de alta montaña : caso del Río Chinchiná Comparative analysis of continuous simulation hydrological models in high-mountain watersheds : Chinchiná River case. *Empiria. Revista de Metodología de Ciencias Sociales*, *14*(36), 119. <http://dx.doi.org/10.1007/s00267-018-1104-8>

- Ongdas, N., Akiyanova, F., Karakulov, Y., Muratbayeva, A., & Zinabdin, N. (2020). Application of hec-ras (2d) for flood hazard maps generation for yesil (ishim) river in kazakhstan. *Water (Switzerland)*, *12*(10), 1–20. <https://doi.org/10.3390/w12102672>
- Ongdas, Nurlan, Akiyanova, F., Karakulov, Y., Muratbayeva, A., & Zinabdin, N. (2020). Application of hec-ras (2d) for flood hazard maps generation for yesil (ishim) river in kazakhstan. *Water (Switzerland)*, *12*(10), 1–20. <https://doi.org/10.3390/w12102672>
- Orellana, D., Timbe, L., & Pinos, J. (2017). Calibración de un Modelo Basado en Agentes para el estudio del peligro de inundación en el río Santa . *XVI Conferencia Iberoamericana de Sistemas de Información Geográfica*, 391–397. <https://gis.uazuay.edu.ec/confibsig/>
- Ortiz-Saenz, L. E. (2019). Modelo de elevación digital de alta resolución para identificar y evaluar zonas en riesgo de inundación : caso caña de azúcar High resolution digital elevation model to identify and evaluate areas at risk of flooding : case sugarcane. *UD y La Geomática*, *14*, 18–25. <https://doi.org/https://doi.org/10.14483/23448407.15266>
- Oubennaceur, K., Chokmani, K., Gauthier, Y., Ratte-Fortin, C., Homayouni, S., & Toussaint, J.-P. (2021). Flood Risk Assessment under Climate Change: The Petite Nation River Watershed. *Climate*, *9*(8), 125. <https://doi.org/10.3390/cli9080125>
- Palla, A., Colli, M., Candela, A., Aronica, G. T., & Lanza, L. G. (2018). Pluvial flooding in urban areas: the role of surface drainage efficiency. *Journal of Flood Risk Management*, *11*(S2), S663–S676. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/jfr3.12246>
- Parrens, M., Bitar, A. Al, Frappart, F., Paiva, R., Wongchuig, S., Papa, F., Yamasaki, D., & Kerr, Y. (2019). High resolution mapping of inundation area in the Amazon basin from a combination of L-band passive microwave, optical and radar datasets. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, *81*(August 2018), 58–71. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.04.011>
- Peña, F., & Nardi, F. (2018). Floodplain terrain analysis for coarse resolution 2D flood modeling. *Hydrology*, *5*(4). <https://doi.org/10.3390/hydrology5040052>
- Perez-Aguilar, L. Y., Plata-Rocha, W., Monjardin-Armenta, S. A., Franco-Ochoa, C., & Zambrano-Medina, Y. G. (2021). The identification and classification of arid zones through multicriteria evaluation and geographic information systems—Case study: Arid regions of northwest Mexico. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, *10*(11). <https://doi.org/10.3390/ijgi10110720>
- Perez-Luna, G. (1998). *Estudio hidrológico del río Sinaloa en la zona urbana de Guasave, Sinaloa*. UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.
- Pérez, J. I., Escobar, J. R., & Fragozo, J. M. (2018). Modelación Hidráulica 2D de Inundaciones en Regiones con Escasez de Datos. El Caso del Delta del Río Ranchería, Riohacha-Colombia. *Información Tecnológica*, *29*(4), 143–156. <https://doi.org/10.4067/s0718-07642018000400143>
- Petroselli, A., Vojtek, M., & Vojteková, J. (2019). Flood mapping in small ungauged basins: A comparison of different approaches for two case studies in Slovakia. *Hydrology Research*, *50*(1), 379–392. <https://doi.org/10.2166/nh.2018.040>

- Petroselli, Andrea, Florek, J., Młynski, D., Ksiazek, L., & Wałęga, A. (2020). New Insights on Flood Mapping Procedure : Two Case Studies in Poland. *Sustainability*, 12(20), 1–17. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su12208454>
- Pinos, J., Timbe, L., & Orellana, D. (2017). Métodos para la evaluación del riesgo de inundación fluvial: revisión de literatura y propuesta metodológica para Ecuador. In *Maskana* (Vol. 8, Issue 2, pp. 147–162). <https://doi.org/10.18537/mskn.08.02.11>
- Pizarro Tapia, R., Marabolí Fuenzalida, F., Flores Villanelo, J. P., & Icaza, N. M. G. (2003). Evaluación de tres fórmulas precipitación-escorrentía, en la cuenca del río Achibueno, Chile. *Ingeniería Hidráulica En Mexico*, 18(3), 95–104.
- Podest, E., & McCartney, S. (2019). *National Aeronautics and Space Administration SAR for Flood Mapping using Google Earth Engine* (Issue August, p. 52).
- Prama, M., Omran, A., Schröder, D., & Abouelmagd, A. (2020). Vulnerability assessment of flash floods in Wadi Dahab Basin, Egypt. *Environmental Earth Sciences*, 79(5). <https://doi.org/10.1007/s12665-020-8860-5>
- Psomiadis, E., Tomanis, L., Kavvadias, A., Soulis, K. X., Charizopoulos, N., & Michas, S. (2021). Potential dam breach analysis and flood wave risk assessment using HEC-RAS and remote sensing data: A multicriteria approach. *Water (Switzerland)*, 13(3), 1–24. <https://doi.org/10.3390/w13030364>
- Puno, G. R., Amper, R. A. L., Talisay, B. A. M., Barro, R. A., & Oganía, J. L. (2016). Modeling flood hazards in Northern Mindanao, Philippines using HEC-RAS and LiDAR-derived DEM. *37th Asian Conference on Remote Sensing, ACRS 2016*, 2, 1538–1546. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85018409092&partnerID=40&md5=9cc641f27a34ee5c49676113c6397863>
- Quintero-Morales, M. A., Plata-Rocha, W., Monjardín-Armenta, S. A., Olimón-Andalón, V., & Torres-Montoya, E. H. (2021). Geospatial simulation model of sustainable mangrove development scenarios for the years 2030 and 2050 in marismas Nacionales, Mexico. *Sustainability (Switzerland)*, 13(17). <https://doi.org/10.3390/su13179551>
- Quiroga, V. M., Kurea, S., Udoa, K., & Manoa, A. (2016). Application of 2D numerical simulation for the analysis of the February 2014 Bolivian Amazonia flood: Application of the new HEC-RAS version 5. *Ribagua*, 3(1), 25–33. <https://doi.org/10.1016/j.riba.2015.12.001>
- Rentería-Guevara, S. A., Rangel-Peraza, J. G., Rodríguez-Mata, A. E., Amábilis-Sosa, L. E., Sanhouse-García, A. J., & Uriarte-Aceves, P. M. (2019). Effect of agricultural and urban infrastructure on river basin delineation and surface water availability: Case of the Culiacan River Basin. *Hydrology*, 6(3). <https://doi.org/10.3390/HYDROLOGY6030058>
- Reyes-Olvera, A. L., & Gutiérrez-González, E. (2016). Modelación del riesgo de inundaciones en el estado de Tabasco en el periodo 1961-2007. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 7(2), 99–114.
- Rigo, T., Llasat, M. C., & Esbrí, L. (2021). The Results of Applying Different Methodologies to 10 Years of Quantitative Precipitation Estimation in Catalonia Using Weather Radar.

- Geomatics*, 1(3), 347–368. <https://doi.org/10.3390/geomatics1030020>
- Rincón, H., & González, S. (2011). Metodología para el ajuste de modelos de valor extremo Tipo I (Gumbel) y Log Pearson Tipo III, para series de valores máximos. In *Ingenio Magno* (Vol. 2, Issue 1, pp. 57–64).
- Rocha, J., Duarte, A., Fabres, S., Quintela, A., & Serpa, D. (2023). Influence of DEM Resolution on the Hydrological Responses of a Terraced Catchment: An Exploratory Modelling Approach. *Remote Sensing*, 15(1), 1–18. <https://doi.org/10.3390/rs15010169>
- Rodríguez López, Y., Marrero de León, N., & Gil Urrutia, L. (2010). Modelo lluvia-escurrencimiento para la cuenca del río Reno TT - Rainfall-runoff model for Reno's river basin. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 19(2), 31–37. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-00542010000200006&lang=es%0Ahttp://scielo.sld.cu/pdf/rcta/v19n2/rcta06210.pdf
- Rojas, C., Sepúlveda-Zúñiga, E., Barbosa, O., Rojas, O., & Martínez, C. (2015). Patrones de urbanización en la biodiversidad de humedales urbanos en Concepción metropolitana. *Revista de Geografía Norte Grande*, 2015(61), 181–204. <https://doi.org/10.4067/s0718-34022015000200010>
- Rojas, O., Martínez, C., & Rivas, M. (2012). Evaluación de la peligrosidad por inundación fluvial en el curso inferior del río Maipo – Región de Valparaíso, Chile. *Memorias II Congreso Regional SRA-LA Sociedad Para El Análisis de Riesgos Capítulo Latinoamérica*, 388.
- Rojas, Octavio, Mardones, M., Arumí, J. L., & Aguayo, M. (2014). Una revisión de inundaciones fluviales en Chile, período 1574-2012: Causas, recurrencia y efectos geográficos. *Revista de Geografía Norte Grande*, 192(57), 177–192. <https://doi.org/10.4067/s0718-34022014000100012>
- Rojas, Octavio, & Martínez, C. (2011). Riesgos naturales: evolución y modelos conceptuales. *Revista Universitaria de Geografía*, 20, 83–116. http://bibliotecadigital.uns.edu.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1852-42652011001100005&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Rosas, L. (2009). *MANUAL DE DELIMITACIÓN Y*.
- Rubinato, M., Martins, R., Kesserwani, G., Leandro, J., Djordjević, S., & Shucksmith, J. (2017). Experimental calibration and validation of sewer/surface flow exchange equations in steady and unsteady flow conditions. *Journal of Hydrology*, 552, 421–432. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.06.024>
- Ruiz-Fernández, A. C., Hillaire-Marcel, C., Ghaleb, B., Soto-Jiménez, M., & Páez-Osuna, F. (2002). Recent sedimentary history of anthropogenic impacts on the Culiacan River Estuary, northwestern Mexico: Geochemical evidence from organic matter and nutrients. *Environmental Pollution*, 118(3), 365–377. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(01\)00287-1](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(01)00287-1)
- Run, Y., Li, M., Qin, Y., Shi, Z., Li, Q., & Cui, Y. (2022). Dynamics of Land and Water Resources and Utilization of Cultivated Land in the Yellow River Beach Area of China. *Water*, 14(305), 1–15. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/w14030305>

- Russo, B., Martínez-Gomariz, E., Locatelli, L., Martínez, M., & Montes Carretero, J. (2019). Evaluación del riesgo asociado a inundaciones y DSS para la ciudad de Badalona en un contexto de cambio climático. El proyecto BINGO. *XXXV Jornadas Técnicas de AEAS, hasta 2012*, 428–438.
- Said, M., Hyandye, C., Mjemah, I. C., Komakech, H. C., & Munishi, L. K. (2021). Evaluation and Prediction of the Impacts of Land Cover Changes on Hydrological Processes in Data Constrained Southern Slopes of Kilimanjaro, Tanzania. *Earth*, 2(2), 225–247. <https://doi.org/10.3390/earth2020014>
- Saito, K., Bank, W., & Aardt, J. A. Van. (2015). Digital elevation models. In W. B. GROUP (Ed.), *US Geological Survey National Mapping Program, Technical Instructions, Data Users Guide* (Vol. 1, Issue June 2021). GFDRR. https://doi.org/10.4324/9780203302392_chapter_five
- Salas-Salinas, M. A., & Jiménez-Espinosa, M. (2007). *Serie Fascículos: INUNDACIONES* (CENAPRED-SEGOB (ed.)). <http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/3-FASCCULOINUNDACIONES.PDF>
- Salazar-Briones, C., Hallack-Alegría, M., Mungaray-Moctezuma, A., Lomelí, M. A., Lopez-Lambraño, A., & Salcedo-Peredia, A. (2018). Hydrological and hydraulic modeling of an intra-urban river in a transboundary basin using a regional frequency analysis. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 9(4), 48–74. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-04-03>
- Salman, A., Hassan, S. S., Khan, G. D., Goheer, M. A., Khan, A. A., & Sheraz, K. (2021). HEC-RAS and GIS-based flood plain mapping: A case study of Narai Drain Peshawar. *Acta Geophysica*, 69(4), 1383–1393. <https://doi.org/10.1007/s11600-021-00615-4>
- Sánchez-Romero, F. J., Pérez-Sánchez, M., Redón-Santafé, M., Torregrosa Soler, J. B., Ferrer Gisbert, C., Ferrán Gozávez, J. J., Ferrer Gisbert, A., & López-Jiménez, P. A. (2019). Estudio numérico para la elaboración de mapas de inundación considerando la hipótesis de rotura en balsas para riego. *Ingeniería Del Agua*, 23(1), 1. <https://doi.org/10.4995/ia.2019.8892>
- Sánchez-Vélez, A. S., Hinojosa-Guzmán, M. D., & García-Núñez, R. M. (2017). La cuenca baja del río Tamazula, Sin., gestión integrada de sus recursos hidroagrícolas y forestales. *Ciencias de La Biología, Agronomía y Economía*, 1–15.
- Sánchez, F. (2016). Cálculos Estadísticos en Hidrología. *Boletín Oficial Del Estado*, 1(mm), 1–2. <http://hidrologia.usal.es>
- Sanhouse-García, A. J., Rangel-Peraza, J. G., Rentería-Guevara, S. A., Bustos-Terrones, Y. A., Mora-Félix, Z. D., Plata-Rocha, W., & Monjardin-Armenta, S. A. (2021). Flood-Prone Area Delineation in Urban Subbasins Based on Stream Ordering : Culiacan Urban Basin as a Study Case. *Sustainability*, 13, 22. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su132413513>
- Schosinsky, G., & Losilla, M. (2000). Modelo analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual. *Revista Geológica de América Central*, 23, 43–55. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i23.8579>

- Schubert, J. E., Luke, A., AghaKouchak, A., & Sanders, B. F. (2022). A Framework for Mechanistic Flood Inundation Forecasting at the Metropolitan Scale. *Water Resources Research*, 58(10), e2021WR031279. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2021WR031279>
- Schuler, A. E., Guandique, M. E. G., Milde, L. C., Groppo, J. D., Martinelli, L. A., & Victoria, R. L. (2003). Propriedades Físicas dos Solos na Parametrização de um Modelo Hidrológico. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 8(1), 61–70. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v8n1.p61-70>
- Schumann, G., Giustarini, L., Tarpanelli, A., Jarihani, B., & Martinis, S. (2023). Flood Modeling and Prediction Using Earth Observation Data. *Surveys in Geophysics*, 44(5), 1553–1578. <https://doi.org/10.1007/s10712-022-09751-y>
- Secretaría de Desarrollo Agrario Territorial y Urbano, S. (2015). *Atlas de Riesgos y Catálogo de Datos Geográficos para Representar en el municipio de Culiacán, Sinaloa 2015 Acierto*.
- Segura-Beltrán, F., Sanchis-Ibor, C., Morales-Hernández, M., González-Sanchis, M., Bussi, G., & Ortiz, E. (2016). Using post-flood surveys and geomorphologic mapping to evaluate hydrological and hydraulic models: The flash flood of the Girona River (Spain) in 2007. *Journal of Hydrology*, 541, 310–329. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.04.039>
- Shustikova, I., Domeneghetti, A., Neal, J. C., Bates, P., & Castellarin, A. (2019). Comparing 2D capabilities of HEC-RAS and LISFLOOD-FP on complex topography. *Hydrological Sciences Journal*, 64(14), 1769–1782. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1671982>
- Stehli, P. T., Weber, J. F., & Jorquera, E. (2012). Implementación de un modelo hidrológico espacialmente distribuido de simulación de eventos. *Primer Encuentro de Investigadores En Formación En Recursos Hídricos*. Ezeiza, Bs. AsUmaña, G. & Padilla, G. *A Project of Environmental Education with Teachers in the Municipality of Caldas*. *Revista Folios*, 14, 1–17.
- Surwase, T., SrinivasaRao, G., Manjusree, P., Begum, A., Nagamani, P. V, & JaiSankar, G. (2019). Flood Inundation Simulation of Mahanadi River, Odisha During September 2008 by Using HEC-RAS 2D Model. *Springer Series in Geomechanics and Geoengineering*, 851–863. https://doi.org/10.1007/978-3-319-77276-9_77
- Tamiru, H., & Dinka, M. O. (2021). Application of ANN and HEC-RAS model for flood inundation mapping in lower Baro Akobo River Basin, Ethiopia. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 36. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100855>
- Tamiru, Habtamu, & Dinka, M. O. (2021). Application of ANN and HEC-RAS model for flood inundation mapping in lower Baro Akobo River Basin, Ethiopia. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 36, 100855. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100855>
- Tanouchi, H., Olsson, J., Lindström, G., Kawamura, A., & Amaguchi, H. (2019). Improving urban runoff in multi-basin hydrological simulation by the HYPE model using EEA urban atlas: A case study in the Sege River basin, Sweden. *Hydrology*, 6(1). <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/hydrology6010028>

- Tapia-Flores, C. E., & Cevallos-Flores, K. L. (2021). Pruebas Para Comprobar La Normalidad De Datos En Procesos Productivos : Anderson- Darling , Ryan-Joiner , Shapiro-Wilk Y Kolmogórov-Smirnov Tests To Verify the Normality of Data in Production Processes : Anderson- Darling , Ryan-Joiner , Shapiro-Wilk and. *Societas*, 23(2), 83–97. <http://portal.amelica.org/ameli/jatsRepo/341/3412237018/index.html>
- Teegavarapu, R. S. V., Salas, J. D., & Stedinger, J. R. (2019). Statistical Analysis of Hydrologic Variables: Methods and Applications. In *Statistical Analysis of Hydrologic Variables: Methods and Applications*. <https://doi.org/10.1061/9780784415177>
- Triviño Pérez, A., & Ortiz Rojas, S. (2004). Metodología para la modelación distribuida de la escorrentía superficial y la delimitación de zonas inundables en ramblas y ríos-rambla mediterráneos. *Investigaciones Geográficas*, 35, 67. <https://doi.org/10.14198/ingeo2004.35.08>
- Uribe-Alcántara, E. M., Montes-León, M. A. L., & García-Celis, E. (2010). Mapa Nacional de Índice de Inundación. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 1(2), 73–85. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222010000200005&lng=es&tlng=es
- Valeo, C., He, J., & Kasiviswanathan, K. S. (2021). Urbanization under a changing climate-impacts on hydrology. In *Water (Switzerland)* (Vol. 13, Issue 4). <https://doi.org/10.3390/w13040393>
- Vargas Garay, L., Torres Goyeneche, O. D., & Carrillo Soto, G. A. (2019). Evaluation of SCS - unit hydrograph model to estimate peak flows in watersheds of Norte de Santander. *Respuestas*, 24(1), 6–15. <https://doi.org/10.22463/0122820X.1743>
- Vazquez-Ontiveros, J. R., Martinez-Felix, C. A., Vazquez-Becerra, G. E., Gaxiola-Camacho, J. R., Melgarejo-Morales, A., & Padilla-Velazco, J. (2021). Monitoring of local deformations and reservoir water level for a gravity type dam based on GPS observations. *Advances in Space Research*, xxxx. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.09.018>
- Vega, A. P., & Mas, J. F. (2009). Evaluación de los errores de modelos digitales de elevación obtenidos por cuatro métodos de interpolación. *Investigaciones Geográficas*, 69(8701), 53–67.
- Vélez-Upegui, Jorge Julián, & Botero-Gutiérrez, A. (2011). Estimación del tiempo de concentración y tiempo de rezago en la cuenca experimental urbana de la quebrada San Luis, Manizales (Estimation of the time of concentration and the lag time at San Luis creek basin, Manizales). *Dyna*, 78(165), 58–71. <https://www.redalyc.org/html/496/49622372006/>
- Vélez-Upegui, Jorge Julián, Botero-Hernández, B. A., Parra-Toro, J. C., Aristizábal-Murillo, V. M., & Marulanda-Aguirre, A. (2013). *DISEÑO HIDRÁULICO E HIDROLÓGICO DE OBRAS DE INGENIERÍA PARA PROYECTOS VIALES* (Universida). <https://doi.org/10.13140/2.1.1689.6322>
- Vergara Tenorio, M. del C., Ellis, E. A., Cruz Aguilar, J. A., Alarcón Sánchez, L. del C., & Galván del Moral, U. (2011). La conceptualización de las inundaciones y la percepción del riesgo ambiental. *Política y Cultura*, 36, 45–69.

- Vergés, F. A. R., Hernández, G. E., & Von Wobeser, E. A. (2013). El componente del riesgo en el Ordenamiento Ecológico del Territorio: el caso del Ordenamiento Ecológico Regional y Marino del Golfo de México y Mar Caribe. In *Investigaciones Geográficas* (Vol. 80, pp. 7–20). <https://doi.org/10.14350/rig.36393>
- Vidrio-Sahagún, C. T., & He, J. (2021). Flood hazard estimation under nonstationarity using the particle filter. *Geosciences (Switzerland)*, *11*(1), 1–16. <https://doi.org/10.3390/geosciences11010013>
- Villalobos, A. De, Hernández, N., Rosa, G. E., & Paz, A. (2004). *MANUAL de Manejo de Cuecas* (José Angel Girón Carlos Gómez Andrés Recalde (ed.); 2nd ed.).
- Villón Béjar, M. (2004). *Hidrología*.
- Vojtek, M., Petroselli, A., Vojteková, J., & Asgharinia, S. (2019). Flood inundation mapping in small and ungauged basins: Sensitivity analysis using the EBA4SUB and HEC-RAS modeling approach. *Hydrology Research*, *50*(4), 1002–1019. <https://doi.org/10.2166/nh.2019.163>
- Walpole, R. E., Myers, R. H., Myers, S. L., & Ye, K. (2012). *Probability & Statistics for Engineers & Scientists* (L. Deirdre (ed.); 9th ed., Vol. 9). PEARSON.
- Wang, X., Ding, Y., Zhao, C., & Wang, J. (2018). Validation of TRMM 3B42V7 rainfall product under complex topographic and climatic conditions over Hexi region in the Northwest Arid Region of China. *Water (Switzerland)*, *10*(8). <https://doi.org/10.3390/w10081006>
- Weber, J. F., Dasso, C. M., & Jorquera, E. (2010). Desarrollo y calibración de un modelo hidrológico de simulación mixta. *Mecánica Computacional*, *29*(39), 4013–4037.
- Wijayarathne, D. B., & Coulibaly, P. (2020). Identification of hydrological models for operational flood forecasting in St. John's, Newfoundland, Canada. In *Journal of Hydrology: Regional Studies* (Vol. 27). <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100646>
- Wing, O. E. J., Sampson, C. C., Bates, P. D., Quinn, N., Smith, A. M., & Neal, J. C. (2019). A flood inundation forecast of Hurricane Harvey using a continental-scale 2D hydrodynamic model. *Journal of Hydrology X*, *4*(August). <https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2019.100039>
- Wing, O. E. J., Smith, A. M., Marston, M. L., Porter, J. R., Amodeo, M. F., Sampson, C. C., & Bates, P. D. (2021). Simulating historical flood events at the continental scale: observational validation of a large-scale hydrodynamic model. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *21*(2), 559–575. <https://doi.org/10.5194/nhess-21-559-2021>
- Wurl, J., García, C. N. M., & Lamadrid, M. Á. I. (2015). Caracterización del peligro por inundaciones en el oasis La Purísima, Baja California Sur, México. *Investigaciones Geográficas*, *87*(87), 76–87. <https://doi.org/10.14350/rig.41858>
- Xia, X., Liang, Q., & Ming, X. (2019). A full-scale fluvial flood modelling framework based on a high-performance integrated hydrodynamic modelling system (HiPIMS). *Advances in Water Resources*, *132*, 103392. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2019.103392>

- Yang, J., Townsend, R. D., & Daneshfar, B. (2006). Applying the HEC-RAS model and GIS techniques in river network floodplain delineation. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 33(1), 19–28. <https://doi.org/10.1139/105-102>
- Yang, S., Yang, D., Zhao, B., Ma, T., Lu, W., & Santisirisomboon, J. (2022). Future Changes in High and Low Flows under the Impacts of Climate and Land Use Changes in the Jiulong River Basin of. *Atmosphere*, 13(150), 1–21. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/atmos13020150>
- Yang, W., Long, D., & Bai, P. (2019). Impacts of future land cover and climate changes on runoff in the mostly afforested river basin in North China. *Journal of Hydrology*, 570(May 2018), 201–219. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.12.055>
- Zainalfikry, M. K., Ab Ghani, A., Zakaria, N. A., & Chan, N. W. (2020). HEC-RAS One-Dimensional Hydrodynamic Modelling for Recent Major Flood Events in Pahang River. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 53, 1099–1115. https://doi.org/10.1007/978-3-030-32816-0_83
- Zeiger, S. J., & Hubbard, J. A. (2021). Measuring and modeling event-based environmental flows: An assessment of HEC-RAS 2D rain-on-grid simulations. *Journal of Environmental Management*, 285(February). <https://doi.org/DOI:10.1016/j.jenvman.2021.112125>
- Zhao, G., Balstrøm, T., Mark, O., & Jensen, M. B. (2021). Multi-Scale Target-Specified Sub-Model Approach for Fast. *Water (Switzerland)*, 13(259), 1–28. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/w13030259>
- Zhao, L., Zhang, T., Fu, J., Li, J., Cao, Z., & Feng, P. (2021). Risk Assessment of Urban Floods Based on a SWMM-MIKE21-Coupled Model Using GF-2 Data. *Remote Sensing Article*, 13(21). <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/rs13214381>
- Zhihua, L. V., Zuo, J., & Rodriguez, D. (2020). Predicting of Runoff Using an Optimized SWAT-ANN: A Case Study. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 29(March). <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100688>
- Zúñiga, E., Magaña, V., & Piña, V. (2020). Effect of urban development in risk of floods in Veracruz, Mexico. *Geosciences (Switzerland)*, 10(10), 1–14. <https://doi.org/10.3390/geosciences10100402>

ANEXOS

ANEXO 1. Productos obtenidos

- [1] E. Avila-Aceves, S. A. Monjardin-Armenta, and W. Plata-Rocha, “A comparative assessment and geospatial simulation of three hydrological models in urban basins,” *Open Geosci.*, vol. 15, no. 1, pp. 1–14, 2023, doi: <https://doi.org/10.1515/geo-2022-0557>.
- [2] E. Avila-Aceves, W. Plata-Rocha, S. A. Monjardin-Armenta, and J. G. Rangel-Peraza, “Geospatial modelling of floods: a literature review,” *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.*, vol. 1, no. ix, pp. 1–20, 2023, doi: [10.1007/s00477-023-02505-1](https://doi.org/10.1007/s00477-023-02505-1).
- [3] Y. G. Zambrano-Medina *et al.*, “The Impact of Climate Change on Crop Productivity and Adaptation and Mitigation Strategies in Agriculture,” in *Transforming Agricultural Management for a Sustainable Future: Climate Change and Machine Learning Perspectives*, S. Kanga, S. K. Singh, K. Shevkani, V. Pathak, and B. Sajan, Eds. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024, pp. 1–20.
- [4] R. F. López-Osorio, L. Y. Pérez-Aguilar, Y. G. Zambrano-Medina, and E. Avila-Aceves, “Aplicación de evaluación multicriterio para modelar factores climáticos y ambientales en la identificación de regiones áridas en el noroeste de México Application of multicriteria assessment to evaluate climatic and environmental factors in the identifica,” *RITI*, vol. 10, no. Especial, pp. 54–70, 2024, doi: <https://doi.org/10.36825/RITI.12.28.006>.

ANEXO 2. Descargar datos de precipitación desde portal CONAGUA

NOTA: Los Scribs realizados en lenguaje R para la limpieza y edición de los datos pluviométricos para las series históricas, con el propósito de obtener datos de lluvia de más de una estación, se realizaron con ayuda de I.A. evaluados y supervisados para su correcta función de acuerdo a lo necesitado en esta investigación.

```
#####  
#DESCARGAR DESDE LA PAGINAS DE ESTACIOENS PLUVIOMÉTRICAS Y  
# EXTRAER LOS DATOS DE UBICACION Y DATOS PLUVIOMÉTRICOS  
#####  
# Librerías necesarias  
library(dplyr)  
library(lubridate)  
# Definir estados y estaciones  
estado <- c("dgo", "sin")  
estacion_clave <- c(10086,10087,10050,10018,10122, 10154,10148,10153,10082,25183)  
# Crear una lista para almacenar los resultados  
all_data <- list()
```

```

# Inicializar un vector vacío para almacenar las estaciones filtradas
ESTACION_DESCARGA <- c()
# Crear un data frame para almacenar los valores extraídos
tabla_estaciones <- data.frame(
  "ESTACIÓN" = character(),
  "NOMBRE" = character(),
  "LATITUD" = character(),
  "LONGITUD" = character(),
  "ALTITUD" = character(),
  stringsAsFactors = FALSE
)
# Función para descargar y extraer datos de una estación
procesar_estacion <- function(estacion) {
  # Generar la URL de cada estación
  url <-
paste0("https://smn.conagua.gob.mx/tools/RECURSOS/Normales_Climatologicas/Diarios/
", estacion, ".txt")
  # Nombre del archivo de destino
  destfile <- paste0(gsub("/", "_", estacion), ".txt")
  # Descargar el archivo desde la URL
  download.file(url, destfile, mode = "wb")
  # Verificar el tamaño del archivo
  if (file.info(destfile)$size > 0) {
    # Leer el archivo completo como texto
    lines <- readLines(destfile)
    # Extraer datos de la estación
    estacion_line <- 11
    nombre_line <- 12
    latitud_line <- 17
    longitud_line <- 18
    altitud_line <- 19

    # Extraer valores
    estacion_nombre <- sub(".*: ", "", lines[estacion_line])
    nombre <- sub(".*: ", "", lines[nombre_line])
    latitud <- sub(".*: ", "", lines[latitud_line])
    longitud <- sub(".*: ", "", lines[longitud_line])
    altitud <- sub(".*: ", "", lines[altitud_line])

    # Limpiar caracteres no deseados

```

```

latitud <- gsub("Â", "", latitud)
longitud <- gsub("Â", "", longitud)
altitud <- gsub("Â", "", altitud)

# Agregar a tabla_estaciones
tabla_estaciones <- rbind(tabla_estaciones, data.frame(
  "ESTACIÓN" = estacion_nombre,
  "NOMBRE" = nombre,
  "LATITUD" = latitud,
  "LONGITUD" = longitud,
  "ALTITUD" = altitud,
  stringsAsFactors = FALSE
))

# Procesar los datos de precipitación
data_start <- grep("FECHA", lines) + 1
data_lines <- lines[data_start:length(lines)]
data_lines <- data_lines[data_lines != ""]
# Leer los datos desde las líneas limpiadas
data <- read.table(textConnection(data_lines), header = TRUE, sep = "\t", fill = TRUE,
na.strings = c("NULO", "NA"))

# Renombrar las columnas
colnames(data)[1:2] <- c("FECHA", "PRECIP")
# Extraer y limpiar datos
data_extracted <- data %>%
  select(FECHA, PRECIP) %>%
  mutate(FECHA = as.Date(FECHA, format = "%Y-%m-%d")) %>%
  mutate(PRECIP = ifelse(is.na(PRECIP), "", PRECIP))# Reemplazar NULO por ""

# Cambiar el nombre de la columna PRECIP
colnames(data_extracted)[2] <- paste(nombre, estacion_nombre, sep = "-")

# Agregar a la lista all_data
all_data[[estacion_nombre]] <- data_extracted

} else {
  print(paste("Advertencia: El archivo", destfile, "está vacío o no se descargó
correctamente."))
}

```

```

}
# 1. Bucle para recorrer los estados y filtrar estaciones
for (est in estado) {
  if (est == "dgo") {
    estaciones_filtradas <- paste0("dgo/dia", estacion_clave[estacion_clave >= 10000 &
estacion_clave < 11000])
  } else if (est == "sin") {
    estaciones_filtradas <- paste0("sin/dia", estacion_clave[estacion_clave >= 25000 &
estacion_clave < 26000])
  }
  # Concatenar las estaciones filtradas
  ESTACION_DESCARGA <- c(ESTACION_DESCARGA, estaciones_filtradas)
}
print(ESTACION_DESCARGA)
# Procesar cada estación filtrada
for (estacion in ESTACION_DESCARGA) {
  procesar_estacion(estacion)
}
# Mostrar la tabla con los datos de las estaciones
print(tabla_estaciones)
#AQUI SE EXTRAEN LOS REGISTROS DE LAS ESTACIONES
# Combinar todos los resultados en una única tabla
if (length(all_data) > 0) {
  combined_data <- Reduce(function(x, y) full_join(x, y, by = "FECHA"), all_data)
  # Ordenar la tabla por fecha
  combined_data <- combined_data %>% arrange(FECHA)
  # Mostrar la tabla combinada
  print(combined_data)
  # Guardar la tabla combinada en un archivo CSV (opcional)
  write.csv(combined_data,
            "C:/Users/pc/Desktop/OPTATIVA_
HIDROLOGÍA/PRECIPITACIONES/Registros_estacioens.csv", row.names = FALSE)
} else {
  print("No se pudieron combinar los datos, la lista 'all_data' está vacía.")
}
# Guardar la tabla de estaciones en un archivo CSV
write.csv(tabla_estaciones,
          "C:/Users/pc/Desktop/OPTATIVA_
HIDROLOGÍA/PRECIPITACIONES/ESTACIONES_coordenadasVIDEO.csv", row.names
= FALSE)
#-----
#graficar la serie temporal

```

```

library(ggplot2)
library(tidyr)
# Convertir todas las columnas excepto 'FECHA' a formato carácter
combined_data <- combined_data %>%
  mutate(across(-FECHA, as.character))
# Reestructurar en formato largo para ggplot
combined_data_long <- combined_data %>%
  pivot_longer(-FECHA, names_to = "Estacion", values_to = "precipitation")

# Crear la paleta de colores
color_paleta <- c("#CE1414", "#CE6614", "#CEC214", "#55CE14", "#14CE59",
  "#14CE93", "#14CEB1", "#1476CE", "#1814CE", "#6914CE", "#CE143C")
# Crear el gráfico
# Instalar y cargar RColorBrewer si no está instalado
if (!requireNamespace("RColorBrewer", quietly = TRUE)) {
  install.packages("RColorBrewer")
}
library(RColorBrewer)
# Crear una paleta de 30 colores a partir de "Set3" o la que prefieras
color_paleta <- colorRampPalette(brewer.pal(12, "Set3"))(30)
# Crear el gráfico
ggplot(combined_data_long, aes(x = FECHA, y = as.numeric(precipitation), color = Estacion,
group = Estacion)) +
  geom_line() +
  labs(x = "Fecha", y = "Precipitación") +
  scale_color_manual(values = color_paleta) +
  geom_point() +
  theme_minimal() +
  theme(axis.text.x = element_text(angle = 90, hjust = 1))
#-----
#seleccionar un rango de tiempo
# Filtrar los datos para las fechas deseadas
combined_data_fecha <- combined_data %>%
  pivot_longer(-FECHA, names_to = "Estacion", values_to = "PRECIP")%>%
  filter(FECHA >= as.Date("1990-01-01") & FECHA <= as.Date("2023-12-31"))%>%
  mutate(PRECIP = ifelse(is.na(PRECIP), "", PRECIP)) %>% # Reemplazar NULO por ""
  mutate(FECHA = as.Date(FECHA, format = "%Y-%m-%d")) %>%
  mutate(PRECIP = ifelse(is.na(PRECIP), "", PRECIP)) %>% # Reemplazar NULO por ""
  pivot_wider(names_from = Estacion, values_from = PRECIP)
# Mostrar el número de registros en la nueva tabla

```

```

print(paste("Número de registros entre 1990 y 2023:", nrow(combined_data_fecha)))
# Guardar la tabla filtrada en un archivo CSV
write.csv(combined_data_fecha, "C:/Users/pc/Desktop/OPTATIVA_
HIDROLOGÍA/PRECIPITACIONES/ESTACIONES_1990_2023-2.csv", row.names =
FALSE)
#----
#PLOTAR EL RANGO DE TIEMPO SELECCIONADO
combined_data_long_FECHA<- combined_data_fecha %>%
  pivot_longer(-FECHA, names_to = "Estacion", values_to = "precipitation")
# Crear una paleta de 30 colores a partir de "Set3" o la que prefieras
color_paleta <- colorRampPalette(brewer.pal(12, "Set3"))(30)
# Crear el gráfico
ggplot(combined_data_long_FECHA, aes(x = FECHA, y = as.numeric(precipitation), color =
Estacion, group = Estacion)) +
  geom_line() +
  labs(x = "Fecha", y = "Precipitación") +
  scale_color_manual(values = color_paleta) +
  geom_point() +
  theme_minimal() +
  theme(axis.text.x = element_text(angle = 90, hjust = 1))

```

ANEXO 3. Calculo de CN para cada sub cuenca en RStudio

```

#####
#SCRIP: CALCULO DE CN
#####

options(scipen = 999)
#definir los paquetes en vector
paquetes<-c("tidyverse", "foreign", "haven", "readxl", "dplyr", "purrr",
  "ggplot2", "forecast", "tsibble", "janitor",
  "sf", "viridis", "leaflet", "lubridate", "RColorBrewer",
  "plotly", "gganimate", "rvg", "officer", "carData", "jtools",
  "sandwich", "huxtable", "gstat", "jcolors", "skimr",
  "visdat", "readxl", "ggplot2", "zoo", "sf")

# Cargar los paquetes
invisible(lapply(paquetes, library, character.only = TRUE))

```

```

CNGRID <- st_read("./data/Shp_cngrid/CNGRID.shp")
#                               C:\1-AVILA                               ACEVES-DOCTORADO\02-
R_projects\01_precipitaciones\data\Shp_cngrid

# Obtener la tabla de atributos
tabla_propiedades <- as.data.frame(CNGRID) %>%
  select(c(3:4,43))
colnames(tabla_propiedades)

cn_subbsain <- tabla_propiedades %>%
  mutate(CN_Am2= GRIDCODE*AREAKM2) %>%
  group_by(HydroID) %>%
  summarise(Suma_CN_Am2 = sum(CN_Am2), Suma_AREAM2 = sum(AREAKM2)) %>%
  mutate(CNSubbasin = Suma_CN_Am2 / Suma_AREAM2) %>%
  select(1,4) %>%
  print()

```

ANEXO 4. Descarga de imágenes de radar Sentinel-2 desde GEE

Preparación y descarga de imágenes Radar del satélite Sentinel antes y después de la inundación para validar la simulación de inundación en Google Earth Engine. Fuente: (Podest & McCartney, 2019).

```

//Load Sentinel-1 C-band SAR Ground Range collection (log scale, VV, descending)
var collectionVV = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S1_GRD')
  .filter(ee.Filter.eq('instrumentMode', 'IW'))
  .filter(ee.Filter.listContains('transmitterReceiverPolarisation', 'VV'))
  .filter(ee.Filter.eq('orbitProperties_pass', 'DESCENDING'))
  .filterMetadata('resolution_meters', 'equals', 10)
  .filterBounds(roi)
  .select('VV');
print(collectionVV, 'Collection VV');
// Load Sentinel-1 C-band SAR Ground Range collection (log scale, VH, descending)
var collectionVH = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S1_GRD')
  .filter(ee.Filter.eq('instrumentMode', 'IW'))
  .filter(ee.Filter.listContains('transmitterReceiverPolarisation', 'VH'))
  .filter(ee.Filter.eq('orbitProperties_pass', 'DESCENDING'))
  .filterMetadata('resolution_meters', 'equals', 10)
  .filterBounds(roi)
  .select('VH');

```

```

print(collectionVH, 'Collection VH');

//filter by dates
var beforeVV = collectionVV.filterDate('2018-09-01', '2018-09-15');
var afterVV = collectionVV.filterDate('2018-09-15', '2018-09-30');
var beforeVH = collectionVH.filterDate('2018-09-01', '2018-09-15');
var afterVH = collectionVH.filterDate('2018-09-15', '2018-09-30');
print(beforeVV, 'Before VV');
print(afterVV, 'After VV');
print(beforeVH, 'BeforeVH');
print(afterVH, 'AfterVH');

//Display each image form before and after search
function addImage(image){ //display each image in colletion
var id = image.id;
var image = ee.Image(image.id);
Map.addLayer(image);
}
beforeVV.evaluate(function(beforeVV) { //use map on client-side
beforeVV.features.map(addImage)
})

//Filter by date
var beforeVV = collectionVV.filterDate ('2018-09-01', '2018-09-15').mosaic();
var afterVV = collectionVV.filterDate ('2018-09-15', '2018-09-30').mosaic();
var beforeVH = collectionVH.filterDate ('2018-09-01', '2018-09-15').mosaic();
var afterVH = collectionVH.filterDate ('2018-09-15', '2018-09-30').mosaic();
// Display map
Map.centerObject(roi,7);
Map.addLayer(beforeVV, {min:-15,max:0}, 'Before flood VV', 0);
Map.addLayer(afterVV, {min:-15, max:0}, 'After flood VV', 0);
Map.addLayer(beforeVH, {min:-25, max: 0},'Before glood VH', 0);
Map.addLayer(afterVH, {min:-25, max:0}, 'After flood VH', 0);
//visualizar en RGB
Map.addLayer(beforeVH.addBands(afterVH).addBands(beforeVH), {min:-25, max:-8},
'BVH/AVV/AVH composite',0);
var com = Map.addLayer(beforeVH.addBands(afterVH).addBands(beforeVH),{min:-25,
max:-8},
'BVH/AVV/AVH composite', 0);

```

```

//Aplicar un filtro "Speckle"
//apply filter to reduce speckle
var SMOOTHING_RADIUS = 20;
var beforeVV_filtered = beforeVV.focal_mean(SMOOTHING_RADIUS, 'circle',
'meters');
var beforeVH_filtered = beforeVH.focal_mean(SMOOTHING_RADIUS, 'circle',
'meters');
var afterVV_filtered = afterVV.focal_mean(SMOOTHING_RADIUS, 'circle',
'meters');
var afterVH_filtered = afterVH.focal_mean(SMOOTHING_RADIUS, 'circle',
'meters');
//Display filtered images
Map.addLayer(beforeVV_filtered, {min:-15, max:0}, 'Before Flood VV Filtered',0);
Map.addLayer(beforeVH_filtered, {min:-25, max:0}, 'Before Flood VH Filtered',0);
Map.addLayer(afterVV_filtered, {min:-15, max:0}, 'After Flood VV Filtered',0);
Map.addLayer(afterVH_filtered, {min:-25, max:0}, 'After Flood VH Filtered',0);
//Calculate difference between before and after
var differenceVH = afterVH_filtered.divide(beforeVH_filtered);
Map.addLayer(differenceVH, {min:0, max:2}, 'difference VH filtered',0);
var differenceVV = afterVV_filtered.divide(beforeVV_filtered);
Map.addLayer(differenceVV, {min:0, max:2}, 'difference VV filtered',0);

//Apply Threshold
var DIFF_UPPER_THRESHOLD = 1.10;
var differenceVH_thresholded = differenceVH.gt(DIFF_UPPER_THRESHOLD);
Map.addLayer(differenceVH_thresholded.updateMask(differenceVH_thresholded),
{palette:"0000FF"}, 'flooded areas-blue',1);

//descargar de la imagen
//region = ee.Geometry.Rectangle([])
var perc = differenceVH_thresholded.clip(roi);
var be = beforeVH.clip(roi);
var af = afterVH.clip(roi);

//var perc1 = area.clip(roi);
Export.image.toDrive({
  image: perc,
  description : 'radar',
  scale : 5,
  region: roi ,

```

```
    maxPixels: 1.0E13});  
Export.image.toDrive({  
  image: be,  
  description: 'beVH',  
  scale: 5,  
  region: roi ,  
  maxPixels: 1.0E13});  
Export.image.toDrive({  
  image: af,  
  description: 'afVH',  
  scale:5,  
  region:roi ,  
  maxPixels: 1.0E13});
```