

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA

FACULTAD DE ZOOTECNIA Y ECOLOGÍA

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA**

**ESTIMACIÓN DE ZONAS DE RIESGO A INUNDACIÓN EN
ASENTAMIENTOS URBANOS: CASO DE ESTUDIO CHIHUAHUA,
CHIHUAHUA.**

POR:

ARQ. ERÉNDIRA TISCAREÑO MARTÍNEZ

**TESIS PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS**

CHIHUAHUA, CHIH., MÉXICO

FEBRERO 2025



Estimación de zonas de riesgo a inundación en asentamientos urbanos: caso de estudio Chihuahua, Chihuahua. Tesis de maestría presentada por Eréndira Tiscareño Martínez como requisito para obtener el grado de Maestra en Ciencias, ha sido aprobada y aceptada por:

D.Ph. Alfredo Pinedo Álvarez
Director de la Facultad de Zootecnia y Ecología

Dra. Rosalía Sánchez Basualdo
Secretaria de Investigación y Posgrado

Dr. Lauro Manuel Espino Enríquez
Coordinador Académico

Dra. Nathalie Socorro Hernández Quiroz
Presidente del Comité

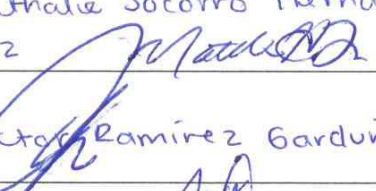
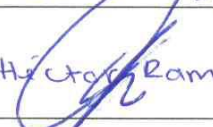
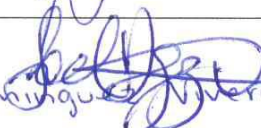
21 de febrero de 2025
Fecha

Fecha: 12 de febrero de 2025

Después de haber reunido la revisión final del trabajo de tesis a nivel Maestría, bajo el nombre: Estimación de zonas de riesgo a inundación en asentamientos urbanos: caso de estudio Chihuahua, Chihuahua.

Elaborado por: Erendira Tiscareño Martínez

Los integrantes del comité están de acuerdo en que dicho trabajo satisface los requisitos para su publicación (indicándolo con una "X"), desde el punto de vista de:

Puesto en comité	Nombre y firma	Contenido Técnico	Análisis de la Información	Formato (estilo y forma)
Asesor:	Dra. Nathalie Socorro Hernández Quiroz 	X	X	X
Co-Director	Dr. Héctor Ramírez Garduño 	✓	✓	✓
Representante área relacionada:	Dr. Martín Martínez Salvador 	✓	✓	✓
Representante área estadística:	Dr. Joel Domínguez Viveros 	✓	✓	✓
Representante de la coordinación:	D. Ph. Alfredo Rueda Álvarez 	/	/	/


Dr. Lauro Manuel Espino Enríquez
Unidad/Coordinación Académica

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría empezar agradeciendo al comité de ingreso que me permitió realizar mis estudios de maestría aun cuando mi perfil de arquitecta no fuera del todo afín. De igual manera quisiera agradecerle a mi asesora que se volvió mi amiga, la Dra. Nathalie por apoyarme en todo momento y nunca perder la fe de que lograríamos lo que nos propusimos en ese primer semestre. Al Dr. Héctor porque sin su apoyo esta investigación no habría sido posible. También agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONAHCyT) por la beca con CVU 1223263 otorgada para la realización de mis estudios de Maestría.

A mis amigos en Chihuahua, Celaya y el mundo, gracias por ser ese refugio y apoyo incondicional en los momentos difíciles, además de ser la causa de tantas risas y momentos inolvidables que atesoraré hasta el día en que muera.

A mi familia, no existen palabras suficientes para expresar lo que significan para mí, no sé qué hice para merecer una familia tan unida y amorosa como la que me tocó, en Celaya y Chihuahua sé que tengo 2 hogares. En especial quiero agradecer a mi tía Emira por adoptarme y abrirme las puertas de su casa sin pensarlo y a mi prima Larisa por cederme la mitad de su cuarto y ser la promotora #1 de que me viniera a estudiar la maestría para acá.

A mi hermano por ser tan él y enseñarme que la vida no es tan enserio como nos la hacen creer. A mi papá que, aunque a veces no esté de acuerdo con mis decisiones tiene una confianza ciega en mis habilidades y valores, dejándome forjar mi propio destino; siendo ese es el mejor regalo que me pudo dar. Y, por último, quiero agradecer a mi mamá que, aunque ya no está conmigo, todo lo que soy es gracias a ella y lo que lograré va por ella (y por mi papá).

Para mi mamá en el cielo y mi papá en la tierra.

CURRICULUM VITAE

El autor nació el 12 de Julio de 1999 en la Ciudad de Celaya, Guanajuato, México.

Estudios

2017 – 2022 Estudios de Licenciatura en Arquitectura en la
Universidad de Guanajuato. Cd. Guanajuato, Gto.

Mención Honorífica.

Mejor promedio de la generación.

2022 – 2024 Estudiante Graduado de la Maestría en Ciencias de la
Facultad de Zootecnia y Ecología de la Universidad
Autónoma de Chihuahua.

Mejor promedio de la generación.

Cursos

Diciembre, 2022 “Percepción remota aplicada al análisis de cambio de uso
de suelo”

Septiembre, 2023 “Análisis espaciales en ecología y genética del paisaje”

Junio, 2024 “Simulación de lluvia”

Agosto, 2024 “Modelado de nichos ecológicos y áreas de distribución”

Publicaciones

Enero, 2025 Desplegable: “Simulación de lluvia para evaluar pérdida
de suelo y escorrentía en clima árido y semiárido”

RESUMEN

ESTIMACIÓN DE ZONAS DE RIESGO A INUNDACIÓN EN ASENTAMIENTOS URBANOS: CASO DE ESTUDIO CHIHUAHUA, CHIHUAHUA.

POR:

ARQ. ERÉNDIRA TISCAREÑO MARTÍNEZ

Maestría en Ciencias en Manejo de Recursos Naturales

Secretaría de Investigación y Posgrado

Facultad de Zootecnia y Ecología

Universidad Autónoma de Chihuahua

Presidente: Dra. Nathalie Socorro Hernández Quiroz

El cambio climático y la rápida urbanización han provocado que las ciudades sean vulnerables a eventos de inundación. Para prevenir los daños los modelos hidrológicos permiten predecir riesgos e identificar puntos críticos. El presente trabajo generó un modelo el cual identificó zonas de mayor riesgo a inundación para el centro de población de Chihuahua, México. Para la simulación se utilizó un modelo hidrológico con periodo de retorno de 10 años (42 mm hr^{-1}) y una duración de 1 hora de precipitación y 5 horas posteriores al evento. Se obtuvieron mapas de inundación cada 10 minutos. Se identificaron 10 zonas de inundación con afectación en 118 colonias. Solo 1 de las zonas cumplió con la dotación mínima de coladeras requeridas. El estudio resalta la complejidad de las inundaciones urbanas y propone un enfoque integral que con apoyo gubernamental permita implementar medidas para proteger la infraestructura, la economía y la calidad de vida de la sociedad, buscando la protección de los recursos hídricos.

ABSTRACT

ASSESSMENT OF FLOOD RISK ZONES IN URBAN SETTLEMENTS: CASE STUDY CHIHUAHUA, CHIHUAHUA.

BY:

ARCH. ERÉNDIRA TISCAREÑO MARTÍNEZ

As a result of climate change and rapid urbanization, cities have become more vulnerable to flooding events. To prevent damages, hydrological models can predict risks and identify critical points. The study aimed to create a model to identify high-risk flood zones for the city of Chihuahua, Mexico. The simulation was created for a hydrological model and a 10-year return period (42 mm hr^{-1}), for a period of 1-hour of rainfall and 5 hours post-event. Flood maps every 10 minutes were obtained. Ten flood zones were identified affecting 118 neighborhoods. Where only one zone met the minimum requirement for drain coverage. The study highlights the complexity of urban flooding and proposes a comprehensive approach that, with government support, allows the application of strategies that protect infrastructure, the economy, and quality of life, aiming to safeguard water resources.

CONTENIDO

	Página
RESUMEN	vii
ABSTRACT	viii
LISTA DE CUADROS	xi
LISTA DE GRÁFICAS	xii
LISTA DE FIGURAS	xiii
LISTA DE FIGURAS DEL APÉNDICE	xiv
LISTA DE CUADROS DEL APÉNDICE	xvii
LISTA DE ABREVIATURAS	xviii
INTRODUCCIÓN	1
REVISIÓN DE LITERATURA	5
Evolución de los centros de población	5
Cuencas hidrográficas en zonas urbanas.....	8
Impactos ambientales en centros de población	10
Daños en procesos de inundación.....	12
Alternativas para proyectar eventos a futuro.....	16
MATERIALES Y MÉTODOS	20
Área de estudio y adquisición de datos.....	20
Preparación y análisis de capas de información	23
Creación de microcuencas	23
Homologación de usos de suelo	24
Generación de coeficientes	24

Rectificación del modelo digital de elevación.....	29
Simulación de inundación	30
RESULTADOS Y DISCUSION	36
Coeficientes de impermeabilidad y rugosidad y MDE rectificado.....	36
Mapas de inundación.....	44
Zonas de mayor riesgo a inundación.....	52
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	66
LITERATURA CITADA	68
APÉNDICE.....	79

LISTA DE CUADROS

Cuadro		Página
1	Homologación de usos de suelo.....	27
2	Coeficiente de impermeabilidad para el centro de población de Chihuahua.....	37
3	Coeficiente de rugosidad para el centro de población de Chihuahua.....	40
4	Área (km ²) por categoría de profundidad cada 10 minutos con una intensidad de precipitación = 42 mm hr ⁻¹	48
5	Colonias afectadas en cada zona por unidad de tiempo ante inundaciones en el centro de población de Chihuahua.....	57
6	Relación de coladeras por kilómetro en cada zona de inundación para el centro de población de Chihuahua	64

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica		Página
1	Gráfica del proceso de precipitación.....	34

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	Mapa con la ubicación del área de estudio.....	21
2	Metodología para la generación de mapas de inundación y mapa con zonas de mayor riesgo.....	22
3	Mapa sintetizando el proceso de creación de microcuencas....	25
4	Mapa con las microcuencas generadas para el centro de población de Chihuahua.....	26
5	Mapa de impermeabilidad para el centro de población de Chihuahua.....	38
6	Mapa de rugosidad para el centro de población de Chihuahua.	41
7	Modelo digital de elevación rectificado para el centro de población de Chihuahua.....	42
8	Acercamiento al modelo digital de elevación rectificado de la mc-9.....	43
9	Comparativa de mapas de inundación a los 30 y 60 min de precipitación y 30, 60, 90 y 120 min posteriores.....	45
10	Comparativa de mapas de inundación a los 150 y 300 min posteriores al evento de precipitación.....	47
11	Mapa con las zonas de mayor riesgo a inundación en el centro de población de Chihuahua.....	53
12	Mapa con las 10 zonas de mayor riesgo a inundación identificadas para el centro de población de Chihuahua.....	54
13	Acercamiento de las zonas de mayor riesgo a inundación y colonias en el centro de población de Chihuahua.....	56
14	Acercamiento de las zonas de mayor riesgo a inundación y su interacción con las calles y coladeras en el centro de población de Chihuahua.....	65

LISTA DE FIGURAS DEL APÉNDICE

Figura		Página
1	Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 10 minutos de precipitación.....	79
2	Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 20 minutos de precipitación.....	80
3	Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 30 minutos de precipitación.....	81
4	Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 40 minutos de precipitación.....	82
5	Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 50 minutos de precipitación.....	83
6	Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 60 minutos de precipitación.....	84
7	Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 10 minutos posteriores al evento de precipitación.....	85
8	Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 20 minutos posteriores al evento de precipitación.....	86
9	Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 30 minutos posteriores al evento de precipitación.....	87
10	Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 40 minutos posteriores al evento de precipitación.....	88
11	Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 50 minutos posteriores al evento de precipitación.....	89
12	Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 60 minutos posteriores al evento de precipitación.....	90
13	Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 70 minutos posteriores al evento de precipitación.....	91
14	Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 80 minutos posteriores al evento de precipitación.....	92
15	Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 90 minutos posteriores al evento de precipitación.....	93
16	Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 100 minutos posteriores al evento de precipitación.....	94
17	Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 110 minutos posteriores al evento de precipitación.....	95

18	Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 120 minutos posteriores al evento de precipitación.....	96
19	Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 130 minutos posteriores al evento de precipitación.....	97
20	Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 140 minutos posteriores al evento de precipitación.....	98
21	Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 150 minutos posteriores al evento de precipitación.....	99
22	Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 160 minutos posteriores al evento de precipitación.....	100
23	Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 170 minutos posteriores al evento de precipitación.....	101
24	Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 180 minutos posteriores al evento de precipitación.....	102
25	Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 190 minutos posteriores al evento de precipitación.....	103
26	Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 200 minutos posteriores al evento de precipitación.....	104
27	Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 210 minutos posteriores al evento de precipitación.....	105
28	Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 220 minutos posteriores al evento de precipitación.....	106
29	Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 230 minutos posteriores al evento de precipitación.....	107
30	Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 240 minutos posteriores al evento de precipitación.....	108
31	Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 250 minutos posteriores al evento de precipitación.....	109
32	Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 260 minutos posteriores al evento de precipitación.....	110
33	Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 270 minutos posteriores al evento de precipitación.....	111
34	Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 280 minutos posteriores al evento de precipitación.....	112
35	Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 290 minutos posteriores al evento de precipitación.....	113

36	Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 300 minutos posteriores al evento de precipitación.....	114
37	Mapa de las zonas de mayor riesgo a inundación y colonias en el centro de población de Chihuahua.....	123
38	Mapa de las zonas de mayor riesgo a inundación y alcantarillado en el centro de población de Chihuahua.....	124
39	Acercamiento de las zonas de mayor riesgo a inundación y alcantarillado en el centro de población de Chihuahua.....	125

LISTA DE CUADROS DEL APÉNDICE

Cuadro		Página
1	Porcentajes de área ocupada por unidad de tiempo de precipitación para el centro de población de Chihuahua.....	115

LISTA DE ABREVIATURAS

Abreviación	Concepto
1D	Unidimensional
2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
c.	Coeficiente
dat	Data file
dpi	Píxeles por pulgada
HDF	Hierarchical Data Format
mb	Megabyte
mc	Microcuenca
MDE	Modelo digital de elevación
PDU2024	Plan de Desarrollo Urbano 2040
RCP	Representative Concentration Pathways
shp	Shapefile
SWMM	Storm Water Management Model

Abreviación	Dependencia
ACH	Ayuntamiento de Chihuahua
CENAPRED	Centro Nacional de Prevención de Desastres
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
CONAHCyT	Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología
GECH	Gobierno del Estado de Chihuahua
IMPLAN	Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
INEGI	Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática
PCCH	Protección Civil Chihuahua
SCT	Secretaría de Transporte y Comunicación
SEDATU	Secretaría de Desarrollo Territorial y Urbano
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales



INTRODUCCIÓN

La descontrolada expansión de los asentamientos humanos ha provocado cambios irreversibles en la conectividad hidrológica. El inicio de las ciudades surgió a partir de la Revolución Neolítica, entre el 8,000 y 10,000 a.C., cuando las sociedades comenzaron a practicar la agricultura y a establecer asentamientos permanentes (Moya-Honduvilla y Maldonado-Ibáñez, 2003; Ducci, 2012). Este cambio permitió a las comunidades tener más seguridad, organizarse socialmente y acceder a recursos básicos. La principal característica de los asentamientos fue la cercanía a fuentes de agua dulce, como ríos, lagos y oasis. Lo anterior se debió a que el agua era esencial para el consumo, la agricultura y el transporte (Ducci, 2012; Phong, 2015; Vásconez *et al.*, 2019).

El crecimiento de los asentamientos humanos no siempre fue continuo. La Revolución Industrial marcó el inicio de la expansión urbana moderna, la cual se aceleró con el crecimiento demográfico del siglo XX (Ducci, 2012; Orozco-González *et al.*, 2017; Santasusagna-Riu y Tort-Donada, 2019). A medida que las ciudades crecieron, la planificación urbana se volvió más compleja, requiriendo la organización espacial de las necesidades humanas como vivienda, transporte y servicios públicos.

Hoy en día, el ordenamiento territorial enfrenta desafíos como el crecimiento demográfico, la expansión no planificada y la presión sobre recursos como la tierra y el agua (Bazant, 2010; Pérez-Pulido y Romo-Aguilar, 2019; Zubicaray *et al.*, 2021). En este último tema, la planificación urbana y el manejo de las cuencas hidrográficas se encuentran estrechamente relacionados, ya que el crecimiento de las ciudades ejerce una presión significativa sobre los sistemas



hídricos (Dourojeanni y Jouravlev, 1999; Koop y van Leeuwen, 2017). Las cuencas hidrográficas son responsables de drenar el agua de lluvia hacia los cuerpos hídricos y de alterar el desarrollo y funcionamiento de las ciudades (Cotler-Ávalos *et al.*, 2013; Vásconez *et al.*, 2019; Protección Civil y CENAPED, 2022). La morfología de una cuenca afecta la distribución del agua, escorrentía y almacenamiento o recarga del manto acuífero. Mientras que los patrones de precipitación determinan la cantidad, frecuencia y distribución de la lluvia (Díaz-Padilla *et al.*, 2011; Vásconez *et al.*, 2019).

El cambio climático ha modificado los patrones de precipitación a nivel global, causando tormentas más intensas en regiones secas (aun cuando la precipitación promedio anual sea menor) y sequías más severas (Lhomme *et al.*, 2013; Estrada-Porrúa *et al.*, 2023). Los eventos de precipitación extrema y la alteración de la morfología natural de las cuencas por la urbanización pueden afectar la calidad del agua y disponibilidad del recurso (Martínez-Austria y Patiño-Gómez, 2012; Estrada-Porrúa *et al.*, 2023). La pavimentación y construcción de infraestructuras impermeables reducen la capacidad del suelo para infiltrar agua, impidiendo la recarga de acuíferos y embalses e incrementando la escorrentía superficial (Nur y Shrestha, 2017; Agonafir *et al.*, 2023). Como resultado, promueve la vulnerabilidad a fenómenos como las inundaciones en áreas urbanas, con su alta proporción de superficies impermeables y una saturación rápida en los sistemas de drenaje (Ribot *et al.*, 2005; Tingsanchali, 2012; Agonafir *et al.*, 2023). Las inundaciones urbanas son causadas por una variedad de factores naturales y antrópicos. Algunas de las principales causas incluyen lluvias intensas y prolongadas, crecimiento urbano descontrolado y falta de



infraestructura adecuada (Dourojeanni y Jouravlev, 1999; Santasusagna-Riu y Tort-Donada, 2019; Agonafir *et al.*, 2023). Entre las principales consecuencias se encuentran daños a infraestructuras, altos costos de reparación, desplazamientos, alteración en servicios esenciales. contaminación del agua y daños a la flora y fauna (Hammond *et al.*, 2013; Koop y van Leeuwen, 2017; Agonafir *et al.*, 2023). A nivel global, para el año 2008 los costos económicos fueron valorados en 1,905 mil millones de dólares. A nivel nacional fueron de 4.6 mil millones de pesos. A nivel estatal (Chihuahua) fueron de 380 millones de pesos (Baró-Suárez *et al.*, 2011).

Para prevenir y mitigar inundaciones urbanas, es crucial implementar estrategias que combinen enfoques estructurales y no estructurales. Las soluciones estructurales se centran en la construcción de infraestructura física para contener y redirigir el agua, las no estructurales se enfocan en la creación y regulación de planes dentro de las ciudades para reducir los riesgos (Jha *et al.*, 2011; Nur y Shrestha, 2017; Tingsanchali, 2012). Las herramientas de modelación y simulación permiten predecir y gestionar este tipo de riesgos de inundación (Agonafir *et al.*, 2023). Existen distintos modelos, uno de ellos es el modelo hidrológico que simula el comportamiento del agua dentro del área urbana, permitiendo estimar la cantidad de agua que llega a una ciudad durante eventos de precipitación extremos (Qi *et al.*, 2021; Agonafir *et al.*, 2023).

Los modelos hidrológicos tienen la capacidad de predecir cómo se desplazará el agua en las calles y encontrar los puntos críticos de inundación mediante los índices de rugosidad e impermeabilidad en zonas urbanas. Por lo anterior, el objetivo de este trabajo fue generar una simulación a partir de un



modelo hidrológico que permita identificar zonas de mayor riesgo a inundación para el centro de población de Chihuahua. Los objetivos específicos fueron: delimitar microcuencas, generar coeficientes de impermeabilidad y rugosidad, rectificar el modelo digital de elevación, crear mapas de inundación y establecer zonas de mayor riesgo a inundación. El trabajo aporta un marco integral y actualizado para la gestión del riesgo de inundaciones en centros de población o urbanos.



REVISIÓN DE LITERATURA

Evolución de los centros de población

La historia de los centros de población indica que los primeros asentamientos surgieron a partir de la Revolución Neolítica, entre el año 10,000 y 8,000 a.C. cuando el ser humano comenzó a practicar la agricultura. A estas primeras comunidades, se les asignó el nombre de aldeas y se identificaban por formar un pequeño grupo de chozas (Moya-Honduvilla y Maldonado-Ibáñez, 2003; Ducci, 2012). Al establecerse en sitio sin necesidad de migrar lograron domesticar varios animales, y con el paso del tiempo contar con mayor seguridad (Moya-Honduvilla y Maldonado-Ibáñez, 2003), lo que vislumbro un nuevo panorama de posibilidades. Con el paso de los años, algunas aldeas lograron transformarse en imperios dando origen a las primeras ciudades. Estas grandes civilizaciones neolíticas se ubicaban cerca de fuentes de agua, como ríos, lagos u oasis, como ejemplo esta la cultura mesopotámica a orillas del Tigris y el Éufrates y la cultura egipcia cerca del Nilo (Rojas-Eraso, 1997; Ducci, 2012; Santasusagna-Riu y Tort-Donada, 2019).

El recurso hídrico fue fundamental no solo para la agricultura, sino también para el consumo, el transporte y, en muchos casos, su control influyó en la jerarquía política y religiosa (Phong, 2015; Vásconez *et al.*, 2019). Al encontrarse en terrenos fértiles, la sobreproducción agrícola permitió que la población se dedicara a otras actividades, no solo a la agricultura. Esto marcó el comienzo de la repartición de roles y organización social (Ducci, 2012). Con el paso del tiempo, la organización de las sociedades se tornó más compleja. Los nuevos asentamientos continuaron estableciéndose cerca del agua, como en numerosas



capitales europeas o la misma Tenochtitlán en México (Santatusagna-Riu y Tort-Donada, 2019). Sin embargo, el crecimiento de los asentamientos humanos no siempre fue constante, la Revolución Industrial impulsó el desarrollo de las ciudades con innovaciones tecnológicas en industria, comunicación y transporte. Este proceso marcó el inicio de la urbanización moderna, llevando a las ciudades a un crecimiento sin precedentes (Ducci, 2012).

Las ciudades no son entidades aisladas, se localizan insertas en regiones con características específicas y crean vínculos sociales, económicos y políticos con otras zonas urbanas (Bazant, 2010; Ducci, 2012). La rápida urbanización ha dado lugar a la formación de extensos asentamientos irregulares en las periferias de las ciudades, donde no existe planificación de infraestructura ni servicios básicos. A menudo, estos asentamientos se establecen en áreas potencialmente peligrosas a eventos como inundaciones y deslizamientos (Dourojeanni y Jouravlev, 1999; Bazant, 2010). Por lo tanto, la expansión urbana se caracteriza por un desarrollo disperso y descontrolado en las periferias de las ciudades, ignorando frecuentemente los efectos sociales y ambientales, lo que genera presión sobre los espacios naturales y recursos hídricos (Orozco-González *et al.*, 2017; Santatusagna-Riu y Tort-Donada, 2019).

Para el 2025 se espera que las ciudades alberguen al 67% de la población mundial (Koop y van Leeuwen, 2017). En México, la expansión ha sido acelerada, resultando en ciudades más extensas y menos densas (Bazant, 2010; Zubicaray *et al.*, 2021). Por ejemplo, en Ciudad Juárez se encontró que la mancha urbana creció 11 veces más rápido que la población entre 2005 y 2010 (Pérez-Pulido y Romo-Aguilar, 2019). A la fecha la urbanización se considera un proceso



irreversible y plantea grandes desafíos con altos costos de infraestructura, ineficiencias funcionales y necesidad de satisfacer la demanda alimenticia de la población (Ribot *et al.*, 2005; Ducci, 2012). La expansión urbana ha sido más rápida que el crecimiento poblacional, resultando en un modelo disperso de baja densidad, donde tres de cada cuatro personas viven en las ciudades mexicanas.

El modelo actual de crecimiento, en México, ha generado graves problemas ambientales, como la urbanización de suelos agrícolas, el aumento de emisiones contaminantes y mayor estrés hídrico; económicos, como la pérdida de productividad por los tiempos de desplazamiento y un mayor gasto municipal para equipamiento e infraestructura vial; y sociales, como la dependencia al automóvil, la segregación socio-espacial y la desigualdad en el acceso a equipamiento y transporte para las personas de escasos recursos. (Bazant, 2010; Pérez-Pulido y Romo-Aguilar, 2019; Zubicaray *et al.*, 2021). Asimismo, el escenario de expansión actual exige nuevas estrategias de planificación territorial que ordenen y restauren el espacio. Por lo que, a partir del siglo XXI se ha apostado por el ordenamiento territorial, que tiene como objetivo reflejar en el espacio físico los aspectos políticos, económicos, culturales y ecológicos de la sociedad, promoviendo un desarrollo equilibrado y una organización del espacio según un plan general (Gudiño, 2015). Uno de los enfoques del ordenamiento territorial es la planeación urbana que gestiona el crecimiento de las ciudades al identificar tendencias de expansión espacial, permitiendo a los planificadores abordar la expansión desordenada a mediano y largo plazo, y proponiendo soluciones a las ineficiencias existentes (Bazant, 2010; Gudiño, 2015; Orozco-González *et al.*, 2017).



Cuencas hidrográficas en zonas urbanas

Cualquier intervención que realiza el hombre ya sea para planificar o alterar el territorio se ubica dentro de una cuenca hidrográfica, por lo tanto, no existe ningún lugar sobre la superficie terrestre que no corresponda a una cuenca (Breña y Jacobo, 2013). Las cuencas se ven afectadas por los asentamientos urbanos, causando alteraciones y conflictos dentro de ellas (Dourojeanni & Jouravlev, 1999). La transformación de superficies naturales en pavimentadas aumenta la escorrentía superficial, reduce la infiltración y modifica la calidad del agua, afectando la funcionalidad hidráulica y los ecosistemas fluviales. Por lo tanto, una planificación adecuada debe integrar los ríos como elementos clave de la composición urbana, evitando intervenciones excesivas que puedan perjudicar tanto al río como a la ciudad (Ureña-Francés, 2002; Rybka y Mazur, 2018). Las cuencas en zonas urbanas, especialmente aquellas con alta densidad poblacional y actividades industriales o agrícolas, enfrentan crecientes conflictos debido a la presión sobre los recursos hídricos y el medio ambiente.

La urbanización ha alterado significativamente el ciclo hidrológico, reduciendo la cobertura vegetal, ocupando áreas de recarga y regulando artificialmente los caudales, lo que impacta la calidad y cantidad del agua disponible (Koop y van Leeuwen, 2017). Además, muchos asentamientos se ubican en zonas de riesgo, como ríos y quebradas, aumentando su vulnerabilidad a inundaciones (Dourojeanni y Jouravlev, 1999). Aunque el consumo urbano representa menos del 10 % del uso global del agua, la gestión eficiente y el reciclaje son esenciales para reducir la contaminación y optimizar recursos (Koop y van Leeuwen, 2017). En este contexto, garantizar un abastecimiento sostenible



de agua requiere una planificación adecuada que considere tanto las dinámicas urbanas como las de las cuencas proveedoras (Dourojeanni y Jouravlev, 1999).

La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) considera a la cuenca hidrográfica como la unidad territorial básica para la planificación y gestión de los recursos naturales (Cotler-Ávalos et al., 2013). Esta se define como un área o superficie formada por un entramado de ríos y/o arroyos que conduce el flujo de agua desde el parteaguas (puntos altos de las montañas) hasta el cauce principal, con un punto de salida que puede ser un lago (cuenca endorreica) o el mar (cuenca exorreica). Su forma es determinada por factores geológicos, y se compone de tres zonas: alta (zona de captación), media (zona de almacenamiento) y baja (zona de descarga). Las cuencas se pueden clasificar según su extensión: cuenca (mayor a 50-000 ha), sub-cuenca (5,000-50,000 ha) y microcuenca (menor a 5 000 ha) (Cotler-Ávalos *et al.*, 2013; Vásconez *et al.*, 2019; Protección Civil Chihuahua [PCCH] y CENAPRED, 2022).

Las cuencas son consideradas fundamentales para hacer frente a la crisis ambiental por que regulan la recarga hídrica, conservan la biodiversidad y constituyen un sumidero de CO₂ (función ambiental); proveen de hábitat a la flora y fauna (función ecológica); drenan el agua de la precipitación y recargan las fuentes de agua subterránea y superficial (función hidrológica); dota de equipamiento a la sociedad, suministra recursos naturales renovables y no renovables y provee de agua a la población (función socioeconómica) (Vásconez *et al.*, 2019; PCCH y CENAPRED, 2022). Las cuencas son cruciales para comprender el ciclo hidrológico de manera espacial y evaluar los impactos



acumulados de las actividades humanas, ya que se prevé que estas lo alteren significativamente (Cotler-Ávalos *et al.*, 2013).

El ciclo hidrológico es un proceso global en el que el agua circula de manera cerrada entre la superficie terrestre y la atmósfera, a través de las fases: evaporación (y transpiración), precipitación, intercepción, escurrimiento superficial, infiltración y percolación (Arnbjerg-Nielsen y Fleischer, 2009; Cotler-Ávalos *et al.*, 2013; Vásconez *et al.*, 2019). A lo largo de estas fases, la morfología de una cuenca influye en el movimiento de agua y a ese flujo se le conoce como escorrentía: escorrentía superficial (escurrimiento que no se infiltra), sub-superficial (escurrimiento que se infiltra en la capa más superficial del suelo) y subterránea (escurrimiento que alcanza el nivel freático) (Vásconez *et al.*, 2019). De tal manera que la cuenca marca el patrón que seguirán los flujos de agua. Sin embargo, para que estos flujos se den es imprescindible contar con eventos de precipitación. Se conoce como precipitación al agua que cae a la superficie terrestre proveniente de la humedad atmosférica, esta puede presentarse en estado líquido como llovizna o lluvia, y/o en estado sólido como escarcha, nieve o granizo; y los patrones se refiere a la frecuencia, cantidad y distribución que la precipitación puede tener. (Díaz-Padilla *et al.*, 2011; Vásconez *et al.*, 2019).

Impactos ambientales en centros de población

El funcionamiento del ciclo hidrológico y el clima se encuentran estrechamente relacionados ya que de las variaciones en el clima dependen los fenómenos como la precipitación. Sin embargo, las condiciones climáticas dependerán de las emisiones de gases de efecto invernadero (ej. CO₂ y CH₄), que en su mayoría son resultado de las actividades antropogénicas. Debido a



esto, las predicciones científicas se hacen considerando escenarios que simulan diferentes niveles de estos gases; siendo el cambio climático una de las principales amenazas para la vida en la tierra. (García-Páez y Cruz-Medina, 2009; Martínez-Austria y Patiño-Gómez, 2012; Kumar, 2021). En relación a la temperatura, en México se espera un aumento de hasta 4°C para finales de este siglo (Martínez-Austria y Patiño-Gómez, 2012). En cuanto a los fenómenos de precipitación, el cambio climático ha demostrado alteraciones en los patrones de este fenómeno a nivel global y se espera que se intensifique la frecuencia e intensidad de estos propiciando los desastres hidro-meteorológicos (Lhomme *et al.*, 2013). Bases de datos de precipitación analizadas entre 1901 y 2021 muestran una tendencia positiva en el promedio anual de 3.1 mm/mes/siglo. También observaron que los eventos de sequía serán más largos y los fenómenos de precipitación más extremos con un aumento en su intensidad entre 21-26% (Estrada-Porrúa *et al.*, 2023). Para el noreste y noroeste del país se espera una disminución del 20% y 40% respectivamente, es importante mencionar que una disminución de la precipitación del 10% puede causar una disminución de hasta 30% en el escurrimiento (Martínez-Austria, 2007). Es decir, para los climas cálidos se esperan eventos más intensos, aunque la precipitación promedio anual sea menor (Estrada-Porrúa *et al.*, 2023).

En México el 85% del territorio se encuentra en regiones áridas, donde las actividades humanas dependen de las lluvias de temporada y son más vulnerables a los efectos del cambio climático (Ribot *et al.*, 2005; Martínez-Austria, 2007). Con este panorama de crecimiento poblacional, la contaminación del agua, la sobre explotación del recurso hídrico, los cambios en patrones de



precipitación y la expansión urbana ha disminuido la disponibilidad de agua, afectando la recarga de acuíferos y fuentes de agua potable (Estrada-Porrúa *et al.*, 2023). Se espera que la escasez incremente y la gestión de agua no sea suficiente para enfrentar los retos asociados al cambio climático ni para satisfacer la demanda alimenticia (Martínez-Austria y Patiño-Gómez, 2012). Para el año 2030 se estima que será necesario un 40% más de agua para cubrir las necesidades de la población mundial (Koop y van Leeuwen, 2017). En México más del 75% de la población urbana se encuentra en zonas con baja disponibilidad de agua y alto estrés hídrico, y el 90% de la población vive en regiones hidrológicas con problemas de contaminación (Estrada-Porrúa *et al.*, 2023).

De acuerdo a CONAGUA el país está dividido en 11 regiones. El estado de Chihuahua se encuentra en la región Rio Bravo/Grande donde la media disponible para 2025 es de aproximadamente 974 m³/hab/año y, de acuerdo a las naciones unidas, se considera extremadamente baja la disponibilidad de agua si es menor a 1,000 m³/hab/año (Martínez-Austria, 2007). Se prevé que los impactos del cambio climático se manifiesten en zonas urbanas en forma de inundaciones, islas de calor y sequías. Exacerbando las inundaciones gracias al incremento en intensidad y magnitud de la precipitación. Siendo las inundaciones el desastre más peligroso y destructivo para las ciudades (Ribot *et al.*, 2005; Nur y Shrestha, 2017; Gran-Castro y Ramos-deRobles, 2019; Kumar, 2021).

Daños en procesos de inundación

Se le conoce como inundación a la acumulación de agua en zonas donde normalmente no se encuentra (Salas-Salinas, y Jiménez-Espinosa, 2021). Entre



1990 y 2020, el 50% de los desastres naturales reportados a nivel mundial fueron inundaciones. En México, las inundaciones fueron el fenómeno que generó mayores daños a la infraestructura y población. Cerca de 41% del territorio se encuentra expuesto a fenómenos hidro-meteorológicos (Zúñiga *et al.*, 2020; Qi *et al.*, 2021). Existen cuatro tipos de inundaciones (Tingsanchali, 2012; PCCH y CENAPRED, 2022):

- 1- Inundaciones pluviales: Se originan cuando el suelo y/o sistemas de drenaje se saturan y el exceso comienza a acumularse. Esta es la más riesgosa en zonas urbanas por la cantidad de áreas impermeables que se tienen.
- 2- Inundaciones fluviales: Ocurren cuando un río supera su capacidad máxima y se desborda en áreas circundantes.
- 3- Inundaciones costeras: Suceden cuando las tormentas generadas por huracanes tocan tierra en ciudades a nivel del mar.
- 4- Inundaciones lacustres: Se producen cuando el nivel medio de los lagos o lagunas aumenta.

En las zonas urbanas las inundaciones son un fenómeno global que provoca destrucción y pérdidas significativas, estas van desde pérdidas económicas y daños a la biodiversidad hasta la muerte; se espera que esta tendencia continúe en el futuro (Jha *et al.*, 2011). Es importante mencionar que las características locales, como el cambio de uso de suelo y la topografía (pendiente y elevación), influyen significativamente en el impacto de las inundaciones, siendo las áreas con menor altitud y relieve las más afectadas (Nur y Shrestha, 2017; Skougaard Kaspersen *et al.*, 2017; Nkwunonwo *et al.*, 2020).



Este riesgo incrementa para los países de bajos recursos debido a factores como la pobreza, dependencia económica a las materias primas y falta de preparación ante eventos atípicos (Gran-Castro y Ramos-deRobles, 2019; Kumar, 2021; Agonafir *et al.*, 2023).

En las últimas décadas, las ciudades han enfrentado un aumento significativo en el riesgo de inundaciones pluviales, impulsado por factores como los que antes se mencionaron: el cambio climático, el crecimiento poblacional y la rápida urbanización. La expansión de superficies impermeables, como carreteras y edificios, ha reducido la capacidad de infiltración del suelo, impidiendo la recarga de acuíferos y embalses e incrementando el escurrimiento superficial durante eventos de precipitaciones extremas (Nur y Shrestha, 2017; Agonafir *et al.*, 2023). En un estudio realizado en Szechuan, China se encontró que la variable más influyente en las inundaciones pluviales es la densidad de edificios, se demostró que los modelos con edificios incorporados tuvieron un mejor rendimiento que los que no lo incluían (Lin *et al.*, 2020).

Proyecciones bajo los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 siguen que la intensidad de las precipitaciones seguirá en aumento hasta finales del siglo XXI. Además, reportaron que las ciudades europeas estudiadas incrementaron su superficie impermeable a la par que aumentaron los índices de escurrimiento entre 1984 y 2014 (Skougaard Kaspersen *et al.*, 2017). Al contar con grandes extensiones de áreas impermeables los sistemas de drenaje son clave para gestionar el agua precipitada, pero enfrentan limitaciones ante eventos extremos debido a la falta de capacidad, obstrucciones por basura y deterioro de infraestructura (Ribot *et al.*, 2005; Tingsanchali, 2012; Agonafir *et al.*, 2023;



Estrada-Porrúa *et al.*, 2023). Asimismo, la ocupación urbana de zonas de alto riesgo agrava el problema al ignorar los sistemas naturales de drenaje (Dourojeanni y Jouravlev, 1999). Un estudio en Dinamarca sugiere que los municipios deben aumentar la capacidad de drenaje para enfrentar los impactos del cambio climático en inundaciones (Arnbjerg-Nielsen y Fleischer, 2009).

Las consecuencias de las inundaciones pueden ser económicas, sociales o ambientales (Tingsanchali, 2012). Entre las principales consecuencias económicas se encuentran daños a infraestructuras, altos costos de reparación e interrupción de la actividad económica y sistemas de transporte (Agonafir *et al.*, 2023). A nivel global, para el año 2008 los costos económicos fueron valorados en 1,905 mil millones de dólares. A nivel nacional fueron de 4.6 mil millones de pesos. estatal (Chihuahua) fueron de 380 millones de pesos (Baró-Suárez *et al.*, 2011). A nivel social, las inundaciones provocan desplazamientos, afectan la calidad de vida, la seguridad y la salud pública, y alteran servicios esenciales como el acceso a techo, agua y comida. Además, tienen graves efectos ambientales, como la contaminación del agua, la erosión del suelo y daños a la flora y fauna (Hammond *et al.*, 2013; Koop y van Leeuwen, 2017). En este contexto, los parques y áreas verdes desempeñan un papel crucial para mitigar inundaciones al mantener superficies permeables, reduciendo la velocidad de las corrientes y protegiendo a las comunidades de los daños asociados (Dourojeanni y Jouravlev, 1999; Jha *et al.*, 2011). Es esencial tomar en cuenta las variables de cambio climático para diseñar nuevas infraestructuras hidráulicas que ayuden a estar preparados para los eventos extremos que se puedan presentar, los estudios preliminares sugieren que los beneficios de contar con planes de



prevención superan los costos de reparación de daños (Koop y van Leeuwen, 2017).

Alternativas para proyectar eventos a futuro

El objetivo principal del manejo de inundaciones es minimizar las pérdidas humanas y daños a la infraestructura (Tingsanchali, 2012). La vulnerabilidad de la sociedad ante inundaciones en áreas urbanas se aborda principalmente describiendo la magnitud de los impactos en pérdidas económicas, víctimas mortales y las consecuencias posteriores (salud, acceso al agua y el saneamiento) (Nur y Shrestha, 2017). La reducción del riesgo de inundaciones en áreas urbanas debe considerar toda la cuenca, ya que el origen de las inundaciones puede estar lejos de la ciudad afectada. A menudo, la mejor solución es abordar el problema antes de que alcance el entorno urbano. Así, la gestión de inundaciones combina medidas estructurales y no estructurales (Jha *et al.*, 2011; Nur y Shrestha, 2017). Las soluciones estructurales se centran en la construcción de infraestructura física para contener y redirigir el agua y algunos ejemplos son limpieza y mejora del drenaje, barreras de contención, pavimentos permeables, techos verdes, restauración de áreas verdes y un diseño arquitectónico consiente (Jha *et al.*, 2011; Tingsanchali, 2012; Nur y Shrestha, 2017).

Las soluciones no estructurales reconocen que no siempre es posible evitar las inundaciones y se enfocan en la creación y regulación de planes dentro de las ciudades para reducir los riesgos y algunos ejemplos son sistema de alerta temprana, programas de evacuación y refugio, así como planes de contingencia y recuperación (Jha *et al.*, 2011; Tingsanchali, 2012; Nur y Shrestha, 2017). Es



importante mencionar que las soluciones estructurales ofrecen protección a largo plazo, pero suelen implicar grandes inversiones. En contraste, las medidas no estructurales no requieren de inversión previa y son esenciales para proteger a la población (Jha *et al.*, 2011; Tingsanchali, 2012). De tal manera que, la gestión de inundaciones necesita una combinación de ambos enfoques. Es importante tomar en cuenta el contexto para seleccionar la mejor solución. Para que la gestión de inundaciones sea efectiva es fundamental una planificación coordinada entre organizaciones públicas y gubernamentales, así como informar a la población del riesgo y las medidas de protección y mitigación (Jha *et al.*, 2011; Tingsanchali, 2012). También se requiere evaluar el desempeño de las medidas implementadas para determinar su efectividad y cambiar o mejorar aquellos aspectos que lo requieran (Tingsanchali, 2012). Las herramientas de modelación y simulación buscan identificar los puntos clave para la implementación de las estrategias mencionadas y poder predecir y gestionar los riesgos de inundación (Agonafir *et al.*, 2023). La modelación se encarga de recrear la realidad virtualmente y la simulación toma ese modelo para imitar y evaluar los eventos que pasan a lo largo del tiempo. Existen varios modelos desarrollados por gobiernos, instituciones académicas y particulares que logran simular la cantidad y calidad del agua en cuencas “urbanas” (Qi *et al.*, 2021).

Los principales modelos de inundaciones se pueden dividir en (Qi *et al.*, 2021; Agonafir *et al.*, 2023):

- 1- Modelos hidrológicos: simulan el comportamiento del agua en la superficie (infiltración y escorrentía), permitiendo estimar la cantidad de



agua que llega a una ciudad durante eventos de precipitación extremos.

- 2- Modelos hidráulicos: simulan cómo fluye el agua a través de los sistemas de alcantarillado, permitiendo estimar si la capacidad el sistema es suficiente durante eventos de precipitación extremos.
- 3- Modelos de autómatas celulares: utilizan una cuadrícula y no requiere la red de drenaje, reduciendo los tiempos de procesamiento en comparación a los modelos físicos.
- 4- Modelos estadísticos: usan técnicas probabilísticas para evaluar riesgos de inundación y prever eventos, siendo útiles en estudios con datos y/o recursos limitados.
- 5- Modelos de Machine Learning: aplican datos de entrenamiento para predecir inundaciones o recomendar acciones y cuentan con capacidad de aprendizaje continuo. Pueden complementar modelos tradicionales.

Los dos primeros son considerados el método tradicional en la evaluación de inundaciones urbanas. Un ejemplo temprano es el modelo *Storm Water Management* (SWMM), que utiliza datos de drenaje, precipitación, impermeabilidad y un modelo digital de elevación para simular procesos como infiltración y flujo en tuberías y almacenamientos, evaluando el comportamiento del agua bajo diferentes escenarios climáticos (Qi *et al.*, 2021; Agonafir *et al.*, 2023). Estos modelos cuentan con una buena capacidad predictiva, sin embargo, pueden llegar a ser imprácticos por los costos, disponibilidad de datos y tiempo computacional (Nkwunonwo *et al.*, 2020; Agonafir *et al.*, 2023).



Los modelos hidrológicos e hidráulicos son herramientas esenciales para evaluar el impacto del cambio climático, la urbanización y prevenir inundaciones. Permiten analizar de forma integral el escurrimiento en calles, infraestructura pluvial, arroyos y ríos, considerando toda la zona urbana (Alcocer-Yamanaka *et al.*, 2016; Qi *et al.*, 2021). Numerosos estudios de gestión de inundaciones se han realizado usando modelos hidrodinámicos unidimensionales y bidimensionales, e incluso los modelos pueden llegar a combinarlos (1D/2D), también existen los tridimensionales, pero actualmente son menos utilizados (Timbe-Castro y Willems, 2011).

La selección del modelo dependerá del objetivo que se tenga. Por ejemplo, los modelos hidráulicos 1D son rápidos y estables, pero limitados ante desbordes y flujos superficiales mientras que los modelos hidrodinámicos 2D son precisos, pero requieren mucho tiempo de cómputo debido a su alta resolución, y los modelos 1D/2D buscan mitigar las desventajas que se tienen y se sugiere que son mejores para áreas grandes y simulaciones a largo plazo (Timbe-Castro y Willems, 2011; Qi *et al.*, 2021). La modelación y simulación de inundaciones son herramientas útiles para la prevención y mitigación riesgos, cuentan con sus ventajas y limitaciones y aunque en las últimas décadas han mejorado significativamente, al hablar de elementos tan complejos como la precipitación y sistemas urbanos aún existen áreas de oportunidad (Lhomme *et al.*, 2013; Nur y Shrestha, 2017). No obstante, estas técnicas se han popularizado y aplicado globalmente ya que facilitan la comprensión y control de las inundaciones y ofrecen una base científica para la toma de decisiones gubernamentales (Nkwunonwo *et al.*, 2020; Qi *et al.*, 2021).



MATERIALES Y METODOS

Área de estudio y adquisición de datos

El área de estudio se ubica en el centro de población del municipio de Chihuahua, con coordenadas centrales latitud Norte 28°38', longitud Oeste 106°04' y una altitud de 1,440 msnm (figura 1).

El municipio cuenta con una superficie de 9,219.3 km² (Instituto Municipal de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua [IMPLAN], 2006). Asimismo, la superficie de terreno que ocupa el centro de población es de 782.9 km², albergando una población acorde al último censo de población realizado por INEGI (2020) de 937,674 personas. El municipio de Chihuahua posee un clima semiárido extremo con escasos cuerpos de agua superficiales. La temperatura media anual es de 18.2 °C, con una media mínima de -7.4 °C y máxima de 37.7 °C; la precipitación media anual es de 387.5 mm (IMPLAN, 2006; PCCH y CENAPRED, 2022). La temporada de lluvias es de julio a septiembre (Gobierno del Estado de Chihuahua & Protección Civil Chihuahua [GECH y PCCH], 2015). Se localiza dentro de las regiones hidrológicas: cuencas cerradas del Norte y Bravo-Conchos. Donde los ríos principales son el río Sacramento y Chuvíscar de tipo intermitente. En el municipio de Chihuahua se ubican tres presas, la presa Chihuahua, Chuvíscar y El Rejón (IMPLAN, 2006; PCCH y CENAPRED, 2022).

Para el desarrollo de este trabajo se siguió la metodología ilustrada en la figura 2. Los insumos se adquirieron de diferentes fuentes de información. Por parte del Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua (IMPLAN) se obtuvieron las siguientes capas de información en formato “.shp” del centro de población: polígono del centro de población (edición 2016), zonificación

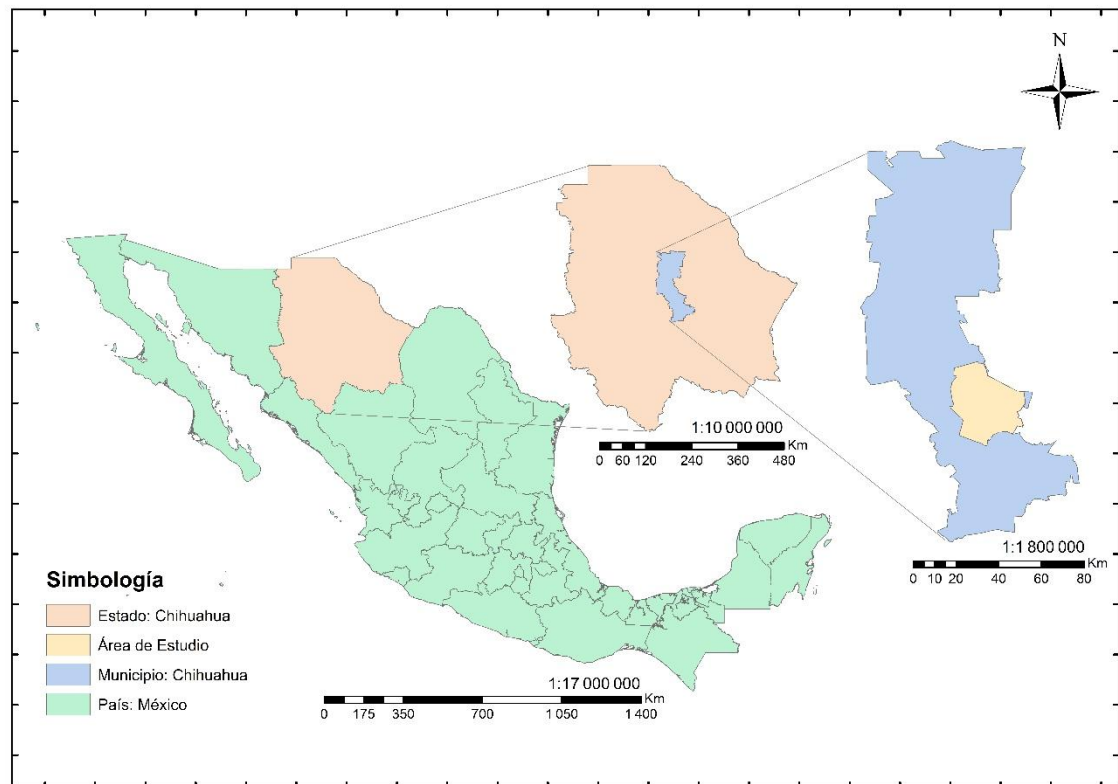


Figura 1. Mapa con la ubicación del área de estudio.

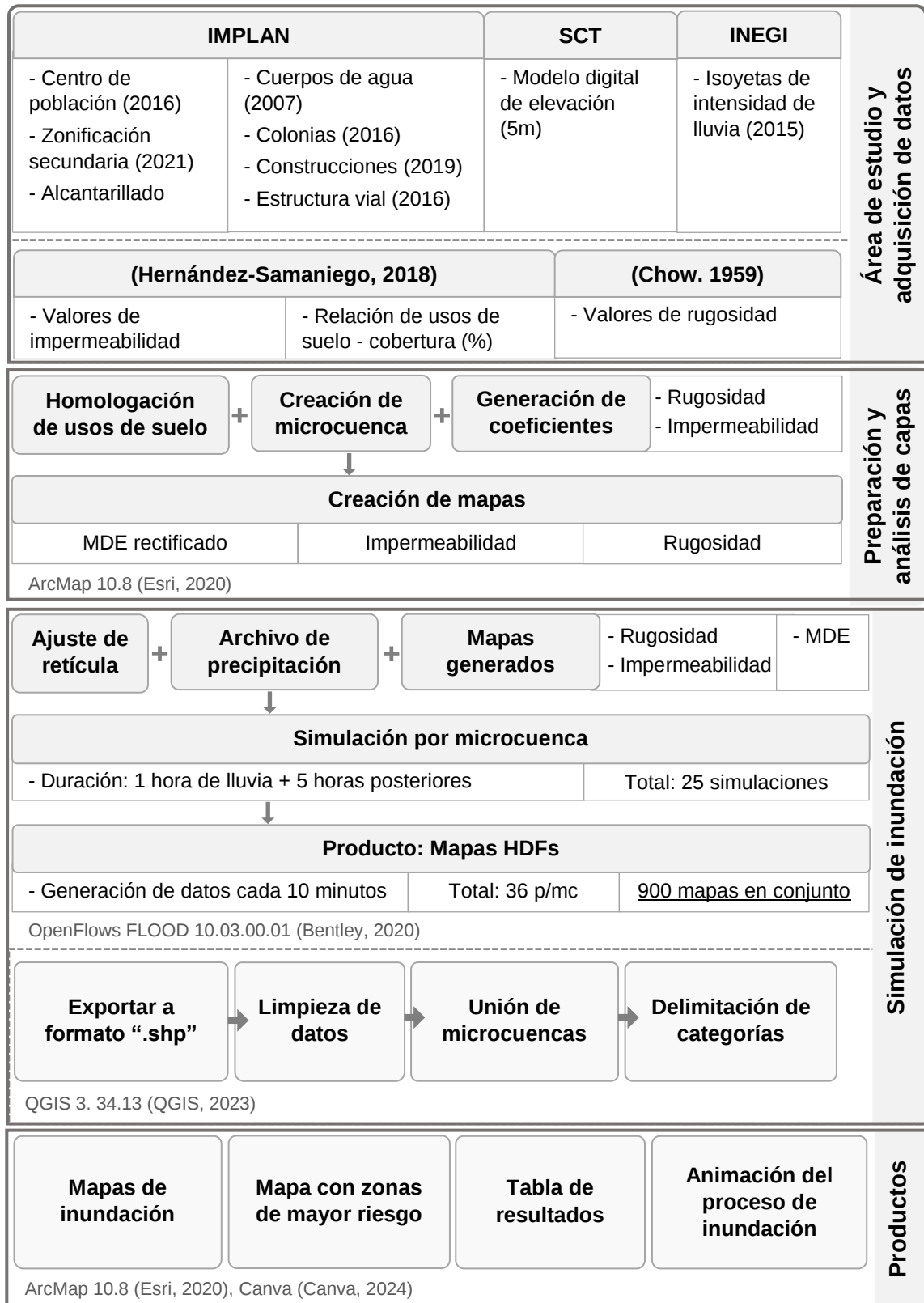


Figura 2. Metodología para la generación de mapas de inundación y mapa con zonas de mayor riesgo.



secundaria (edición 2021), cuerpos de agua (edición 2007), colonias y fraccionamientos (edición 2016), construcciones del área urbana (edición 2019), red vial (edición 2016) y pozos de visita del sistema de alcantarillado público. Del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) se descargaron los modelos digitales de elevación (MDE) que cubren el centro de población a una resolución espacial de 5m (50 cartas topográficas). Finalmente, se adquirieron de la Secretaría de Transporte y Comunicación (SCT; 2015) las capas de información de isoyetas de intensidad-duración para el estado de Chihuahua para un periodo de retorno de 10 años y duración de 60 minutos con un valor de precipitación de 42 mm hr^{-1} para el municipio.

Preparación y análisis de capas de información

Creación de microcuencas

Después de adquirir los insumos el siguiente paso para el desarrollo del objetivo principal fue la generación de microcuencas. El área de estudio está delimitada por un polígono que engloba la mancha urbana y su representación para el análisis de la investigación no es adecuada. Por lo tanto, fue necesario generar microcuencas que sigan el curso natural del terreno considerando desde las partes altas hasta la salida de la microcuenca (mc).

Para generar las mc se utilizó el programa ArcMap 10.8 (Esri, 2020) utilizando las herramientas del módulo “Hidrology” del software. Se integraron las 50 cartas topográficas de los modelos digitales de elevación para unificar la información en un solo producto. Luego, se procedió a generar las capas de información de dirección de flujo, acumulación del flujo y red de arroyo. Se identificaron los órdenes de flujo del 10 al 12 en la red de arroyos, donde se



marcaron puntos en la desembocadura de los ríos de orden 7 al 9 (punto de cierre de cada microcuenca). Los órdenes 1-6 se omitieron ya que generarían microcuencas de un tamaño muy pequeño. Las microcuencas se generaron en formato tipo raster y se exportaron a formato tipo vector (".shp"). Finalmente, se eliminaron las microcuencas ubicadas fuera del área de estudio y se unificaron aquellas con áreas no mayores a 125 km² (ya que el programa para generar la simulación de inundaciones no permite mallas mayores a 5,000,000 píxeles). En la figura 3 se representan todos los pasos anteriores.

La superficie del área de estudio abarca 782.9 km², sin embargo, después de la generación de microcuencas (25 unidades) la superficie estimada abarcó un total de 1,174.50 km² (figura 4).

Homologación de usos de suelo

Para asignar el uso de suelo dentro del área de estudio fue necesario homologar las categorías presentadas por Hernández-Samaniego (2018) y las que propone la zonificación secundaria realizada por el IMPLAN.

En cuanto a los tipos de usos de suelos, se optó por realizar una homologación de los mismos. Esto dado que, si bien ambos describen los mismos usos de suelo, estos tienen distintos nombres. Así se generaron categorías equivalentes para poder aplicar la metodología. En el cuadro 1 se encuentra la homologación, así como el nombre asignado a las categorías que se utilizaron.

Generación de coeficientes

Para la obtención del coeficiente de impermeabilidad y del coeficiente de

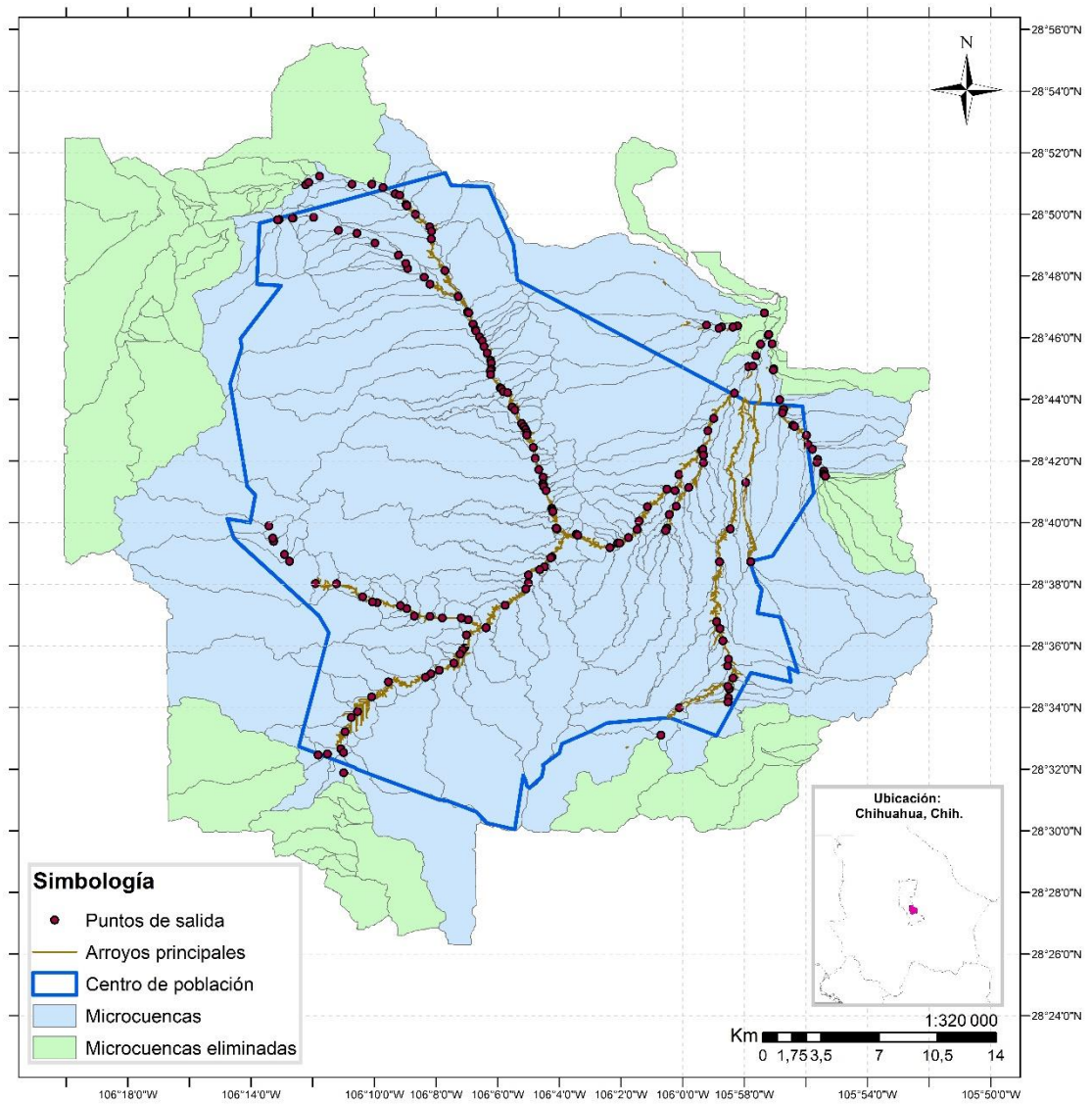


Figura 3. Mapa sintetizando el proceso de creación de microcuencas.

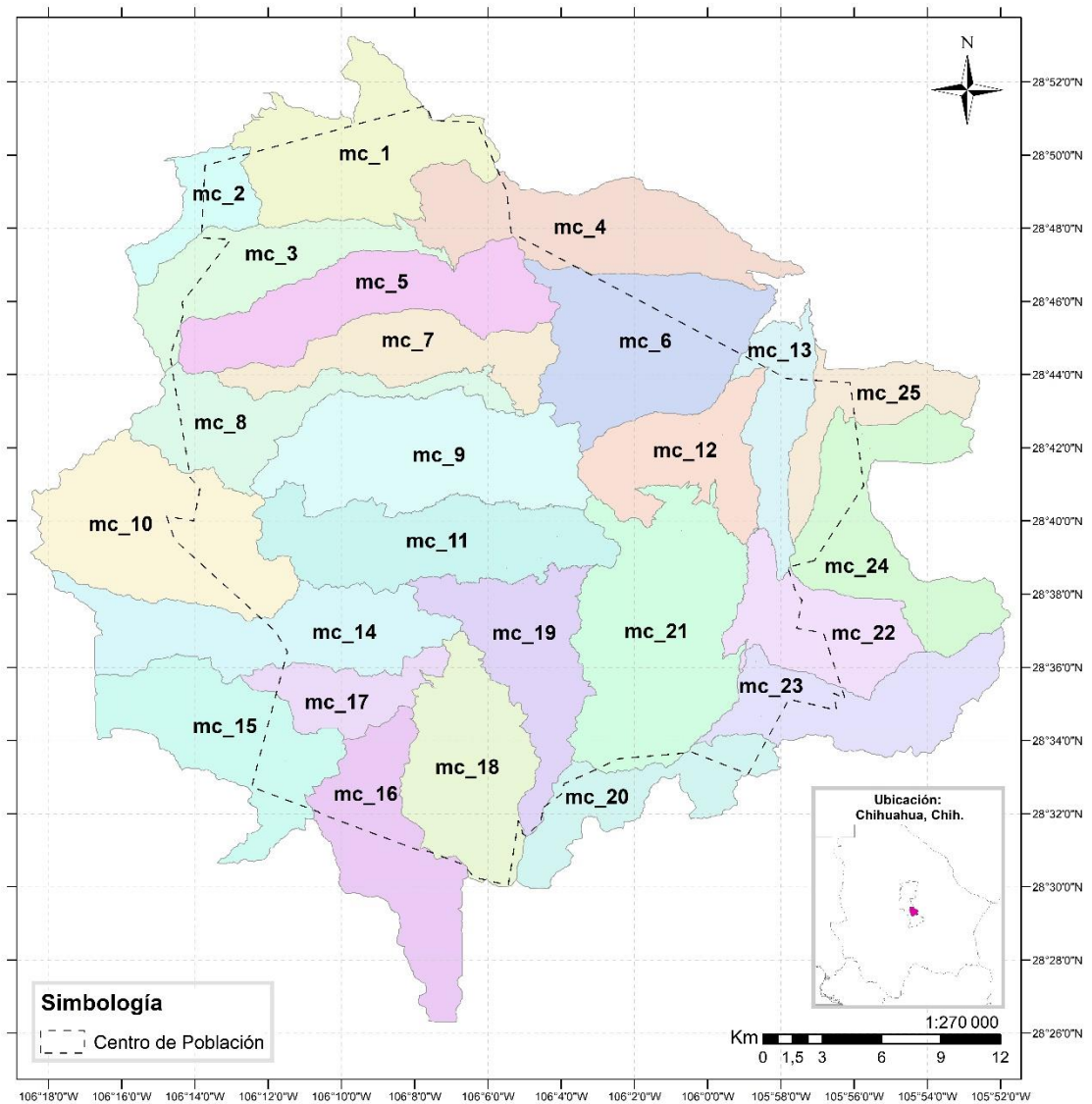


Figura 4. Mapa con las microcuencas generadas para el centro de población de Chihuahua.



Cuadro 1. Homologación de usos de suelo.

Usos de Suelo		
Hernández-Samaniego (2018)	IMPLAN	Propuesto
Comercio	Comercio y servicios	Comercio
Equipamiento urbano PDU2040	Equipamiento	Equipamiento
Vivienda urbana	Habitacional	Habitacional
Industria	Industria	Industria
Parque	Recreación y deporte	Recreación
Terracería	Preservación ecológica	Terreno natural
Vegetación	Usos especiales Centro distrital	
Mixto PDU2040	Mixto Nodo Corredor Amortiguamiento	Mixto



rugosidad se estableció la relación uso de suelo-cobertura utilizando la metodología propuesta por Hernández-Samaniego (2018). Esta metodología identificó el tipo de cobertura de cada uso de suelo urbano basándose en imágenes satelitales, para después ponderar el porcentaje de cobertura que cada uso tiene basándose en 4 elementos básicos: techumbre, pavimento, vegetación y terracería. Las clases presentadas por Hernández-Samaniego (2018) y que se utilizaron en el presente trabajo se encuentran en el cuadro 1. Los porcentajes obtenidos se basaban tanto en los elementos básicos (techumbre, pavimento, terracería y vegetación) como en las mismas clases de uso de suelo generadas. Por ejemplo, equipamiento urbano PDU2040 se encuentra compuesto por 40% de techumbre, 15% de pavimento, 45% de parque; y a su vez el parque se encuentra compuesto por 20% de pavimento, 50% de vegetación, 25% de terracería y 5% de techumbre. Por lo que se optó por desglosarlas a sus elementos básicos. No obstante, al realizar dicho procedimiento se detectaron inconsistencias en los valores y se tuvo que realizar una rectificación para las categorías: comercio, industria y mixto.

La estimación de coeficientes de impermeabilidad y rugosidad presentaron inconsistencias en los porcentajes. Por tal motivo, fue necesario verificar y recalcular los valores de impermeabilidad para los usos de suelo presentados por Hernández-Samaniego (2018). Asimismo, se tomó como base el modelo digital de elevación y se utilizaron los coeficientes de impermeabilidad rectificados para asignarle el valor correspondiente a cada uso de suelo. Los valores de impermeabilidad para los elementos básicos de cobertura fueron los siguientes: techumbre = 1.000, pavimento = 0.950, vegetación = 0.030, terracería = 0.030



(Hernández-Samaniego, 2018). Un ejemplo de cómo se generó el coeficiente es el siguiente: para un comercio donde la superficie que ocupa está determinada en un 70.50% de techumbre, 22.00% de pavimentación, 5.00% de vegetación y 2.5% de terracería (total 100.00%). La relación uso de suelo-cobertura quedaría de la siguiente manera:

$$\text{Comercio} = \underbrace{70.50\% * 1.00}_{\text{techumbre}} + \underbrace{22.00\% * 0.95}_{\text{pavimento}} + \underbrace{5.00\% * 0.03}_{\text{vegetación}} + \underbrace{2.50\% * 0.03}_{\text{terracería}} = \mathbf{0.916}$$

Donde el valor total es la suma de la relación superficie-cobertura para cada uso de suelo.

Para obtener el coeficiente de rugosidad de Manning, el cual determina la resistencia de un material o superficie al flujo, se tomó como referencia el trabajo realizado por Chow (1959), quien calculó coeficientes para distintos materiales. La capa de rugosidad se obtuvo utilizando los valores estimados y los usos de suelo rectificados. Al igual que con la impermeabilidad se utilizó el modelo digital de elevación y los coeficientes de rugosidad para cada uso de suelo. Para el caso del coeficiente de rugosidad los valores de los elementos básicos de cobertura fueron los siguientes: techumbre = 0.012, pavimento = 0.016, vegetación = 0.035, terracería = 0.018 (Chow, 1959).

Rectificación del modelo digital de elevación

El modelo digital de elevación es una representación de la elevación del terreno con respecto al nivel del mar. Debido a que el área de estudio se ubica en una zona urbana fue necesario rectificarlo para considerar las construcciones y zonificación secundaria (insumo IMPLAN). Para lo anterior se agregó al modelo 0.15 m a lo que correspondería banqueta, tomando como referencia la



zonificación secundaria; y 6 m a lo que representa construcciones usando como referencia las construcciones del área urbana (insumo IMPLAN). Finalmente, por medio del programa ArcMap 10.8 (Esri, 2020) se generó esta información para cada microcuenca que integra el estudio.

Simulación de inundación

Para generar la simulación del evento de inundación se consideró como supuestos: la precipitación se distribuyó de manera homogénea, la intensidad fue constante, no se consideraron objetos ajenos a la traza urbana (basura, vehículos, personas, etc.) y el sistema de drenaje no se incluyó como variable en la simulación. Esto con la finalidad de utilizarse para evaluar la eficiencia del sistema de drenaje en las zonas de inundación.

El proceso de simulación se realizó en el programa OpenFlows FLOOD 10.03.00.01 (Bentley, 2020) y se utilizó el modelo MOHID Land. Este es un modelo integrado que se compone de 4 medios: atmósfera, porosidad, superficie y red de arroyos (Mohid, 2024). El movimiento del agua se basó en ecuaciones de la conservación de masa y momento (Mohid, 2013). Dada la conservación de masas por la ecuación simplificada:

$$[tasa\ de\ acumulación] = [entrada - salida] + [fuentes - sumideros]$$

y la conservación de momento por la ecuación simplificada de la segunda ley de Newton:

$$[aceleración] = [resultado\ de\ las\ fuerzas]$$

La atmósfera no se simula explícitamente, pero provee de los datos necesarios para las condiciones del modelo (precipitación, radiación, viento, etc.) y estas pueden variar en espacio y tiempo. El modelo se basa en volúmenes



finitos organizados en una cuadrícula para el plano horizontal y para el plano vertical es de tipo cartesiano (Mohid, 2024). La superficie con el flujo de escurrimiento es descrita por una retícula 2D y resuelve las ecuaciones de St. Venant y de Manning, donde las ecuaciones de St. Venant se derivan de la segunda ley de Newton tomando en cuenta el efecto de la inercia (Mohid, 2017):

$$\frac{\partial Q_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial Q_i}{\partial x_j} = -g \times A \left(\frac{\partial H}{\partial x_i} + S_{f i} \right)$$

Donde Q_i es el flujo de la celda, t es el tiempo, g es la gravedad, H es la columna de agua = canal/topografía, x_i es la dirección espacial donde se resuelve la velocidad, x_j las demás direcciones espaciales, v_j es la velocidad, A es el área, $S_{f i}$ es la pendiente y ∂ representa los cambios en las variables. Considerando que las celdas tienen flujos tanto en x como en y (Mohid, 2013).

La ecuación de Manning sería la siguiente:

$$Q_i = \frac{1}{n} \times A \times R_h^{2/3} \times s_i^{1/2}$$

Donde Q_i es el flujo de la celda, A es el área, n el coeficiente de Manning, R_h es el radio hidráulico y s_i es la pendiente (Mohid, 2017).

La porosidad del suelo es explicada por un dominio 3D que incluye la información proporcionada por el modelo 2D así como una capa vertical con el espesor (Mohid, 2024). Donde los flujos generados en el suelo se dan por las ecuaciones Buckingham-Darcy y quedarían de la siguiente manera:

Dirección Horizontal X

$$\theta^{t+\Delta t} = \frac{(\theta^t \times V_{cell} + ((FluxU_{(i,j,k)} - FluxU_{(i,j+1,k)}) \times \Delta t))}{V_{cell}}$$

Dirección Horizontal Y

$$\theta = (\theta \times V_{cell} + (FluxV_{(i,j,k)} \times ComputeFace_{(i,j,k)} - FluxV_{(i+1,j,k)} \times ComputeFace_{(i+1,j,k)}) \times \Delta t) \times V_{cell}$$



Dirección Vertical W

$$\theta = (\theta \times V_{cell} + (FluxW_{(i,j,k)} \times ComputeFace_{(i,j,k)} - FluxW_{(i,j,k+1)} \times ComputeFace_{(i,j,k+1)}) \times \Delta t) \times V_{cell}$$

Flujo de infiltración

$$\theta = (\theta \times V_{cell} - (UnsatK \times Area_{cell} \times (1 - Imp) \times \Delta t) \times V_{cell}$$

Donde θ es el contenido de agua, V_{cell} es el volumen en la celda, $Area_{cell}$ es el área de la celda, Δt es el paso del tiempo, $ComputeFace$ es la cara calculada, $FluxX$ es el fujo en X, $FluxV$ es el flujo en Y, $FluxW$ es el flujo en W, $UnsatK$ es la conductividad insaturada e Imp es el coeficiente de impermeabilidad de la celda (Mohid, 2023).

El modelo utiliza un algoritmo explícito con variabilidad de tiempo por lo que se realizó un proceso iterativo para calcular los valores (Mohid, 2024).

El software como insumo emplea el modelo digital rectificado, las capas de información de impermeabilidad y rugosidad y los datos de precipitación.

El proceso que se siguió para obtener la simulación se realizó por microcuenca. Así los pasos a seguir fueron: generar una retícula con malla de 5 x 5 m, convertir el modelo rectificado, el de impermeabilidad y el de rugosidad a formato “.dat”, generar un archivo de dominio para el proyecto y agregar la información de las capas que antes se mencionaron, así como el archivo con la información del evento de precipitación.

El siguiente paso fue seleccionar el modelo rectificado para el dominio y generar la simulación sin un sistema de drenaje. Finalmente, se ajustaron los parámetros: atmosféricos, modelo, escurrimientos y cuenca para el modelo. En este apartado es donde se agregó la rugosidad, impermeabilidad y precipitación. Así como la fecha y duración de la simulación. La cual tuvo lugar el día 24 de



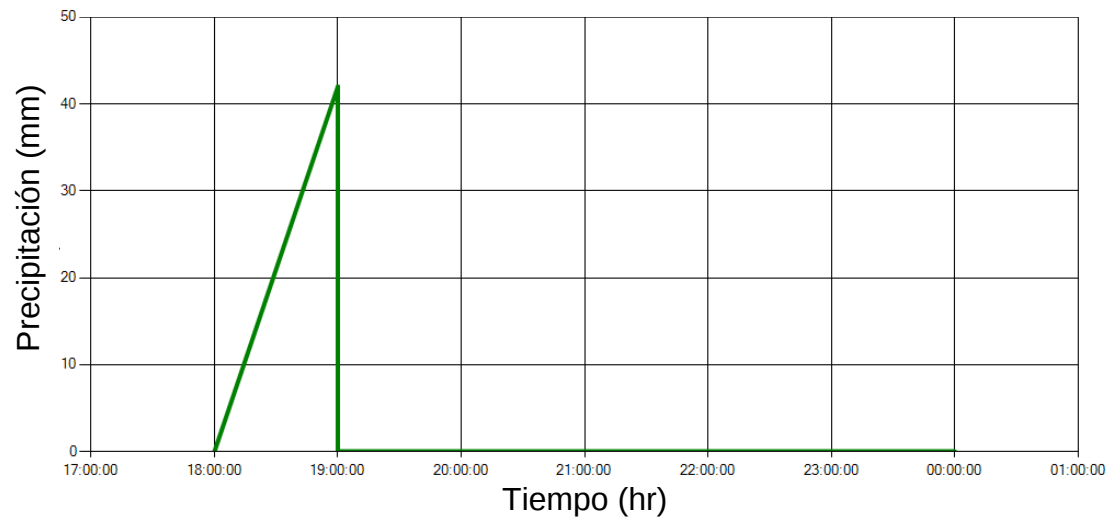
agosto de 2024 a las 18:00 hasta el 25 de agosto de 2024 a las 00:00, con una duración total de 6 horas: 1 hora con intensidad de 42 mm hr⁻¹ y 5 horas después del evento (gráfica 1). El producto generado es un archivo hdf que muestra el escurrimiento del agua cada 10 minutos, generando un total de 36 salidas.

Como paso final fue necesario realizar una limpieza de datos, unificación de microcuencas y delimitación de categorías. El post-procesamiento de datos se realizó con el software QGIS 3. 34.13 (QGIS, 2023). Asimismo, es relevante mencionar que los archivos que exportó el programa OpenFlows FLOOD 10.03.00.01 incluyen todos los pixeles analizados, con valores en 0.00 por lo que se tuvo que eliminar todo valor debajo de 0.15 m. Se eligió este valor dado que la banquetta de las ciudades se encuentra a esa altura (Ayuntamiento de Chihuahua, 2020) y es cuando el peatón se ve mayormente afectado por el fenómeno. Para una mejor representación visual de los resultados se realizó una clasificación con 10 categorías que incrementan cada 10 cm desde 0.15 hasta 1.05 m, siendo la última categoría la que incluye todos los valores superiores a 1.05. También para el mapa de zonas de mayor riesgo se unieron los 36 mapas dejando solo los valores mayores 0.35 m. Este valor fue seleccionado ya que en un estudio realizado por Al-Qadami *et al.* (2024) analizaron la dinámica del agua en relación a los vehículos y mencionan que esa es la profundidad mínima para que los vehículos comiencen a flotar. Aunado a eso, las edificaciones contaron con 0.15cm de banquetta y un primer escalón de 0.15 m, por lo que a esa altura también el agua comienza a entrar.

Para la delimitación de cada zona se marcó un polígono que englobara la inundación, y se utilizaron las colonias para encontrar las que son afectadas



Gráfica 1. Gráfica del proceso de precipitación.





durante el proceso de inundación. Se utilizó el 5% de superficie inundada para seleccionar el tiempo en el que cada colonia se considera inundada. De igual manera se extrajeron las coladeras y calles dentro del polígono y así encontrar el número de coladeras por km.



RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Coeficientes de impermeabilidad y rugosidad y MDE rectificado

Para el caso de los coeficientes calculados, la superficie con mayor permeabilidad fue el terreno natural (0.03), debido a que es un área con menor intervención humana (Dourojeanni y Jouravlev, 1999). El siguiente coeficiente fue la de las zonas de recreación, si bien esta es un área con intervención, son espacios que fomentan la integración de conservan áreas verdes (Ureña-Francés, 2002). Mientras que las categorías comercio, mixto, habitacional, industria y equipamiento contaron con porcentajes mayores al 65%. En zonas urbanas los porcentajes de las categorías mencionadas tendieron a ser mayores por la cantidad de superficies impermeables (Jha *et al.*, 2011). El valor mayor fue estimado para el comercio, esto se debe a las grandes extensiones de estacionamientos que tiene, así como la cantidad de techumbre con la que cuentan. En el cuadro 2 se presentan los porcentajes rectificados, así como los coeficientes de impermeabilidad que se emplearon. En la figura 5 se puede observar la distribución de los usos de suelo para el área de estudio.

Las superficies que tuvieron mayor impermeabilidad (pavimento y comercio) son las que cuentan con un menor coeficiente de rugosidad, esto se debe a que los elementos básicos de cobertura de los que se encuentran compuestos contaron con valores bajos de rugosidad. En un estudio realizado por Papaioannou *et al.* (2018) englobaron a todas las zonas urbanas en una categoría, teniendo un valor de 0.013 utilizando la clasificación por *CORINE Land Cover* (inventario de usos de suelos para Europa). En otro trabajo realizado por



Cuadro 2. Coeficiente de impermeabilidad para el centro de población de Chihuahua.

Uso de suelo	Tipo de superficie				TOTAL ¹
	Techumbre	Pavimento	Vegetación	Terracería	
	(1.000)	(0.950)	(0.030)	(0.030)	
Agua	-----	-----	-----	-----	1.000
Pavimento	-----	100.00%	-----	-----	0.950²
Comercio	70.50%	22.00%	5.00%	2.50%	0.916
Mixto	34.84%	50.73%	10.88%	3.56%	0.835
Habitacional	70.00%	10.00%	20.00%	0.00%	0.801²
Industria	30.50%	47.00%	5.00%	17.50%	0.758
Equipamiento	42.25%	24.00%	22.50%	11.25%	0.661²
Recreación	5.00%	20.00%	20.00%	20.00%	0.263²
Terreno natural	-----	-----	70.00%	30.00% ²	0.030

¹ Coeficiente de impermeabilidad para cada uso de suelo.

² Porcentajes creados por Hernández-Samaniego (2018).

$$^3 \text{ Comercio} = \underbrace{70.50\% \times 1.00}_{\text{techumbre}} + \underbrace{22.00\% \times 0.95}_{\text{pavimento}} + \underbrace{5.00\% \times 0.03}_{\text{vegetación}} + \underbrace{2.50\% \times 0.03}_{\text{terracería}} = 0.916$$

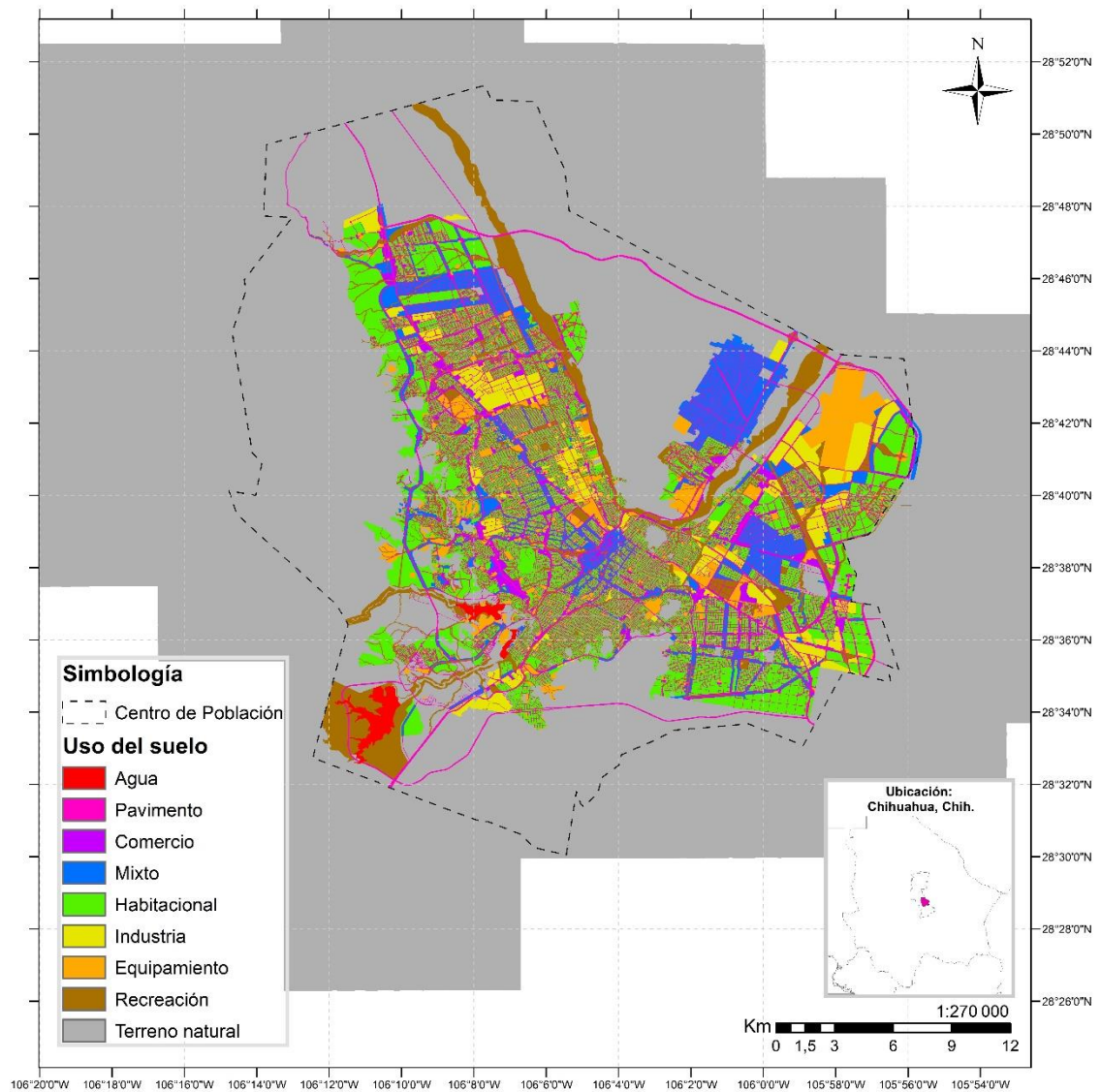


Figura 5. Mapa de impermeabilidad para el centro de población de Chihuahua.



van der Sande *et al.* (2003) le dieron un valor de 0.200 al área urbana en su totalidad, donde utilizaron *IKONOS-2 Land cover* para obtener la cobertura. En ambos casos la detección de usos de suelo fue por medio de imágenes de satélite con una clasificación supervisada, lo cual presentó una limitante ya que todo predio construido entra en una sola categoría y en zonas urbanas contar con una clasificación que distinga los usos de suelo urbano dará resultados más precisos. Para el presente estudio se cuenta con la clasificación urbana realizada por Hernández-Samaniego (2018). Se encontró que para las categorías comercio, mixto, habitacional, industria y equipamiento los valores se encuentran dentro del rango 0.013 -0.200 marcado por los autores anteriores. Teniendo coeficientes más precisos para cada uso de suelo. La relación cobertura-superficie para cada uso de suelo se representa en el cuadro 3, siguiendo la misma lógica de cálculo que el coeficiente de impermeabilidad. En la figura 6 se puede observar la distribución espacial de los coeficientes, donde las zonas más alejadas a la mancha urbana son las que contaron con los valores más altos de rugosidad (agua y terreno natural).

En un estudio realizado en la ciudad de Szechuan, China encontraron que la variable más influyente en un proceso de inundación fue la presencia de edificaciones (Lin *et al.*, 2020). Por lo tanto, considerar la elevación de las construcciones es elemental. La figura 7 muestra el resultado de integrar este aspecto al modelo digital de elevación. No obstante, al ser un área de gran extensión, las variaciones en la elevación (m) no se apreciaron a la escala del trabajo, por ello la figura 8 muestra una ampliación de la mc-9.



Cuadro 3. Coeficiente de rugosidad para el centro de población de Chihuahua.

Uso de suelo	Tipo de superficie				TOTAL ¹
	Techumbre	Pavimento	Vegetación	Terracería	
	(0.012)	(0.016)	(0.035)	(0.018)	
<i>Agua</i>	-----	-----	-----	-----	0.030
<i>Terreno natural</i>	-----	-----	70.00%	30.00%	0.030
<i>Recreación</i>	5.00%	20.00%	20.00%	20.00%	0.026
<i>Equipamiento</i>	42.25%	24.00%	22.50%	11.25%	0.019
<i>Habitacional</i>	70.00%	10.00%	20.00%	0.00%	0.017
<i>Mixto</i>	34.84%	50.73%	10.88%	3.56%	0.017
<i>Industria</i>	30.50%	47.00%	5.00%	17.50%	0.016
<i>Pavimento</i>	-----	100.00%	-----	-----	0.016
<i>Comercio</i>	70.50%	22.00%	5.00%	2.50%	0.014²

¹ Coeficiente de impermeabilidad para cada uso de suelo.

$$^2 \text{ Comercio} = \underbrace{70.5\% \times 0.012}_{\text{techumbre}} + \underbrace{22.0\% \times 0.016}_{\text{pavimento}} + \underbrace{5.0\% \times 0.035}_{\text{vegetación}} + \underbrace{2.5\% \times 0.018}_{\text{terracería}} = 0.014$$

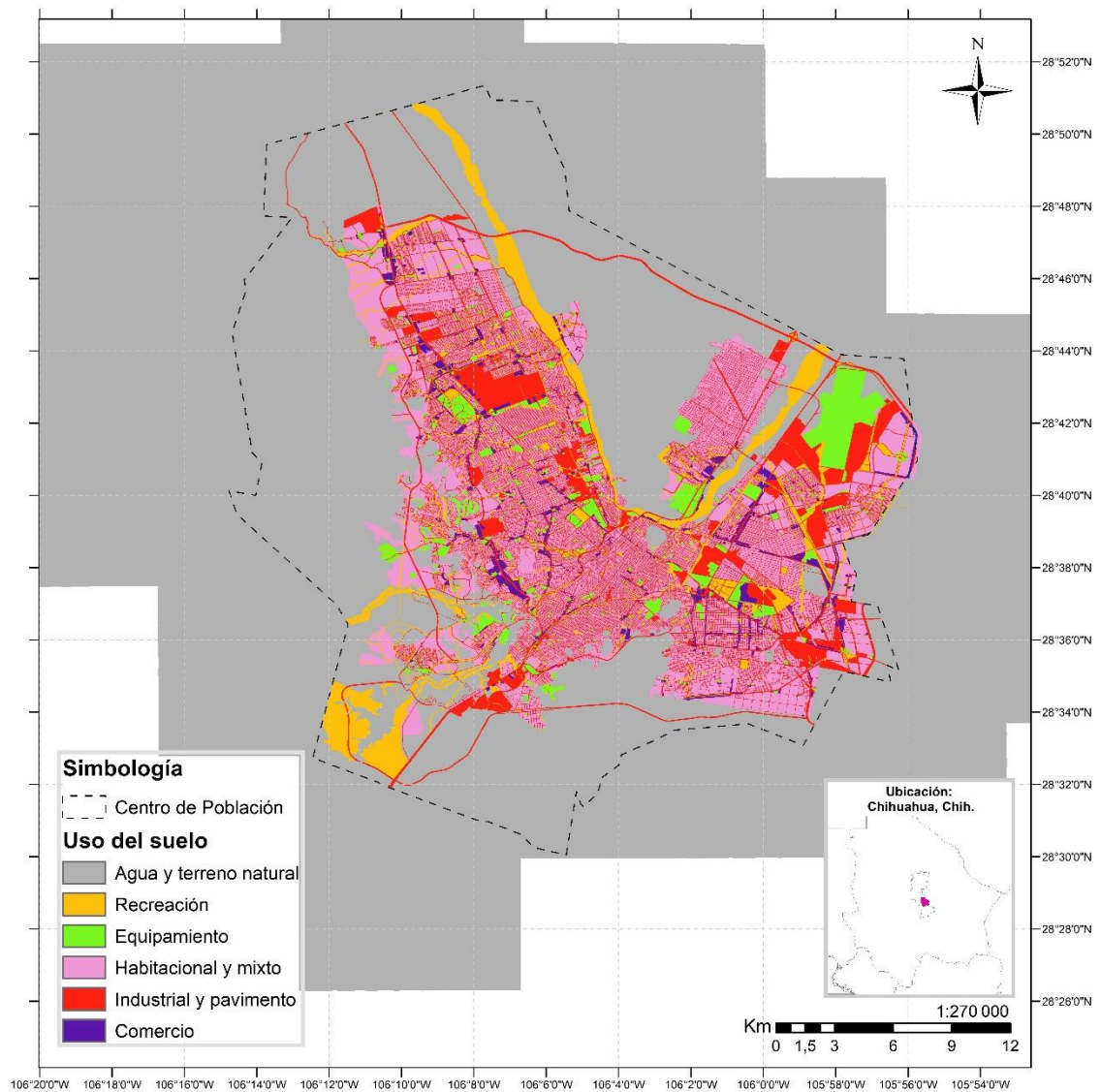


Figura 6. Mapa de rugosidad para el centro de población de Chihuahua.

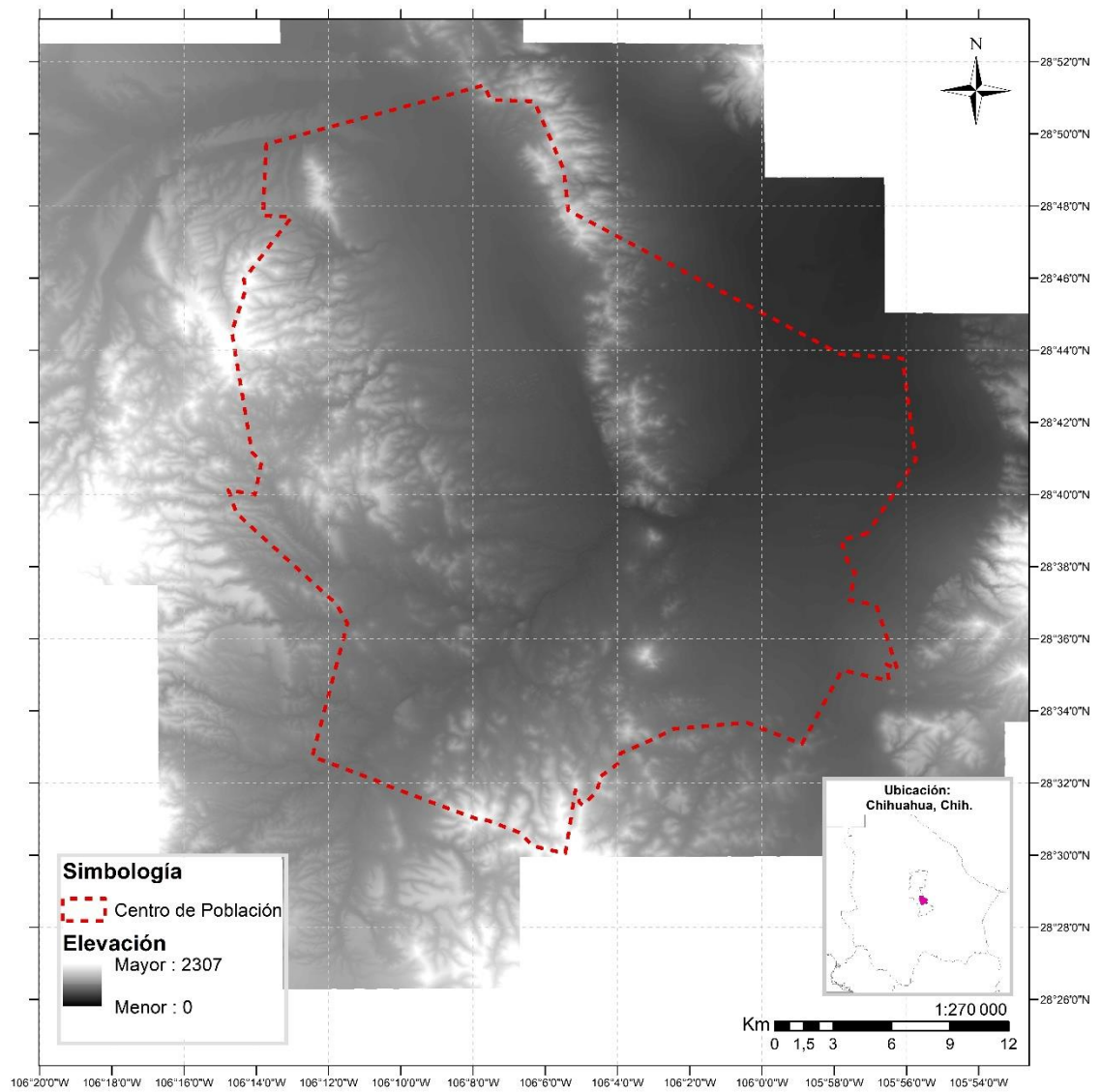


Figura 7. Modelo digital de elevación rectificado para el centro de población de Chihuahua.

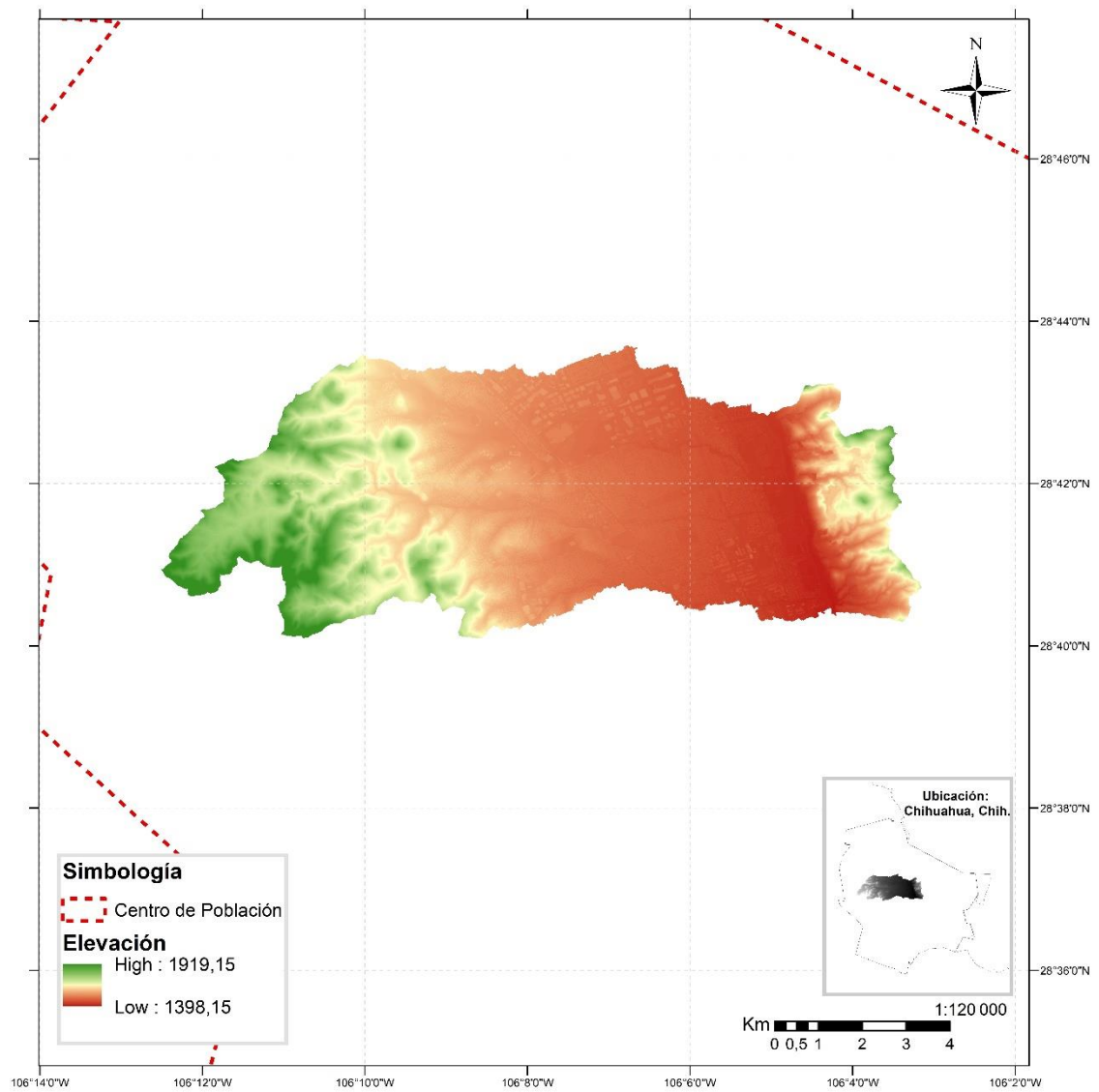


Figura 8. Acercamiento al modelo digital de elevación rectificado de la mc-9.



Mapas de inundación

La simulación generó 36 capas de información. Cada una de las capas correspondió al escurrimiento generado cada 10 minutos. Seis capas durante el evento de precipitación y 30 posteriores. En la figura 9 se observan los mapas a los 30 y 60 minutos de lluvia, así como 30, 60, 90 y 120 minutos posteriores.

Los 36 mapas se encuentran en el apéndice. El cambio que se aprecia en las imágenes se debió a la gravedad, ya que todo lo que se encuentra cuenca arriba es arrasado por los flujos que se dirigen a las partes bajas (Cotler-Ávalos *et al.*, 2013). La velocidad del flujo está determinada por los insumos generados: la capacidad de escurrimiento e infiltración (c. de impermeabilidad), la porosidad de un material (c. de rugosidad) y la pendiente, topografía y elevación (modelo digital de elevación). Asimismo, en la figura 9 se pudo observar que el flujo de agua sigue la forma de las manzanas y edificios que se agregaron al MDE.

Al transcurrir los primeros 30 minutos de precipitación se observó levemente la red de arroyos que se generó desde los cerros previo a adentrarse en la traza urbana. Sin embargo, a los 60 minutos de precipitación se hizo evidente la acumulación del flujo que baja de los cerros (zonas más altas) para comenzar a acumularse y alcanzar alturas mayores a 1.05 m.

A los 30 minutos posteriores al evento de precipitación la inundación comenzó a irrumpir en la mancha urbana con valores mayores a 1.05 m; A los 60 minutos, la inundación recorrió más de la mitad del centro de población. Para los 90 minutos la inundación logró adentrarse en su totalidad a la traza urbana. Finalmente, a los 120 minutos los flujos marcaron las zonas de mayor riesgo a inundación. Al norte de la ciudad, el flujo atravesó de oeste a este la mancha

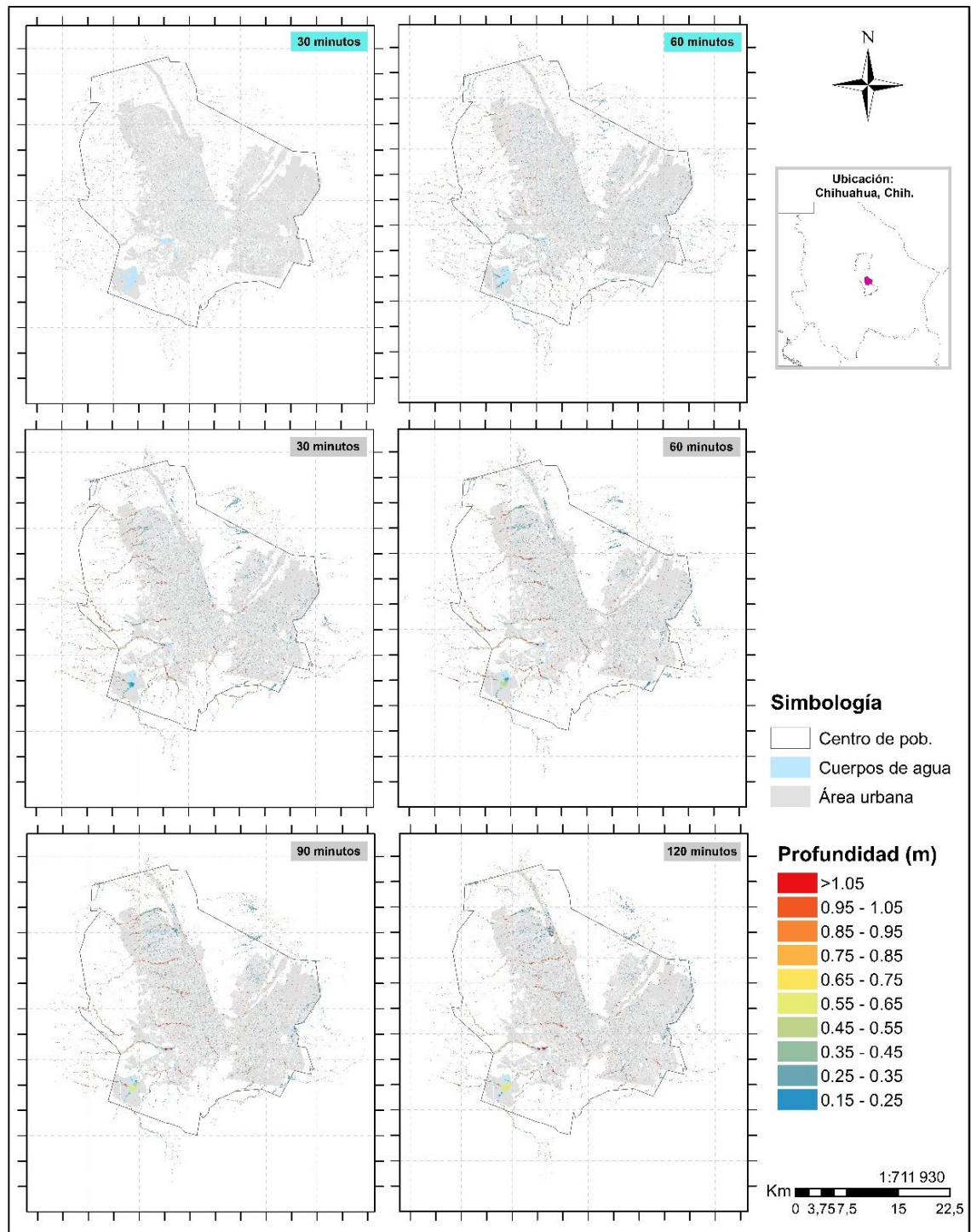


Figura 9. Comparativa de mapas de inundación a los 30 y 60 min de precipitación y 30, 60, 90 y 120 min posteriores.



urbana. Las vialidades principales afectadas son: los nogales zona norte, la cantera, sacramento, Teófilo Borunda y calle 46a. Algunos de los flujos marcados siguen el cauce de los arroyos sin vialidades principales aledañas. Para ejemplificar el movimiento del agua desde el inicio del evento hasta los 150 minutos posteriores se agregó la animación 1 en: [10.5281/zenodo.14642027](https://zenodo.org/record/14642027/files/10.5281/zenodo.14642027).

La figura 10 presentó una comparativa entre los tiempos de 150 y 300 minutos posteriores al evento de precipitación. Se agregó tal comparativa ya que al visualizar el área de estudio como conjunto en la animación 2 (que presentó los tiempos del 160 a los 300 minutos. Disponible en: [10.5281/zenodo.14642046](https://zenodo.org/record/14642046/files/10.5281/zenodo.14642046)) no se visualizaron cambios significativos en el flujo. No obstante, al compararlos es posible darse cuenta que a los 150 minutos posteriores al evento el flujo comenzó a tocar las partes bajas de la cuenca con profundidades de flujo promedio mayores a los 0.75 m. Por otra parte, a los 300 minutos se observó un cambio sustancial en la profundidad de flujos con 0.45 m en promedio. Destacando que a los 300 minutos aún se percibió el cauce que sigue la inundación.

El cuadro 4 muestra el área (km²) ocupada por categoría de profundidad cada 10 minutos con un total de 36 tiempos. Al analizar la tabla se observó que el tiempo donde se encontró una mayor acumulación de flujos totales es a los 10 minutos posteriores del evento, contando con 49.211 km² inundados, para tiempos posteriores los flujos comienzan a disminuir. Esta área representó solo el 4.19% de la superficie total analizada, y sin embargo es el evento meteorológico más perjudicial para el municipio (PCCH y CENAPRED, 2022). Se

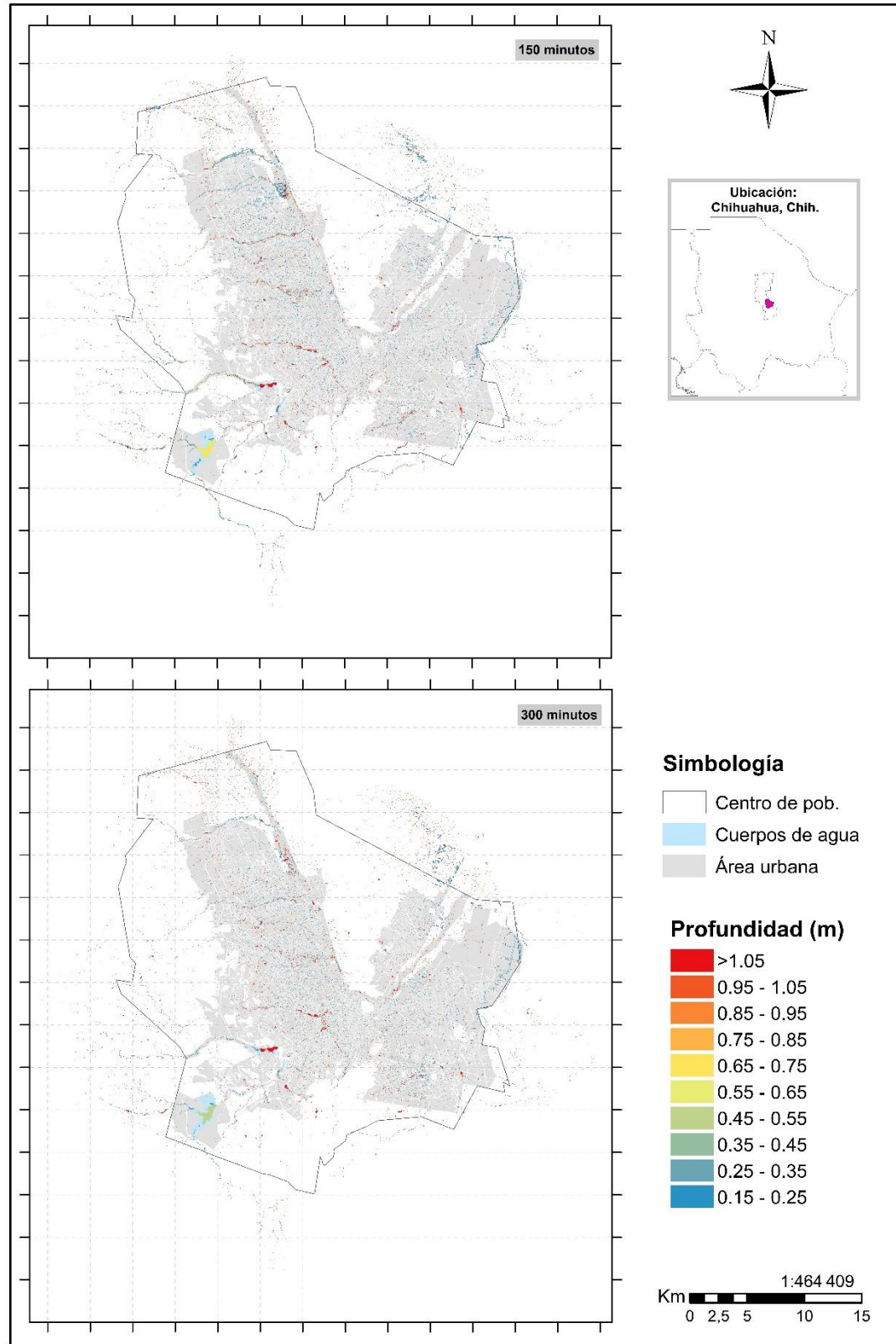


Figura 10. Comparativa de mapas de inundación a los 150 y 300 min posteriores al evento de precipitación.



Cuadro 4. Área (km²) por categoría de profundidad cada 10 minutos con una intensidad de precipitación = 42 mm hr⁻¹.

Tiempo (min)	0.15 - 0.25	0.25 - 0.35	0.35 - 0.45	0.45 - 0.55	0.55 - 0.65	0.65 - 0.75	0.75 - 0.85	0.85 - 0.95	0.95 - 1.05	>1.05	Total
10 ¹	0.5239	0.1244	0.0580	0.0351	0.0218	0.0165	0.0127	0.0101	0.0143	0.0299	0.8465
20 ¹	5.2626	1.7105	0.7521	0.3804	0.2140	0.1494	0.1039	0.0912	0.2008	0.5348	9.3994
30 ¹	9.0244	3.4247	1.8532	1.0812	0.7060	0.4846	0.3478	0.3057	0.7204	1.4396	19.3875
40 ¹	12.4593	4.8844	2.6947	1.7179	1.1555	0.8356	0.6276	0.5643	1.3969	2.7444	29.0806
50 ¹	15.5166	6.2056	3.4918	2.2811	1.5997	1.1731	0.8973	0.8391	2.1037	4.2515	38.3593
60 ¹	18.4595*	7.3193*	4.2417	2.7826	1.9893	1.4874	1.1232	1.0909	2.7971	6.0171	47.3083
10	18.2003	7.1916	4.2823*	2.8488	2.1182*	1.6394*	1.2196	1.2207	3.4816	7.0088	49.2112*
20	17.7709	6.8278	4.1165	2.8697*	2.0867	1.5795	1.2575*	1.2571	3.9394	7.3563	49.0614
30	17.4463	6.5717	3.9626	2.7969	1.9713	1.5215	1.2444	1.2629	4.2722	7.4541*	48.5038
40	17.0829	6.3222	3.9047	2.6564	1.9823	1.4803	1.2143	1.2779*	4.5561	7.3108	47.7877
50	16.7411	6.1465	3.7402	2.7085	1.8526	1.5161*	1.1443	1.2584	4.7720	7.0831	46.9627
60	16.4327	5.9618	3.4602	2.7558*	1.9000	1.4267	1.0709	1.2123	4.9262	6.9141	46.0604
70	16.0316	5.7264	3.3950	2.5443	2.0860*	1.2764	1.0450	1.2057	5.1429	6.7025	45.1557
80	15.6693	5.5005	3.4301	2.3649	2.0587	1.2490	0.9732	1.2222*	5.2185	6.6004	44.2867



90	15.3486	5.3749	3.1504	2.4234*	2.0057	1.2819	0.9567	1.1877	5.3533	6.4150	43.4975
100	15.2400	5.1644	3.1435	2.0943	1.8139	1.5576	0.9082	1.1494	5.5388	6.2438	42.8538
110	14.8702	5.0773	2.9985	1.9064	1.7631	1.5941	0.8710	1.1961*	5.6477	6.1310	42.0552
120	14.5474	4.9446	2.9107	1.8325	1.6646	1.6005	0.8609	1.1315	5.7786	6.0079	41.2791
130	14.1467	4.9165	2.7239	1.8669*	1.5612	1.6132*	0.8443	1.1573*	5.8615	5.8522	40.5435
140	13.9600	4.7463	2.6660	1.7338	1.5094	1.5783	0.8641*	1.1402	5.9389	5.7668	39.9037
150	13.7378	4.5976	2.5893	1.6834	1.5004	1.5448	0.7560	1.1495	6.0286	5.6999	39.2872
160	13.5131	4.4902	2.5112	1.6684	1.4762	1.4913	0.7341	1.1200	6.1438	5.5845	38.7327
170	13.1812	4.3839	2.4302	1.6647	1.5109	1.4043	0.6934	1.1088	6.2279	5.5221	38.1274
180	12.9968	4.2136	2.3908	1.5470	1.8136	1.1001	0.6479	1.1101	6.3207	5.4521	37.5926
190	12.7663	4.1432	2.3425	1.5094	1.9195	0.8864	0.6266	1.1480*	6.4244	5.3674	37.1336
200	12.5356	4.0583	2.2331	1.5107	1.9437*	0.8237	0.5745	1.1049	6.5802	5.3077	36.6723
210	12.3048	3.9790	2.1616	1.5279*	1.8489	0.8080	0.6024*	1.0768	6.6311	5.2754	36.2157
220	12.1060	3.8732	2.1254	1.4989	1.8282	0.7428	0.5799	1.0831	6.7577	5.2062	35.8013
230	11.8830	3.7516	2.1038	1.5255	1.7402	0.7328	0.5643	1.0793	6.8349	5.1660	35.3815
240	11.6354	3.6601	2.1426	1.5908	1.6230	0.7331	0.5325	1.0725	6.8661	5.1739	35.0298



250	11.4205	3.6157	2.1065	1.6271	1.5249	0.7416*	0.5338	1.0448	6.9354	5.1374	34.6875
260	11.2675	3.5260	2.0650	1.7587	1.3697	0.7269	0.5312	1.0258	7.0229	5.0870	34.3805
270	11.0806	3.4494	2.0420	2.1264*	1.0095	0.6914	0.5167	1.0319	7.0884	5.0511	34.0874
280	10.9175	3.4209	2.0115	2.1083	0.9573	0.6910	0.5227*	1.0515	7.1575	4.9783	33.8163
290	10.7668	3.3567	1.9881	2.0973	0.9421	0.6693	0.5055	1.0665*	7.2222	4.9383	33.5528
300	10.5930	3.2902	1.9438	2.1329*	0.9043	0.6678	0.5089	1.0556	7.2984	4.8890	33.2838

¹ Tiempo con precipitación.

* Minuto donde la inundación encuentra un valor máximo de extensión superficial para esa profundidad.



puede observar que al transcurrir los 300 minutos posteriores al evento de precipitación aún se contó con 33.283 km² de escurrimiento. Se calculó una reducción al punto de mayor acumulación del 32.36%, por lo que se infirió el evento de inundación aún no concluía.

Para las profundidades de los 0.15 – 0.45 m se observó una tendencia al alza donde sus valores aumentaron hasta los 60 minutos de lluvia y 10 minutos posteriores para después comenzar a disminuir. Para los 0.45 – 0.95 m se presentó un comportamiento ondulatorio contando con hasta 7 valores máximos de extensión superficial. Para la categoría de 0.95 – 1.05 m los valores fueron en aumento, sin contar con máximo. Por último, los valores mayores a 1.05 m encontraron la cúspide a los 30 minutos posteriores al evento. El valor máximo de acumulación para todas las categorías se dio entre los 10 – 30 minutos posteriores, donde los valores posteriores tendieron a la baja sin rebasar nunca este valor. Esto se pudo explicar ya que al analizar un evento dinámico el cambio de cantidad entre los flujos es lineal debido a la gravedad. La gravedad dirige el flujo hacia los puntos bajos, por lo que tuvo que ir cambiando por las distintas categorías hasta que toda el agua fuera drenada o evaporada (Riebeek, 2012). Como consecuencia del flujo entre categorías y las velocidades alcanzadas se podría presentar el arrastre de personas y animales, así como la destrucción de vehículos y construcciones (Rodríguez y Riccardi, 2014). Estos resultados muestran zonas vulnerables que aún no cuentan con desarrollo urbano ni avenidas principales, no obstante, sería relevante estudiar el comportamiento de la expansión urbana para poder definir si a futuro podrían presentar un alto riesgo a la población por no tomar en cuenta las inundaciones como variable para ello.



Zonas de mayor riesgo a inundación

Para encontrar las zonas de mayor riesgo se unieron los 36 mapas tomando los valores superiores a 0.35 m con las zonas de mayor flujo (figura 11). Los arroyos principales encontrados fueron: Arroyo Los Nogales, Arroyo El Picacho, Arroyo El Mimbres Sur, Arroyo La Cantera, Arroyo El Chamizal y Arroyo Las Norias para la mancha urbana; Arroyo La Noria, Arroyo El Mimbres Norte y El Cuervo en los límites al norte de la ciudad; y por último Arroyo El Berrendo. Arroyo Ojo del Buey y Arroyo el Ojo Poblano en los límites al sur de la ciudad (Sistema de Información Geográfica Municipal, 2021). A partir de estos arroyos se detectaron 10 zonas de riesgo y se ilustran en la figura 12.

Es relevante indicar que, si bien en el río Chuvíscar y Sacramento se estimaron como zonas inundadas, en estas áreas no se creó flujo hídrico debido a la división de microcuencas que se realizó. Los resultados coincidieron con la estructura espacial de la ciudad ya que asumieron los accidentes geográficos del cauce del río (Rojas-Eraso , 1997) . En el municipio de Chihuahua se realizó una identificación de los arroyos más propensos a vulnerar la ciudad, estos fueron: el arroyo Saucito, La Galera, La Cantera, Los Nogales sur, El Cacahuatal, Plaza de Toros, La Canoa y El Picacho. Lo anterior concordó en los resultados que se obtuvieron de este estudio con las zonas Cantera y Picacho (IMPLAN, 2016).

En el Atlas de Riesgo para el Municipio de Chihuahua (Secretaria de Desarrollo Territorial y Urbano et al., 2014) se analizó la mancha urbana para encontrar zonas vulnerables a inundación. Tomaron como variables la profundidad y la velocidad, y optaron por un rango de clasificación de peligros según una matriz cruzada (con escala de muy bajo a muy alto). Comparando resultados las 10

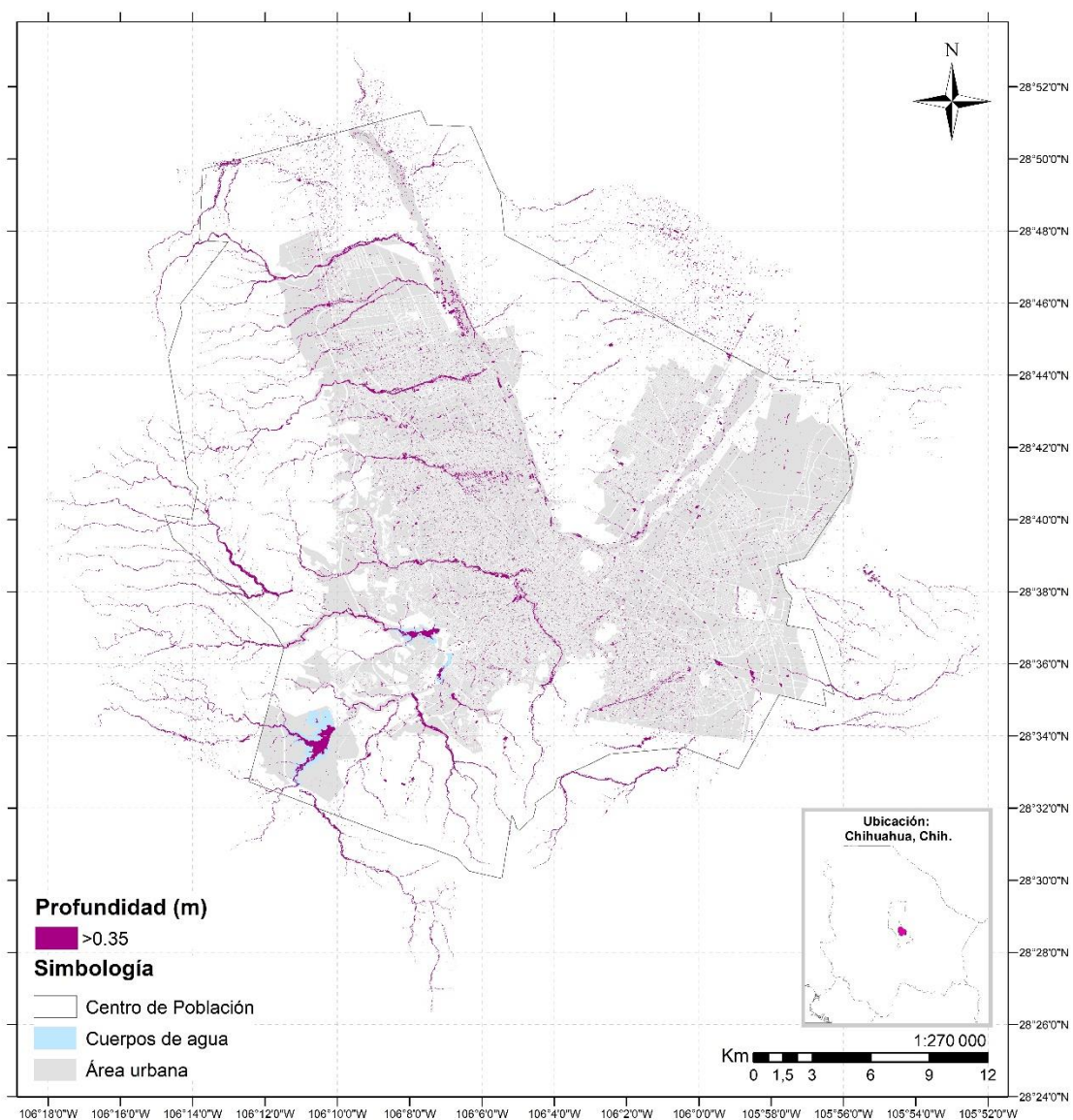


Figura 11. Mapa con las zonas de mayor riesgo a inundación en el centro de población de Chihuahua.

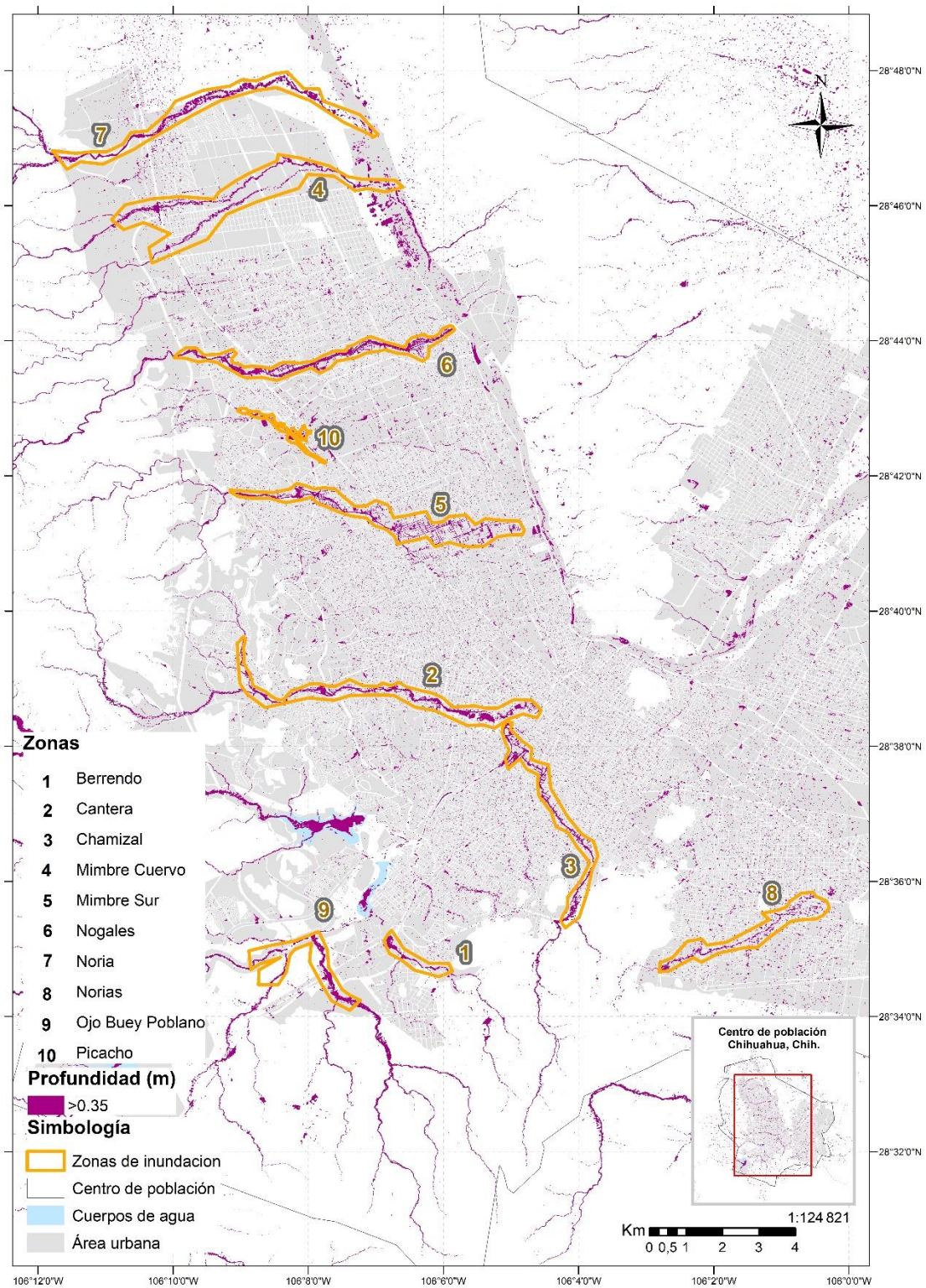


Figura 12. Mapa con las 10 zonas de mayor riesgo a inundación identificadas para el centro de población de Chihuahua.



zonas de riesgo encontradas del presente trabajo se encuentran en la categoría muy alto-alto. Para la actualización 2022 del Atlas de Riesgos del municipio PCCH y CENAPRED también realizaron un análisis de inundaciones y se corrobora que son zonas de inundación severa las zonas, Mimbres Sur y Cantera.

Se realizó un mapa de vulnerabilidad para la ciudad de Chihuahua tomando como criterio para la asignación de vulnerabilidad ante inundaciones los factores socioeconómicos de las zonas habitacionales. Los resultados concordaron con las zonas Noria, Norias, Berrendo, Ojo Buey y Poblano, teniendo riesgos de Alto a Muy Alto (Hernández-Samaniego, 2018).

Se realizó un análisis de las colonias que se vieron afectadas en un evento de inundación, esto se pudo observar en el mapa de zonas de riesgo a inundación y colonias (figura 13). Se ilustra que la delimitación entre una y otra colonia fue dada en su mayoría por los mismos arroyos aledaños. Dourojeanni y Jouravlev (1999) mencionan que al contar con asentamientos a lo largo de los ríos estos son los lugares más propensos a sufrir inundaciones. De las 1253 colonias ubicadas en el centro de población 118 fueron afectadas, representando el 9.42%. De las 118 colonias, 33 se encontraron en la zona mimbres sur, 23 en la zona nogales, 20 en la zona cantera y 18 en la zona Chamizal, representando el 79.66%. Además, 50 colonias comenzaron la inundación a los 40 min de precipitación y 31 a los 50 minutos, abarcando el 68.64%. En el cuadro 5 se encuentran las colonias afectadas por zona, así como el minuto en el que inició la inundación para cada una de ellas. Solo se representaron los tiempos donde alguna colonia comenzó la inundación y el último tiempo es marcado por la última colonia en alcanzarlo. El cuadro completo con los porcentajes para cada colonia

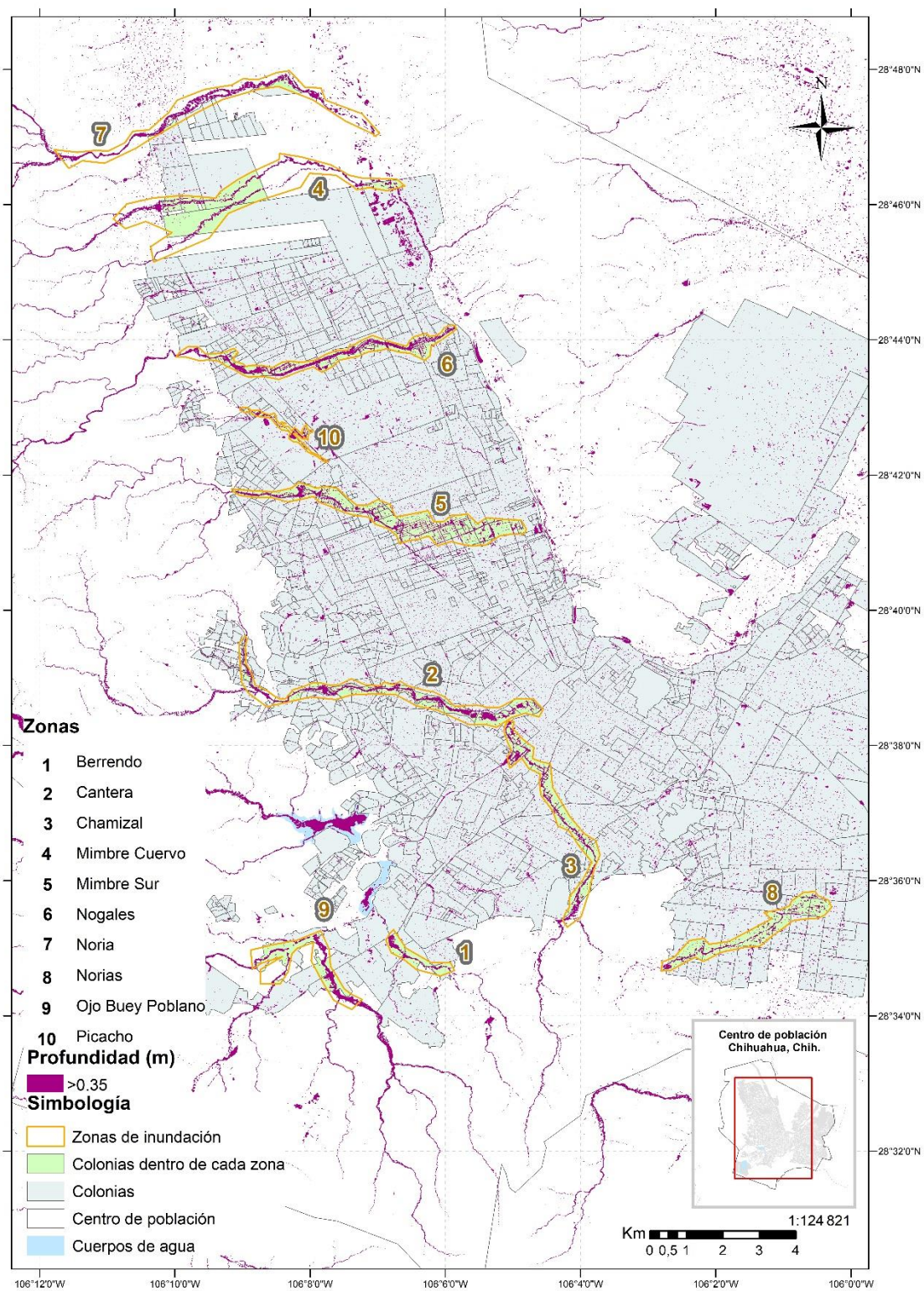


Figura 13. Acercamiento de las zonas de mayor riesgo a inundación y colonias en el centro de población de Chihuahua.



Cuadro 5. Colonias afectadas en cada zona por unidad de tiempo ante inundaciones en el centro de población de Chihuahua.

Tiempo	Colonias por zona
transcurrido	Mimbres Sur
40 min ¹	22 de Septiembre 24 de Junio Almacenes Industriales de Chihuahua C.T.M. C.T.M. (Ortiz) Campo Bello III Campo Bello IV Casa Blanca Deportistas Francisco Villa Gloria Ignacio Allende Insurgentes Etapa II Jardines del Norte Rincones San Andrés San José Vicente Guerrero
50 min ¹	Adriana Insurgentes Etapa I



60 min ¹	Juan Escutia
	Lomas San José
	Santa Rosa Norte
	Villa Dorada
	Zona Industrial Nombre de Dios
	Anexo Santa Rosa Norte
	Niños Héroe
	Nombre de Dios
	Renovación
10 min	La Fe
20 min	Panteón Jardines Eternos San José
50 min	Torres Rey
60 min	Smart
90 min	Huerta Legarreta
Mimbre Cuervo	
50 min ¹	Vistas del Prado Etapa I
60 min ¹	Agrícola Francisco Villa
10 min	Granjas del Valle
	Roberto Orozco
20 min	Riberas del Sacramento II
	Vistas del Prado Etapa II
Noria	
30 min	Riberas del Sacramento III



70 min

Ladrilleros Norte

Ojo Buey Poblano

50 min¹

Labor de Terrazas (Portillo)

Rancho Las Escobas

Berrendo

40 min¹

Universitario (Antes Granjas Universitarias)

50 min¹

Las Animas

Norias

40 min¹

Granjas Cerro Grande

Ladrilleros

Los Llanos

Rigoberto Quiroz (ampliación)

Toribio Ortega

Valle Dorado

Vistas Cerro Grande

50 min¹

Secretaria de la Marina

Chamizal

20 min¹

La Lomita

Reforma II

30 min¹

Área Cerril

Cerro Alto

Gustavo Díaz Ordaz (ampliación)

40 min¹

Arquitos



50 min ¹	Barrio San Pedro
	Cuauhtémoc
	Dale
	Francisco R. Almada (Fracc.)
	Pacifico
	Unidad Proletaria
	Vista Hermosa
	Vista Hermosa Norte
	Zona Centro
	Albino Mireles
	Rosario
	Santa Rita

Cantera

20 min ¹	Puente De Cantera VI
30 min ¹	Encordada del Valle
	Fidel Velázquez
	Puente de Piedra Etapa II
	Residencial Cumbres VI
40 min ¹	Emiliano Zapata
	Localidad la Cantera
	Recursos Hidráulicos
	Residencial Campestre III
	Residencial Campestre Washington



50 min ¹	Condominio Comercial Tres Vías
	El Palomar
	Encordada del Valle III
	Las Misiones
	Ramón Mena
	Residencial Campestre I
	San Felipe Viejo
60 min ¹	Progreso
	Puente de Piedra Etapa I
30 min	Colinas del Valle
Nogales	
40 min ¹	Atanasio Ortega
	Atenas V
	Chihuahua 2000 III (2000-94)
	Las Lunas Residencial Etapa I
	Las Lunas Residencial Etapa II
	Los Arroyos
	Rodolfo Fierro
	Valle de San Pedro
	Valle De San Pedro III Etapa I
50 min ¹	20 Aniversario
	Chihuahua 2000 I
	Chihuahua 2000 II



	José Francisco Ruiz Massieu
	Las Lunas Residencial Etapa III
	Nuevo Triunfo
	Roma Quintas Quijote I
60 min ¹	Los Arroyos II
	Sergio de la Torre Hernández
10 min	Bosques de San Pedro (Antes Los Arroyos IV)
60 min	Roma Quintas Quijote III
110 min	El Mineral I
	Real de Minas
120 min	Atenas III
Picacho	
30 min ¹	Puerta del Norte
40 min ¹	Paseos de Chihuahua
50 min ¹	Rincón de los Huertos
	Universidad Autónoma De Chihuahua Campus II

¹ Tiempo con precipitación.



se encuentra en el cuadro 1 del apéndice. Se han realizado reportes identificando las colonias de mayor riesgo, estas fueron: Las Granjas, Villa Nueva, Revolución, Nombre de Dios, Ladrilleros del Norte, El Provenir, Nuevo Triunfo, Cerro Coronel, Ladrilleros Sur, La Soledad, Colonia Campesina, Porvenir, Nuevo Triunfo, Quintas Carolinas, Barrio de Nombre de Dios, Centro, Barrio Bajo (IMPLAN, 2016; GECH y PCCH, 2015). Los resultados encontrados concordaron con Nombre de Dios, Ladrilleros del Norte y Zona Centro. El mapa completo de colonias y el área de estudio se encuentra en el apéndice como figura 38.

Finalmente, se realizó un análisis tomando como referencia las zonas de mayor riesgo. Se examinaron las zonas aledañas a ellas para determinar si la cantidad de alcantarillas es la adecuada, ya que la Comisión Nacional del Agua (2007) marca que la separación entre coladeras (col) no debe ser mayor a 100 metros, en otras palabras 10 col km^{-1} . Al analizar los resultados del cuadro 6 se observó que, de las 10 zonas analizadas, solo la zona Noria cumple con la dotación mínima de coladeras. Lo anterior confirmó que las infraestructuras de alcantarillado no han podido seguir el ritmo del acelerado crecimiento urbano (Ribot *et al.*, 2005). En la figura 13 se muestran los polígonos, calles, coladeras y zonas inundables. En el apéndice se pueden encontrar la figura 39 con el sistema de alcantarillado y las zonas de mayor riesgo dentro del área de estudio, así como la figura 40 con un acercamiento a ellas.



Cuadro 6. Relación de coladeras por kilómetro en cada zona de inundación para el centro de población de Chihuahua.

Zona	Coladeras	Área (km²)	Longitud de calles (km)	col/km
<i>Berrendo</i>	5	0.61	3.25	1.54
<i>Cantera</i>	252	2.97	49.15	5.13
<i>Chamizal</i>	166	2.01	41.20	4.03
<i>Mimbre Cuervo</i>	59	5.10	29.54	1.99
<i>Mimbre Sur</i>	565	3.40	61.40	9.2
<i>Nogales</i>	323	2.13	38.81	8.32
<i>Noria</i>	41	2.89	4.10	10
<i>Norias</i>	178	1.95	35.20	5.05
<i>Ojo Buey y Poblano</i>	1	1.78	10.10	0.10
<i>Picacho</i>	40	0.34	4.25	9.41

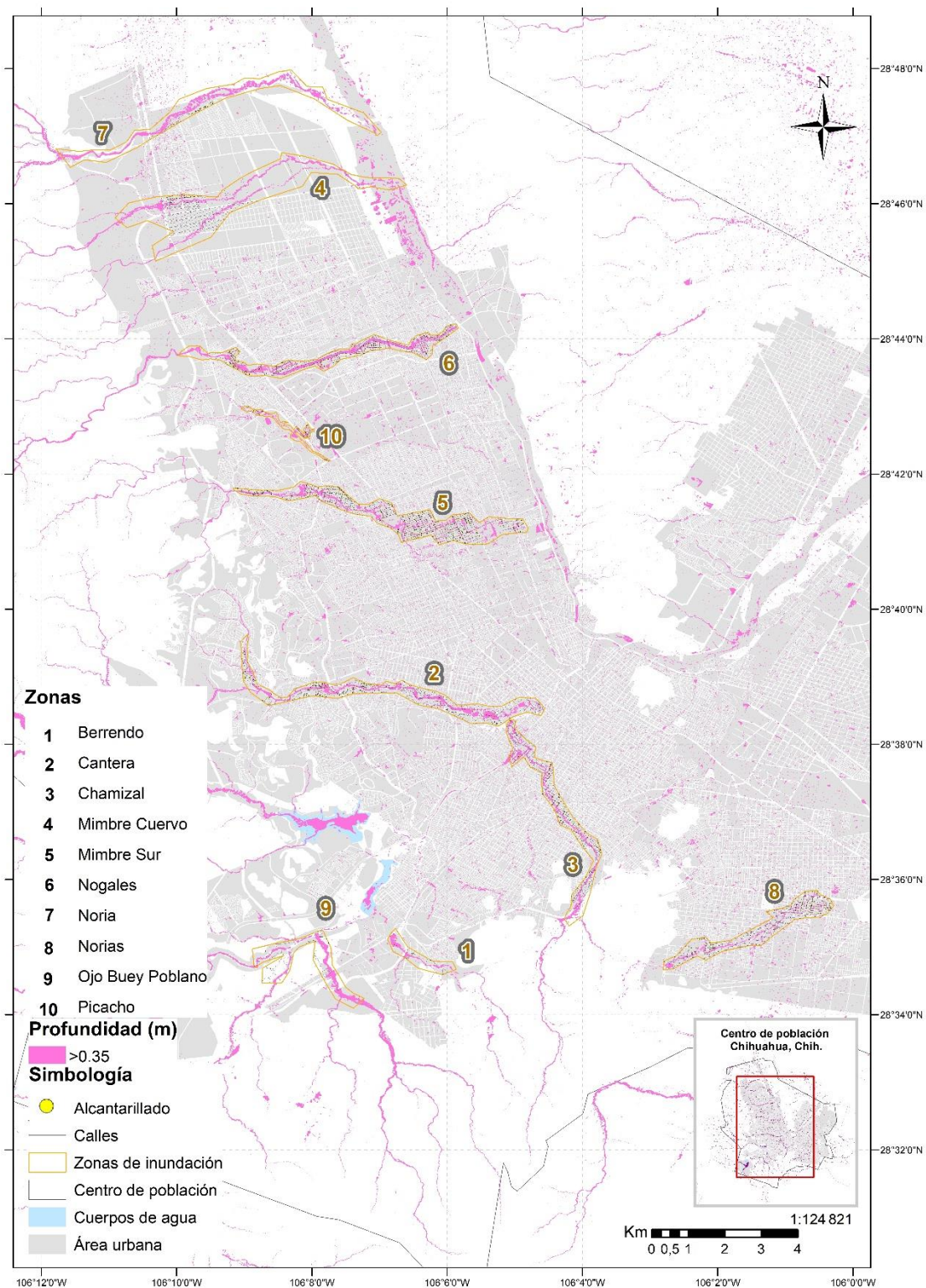


Figura 13. Acercamiento de las zonas de mayor riesgo a inundación y su interacción con las calles y coladeras en el centro de población de Chihuahua.



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El estudio analizó la complejidad de las inundaciones en áreas urbanas, destacando factores como impermeabilidad, rugosidad, topografía y presencia de edificaciones. Se obtuvieron coeficientes específicos de impermeabilidad y rugosidad para diferentes usos de suelo urbano, útil para estudios similares en otras ciudades. La delimitación de microcuencas permitió un análisis detallado de los flujos y acumulaciones de agua, identificando zonas de alto riesgo de inundación. Este análisis proporcionó nuevos datos sobre el comportamiento del agua en diferentes períodos de tiempo, subrayando la insuficiencia en la infraestructura de drenaje urbano.

Al contar con un modelo hidrológico para la ciudad de Chihuahua, se pueden simular distintos escenarios, ajustando variables como el periodo de retorno de las lluvias o utilizando datos de estaciones meteorológicas para validarlo. En futuras investigaciones se recomienda analizar cuáles variables tienen mayor impacto en las inundaciones. También se recomienda comparar las inundaciones en terrenos naturales y en terrenos urbanizados para evaluar cómo la urbanización aumenta el riesgo de inundaciones. Además, podría ser utilizado para valorar terrenos y edificaciones, añadiendo un componente económico al análisis. Por último, estudios como el presente pueden ayudar a encontrar las zonas óptimas para la expansión de las ciudades. A pesar de sus extensas aplicaciones, el modelo enfrenta limitaciones como la capacidad computacional, tiempo y almacenamiento necesarios, así como la dificultad de obtener datos precisos en ciudades pequeñas. Al estar en constante expansión, las ciudades



necesitan la actualización de los modelos de inundación para realizar predicciones precisas.

El siguiente paso debería ser aprovechar el recurso hídrico, no solo a través de planes de mitigación y prevención de inundaciones, sino también buscando puntos clave para la recolección de agua y áreas donde se debe recargar los mantos acuíferos. Esto permitiría equilibrar el cuidado del recurso hídrico para la población y para el medio ambiente.



LITERATURA CITADA

- Agonafir, C., Lakhankar, T., Khanbilvardi, R., Krakauer, N., Radell, D., & Devineni, N. (2023). A review of recent advances in urban flood research. *Water Security*, 19, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.wasec.2023.100141>
- Alcocer-Yamanaka, V. H., Rodríguez-Varela, J. M., Bourguett-Ortiz, V. J., Llaguno-Guilberto, O. J., & Albornoz-Góngora, P. M. (2016). Metodología para la generación de mapas de riesgo por inundación en zonas urbanas. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 7(5), 33–55.
- Al-Qadami, E., Razi, M. A. M., Shah, S. M. H., Pu, J. H., Amran, M., Díaz-Huenchuan, M. A., & Avudaiappan, S. (2024). Floodwaters and vehicle hydrodynamics: A deep dive into risk mitigation unraveling vehicle stability in floods. *Results in Engineering*, 23, 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102540>
- Arnbjerg-Nielsen, K., & Fleischer, H. S. (2009). Feasible adaptation strategies for increased risk of flooding in cities due to climate change. *Water Science and Technology*, 60(2), 273–281. <https://doi.org/10.2166/wst.2009.298>
- Ayuntamiento de Chihuahua. (2020) Reglamento de Construcciones y Normas Técnicas para el Municipio de Chihuahua. http://legismex.mty.itesm.mx/estados/ley-chih/CHIH-RM-Chih-ConstNormTecn2022_12.pdf [9 de diciembre de 2024]
- Baró-Suárez, J. E., Díaz-Delgado, C., Calderón-Aragón, G., Esteller-Alberich, M.V. & Cadena-Vargas, E. (2001) Costo más probable de daños por inundación en zonas habitacionales de México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 2(3), 201-218.



Bazant, J. (2010). Expansión urbana incontrolada y paradigmas de la planeación urbana. *Espacio Abierto*, 19(3), 475–503.

Bentley. (2020). OpenFlows FLOOD 10.03.00.01.
<https://www.bentley.com/software/openflows-flood/>

Bentley. (2024). OpenFlows FLOOD General FAQ's.
[https://bentleysystems.service-](https://bentleysystems.service-now.com/community?id=kb_article&sysparm_article=KB0057793)
[now.com/community?id=kb_article&sysparm_article=KB0057793](https://bentleysystems.service-now.com/community?id=kb_article&sysparm_article=KB0057793)

Breña, A. F. & Jacobo, M. A. (2013). *Principios y fundamentos de hidrología superficial* (pp. 254). 1a ed. Universidad Autónoma Metropolitana. CDMX, México.

Canva. (2024). Canva. https://www.canva.com/es_419/

Chow, V.T. (1959). *Open Channel Hydraulics* (pp. 680). 1a ed. McGraw-Hill. Nueva York, Estados Unidos.

Comisión Nacional del Agua. (2007). MANUAL DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO.
<https://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/Libros/01AlcantarilladoPluvial.pdf> [11 de diciembre de 2024]

Cotler-Ávalos, H., Galindo-Alcántar, A., González-Mora, I. D., Pineda-López, R. F., & Ríos-Patrón, E. (2013). *Cuencas hidrográficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2013/Cuencas_final_2014.pdf [29 de agosto de 2024]



- Díaz-Padilla, G., Sánchez-Cohen, I., Quiroz, R., Garatuza-Payán, J., Watts-Thorp, C., Cruz-Medina, I. R., & Guajardo-Panes, R. A. (2011). Variación espacio-temporal de la precipitación pluvial en México: una aproximación a la evaluación de impactos. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 2(4), 51–64.
- Dourojeanni, A., & Jouravlev, A. (1999). Gestión de cuencas y ríos vinculados con centros urbanos. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/a1428fe9-488a-4598-8358-bdf665fd1bd5/content> [15 de agosto de 2024]
- Ducci, M. E. (2012). *Conceptos básicos de urbanismo* (pp. 2-28). 1a ed. Editorial Trillas. CDMX, México.
- Esri. (2020). ArcMap 10.8. <https://www.esri.com/en-us/home>
- Estrada-Porrúa, F., Zavala-Hidalgo, J., Martínez-Arroyo, A., Raga, G., & Gay-García, C. (2023). *State and Perspectives of Climate Change in Mexico a Starting Point*. Universidad Autónoma de México. <https://cambioclimatico.unam.mx/wp-content/uploads/2023/12/State-and-Perspectives-of-Climate-Change-in-Mexico-a-Starting-Point.pdf> [10 de septiembre de 2024]
- García-Páez, F., & Cruz-Medina, I. R. (2009). VARIABILIDAD DE LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL EN LA REGIÓN PACÍFICO NORTE DE MÉXICO. *Agrociencia*, 43, 1–9.
- Gobierno del Estado de Chihuahua & Protección Civil Chihuahua. (2015). Atlas de peligros naturales del estado de Chihuahua. <https://adjuntos.chihuahua.gob.mx/sdue/CC/APChihuahua.pdf> [10 de septiembre de 2024]



- Gran-Castro, J. A., & Ramos-deRobles, S. L. (2019). Climate change and flood risk: vulnerability assessment in an urban poor community in Mexico. *Environment and Urbanization*, 31(1), 75–92. <https://doi.org/10.1177/0956247819827850>
- Gudiño, M. E. (2015). El Ordenamiento Territorial como política de Estado. *Perspectiva Geográfica*, 20(1), 11–36.
- Hammond, M. J., Chen, A. S., Djordjević, S., Butler, D., & Mark, O. (2013). Urban flood impact assessment: A state-of-the-art review. *Urban Water Journal*, 12(1), 14–29. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2013.857421>
- Hernández-Samaniego, E. (2018). *Índice pérdida-posesión para generación de mapas de riesgo ante inundaciones en zonas urbanas*. [Tesis maestría. Universidad Autónoma de México]. <https://repositorio.unam.mx/contenidos/3501495> [02 de noviembre de 2022]
- Instituto Municipal de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua. (2006). Antecedentes. [https://www.municipiochihuahua.gob.mx/transparenciaarchivos/1er%20Trimestre%202017/Art%2079%20fracc.%20VI/inciso%20A/PDU%202040%20\(2009\)/Atlas%20de%20Riesgos/Documento%20completo/I.%20Antecedentes.pdf](https://www.municipiochihuahua.gob.mx/transparenciaarchivos/1er%20Trimestre%202017/Art%2079%20fracc.%20VI/inciso%20A/PDU%202040%20(2009)/Atlas%20de%20Riesgos/Documento%20completo/I.%20Antecedentes.pdf) [10 de septiembre de 2024]
- Instituto Municipal de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua. (2016). Plan de desarrollo urbano de la ciudad de Chihuahua: Visión 2040. <https://implanchihuahua.org/IMPLAN->



Datos/PDU2040/pdf/PDU2040_2016/INFRA/2.7%20Riesgo%20y%20Vulnerabilidad.pdf [10 de septiembre de 2024]

Instituto Municipal de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua. (s.f.) Descargables. https://implanchihuahua.org/Descargables_DA.html [30 de noviembre de 2023]

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (2020). Panorama sociodemográfico de México 2020, Chihuahua. https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825198145.pdf [10 de septiembre de 2024]

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (s.f.). Continuo de elevaciones mexicano y modelos digitales de elevación. <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/#:~:text=El%20Continuo%20de%20Elevaciones%20Mexicano,le%20integran%20valores%20que%20representan> [23 de febrero de 2023]

Jha, A., Lamond, J., Bloch, R., Bhattacharya, N., Lopez, A., Papachristodoulou, N., Bird, A., Proverbs, D., Davies, J., & Barker, R. (2011). *Five Feet High and Rising: Cities and Flooding in the 21st Century*. The World Bank, East Asia and Pacific Region, Transport, Energy & Urban Sustainable Development Unit. https://www.researchgate.net/publication/272751593_Five_Feet_High_and_Rising_Cities_and_Flooding_in_21st_Century [10 de septiembre de 2024]



- Koop, S. H. A., & van Leeuwen, C. J. (2017). The challenges of water, waste and climate change in cities. *Environment, Development and Sustainability*, 19, 385–418. <https://doi.org/10.1007/s10668-016-9760-4>
- Kumar, P. (2021). Climate Change and Cities: Challenges Ahead. *Frontiers in Sustainable Cities*, 3, 1–8. <https://doi.org/10.3389/frsc.2021.645613>
- Lhomme, S., Serre, D., Diab, Y., & Laganier, R. (2013). Analyzing resilience of urban networks: A preliminary step towards more flood resilient cities. *Natural Hazards and Earth System Science*, 13, 221–230. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-221-2013>
- Lin, J., He, X., Lu, S., Liu, D., & He, P. (2021). Investigating the influence of three-dimensional building configuration on urban pluvial flooding using random forest algorithm. *Environmental Research*, 196. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110438>
- Martínez-Austria, P. F. (2007). *Effects of climate change on Mexico's water resources*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. https://www.researchgate.net/publication/291164839_Effects_of_climate_change_on_Mexicos_water_resources [10 de septiembre de 2024]
- Martínez-Austria, P. F., & Patiño-Gómez, C. (2012). Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua en México El cambio climático. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 3(1), 5–20.
- MOHID. (2013). Equations in Mohid Land. http://wiki.mohid.com/index.php?title=Equations_in_Mohid_Land [12 de diciembre de 2024]



MOHID. (2017). Module Runoff.

http://wiki.mohid.com/index.php?title=Module_Runoff [12 de diciembre de 2024]

MOHID. (2023). Module Porous Media.

http://wiki.mohid.com/index.php?title=Module_PorousMedia [12 de diciembre de 2024]

MOHID. (2024). MOHID Land.

http://www.mohid.com/pages/models/mohidland/mohid_land_home.shtml [12 de diciembre de 2024]

Moya-Honduvilla, J., & Maldonado-Ibáñez, A. (15 de diciembre de 2003). *Urbanismo de las Ciudades de la Antigüedad* [Presentación]. II Congreso Internacional de Pueblos y Culturas de la Cuenca del Mediterráneo, El Cairo, Egipto.

Nkwunonwo, U. C., Whitworth, M., & Baily, B. (2020). A review of the current status of flood modelling for urban flood risk management in the developing countries. *Scientific African*, 7, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00269>

Nur, I., & Shrestha, K. K. (2017). An Integrative Perspective on Community Vulnerability to Flooding in Cities of Developing Countries. *Procedia Engineering*, 198, 958–967. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.07.141>

Orozco-González, C. P., Porras-Flores, D. A., Ortega-Rodríguez, A., González-Aldana Ricardo A., & García-González, C. G. (2017). Expansión de la mancha urbana de la Ciudad de Chihuahua 2000-2012. *Revista Científica*



<https://doi.org/10.47808/revistabioagro.v5i1.95>

Papaioannou, G., Efstratiadis, A., Vasiliades, L., Loukas, A., Papalexiou, S. M., Koukouvinos, A., Tsoukalas, I., & Kossieris, P. (2018). An operational method for Flood Directive implementation in ungauged urban areas.

Hydrology, 5(2). <https://doi.org/10.3390/hydrology5020024>

Pérez-Pulido, L. A., & Romo-Aguilar, M. de L. (2019). Modelo analítico de justicia socio-territorial: implicaciones de la expansión urbana en el desarrollo social. *Economía, Sociedad y Territorio*, 19(61), 479–506.

<https://doi.org/10.22136/est20191365>

Phong, L. H. (2015). The relationship between rivers and cities: influences of urbanization on the riverine zones – a case study of Red River zones in Hanoi, Vietnam. *WIT Transactions on Ecology and The Environment*, 193(7), 27–43. <https://doi.org/10.2495/sdp150031>

Protección Civil Chihuahua & Centro Nacional de Prevención de Desastres. (2022). Atlas de Riesgos del Municipio de Chihuahua 2022.

<https://www.municipiochihuahua.gob.mx/Descargas/SHA/Gacetas/Adicional%20Gacetas/ATLAS%20DE%20RIESGOS%202022.pdf> [19 de noviembre de 2024]

QGIS. (2023). QGIS 3.34.13. <https://www.qgis.org/downloads/QGIS-OSGeo4W-3.34.13-1.msi>

Qi, W., Ma, C., Xu, H., Chen, Z., Zhao, K., & Han, H. (2021). A review on applications of urban flood models in flood mitigation strategies. *Natural Hazards*, 108, 31–62. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04715-8>



- Ribot, J. C., Rocha-Magalhaes, A., & Panagides, S. S. (2005). *Climate Variability, Climate Change and Social Vulnerability in the Semi-arid Tropics* (pp.55-70). 1a ed. Cambridge University Press. Cambridge, Reino Unido.
- Riebeek H. (2012). The Gravity of Water. *Earth Observatory NASA*. 1-10
- Rodríguez, T. y Riccardi, G. (2014). Dinámica del escurrimiento superficial en calles de una cuenca urbana sometida a intensas precipitaciones en la provincia de misiones. *Memorias del 2do Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras*. 1-10
- Rojas-Eraso, A. M. (1997). El río y la ciudad. *Bitácora Urbano-Territorial*, 1(1), 41–44.
- Ruiz-Corral, J. A., Medina-García, G., Rodríguez-Moreno, V. M., Sánchez-González, J. de J., Villavicencio-García, R., Durán-Puga, N., Grageda-Grageda, J., & García-Romero, G. E. (2016). Regionalización del cambio climático en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13, 2451–2464.
- Rybka, A., & Mazur, R. (2018). The river as an element of urban composition. *E3S Web of Conferences*, 45, 1–8.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184500077>
- Salas-Salinas, M. A., & Jiménez-Espinosa, M. (2021). *INUNDACIONES*. Centro Nacional de Prevención de Desastres, Secretaría De Seguridad Y Protección Ciudadana-Seguridad & Coordinación Nacional De Protección Civil. <https://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/3-FASCCULOINUNDACIONES.PDF> [5 de diciembre de 2024]



- Santasusagna-Riu, A., & Tort-Donada, J. (2019). Agua y espacio urbano. Algunas consideraciones teóricas a propósito de la relación entre ciudad y río. *Documents d'Anàlisi Geogràfica*, 65(2), 371–397. <https://doi.org/10.5565/rev/dag.513>
- Secretaria de Comunicación y Transporte. (2015). ISOYETAS DE INTENSIDAD - DURACIÓN - PERIODO DE RETORNO PARA EL ESTADO DE CHIHUAHUA. <https://www.sct.gob.mx/carreteras/direccion-general-de-servicios-tecnicos/isoyetas/chihuahua/> [26 de octubre de 2023]
- Secretaria de Desarrollo Territorial y Urbano, Ayuntamiento de Chihuahua & Protección Civil Chihuahua. (2014). Atlas de Riesgo del municipio de Chihuahua. <http://municipium.mx/atlasderiesgos/municipiochihuahua> [17 de noviembre de 2022]
- Sistema de Información Geográfica Municipal. (2021). Hidrografía: Cuerpos de agua, ríos y arroyos principales. <https://geoportal.implanchihuahua.org/sigmun/apps/webappviewer/index.html?id=91d32aae9b874b139ad893832c365921> [10 de diciembre de 2024]
- Skougaard Kaspersen, P., Høegh Ravn, N., Arnbjerg-Nielsen, K., Madsen, H., & Drews, M. (2017). Comparison of the impacts of urban development and climate change on exposing European cities to pluvial flooding. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21, 4131–4147. <https://doi.org/10.5194/hess-21-4131-2017>
- Timbe-Castro, L., & Willems, P. (2011). Desempeño de modelos hidráulicos 1D y 2D para la simulación de inundaciones. *MASKANA*, 2(1), 91–98.



- Tingsanchali, T. (2012). Urban flood disaster management. *Procedia Engineering*, 32, 25–37. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.1233>
- Ureña-Francés, J. M. (2002). La ordenación de los espacios fluviales en las ciudades. In P. de la Cal, F. Pellicer (Eds), *Ríos y ciudades. Aportaciones para la recuperación de los ríos y riberas de Zaragoza* (pp. 45–63). Institución «Fernando el Católico». Zaragoza, España.
- van der Sande, C. J., de Jong, S. M., & de Roo, A. P. J. (2003). A segmentation and classification approach of IKONOS-2 imagery for land cover mapping to assist flood risk and flood damage assessment. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 4(3), 217–229. [https://doi.org/10.1016/S0303-2434\(03\)00003-5](https://doi.org/10.1016/S0303-2434(03)00003-5)
- Vásconez, M., Mancheno, A., Álvarez, C., Prehn, C., Cevallos, C., Ortiz, L., & Araque, M. (2019). *Cuencas Hidrográficas* (pp15-59). 1a ed. Editorial Abya-Yala. Quito, Ecuador.
- Zubicaray, G., Brito, M., Ramírez-Reyes, L., García, N., & Macías, J. A. (2021). *Las ciudades mexicanas: tendencias de expansión y sus impactos*. Coalition for Urban transitions: London, UK, y Washington, DC. <https://urbantransitions.global/publications/>. [10 de septiembre de 2024]
- Zúñiga, E., Magaña, V., & Piña, V. (2020). Effect of urban development in risk of floods in Veracruz, Mexico. *Geosciences*, 10(402), 1–14. <https://doi.org/10.3390/geosciences10100402>



APÉNDICE

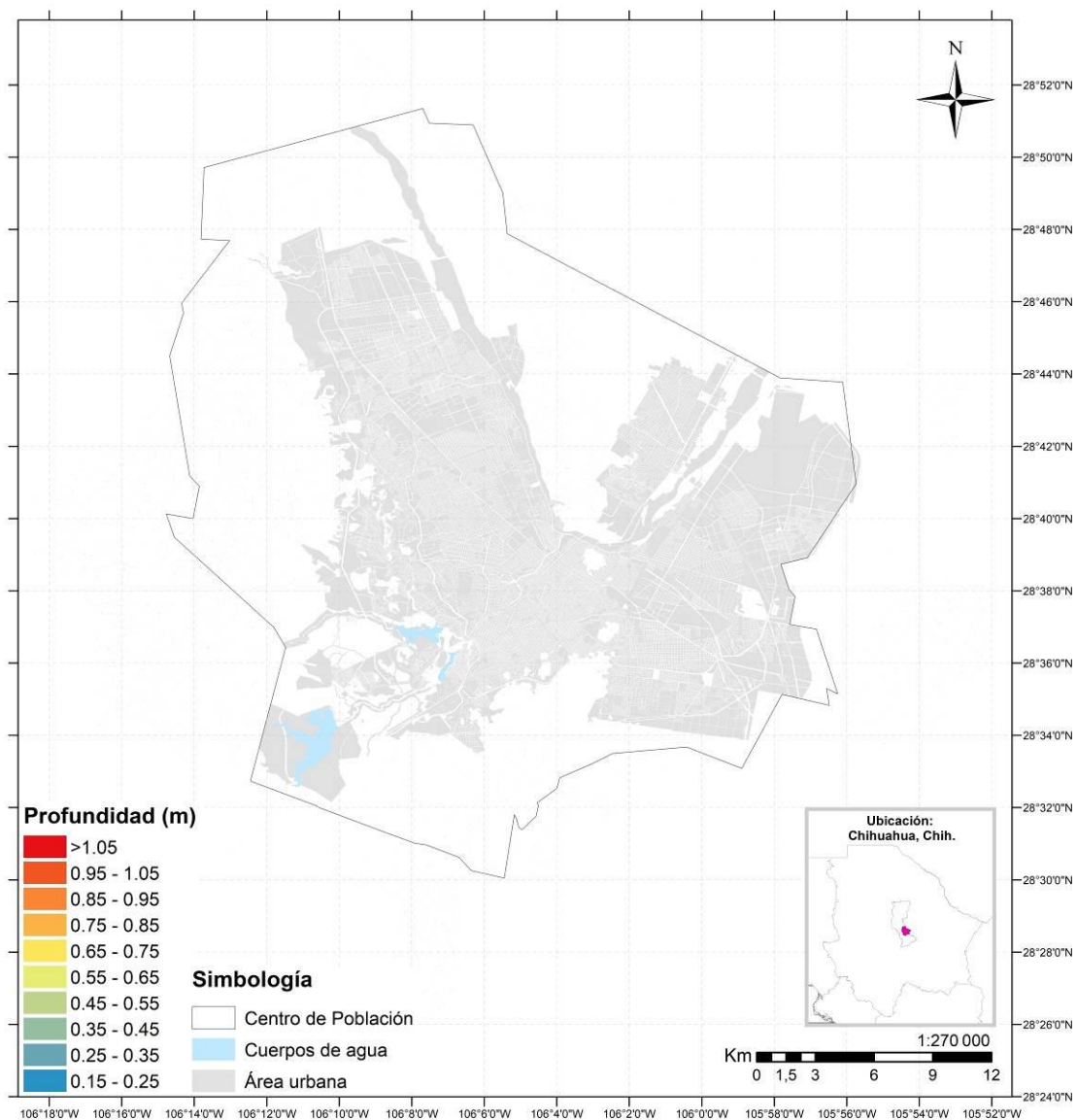


Figura 1. Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 10 minutos de precipitación.

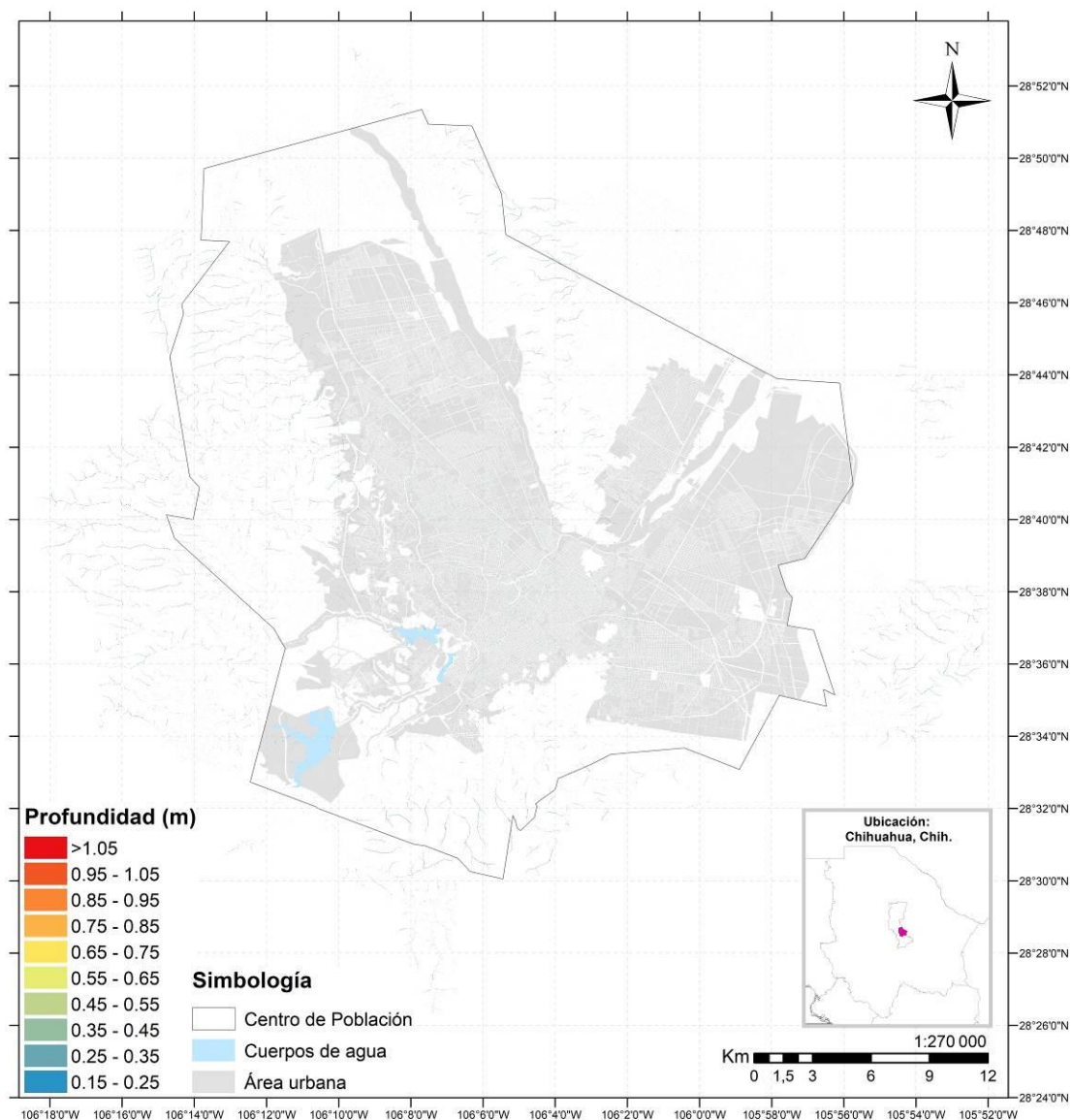


Figura 2. Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 20 minutos de precipitación.

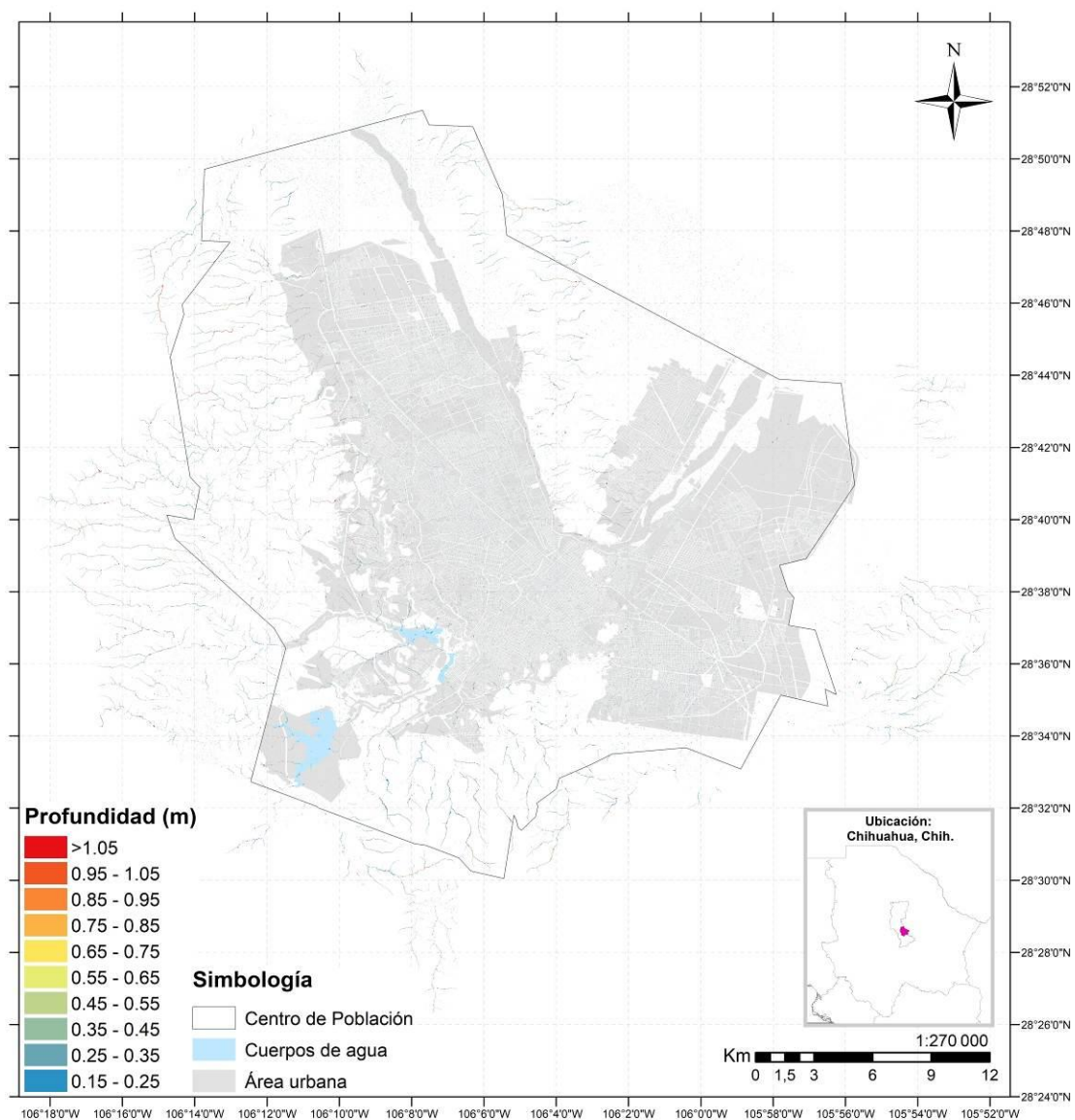


Figura 3. Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 30 minutos de precipitación.

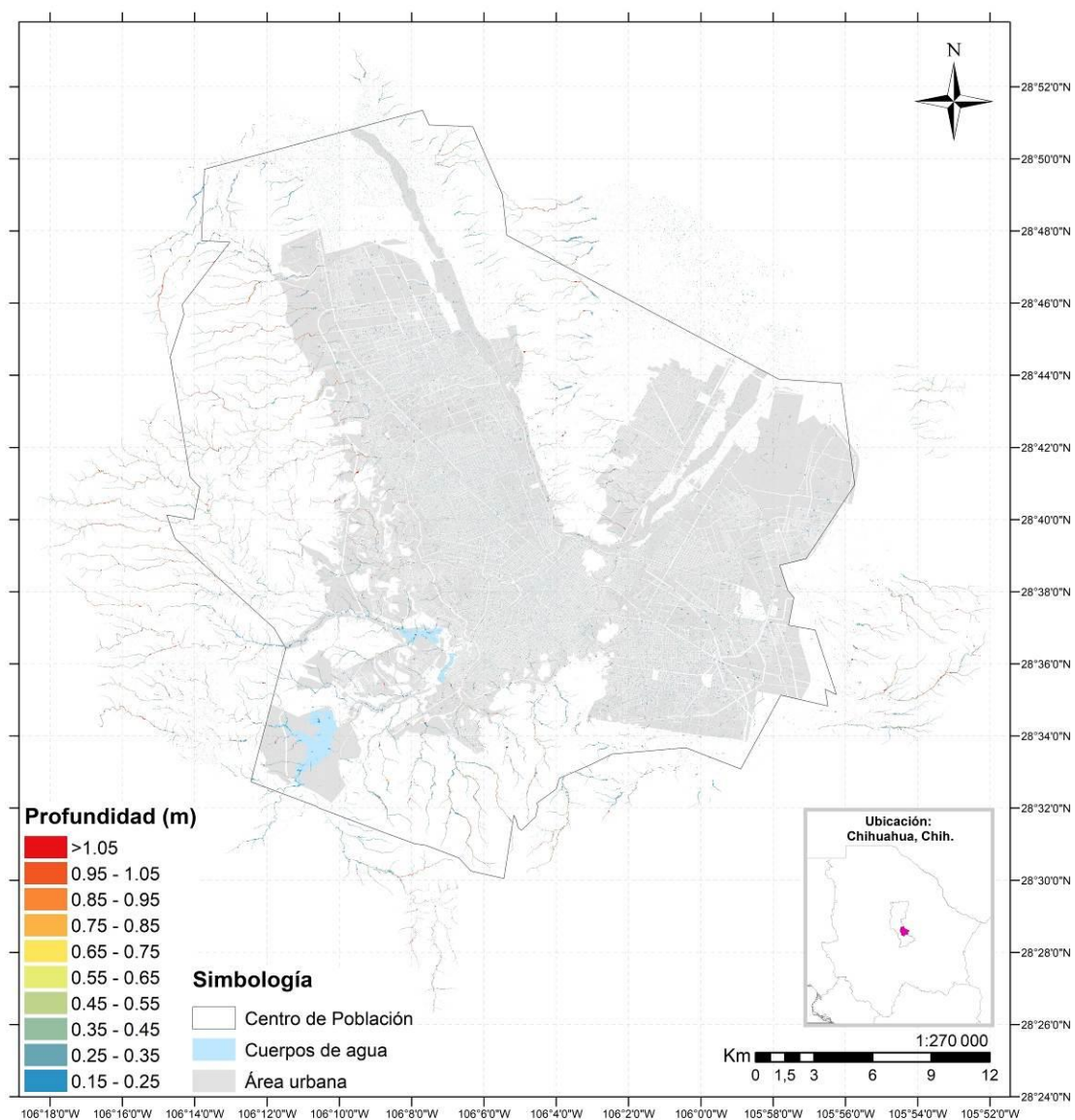


Figura 4. Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 40 minutos de precipitación.

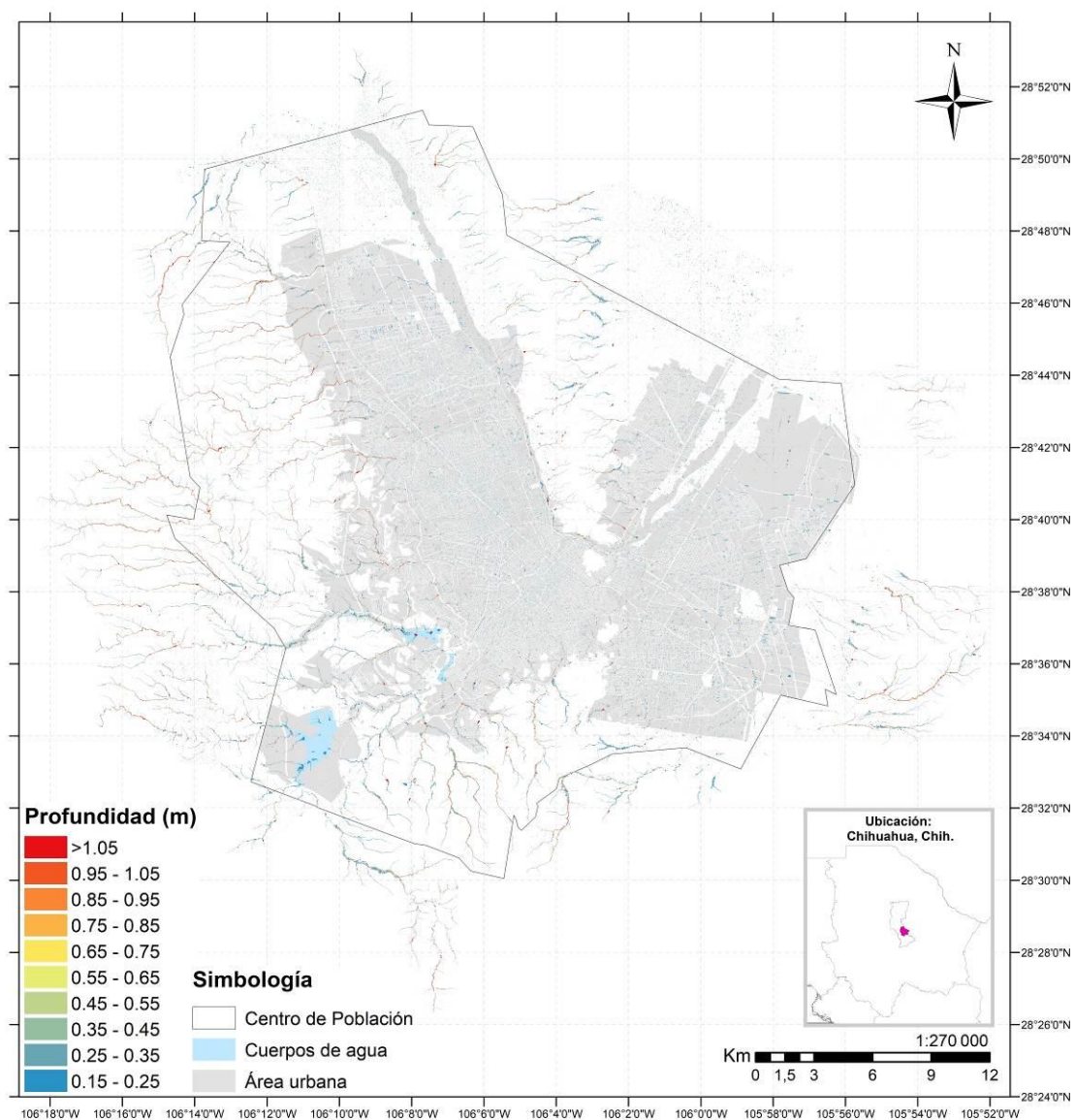


Figura 5. Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 50 minutos de precipitación.

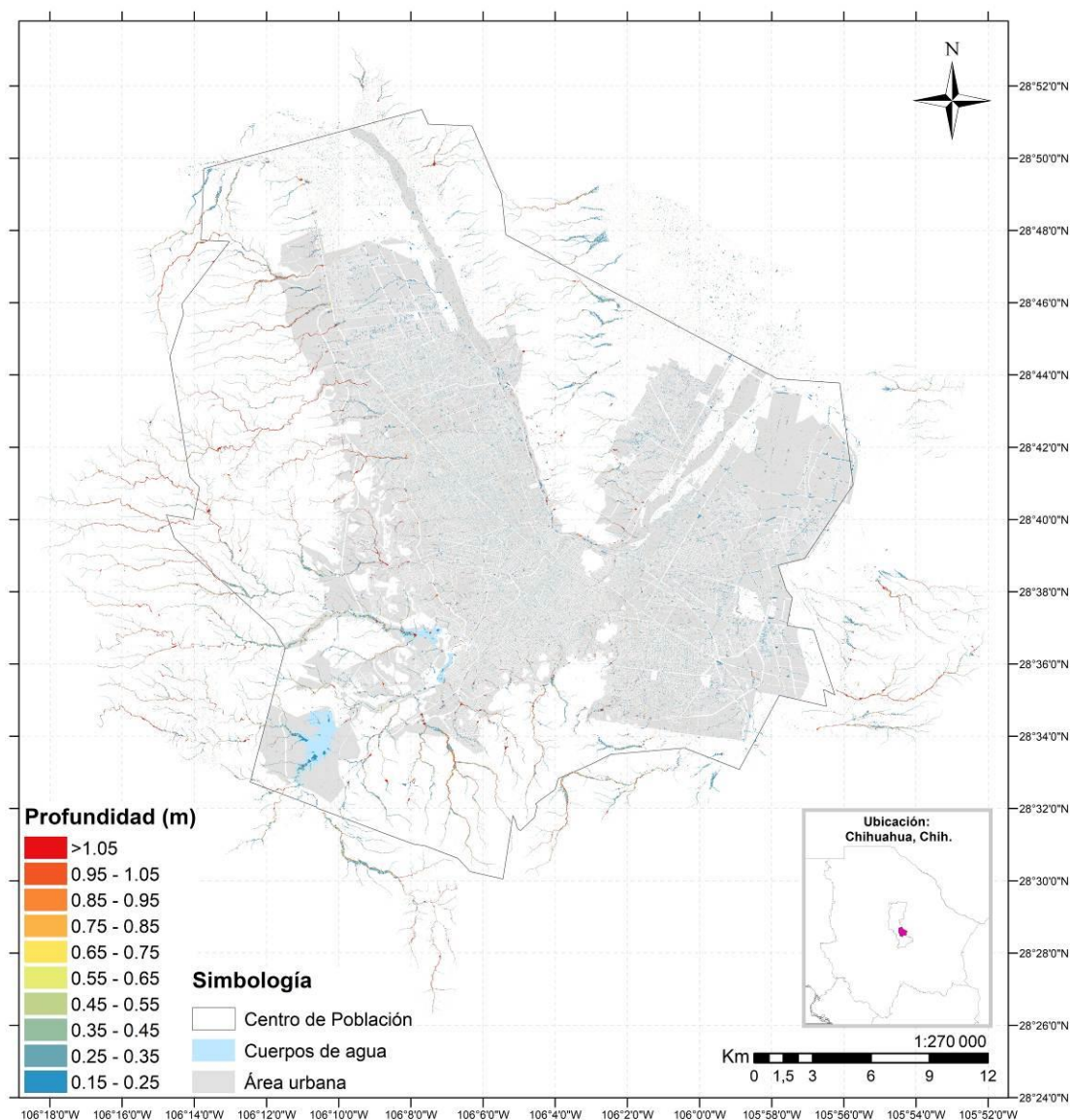


Figura 6. Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 60 minutos de precipitación.

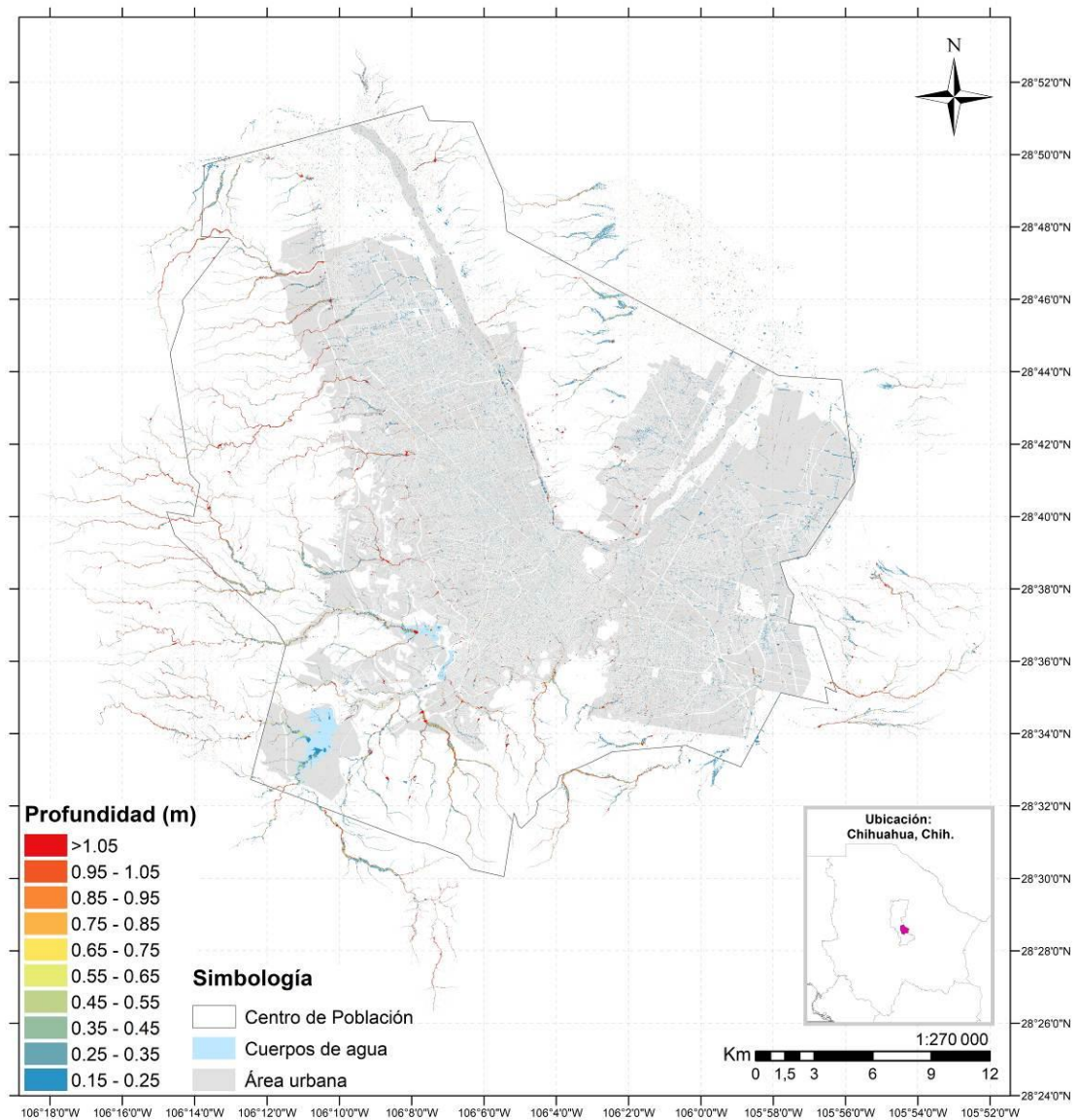


Figura 7. Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 10 minutos posteriores al evento de precipitación.

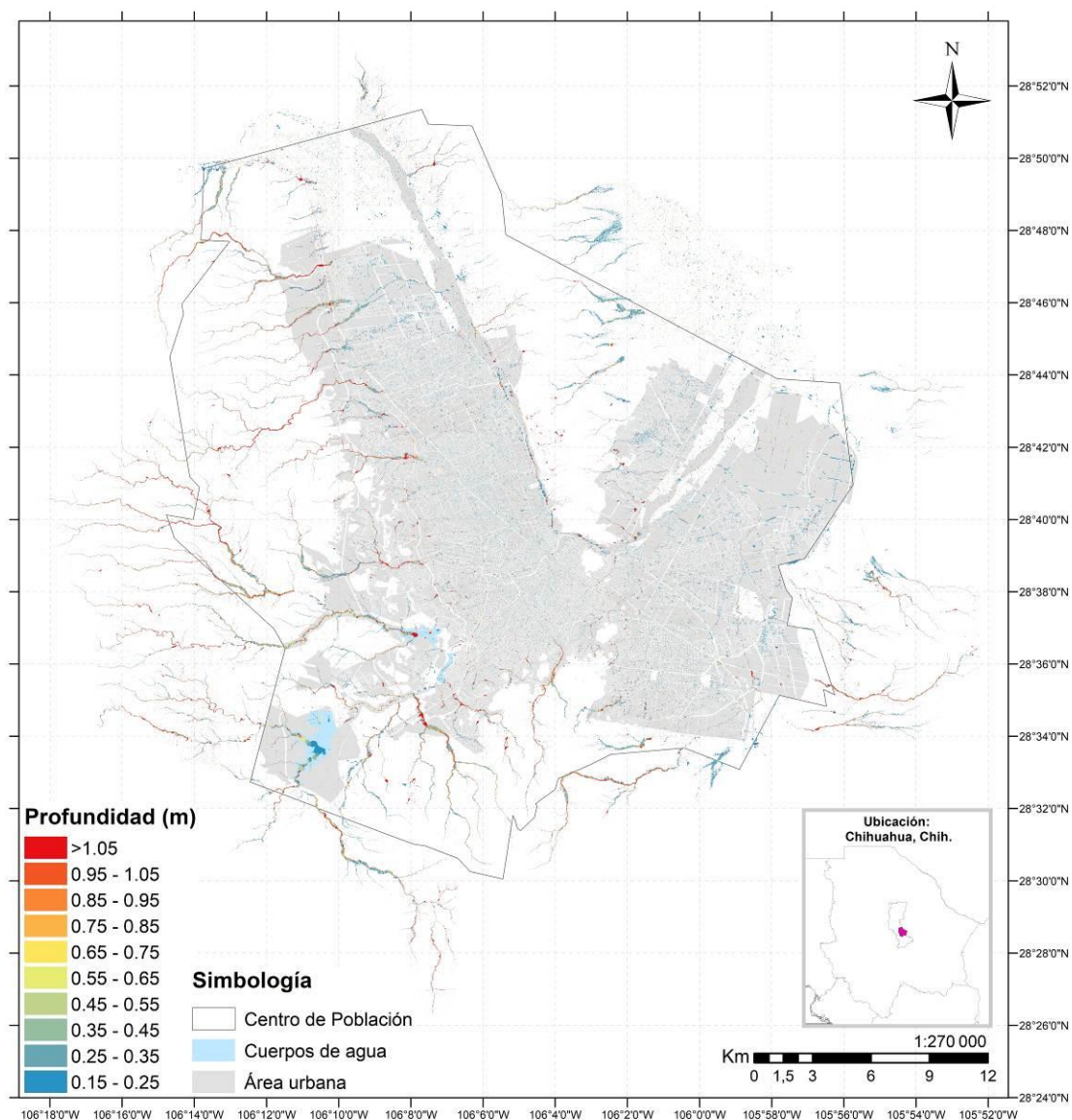


Figura 8. Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 20 minutos posteriores al evento de precipitación.

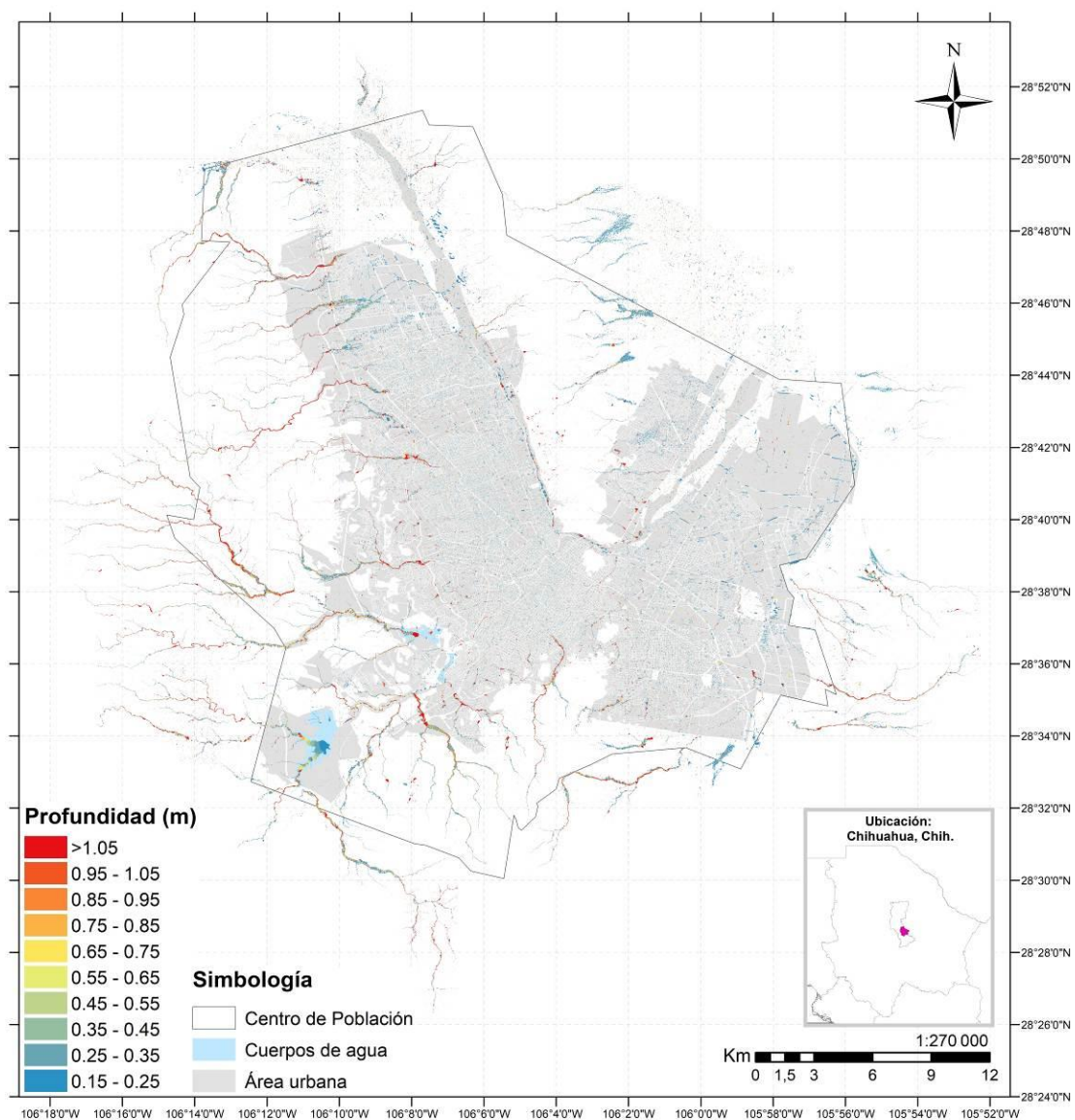


Figura 9. Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 30 minutos posteriores al evento de precipitación.

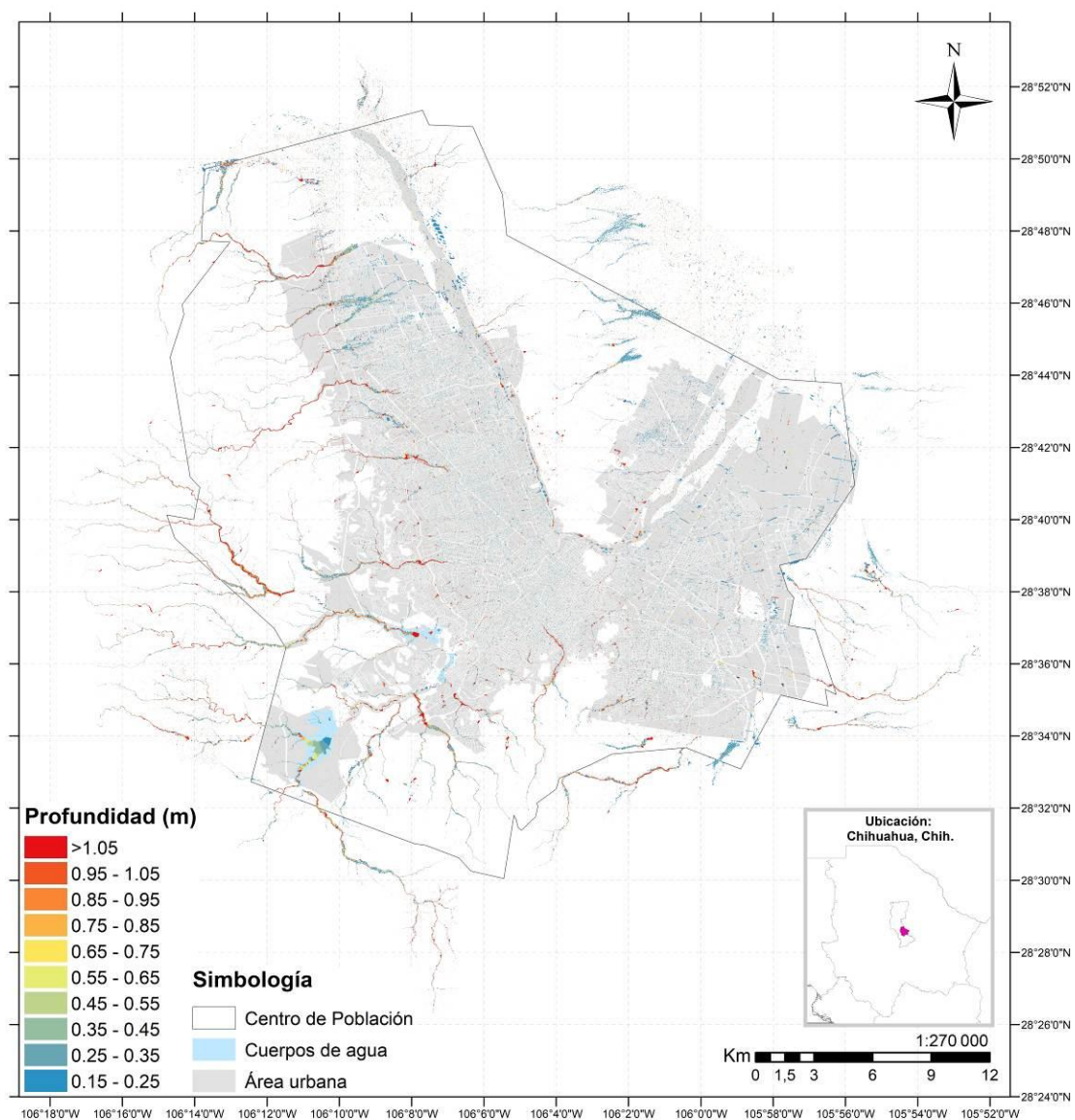


Figura 10. Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 40 minutos posteriores al evento de precipitación.

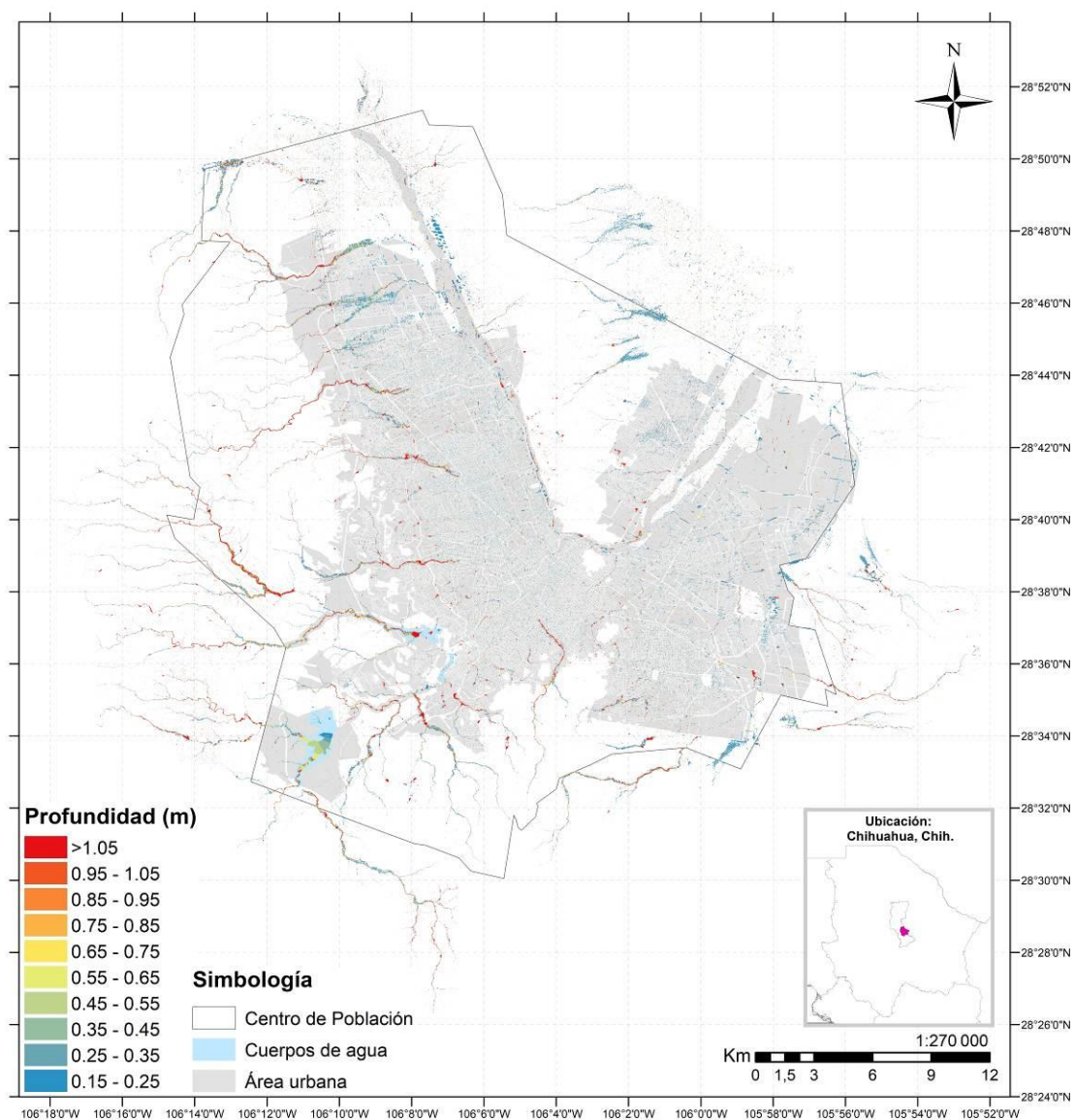


Figura 11. Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 50 minutos posteriores al evento de precipitación.

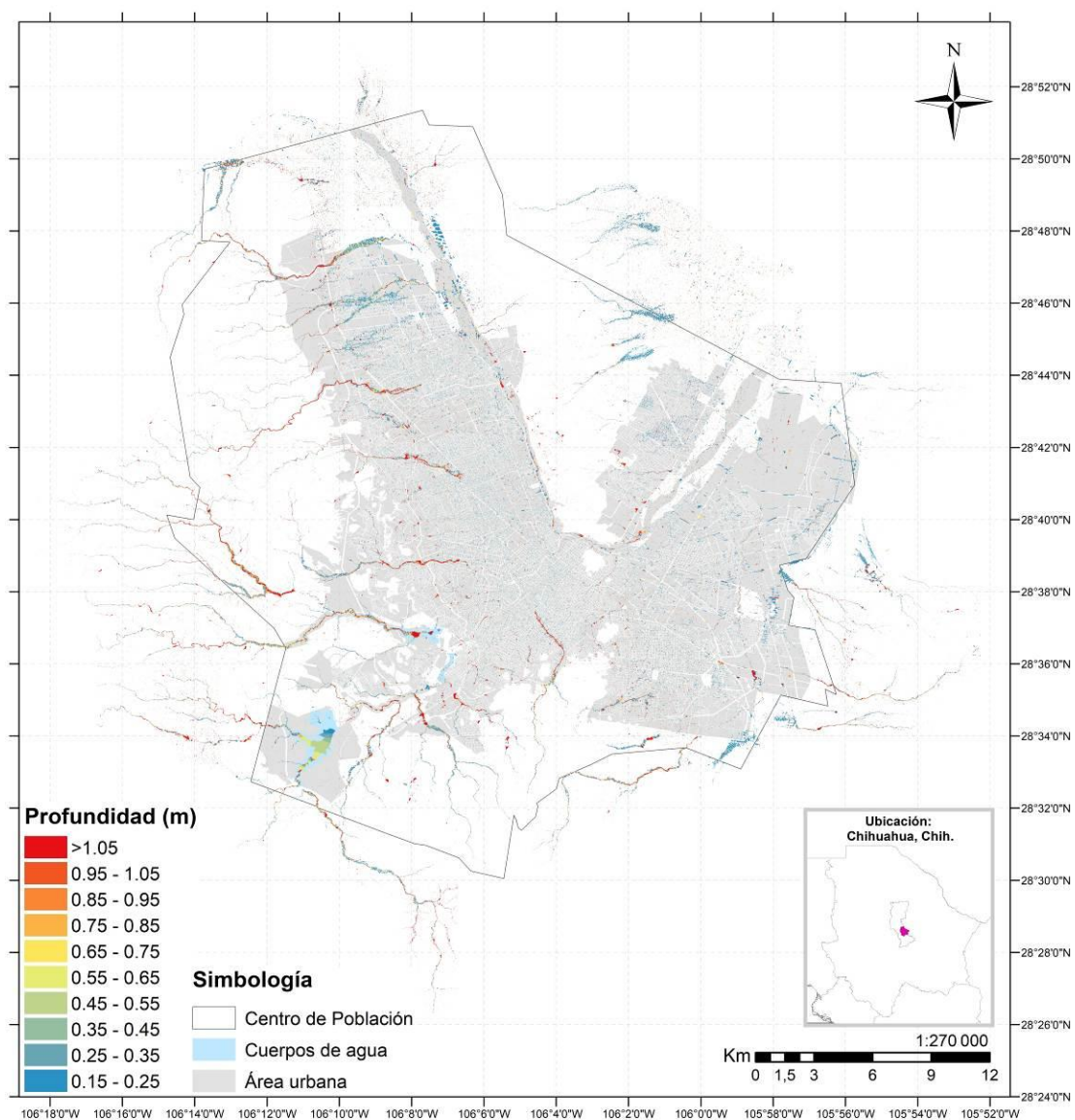


Figura 12. Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 60 minutos posteriores al evento de precipitación.

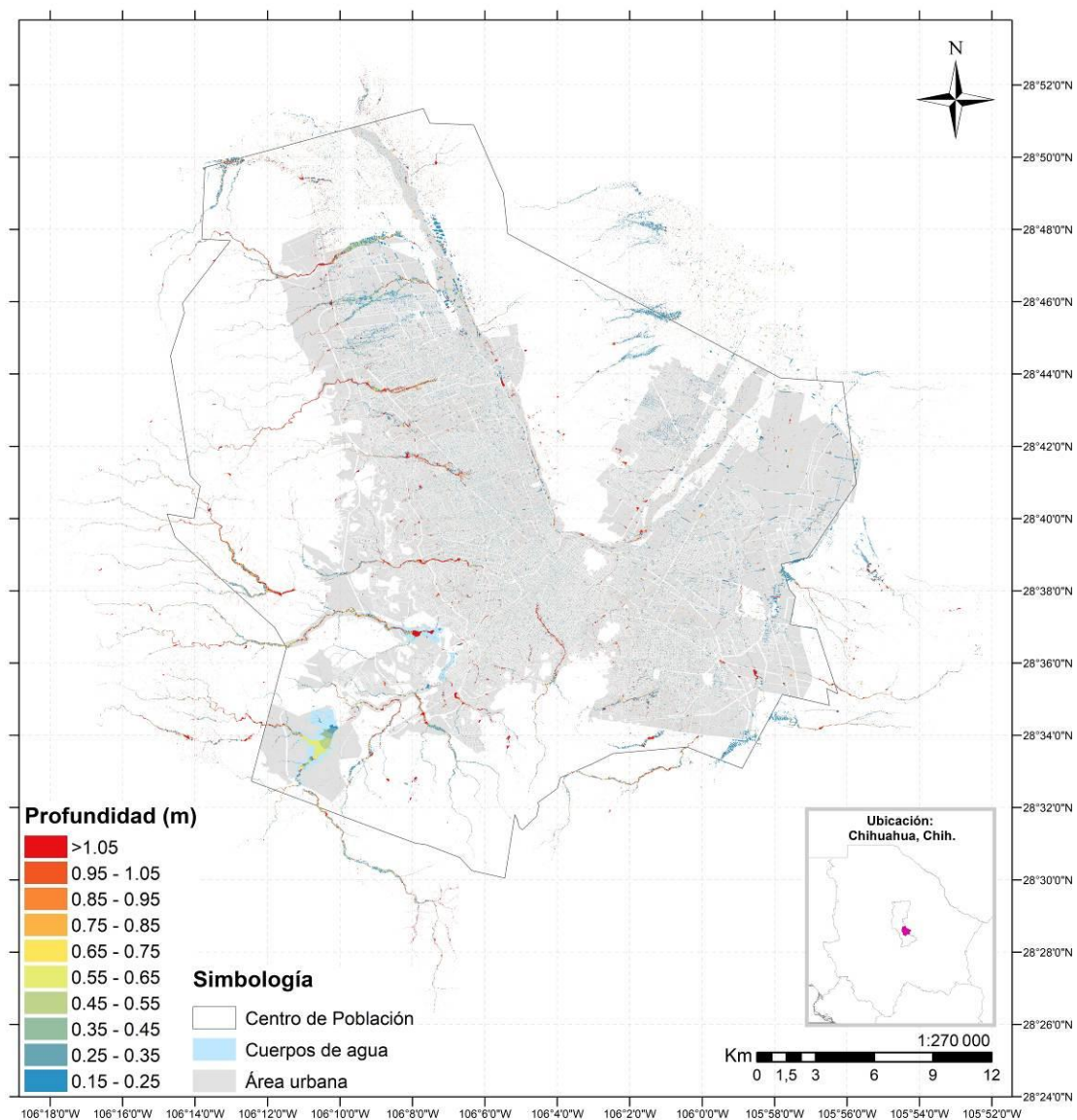


Figura 13. Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 70 minutos posteriores al evento de precipitación.

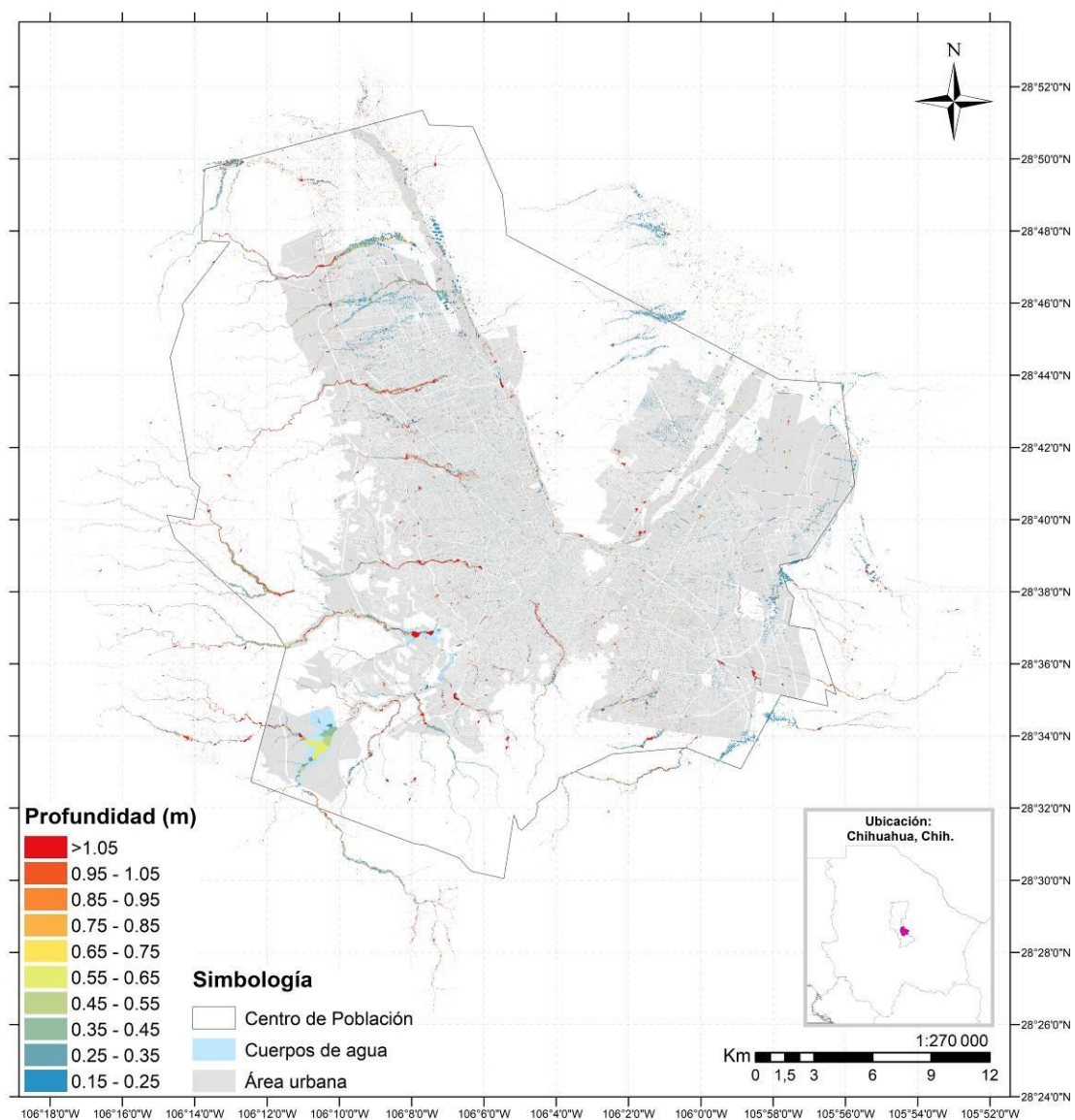


Figura 14. Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 80 minutos posteriores al evento de precipitación.

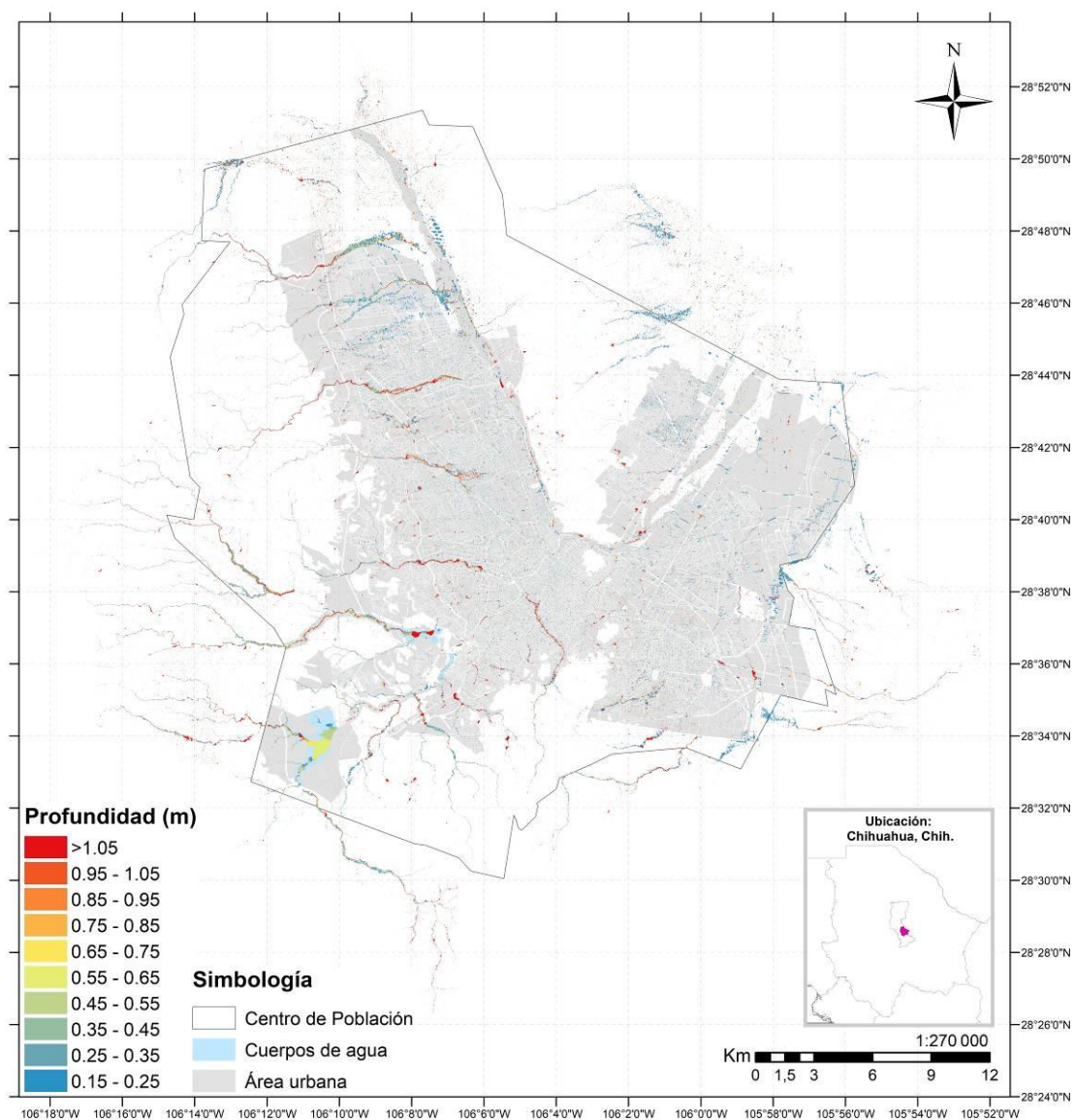


Figura 15. Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 90 minutos posteriores al evento de precipitación.

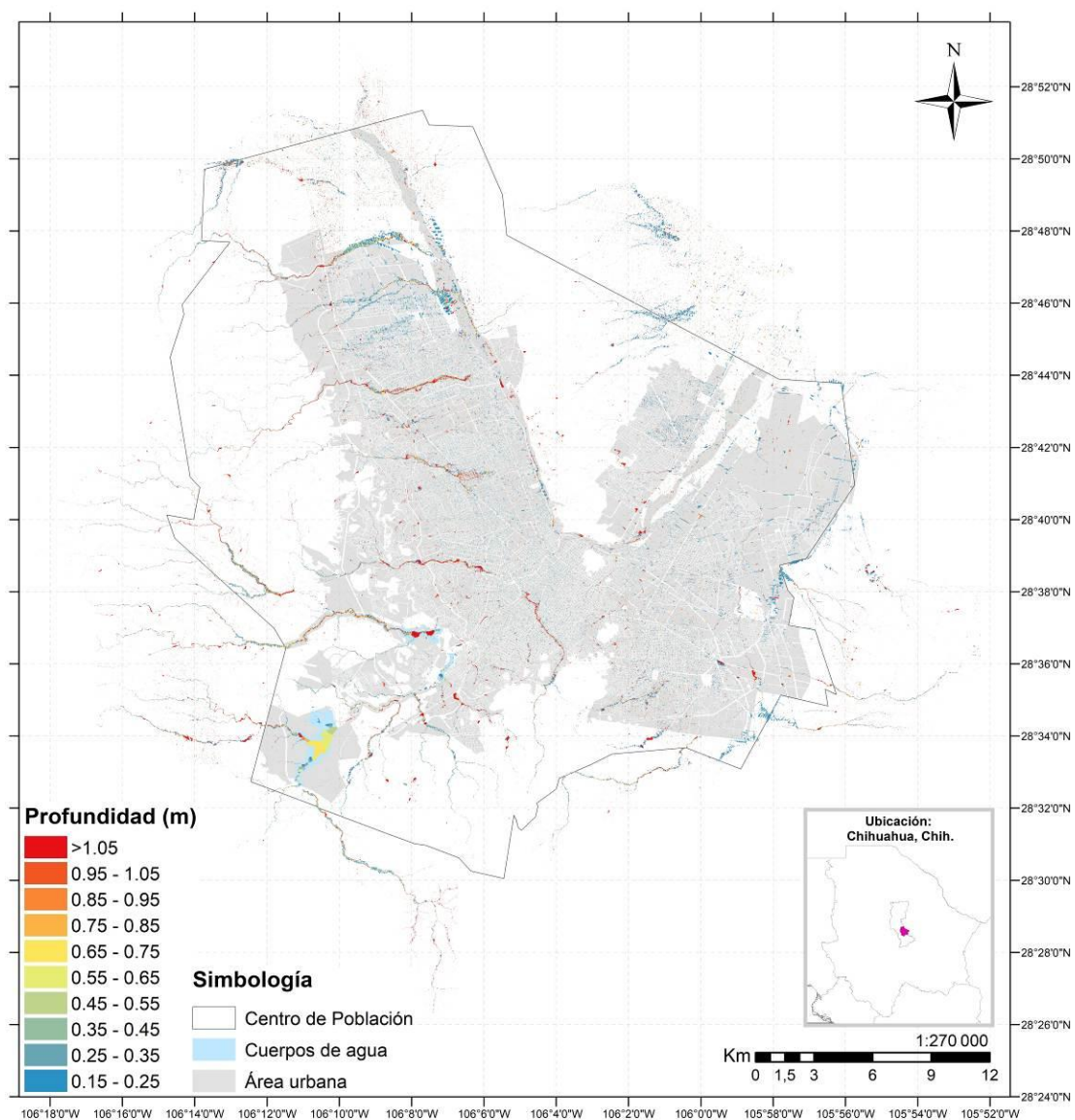


Figura 16. Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 100 minutos posteriores al evento de precipitación.

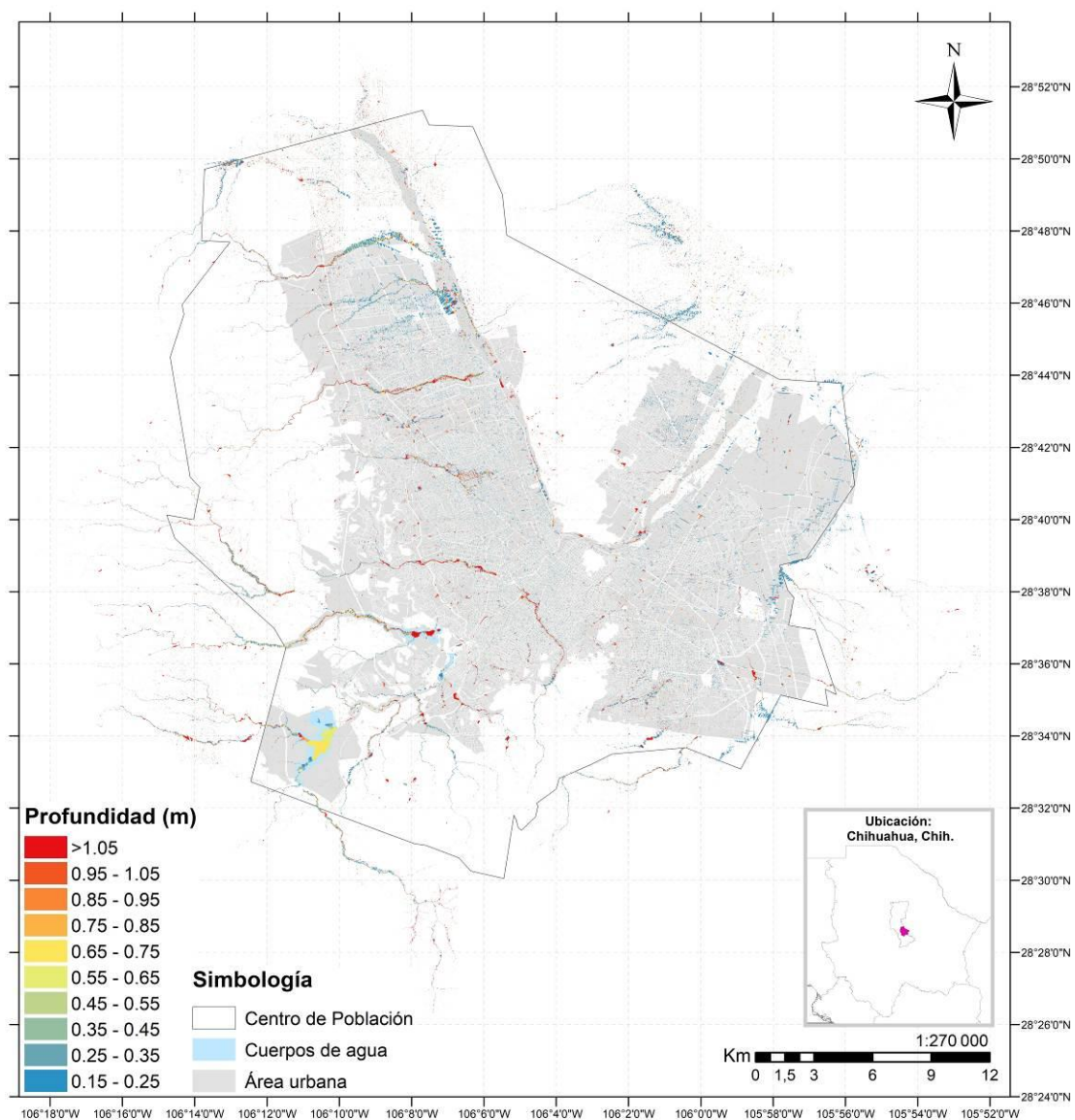


Figura 17. Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 110 minutos posteriores al evento de precipitación.

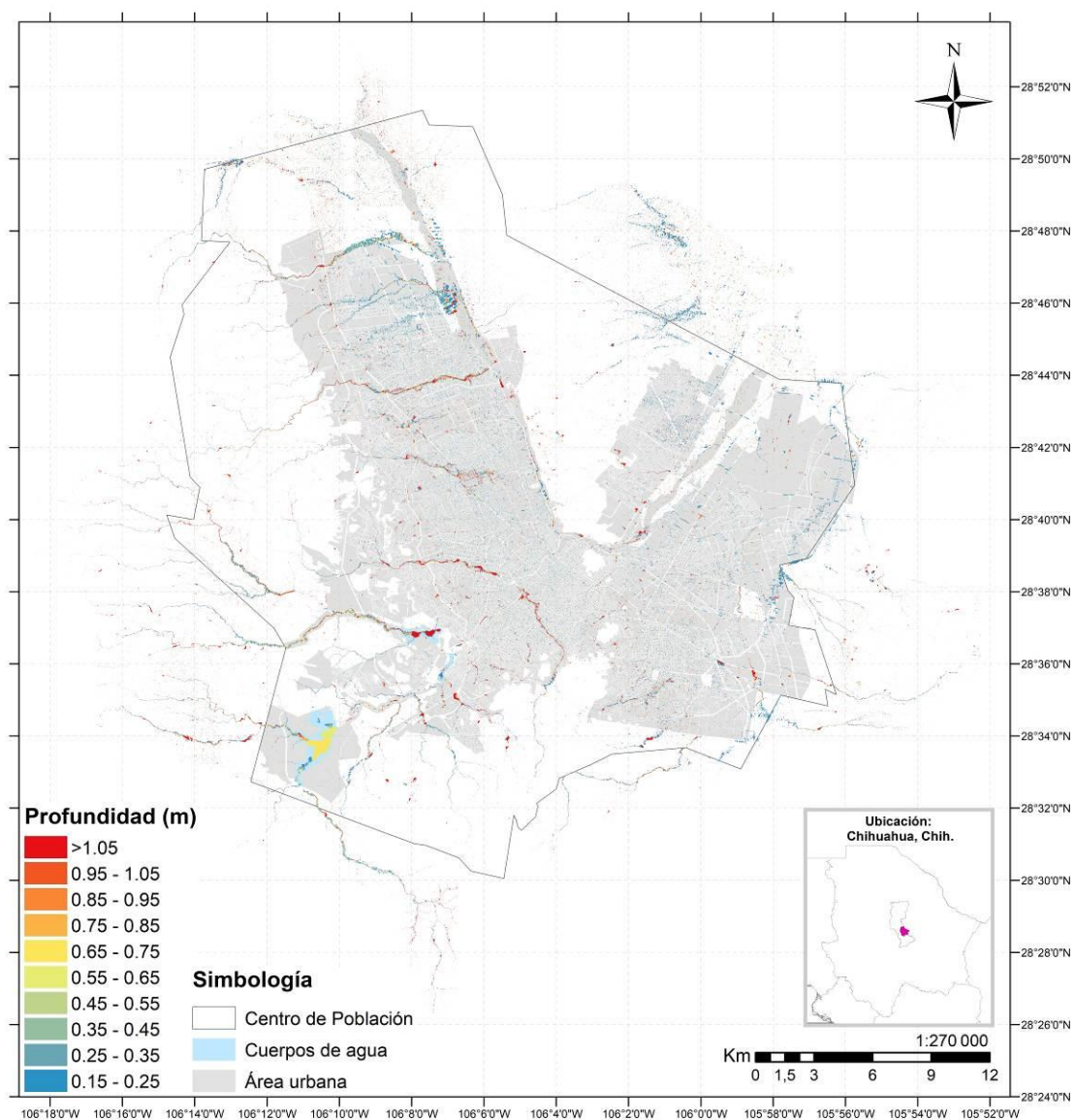


Figura 18. Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 120 minutos posteriores al evento de precipitación.

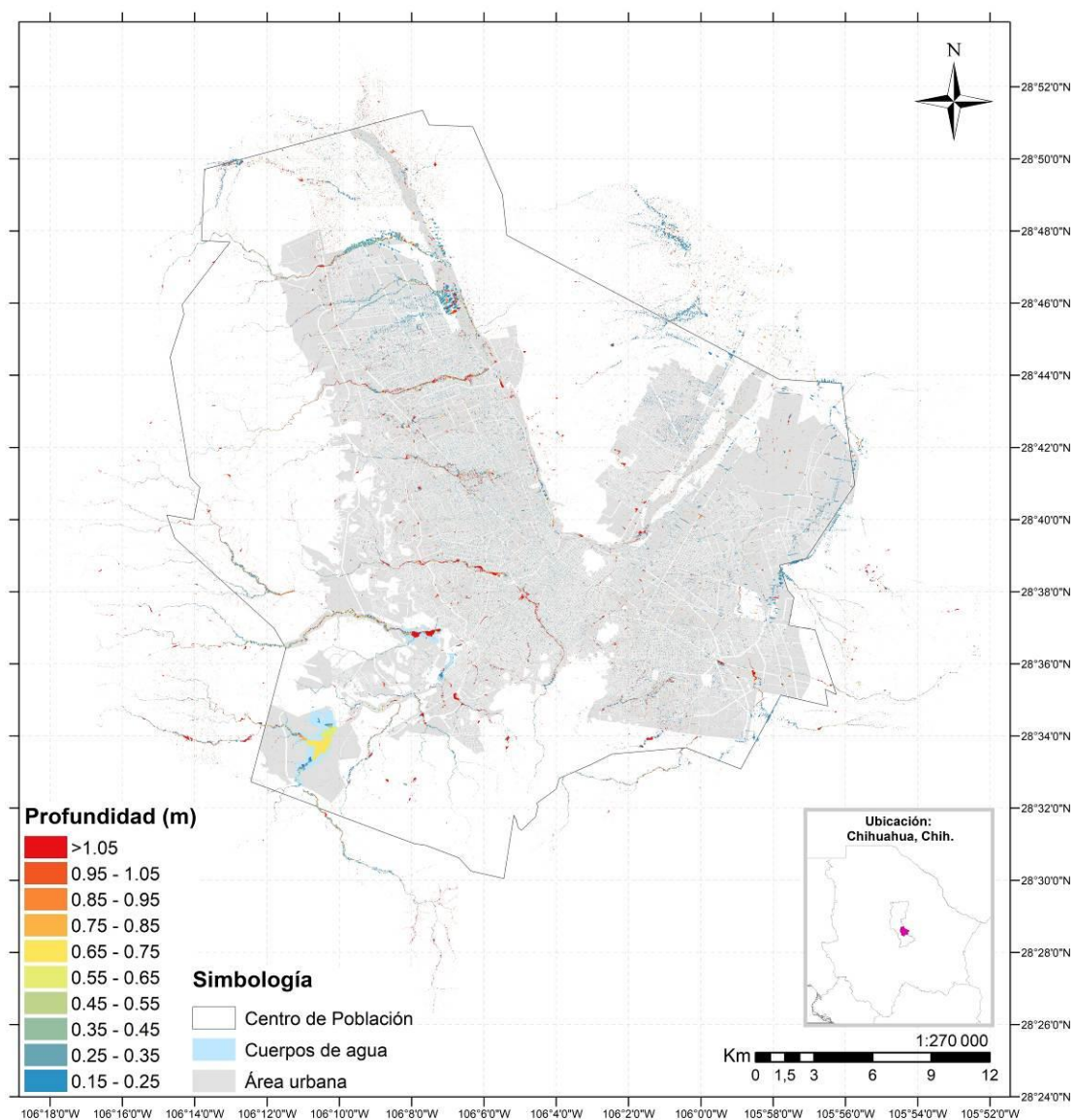


Figura 19. Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 130 minutos posteriores al evento de precipitación.

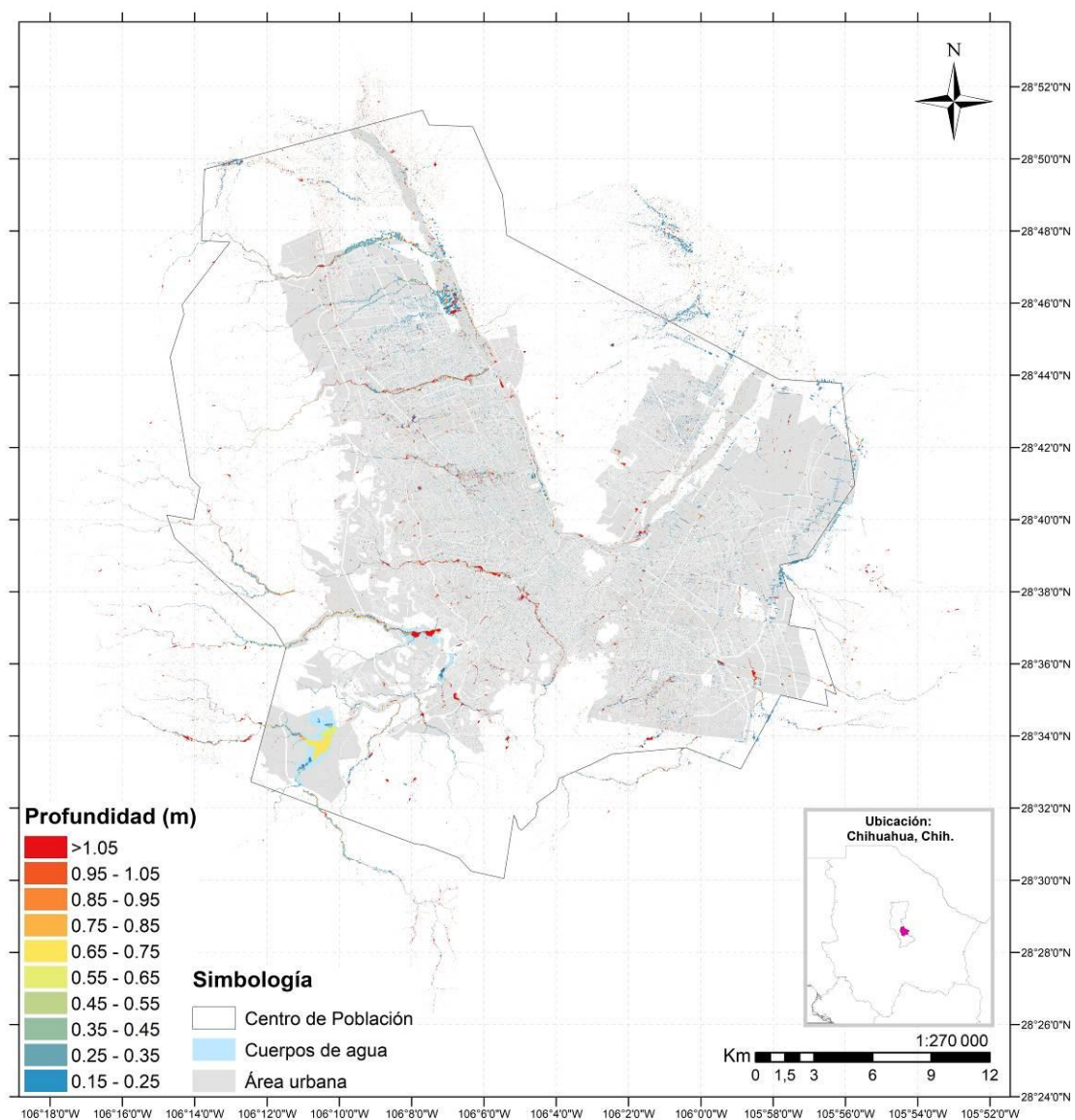


Figura 20. Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 140 minutos posteriores al evento de precipitación.

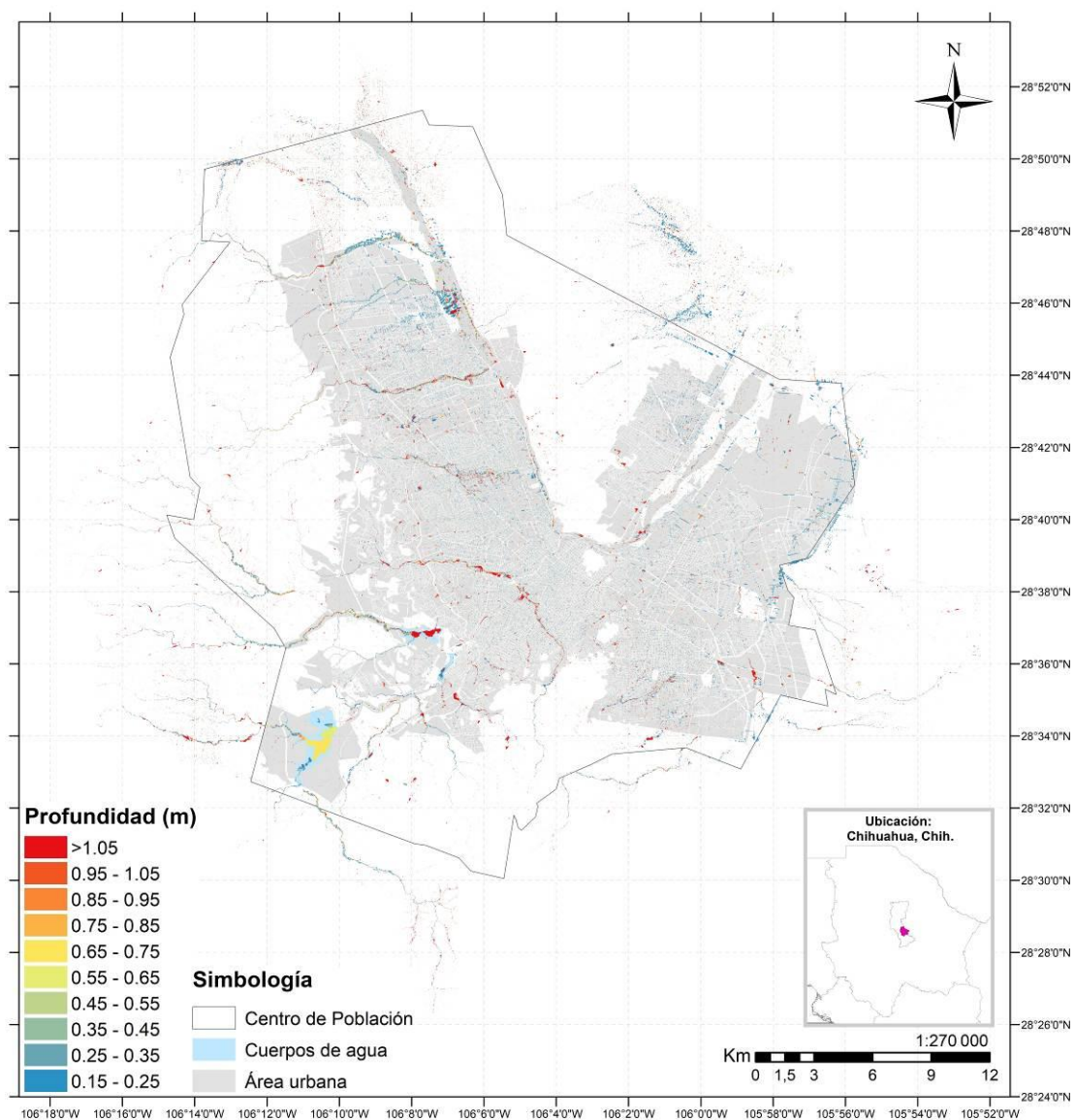


Figura 21. Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 150 minutos posteriores al evento de precipitación.

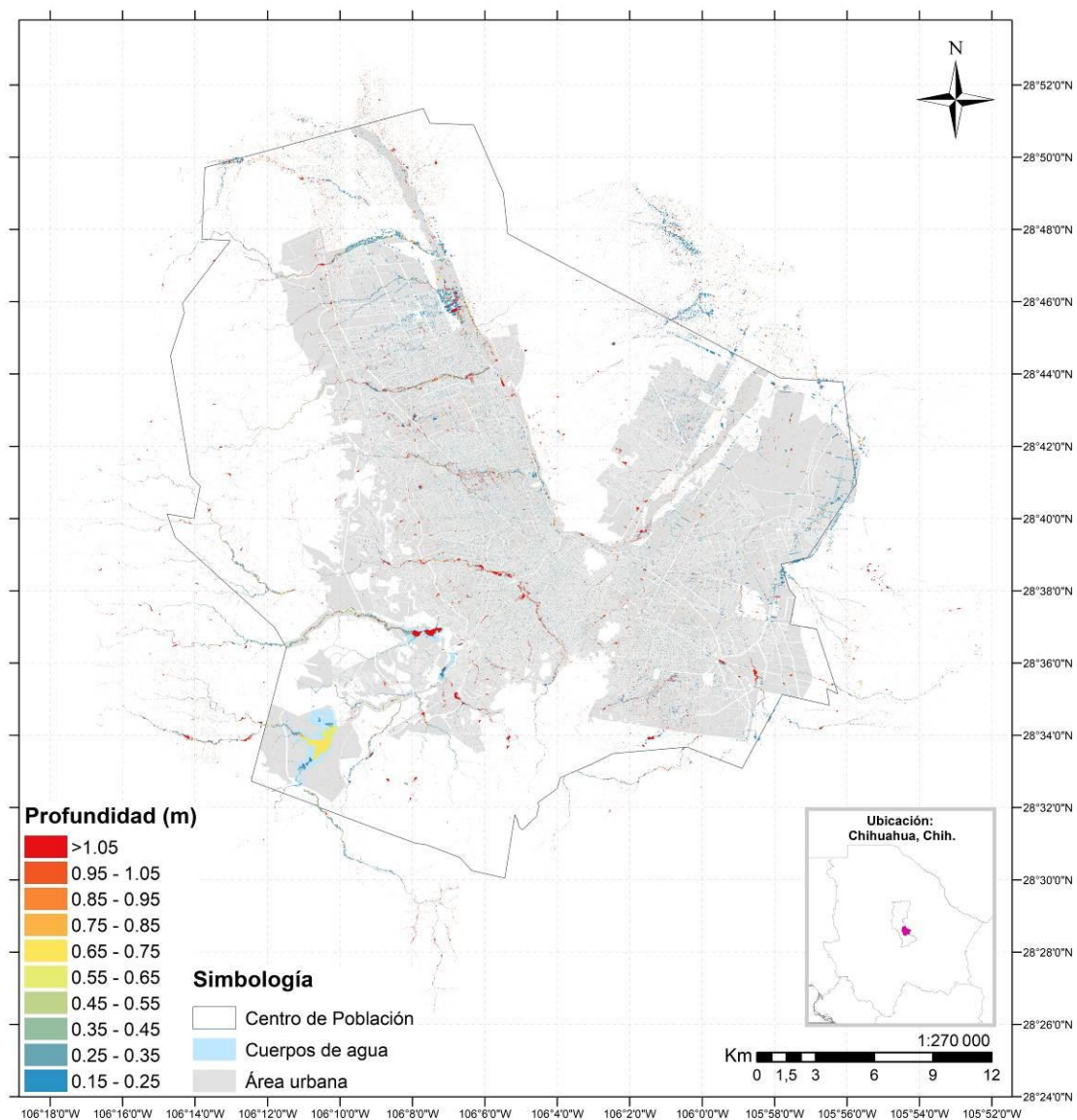


Figura 22. Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 160 minutos posteriores al evento de precipitación.

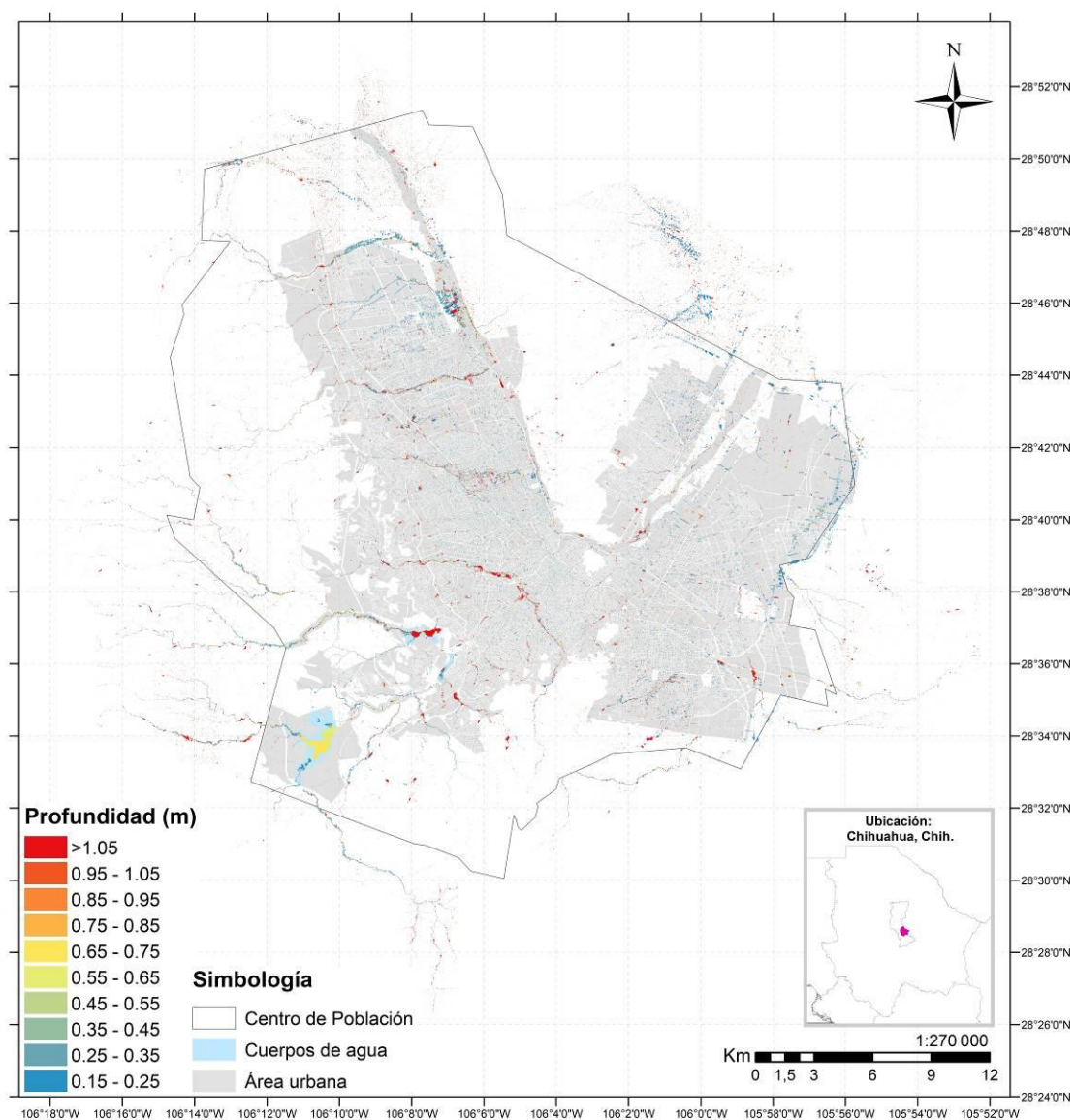


Figura 23. Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 170 minutos posteriores al evento de precipitación.

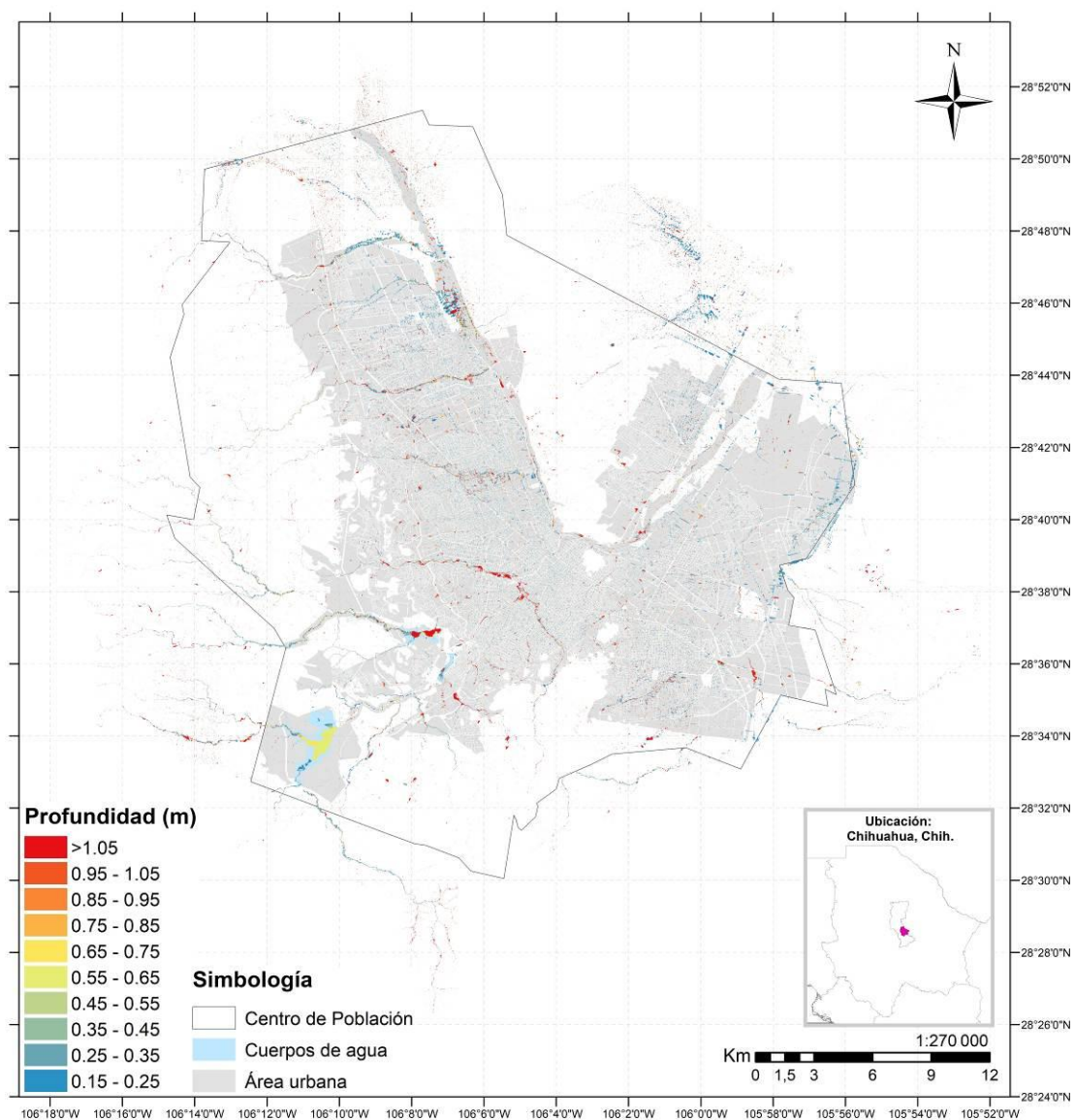


Figura 24. Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 180 minutos posteriores al evento de precipitación.

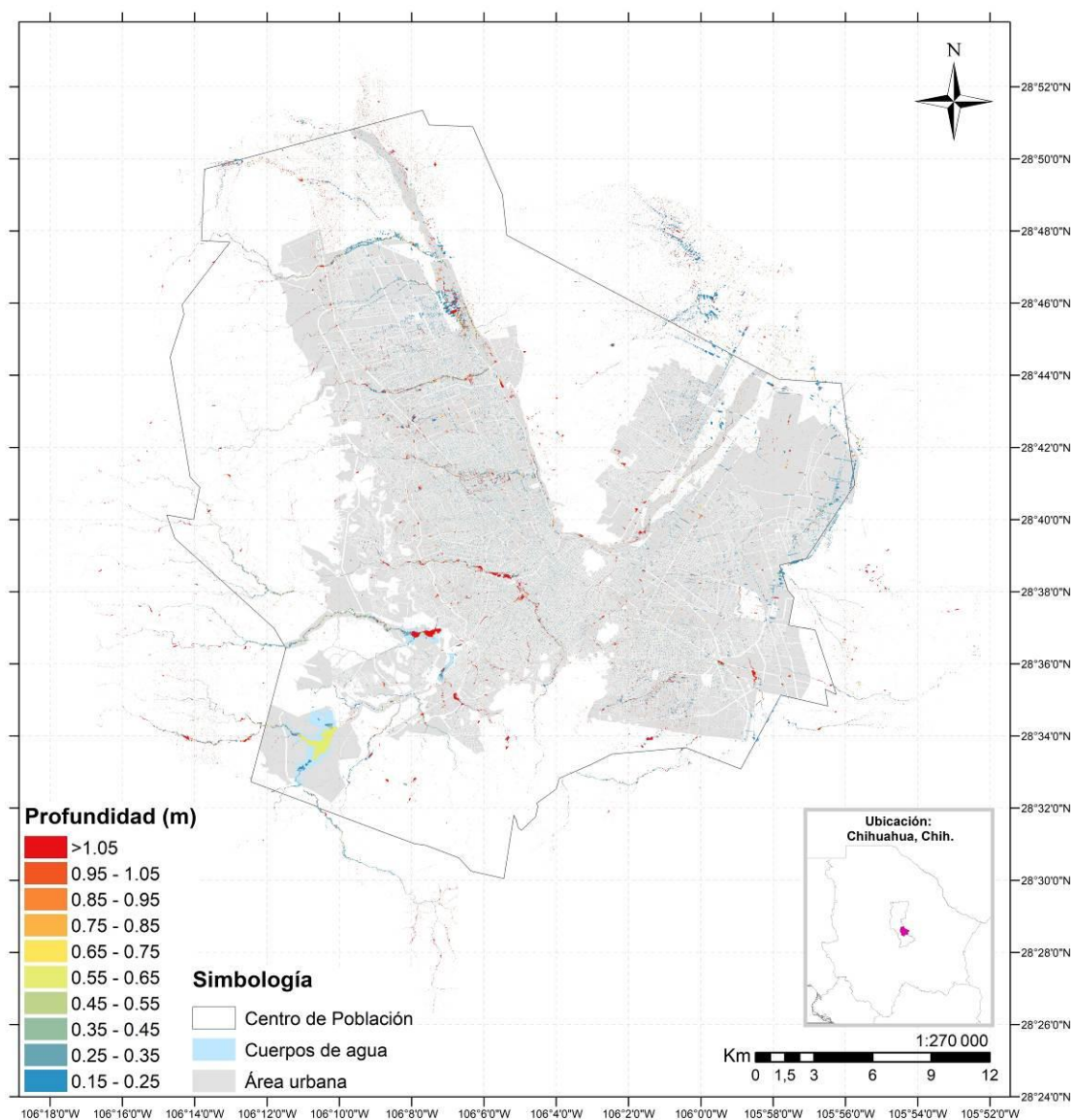


Figura 25. Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 190 minutos posteriores al evento de precipitación.

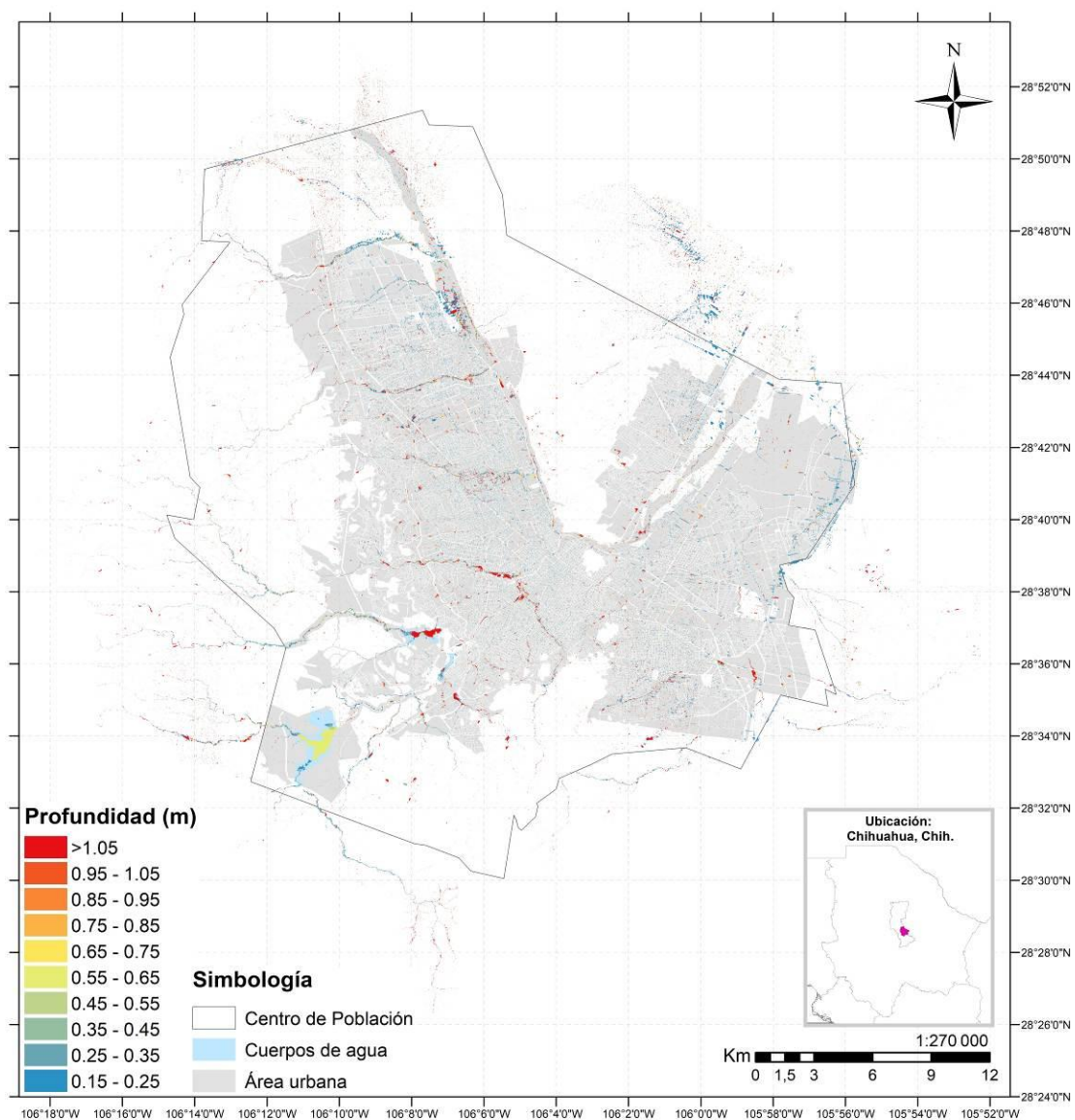


Figura 26. Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 200 minutos posteriores al evento de precipitación.

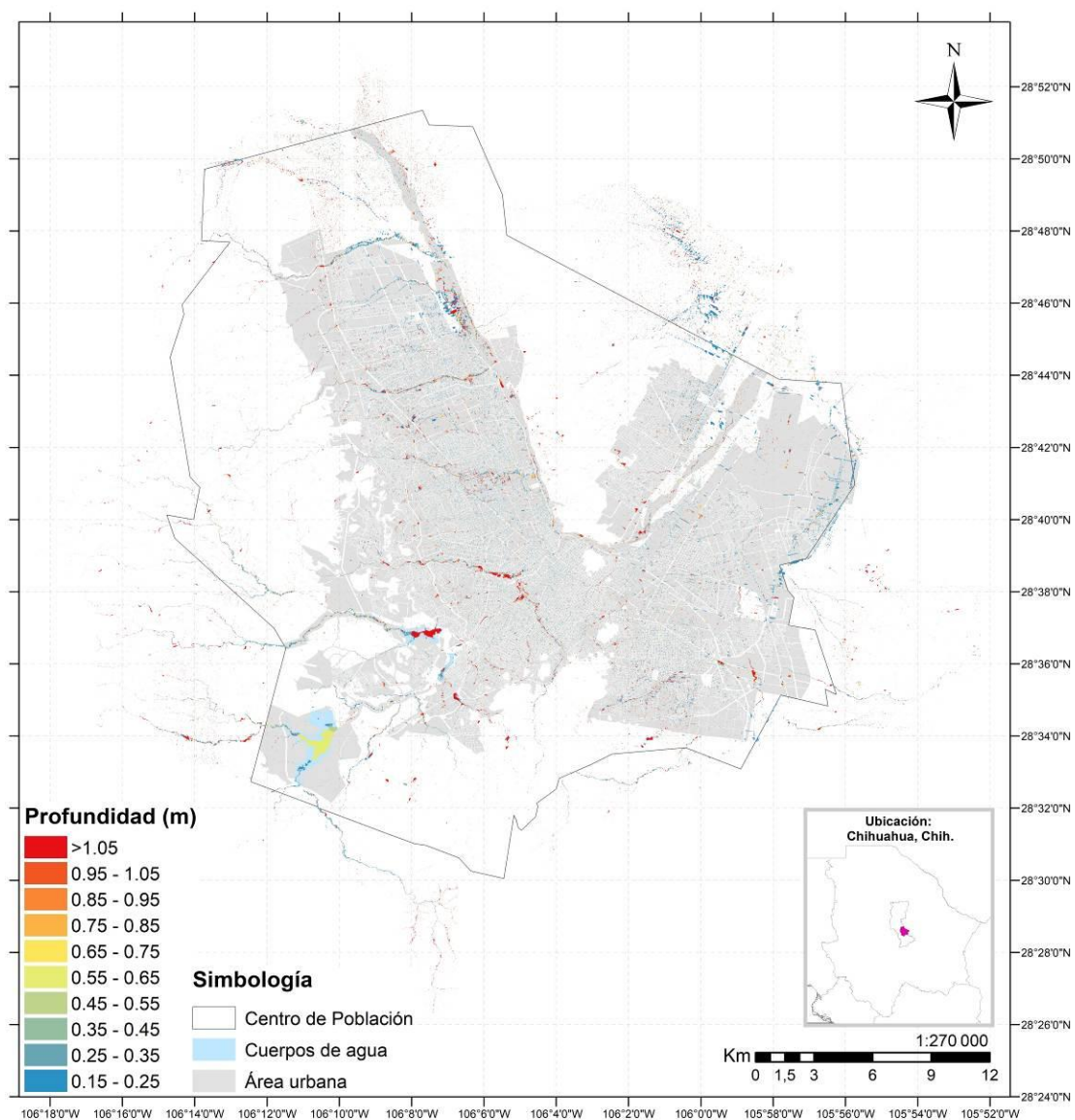


Figura 27. Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 210 minutos posteriores al evento de precipitación.

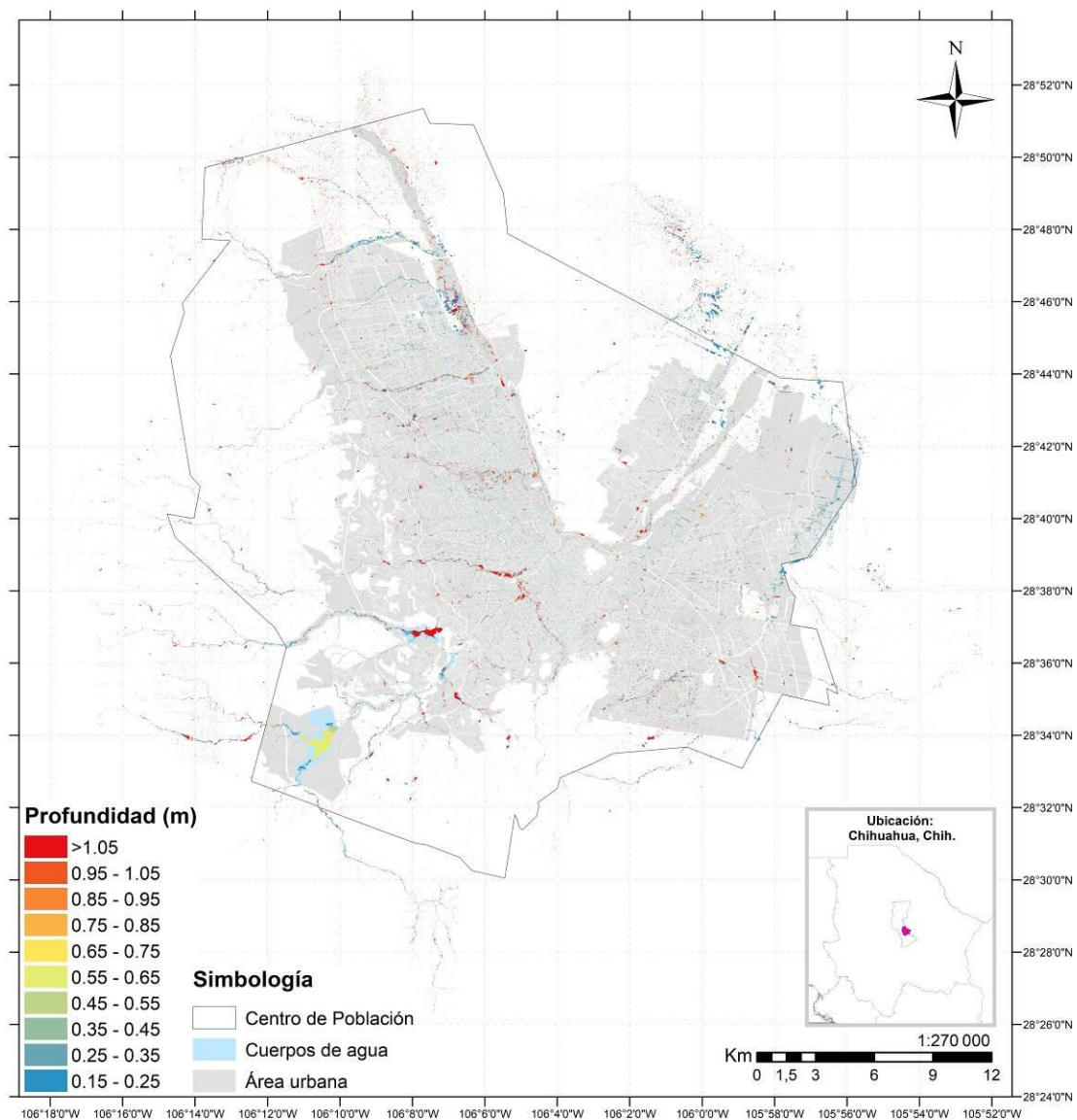


Figura 28. Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 220 minutos posteriores al evento de precipitación.

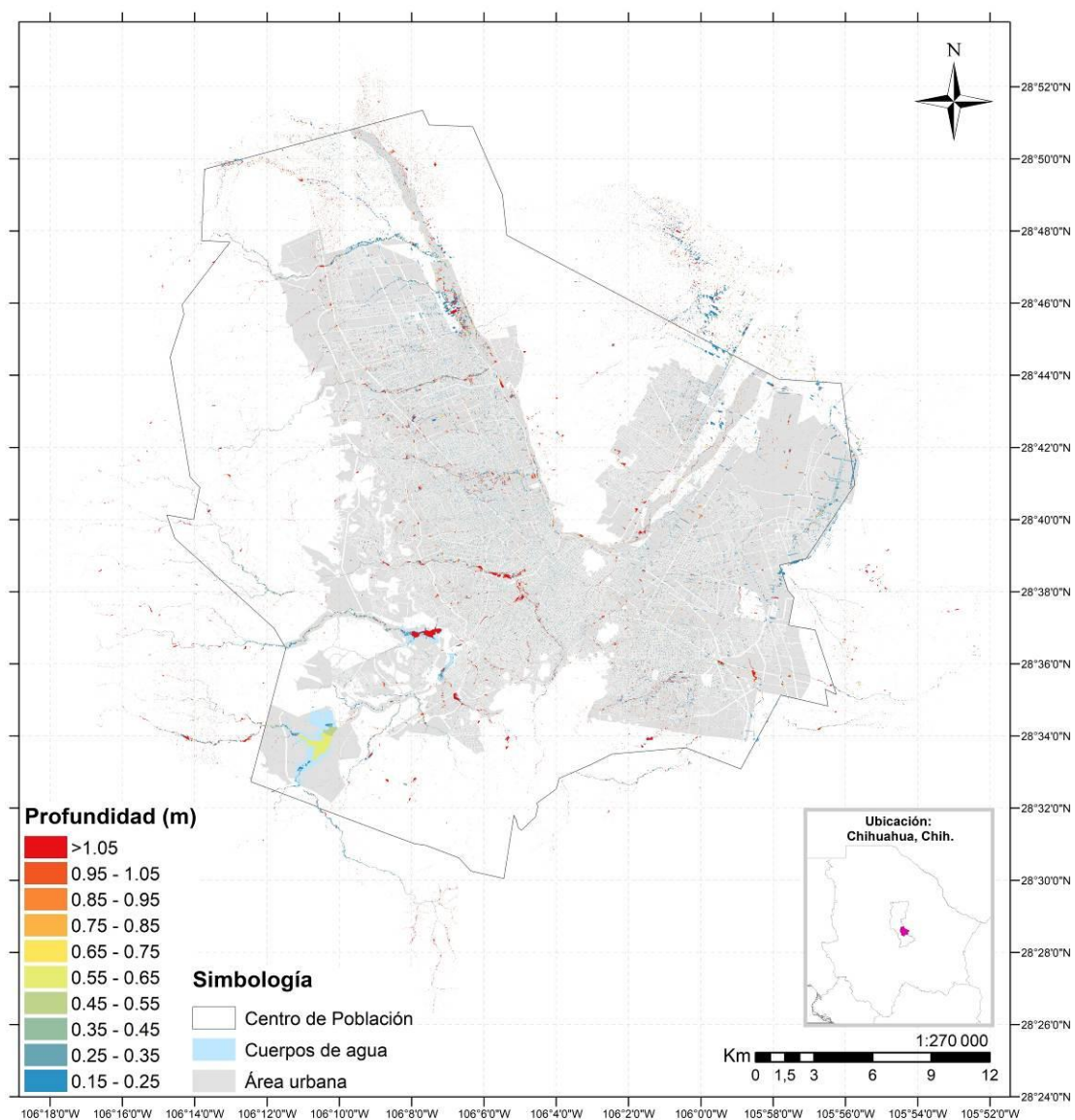


Figura 29. Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 230 minutos posteriores al evento de precipitación.

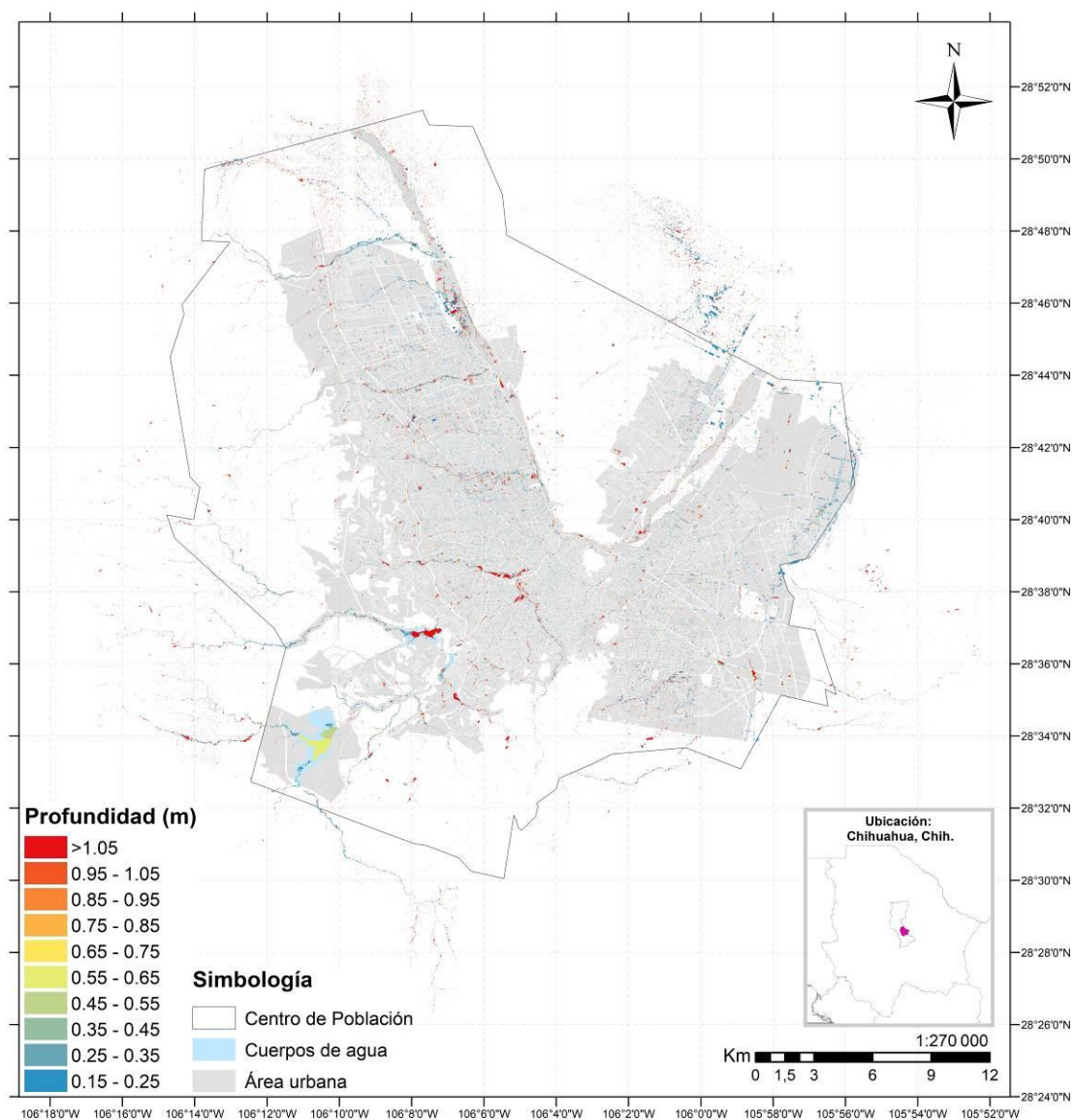


Figura 30. Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 240 minutos posteriores al evento de precipitación.

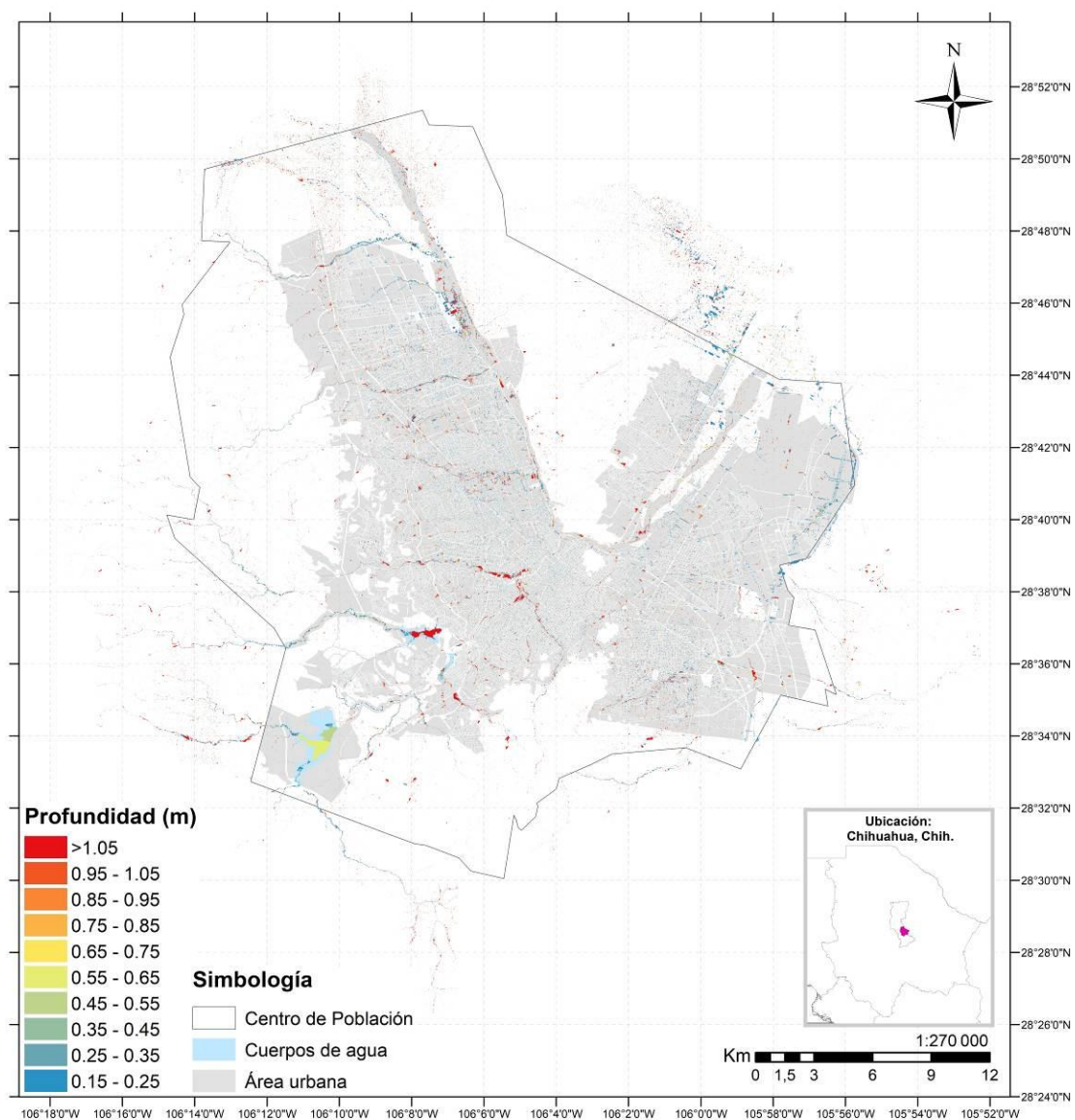


Figura 31. Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 250 minutos posteriores al evento de precipitación.

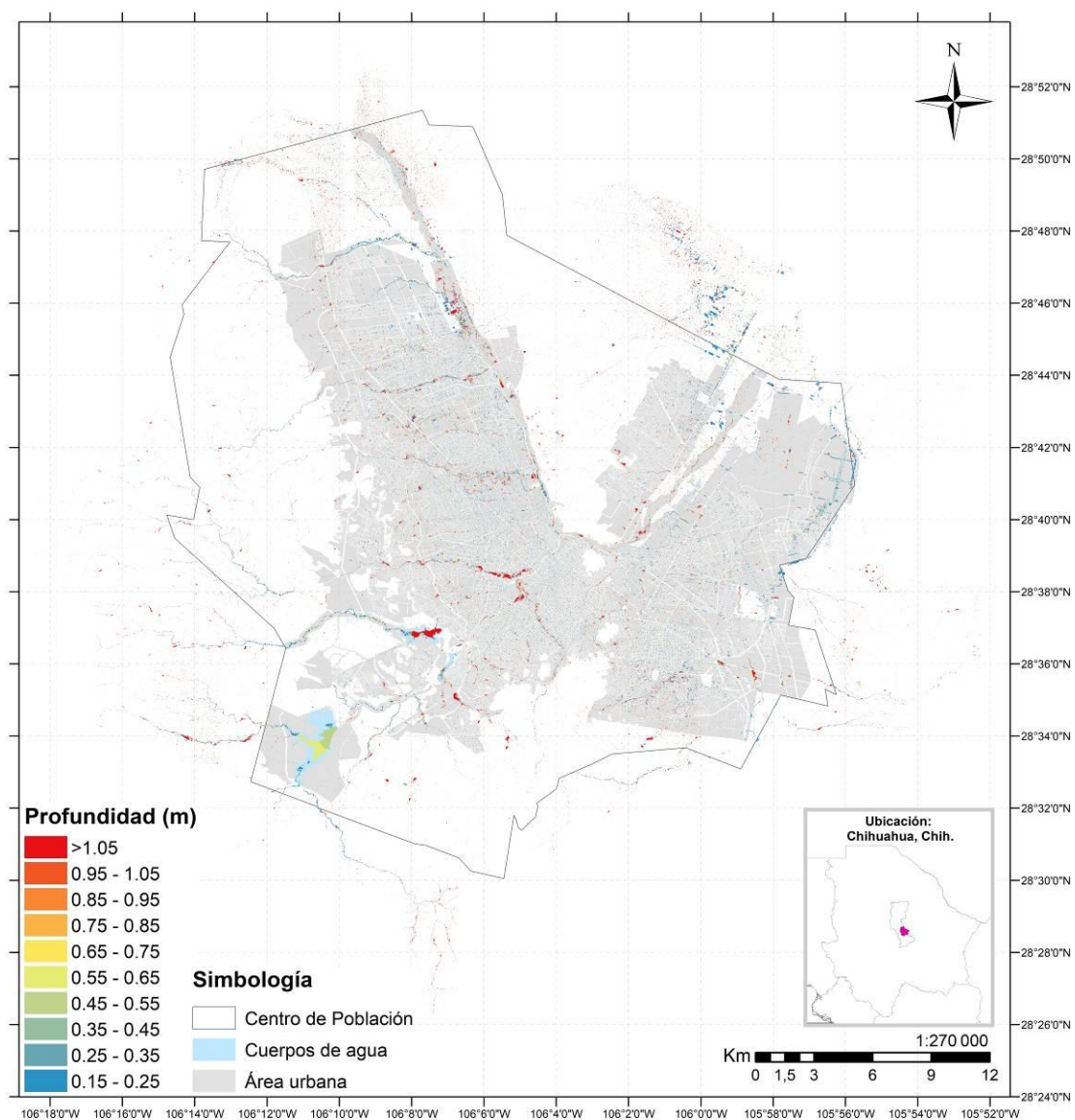


Figura 32. Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 260 minutos posteriores al evento de precipitación.

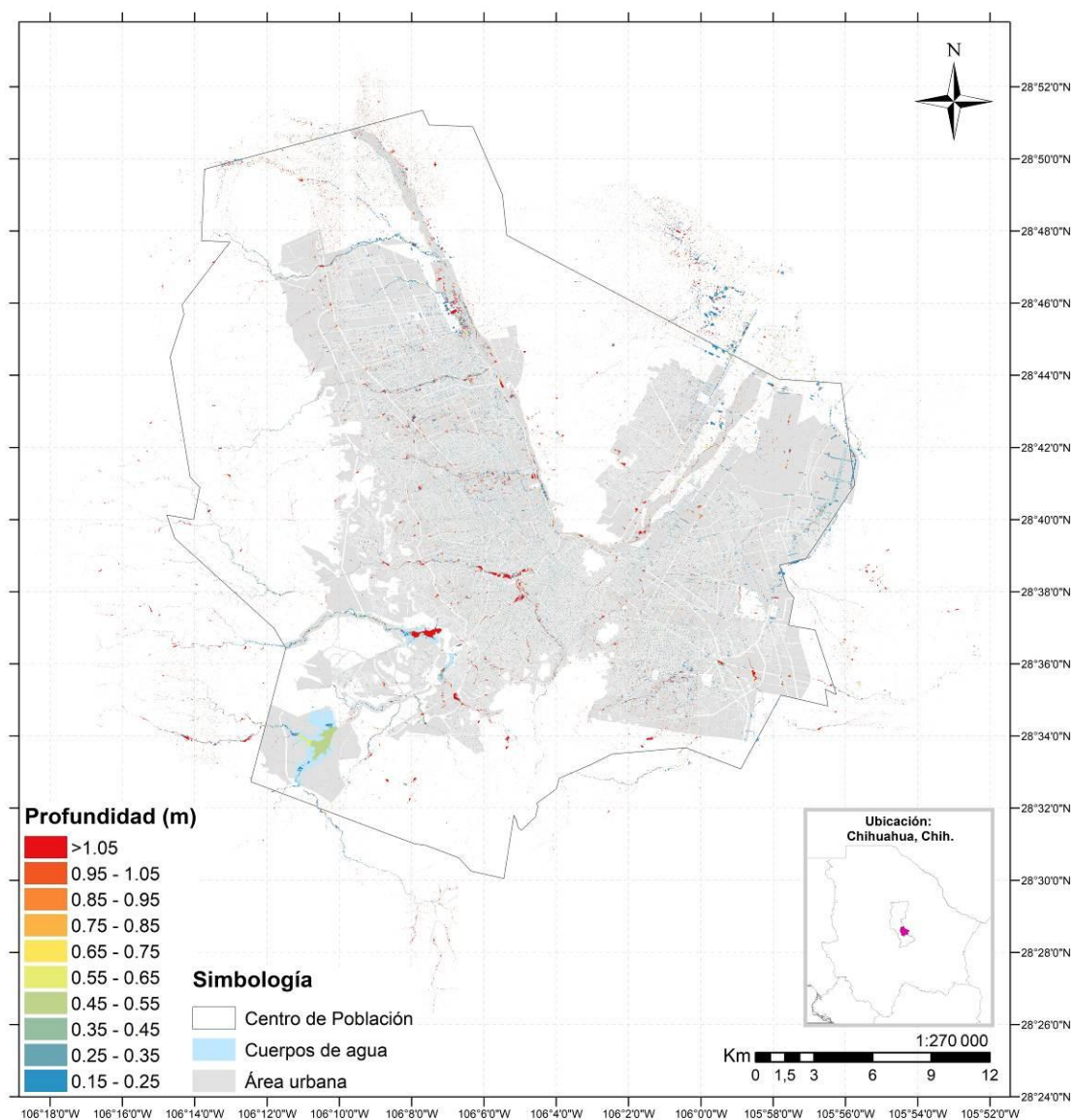


Figura 33. Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 270 minutos posteriores al evento de precipitación.

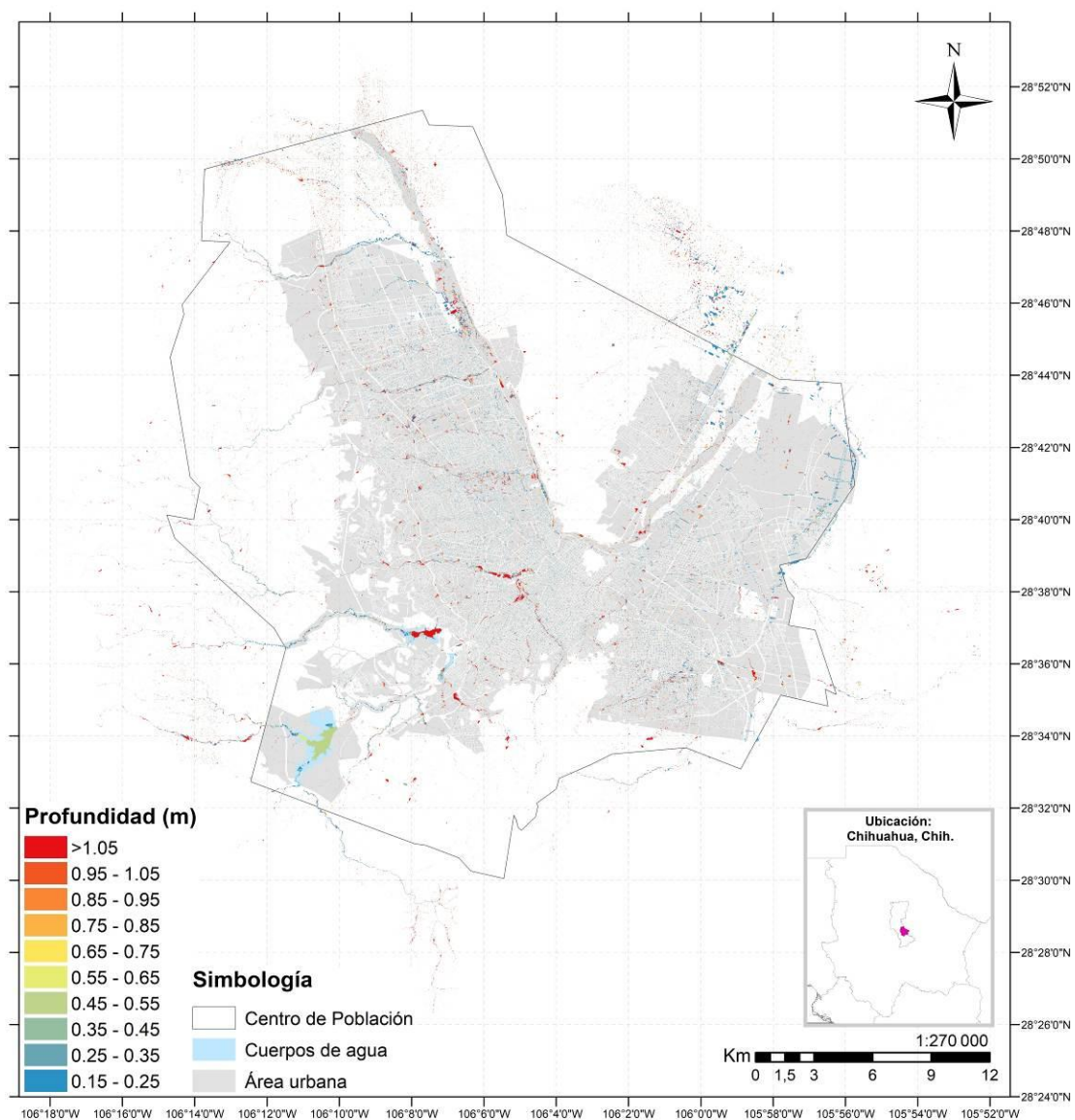


Figura 34. Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 280 minutos posteriores al evento de precipitación.

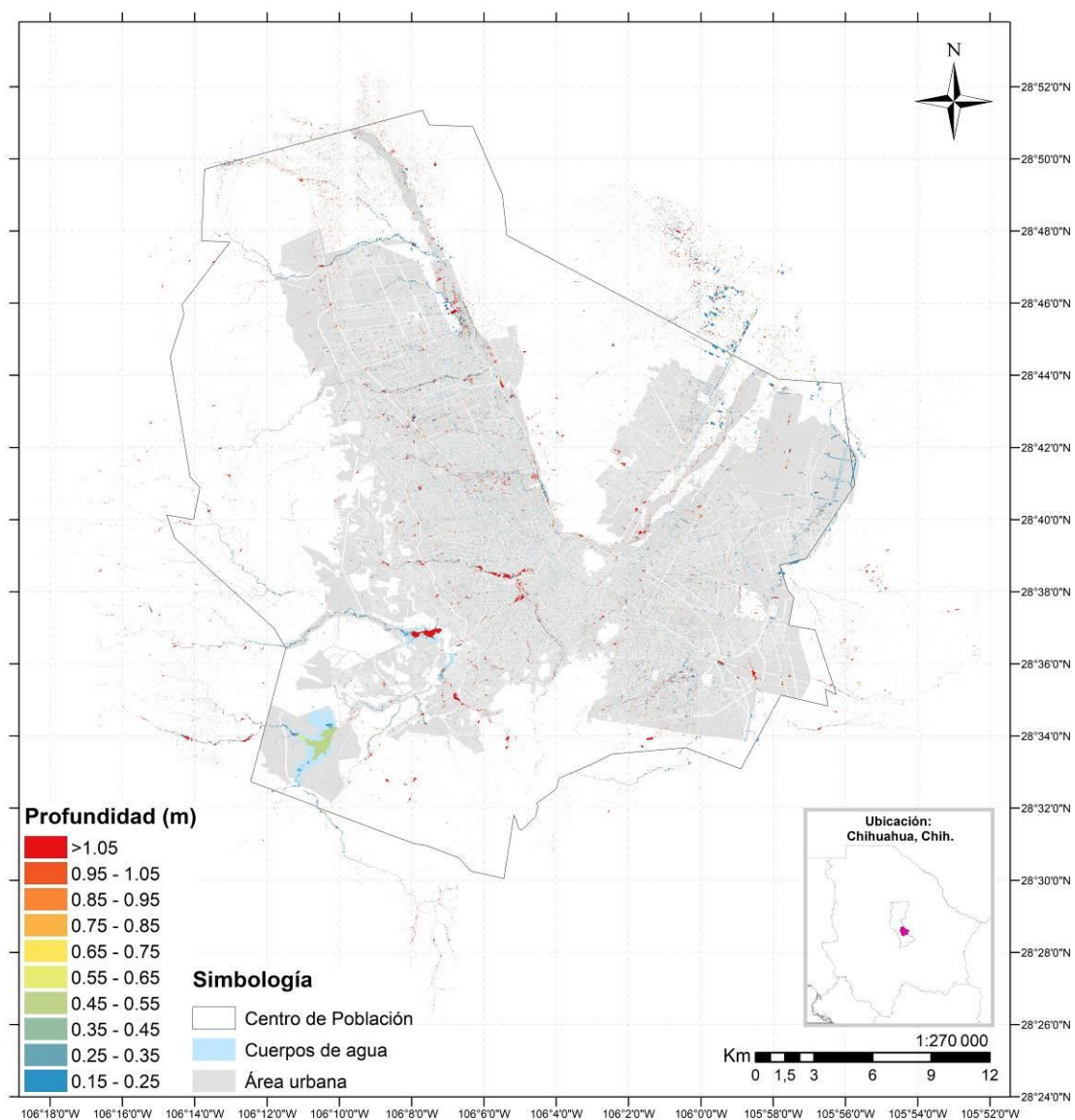


Figura 35. Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 290 minutos posteriores al evento de precipitación.

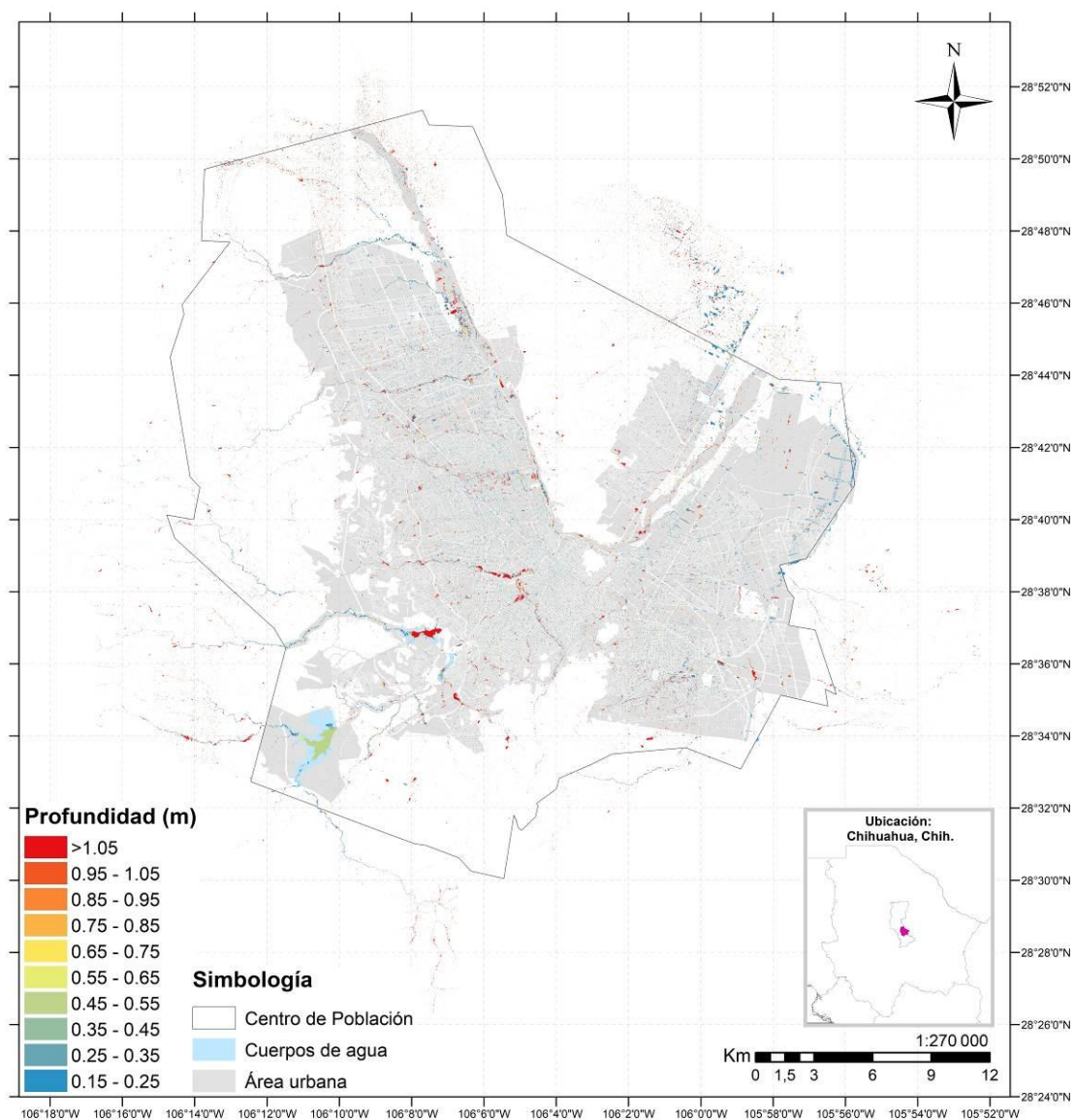


Figura 36. Mapa de inundación del centro de población de Chihuahua con 300 minutos posteriores al evento de precipitación.



Cuadro 1 Porcentajes de área ocupada por unidad de tiempo de precipitación para el centro de población de Chihuahua.

Colonia	Tiempo													
	20 min	30 min	40 min	50 min	60 min	10 min	20 min	30 min	50 min	60 min	70 min	90 min	110 min	120 min
20 Aniversario	1.5%	3.1%	4.8%	5.8%	6.7%	6.9%	7.0%	12.0%	34.9%	43.7%	46.0%	45.1%	41.4%	39.4%
22 De Septiembre	0.0%	1.9%	13.6%	16.4%	18.9%	18.9%	18.9%	18.9%	29.3%	54.3%	56.1%	56.1%	56.1%	54.3%
24 De Junio	1.5%	3.4%	5.6%	8.3%	9.2%	9.3%	9.3%	9.3%	13.0%	14.9%	18.7%	19.4%	19.0%	18.0%
Adriana	0.8%	1.0%	2.6%	8.0%	9.6%	10.8%	10.8%	11.0%	15.2%	21.0%	26.5%	31.2%	31.2%	31.2%
Agrícola Francisco Villa	0.3%	1.0%	1.2%	2.7%	5.4%	6.4%	6.7%	19.9%	35.3%	33.8%	27.4%	23.8%	18.4%	16.2%
Albino Mireles	1.6%	3.3%	4.8%	8.3%	8.7%	10.0%	9.6%	10.5%	10.5%	10.5%	10.5%	10.5%	38.0%	51.5%
Almacenes Ind.	1.1%	3.4%	5.2%	6.3%	6.6%	11.4%	11.4%	11.4%	11.4%	11.4%	11.4%	11.4%	11.4%	11.4%
Anexo Santa Rosa Norte	1.9%	2.4%	4.4%	4.6%	5.7%	5.7%	5.7%	5.7%	26.0%	26.2%	25.3%	25.1%	22.6%	19.7%
Área Cerril	2.5%	5.0%	5.4%	8.0%	27.2%	27.7%	28.2%	28.0%	27.9%	27.8%	27.4%	26.4%	25.6%	24.4%
Arquitos	3.5%	4.4%	5.8%	6.1%	7.2%	7.4%	7.4%	7.4%	7.4%	7.4%	7.4%	7.4%	7.4%	12.4%
Atanasio Ortega	1.9%	3.9%	8.2%	8.8%	9.7%	9.7%	9.9%	9.9%	10.0%	10.0%	57.2%	57.6%	56.8%	55.1%
Atenas III	0.7%	2.3%	3.1%	3.1%	3.7%	3.7%	3.7%	3.7%	3.7%	3.7%	3.7%	3.7%	3.7%	40.0%
Atenas V	1.7%	3.8%	5.7%	6.5%	7.1%	7.1%	7.1%	7.1%	7.1%	7.1%	7.3%	7.3%	26.4%	36.5%
Barrio San Pedro	1.5%	3.2%	5.6%	7.3%	8.7%	8.7%	8.7%	8.7%	8.7%	8.7%	8.7%	8.7%	15.1%	17.2%
Bosques de San Pedro	1.2%	1.9%	2.8%	3.4%	4.6%	7.8%	32.8%	43.0%	53.9%	56.0%	55.0%	53.1%	47.0%	44.2%
C.T.M.	1.9%	3.4%	5.2%	6.1%	6.7%	6.7%	6.7%	6.7%	6.7%	6.7%	6.7%	6.7%	8.4%	14.3%



C.T.M. (Ortiz)	1.5%	2.8%	5.0%	7.1%	10.6%	10.8%	10.8%	10.8%	11.1%	11.1%	11.1%	11.1%	23.2%	24.5%
Campo Bello III	1.7%	4.3%	16.9%	33.1%	39.1%	40.4%	40.5%	39.8%	37.5%	34.8%	30.5%	29.1%	24.7%	22.7%
Campo Bello IV	3.1%	3.9%	5.6%	17.9%	32.8%	38.4%	39.3%	37.4%	27.4%	21.1%	15.1%	11.8%	10.1%	9.8%
Casa Blanca	1.3%	3.5%	5.5%	7.2%	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%	23.6%	27.3%	27.3%	27.0%	23.6%	23.6%
Cerro Alto	0.3%	8.9%	8.9%	24.8%	25.1%	25.7%	42.9%	42.9%	42.9%	42.6%	42.0%	42.0%	26.3%	26.0%
Chihuahua 2000 I	1.3%	2.6%	3.9%	7.1%	8.3%	8.3%	8.3%	8.5%	8.5%	8.5%	36.2%	37.8%	37.0%	35.7%
Chihuahua 2000 II	1.3%	3.3%	4.3%	6.1%	8.1%	8.4%	8.4%	8.4%	8.4%	8.4%	34.1%	45.4%	49.0%	48.1%
Chihuahua 2000 III (2000-94)	1.3%	3.6%	5.1%	6.3%	7.4%	7.4%	7.4%	7.4%	7.4%	7.4%	7.8%	26.0%	28.8%	26.1%
Colinas del Valle	1.0%	1.9%	2.4%	2.5%	2.7%	4.7%	4.6%	11.0%	14.3%	14.3%	14.2%	14.2%	12.7%	12.5%
Condominio Com. Tres Vías	1.2%	3.4%	3.6%	5.4%	5.5%	7.2%	7.2%	7.2%	14.5%	14.5%	14.5%	14.5%	14.5%	14.5%
Cuauhtémoc	1.6%	3.0%	5.3%	6.4%	7.3%	7.6%	7.6%	7.5%	7.5%	7.5%	9.8%	16.5%	25.5%	29.5%
Dale	1.6%	3.4%	5.4%	7.1%	9.2%	11.0%	13.0%	18.6%	25.4%	25.8%	24.7%	23.3%	21.2%	20.1%
Deportistas	1.8%	3.8%	5.6%	6.1%	7.6%	7.7%	7.7%	9.6%	23.4%	24.9%	26.7%	25.3%	22.9%	22.3%
El Mineral I	1.0%	1.7%	2.5%	3.4%	3.6%	3.7%	3.7%	3.7%	3.7%	3.7%	3.7%	3.7%	19.1%	54.0%
El Palomar	0.9%	2.4%	3.7%	5.6%	7.8%	8.0%	8.0%	8.0%	8.0%	8.0%	8.0%	8.0%	8.0%	8.0%
Emiliano Zapata	1.9%	3.2%	6.1%	7.0%	7.7%	7.8%	8.0%	8.5%	8.5%	8.5%	8.5%	11.3%	31.9%	39.6%
Encordada del Valle	3.6%	16.8%	34.2%	68.9%	74.7%	74.8%	72.6%	67.1%	56.8%	49.6%	46.3%	44.8%	40.7%	37.8%
Encordada del Valle III	0.9%	0.9%	0.9%	13.7%	14.2%	14.1%	14.1%	14.0%	14.0%	9.2%	6.5%	6.5%	6.5%	6.5%
Fidel Velázquez	3.1%	9.0%	15.0%	17.3%	17.3%	17.3%	17.3%	17.3%	42.8%	63.6%	63.6%	63.6%	60.5%	59.7%



Francisco R. Almada	2.7%	4.3%	7.6%	9.9%	13.8%	22.0%	27.3%	27.6%	28.1%	26.7%	22.8%	21.3%	18.6%	17.9%
Francisco Villa	1.5%	3.4%	5.3%	7.3%	9.0%	9.0%	9.0%	9.0%	9.0%	11.6%	23.9%	27.3%	28.1%	27.7%
Gloria	1.3%	3.3%	5.9%	8.6%	10.3%	10.3%	10.4%	10.4%	10.4%	10.4%	12.6%	15.3%	21.0%	22.4%
Granjas Cerro Grande	1.5%	3.7%	5.4%	6.4%	8.1%	8.9%	8.9%	9.0%	15.3%	19.8%	25.9%	26.1%	23.9%	22.7%
Granjas del Valle	0.7%	1.7%	2.6%	3.5%	3.9%	8.8%	16.1%	18.1%	16.5%	14.6%	11.5%	10.3%	8.1%	7.3%
Gustavo Díaz Ordaz	4.3%	12.0%	12.6%	21.1%	21.9%	21.4%	29.3%	30.3%	29.0%	29.0%	27.9%	25.8%	21.4%	21.2%
Huerta Legarreta	1.0%	1.8%	3.3%	3.5%	3.9%	4.2%	4.2%	4.2%	4.2%	4.2%	4.2%	34.7%	64.1%	64.2%
Ignacio Allende	2.3%	3.7%	6.0%	7.0%	11.0%	22.7%	32.8%	35.2%	35.2%	34.2%	31.2%	30.7%	29.3%	28.1%
Ind. Nombre De Dios	1.6%	3.2%	4.2%	5.1%	6.4%	6.5%	6.6%	7.4%	7.5%	7.5%	7.5%	7.5%	7.5%	8.1%
Insurgentes Etapa I	1.7%	3.4%	4.8%	6.1%	6.9%	6.9%	25.8%	37.7%	40.6%	40.1%	38.9%	37.1%	33.1%	30.5%
Insurgentes Etapa II	1.3%	3.8%	5.5%	6.6%	9.2%	9.3%	13.8%	18.8%	25.4%	25.1%	22.4%	20.2%	18.0%	17.2%
Jardines del Norte	1.5%	3.3%	5.0%	7.7%	10.1%	10.2%	10.2%	10.2%	10.3%	10.3%	10.3%	11.5%	18.9%	21.8%
José Francisco Ruiz Massieu	1.4%	3.3%	3.8%	5.4%	7.1%	7.1%	6.8%	6.3%	6.3%	6.3%	6.3%	27.5%	58.3%	57.6%
Juan Escutia	1.5%	3.7%	5.0%	8.6%	10.3%	10.3%	10.3%	10.3%	10.3%	10.3%	10.3%	10.3%	10.3%	10.4%
La Fe	1.9%	2.0%	2.4%	2.4%	2.4%	6.3%	6.3%	6.3%	6.3%	15.3%	31.1%	31.1%	31.1%	31.1%
La Lomita	7.2%	8.6%	9.7%	9.7%	11.9%	11.9%	11.9%	11.9%	11.9%	11.9%	11.9%	11.9%	18.0%	20.9%
Labor de Terrazas	0.4%	1.8%	4.6%	6.4%	9.0%	12.0%	17.5%	19.7%	20.0%	19.4%	18.0%	17.0%	14.7%	13.6%
Ladrilleros	1.4%	3.7%	10.0%	14.1%	24.3%	29.5%	31.0%	31.2%	28.8%	27.7%	25.1%	24.5%	20.2%	19.0%



Ladrilleros Norte	0.0%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	1.9%	33.9%	36.0%	35.1%	34.2%
Las Animas	1.8%	3.2%	4.2%	6.5%	8.5%	13.4%	21.1%	23.7%	26.4%	28.1%	31.4%	31.3%	31.3%	31.2%
Las Lunas	1.0%	2.8%	11.7%	15.4%	21.5%	34.1%	34.6%	36.2%	45.4%	45.4%	45.4%	42.5%	37.3%	37.3%
Residencial Etapa I														
Las Lunas														
Residencial Etapa II	2.6%	4.2%	8.5%	8.9%	9.4%	12.2%	12.2%	12.2%	13.2%	13.2%	13.2%	13.2%	12.2%	12.2%
Las Lunas														
Residencial Etapa III	1.1%	1.1%	4.6%	6.2%	8.5%	10.2%	10.2%	11.2%	17.0%	19.2%	14.4%	13.1%	11.2%	10.2%
Las Misiones	1.2%	3.2%	4.8%	7.9%	9.2%	11.3%	24.4%	30.9%	33.3%	33.2%	32.5%	33.1%	41.8%	42.8%
Localidad La Cantera	2.2%	4.9%	10.8%	14.2%	17.5%	22.1%	28.3%	27.9%	28.3%	28.0%	24.0%	22.3%	20.1%	19.1%
Lomas San José	1.0%	3.5%	4.9%	7.1%	8.9%	8.9%	8.9%	8.9%	50.3%	50.3%	50.0%	49.8%	47.9%	46.9%
Los Arroyos	1.5%	2.6%	5.5%	7.8%	10.5%	21.0%	30.3%	30.4%	32.3%	32.8%	32.1%	31.4%	30.8%	30.5%
Los Arroyos II	2.1%	3.4%	3.9%	4.9%	5.1%	5.1%	23.2%	23.2%	26.1%	27.2%	25.9%	24.3%	23.6%	23.2%
Los Llanos	1.4%	4.2%	5.6%	7.4%	8.4%	8.4%	8.4%	8.4%	8.4%	8.4%	10.8%	16.0%	20.2%	20.1%
Niños Héroes	1.4%	3.6%	3.8%	4.8%	6.1%	6.1%	6.1%	6.1%	6.1%	6.1%	6.1%	6.1%	10.7%	12.6%
Nombre de Dios	1.2%	2.0%	3.7%	4.8%	5.7%	5.7%	5.7%	5.1%	5.1%	5.1%	5.1%	5.1%	5.1%	5.1%
Nuevo Triunfo	1.5%	2.9%	4.6%	6.8%	7.9%	8.6%	8.6%	8.6%	9.3%	9.3%	9.3%	9.3%	28.9%	30.8%
Pacífico	1.8%	3.8%	5.6%	6.9%	8.0%	8.1%	8.2%	8.2%	13.2%	21.4%	26.6%	26.1%	25.0%	24.0%
Panteón J. Eternos														
San José	1.1%	2.2%	3.3%	3.9%	4.9%	4.9%	5.0%	5.0%	20.1%	39.1%	40.0%	38.8%	34.7%	32.5%



Paseos de Chihuahua	1.4%	2.4%	7.2%	7.9%	9.2%	9.1%	9.1%	9.9%	24.0%	35.4%	39.1%	38.1%	37.5%	37.0%
Progreso	1.4%	2.7%	4.0%	4.7%	6.9%	7.0%	7.1%	7.1%	12.3%	24.0%	43.5%	45.6%	46.2%	45.4%
Puente De Cantera VI	8.9%	11.5%	39.1%	39.8%	39.8%	39.1%	34.6%	29.7%	16.0%	14.5%	13.8%	13.8%	13.8%	11.5%
Puente de Piedra Etapa I	1.3%	1.8%	1.8%	3.3%	20.3%	22.2%	20.4%	18.5%	14.0%	12.6%	12.2%	12.2%	11.8%	11.5%
Puente de Piedra Etapa II	3.7%	6.2%	8.1%	21.0%	42.0%	42.5%	41.2%	38.4%	30.4%	27.7%	23.9%	23.3%	22.8%	21.7%
Puerta del Norte	4.6%	7.4%	9.2%	11.6%	40.5%	64.7%	67.1%	68.4%	62.8%	60.3%	56.5%	53.9%	51.9%	50.9%
Ramón Mena	0.8%	1.0%	1.2%	5.3%	5.3%	5.3%	5.3%	5.3%	5.3%	5.3%	5.3%	8.2%	31.8%	34.8%
Rancho las Escobas	0.7%	2.2%	3.3%	8.8%	18.3%	28.1%	36.2%	35.3%	31.2%	27.7%	25.3%	24.8%	22.8%	20.9%
Real De Minas	1.0%	2.3%	3.8%	4.5%	4.8%	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%	59.0%	60.4%
Recursos Hidráulicos	1.8%	3.9%	6.0%	7.5%	8.6%	9.0%	8.9%	15.7%	33.8%	35.2%	37.6%	35.9%	32.7%	32.1%
Reforma II	5.1%	6.8%	7.2%	7.5%	10.2%	17.0%	17.0%	21.0%	21.7%	21.0%	20.4%	20.4%	17.7%	17.0%
Renovación	1.3%	3.2%	3.7%	4.7%	6.8%	7.3%	7.6%	20.0%	28.7%	28.5%	26.5%	24.5%	21.5%	19.2%
Res. Campestre III	2.7%	3.5%	5.9%	7.8%	8.9%	8.9%	10.4%	10.4%	25.5%	26.9%	31.6%	31.6%	31.3%	31.2%
Res. Campestre Washington	1.9%	4.5%	6.3%	6.4%	6.8%	7.6%	7.7%	7.7%	24.3%	24.6%	25.0%	24.4%	24.0%	23.8%
Residencial Campestre I	1.7%	3.0%	4.9%	6.8%	8.4%	8.5%	8.9%	8.9%	9.5%	9.8%	12.8%	19.4%	24.7%	24.7%



Residencial Cumbres Vi	1.6%	5.9%	9.1%	11.0%	14.1%	18.8%	47.7%	62.1%	67.5%	67.3%	65.6%	63.6%	54.0%	52.5%
Riberas del Sacramento II	0.6%	1.8%	2.1%	3.3%	3.4%	3.8%	24.5%	43.4%	38.0%	32.4%	25.6%	23.3%	18.3%	16.3%
Riberas Del Sacramento III	0.8%	1.9%	2.7%	3.2%	4.0%	4.1%	4.9%	10.7%	10.3%	11.6%	11.2%	10.2%	8.4%	7.2%
Rigoberto Quiroz	1.8%	3.7%	5.2%	5.6%	5.6%	5.6%	5.6%	5.6%	5.9%	5.9%	5.9%	5.9%	5.9%	5.9%
Rincón de los Huertos	1.3%	2.0%	3.1%	10.7%	24.0%	32.7%	33.6%	34.6%	30.8%	27.1%	18.8%	17.2%	14.8%	13.7%
Rincones San Andrés	0.8%	1.8%	5.6%	6.3%	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%	16.0%	23.6%
Roberto Orozco	0.2%	1.2%	1.4%	1.8%	4.9%	6.8%	8.7%	11.8%	20.1%	25.1%	34.1%	38.5%	39.6%	45.1%
Rodolfo Fierro	1.8%	3.7%	6.1%	7.7%	8.3%	8.7%	9.0%	9.0%	9.0%	15.3%	29.0%	36.8%	36.5%	35.2%
Roma Quintas Quijote I	1.1%	2.7%	4.5%	5.2%	6.0%	6.0%	6.0%	6.0%	6.0%	8.3%	39.1%	39.1%	37.7%	36.2%
Roma Quintas Quijote III	1.3%	2.1%	2.7%	3.1%	3.9%	3.8%	3.9%	4.1%	4.1%	19.6%	40.4%	41.5%	38.3%	37.7%
Rosario	1.8%	3.2%	4.9%	6.3%	6.9%	7.1%	7.6%	8.3%	23.4%	24.0%	23.2%	20.0%	19.2%	18.4%
San Felipe Viejo	1.4%	3.3%	4.8%	7.8%	9.1%	9.8%	9.9%	9.9%	9.9%	9.9%	9.9%	9.9%	9.9%	9.9%
San José	0.9%	4.1%	5.4%	6.6%	8.3%	8.4%	8.5%	8.5%	34.2%	39.5%	37.2%	34.8%	28.8%	23.9%
Santa Rita	1.4%	2.6%	4.6%	6.8%	9.5%	9.5%	9.5%	9.5%	9.5%	9.5%	26.4%	27.9%	26.9%	25.7%
Santa Rosa Norte	1.2%	1.8%	4.1%	5.4%	7.5%	7.2%	7.2%	7.2%	46.2%	46.4%	46.1%	45.3%	42.9%	33.1%
Secretaria de la Marina	1.5%	3.5%	4.8%	6.8%	10.0%	14.3%	21.8%	22.1%	21.3%	19.8%	17.7%	16.8%	15.1%	14.8%



Sergio De La Torre Hdez.	1.5%	2.8%	3.9%	4.8%	5.3%	5.4%	5.2%	5.2%	5.2%	5.2%	5.2%	19.8%	34.9%	34.1%
Smart	0.2%	0.4%	0.6%	1.3%	1.7%	1.7%	1.7%	1.7%	1.7%	10.6%	11.6%	11.1%	11.1%	10.6%
Toribio Ortega	1.1%	2.8%	5.6%	7.1%	8.3%	8.3%	8.3%	8.3%	8.3%	8.4%	8.4%	8.5%	14.4%	18.0%
Torres Rey	1.0%	2.1%	2.7%	4.2%	4.6%	4.6%	4.6%	4.6%	5.4%	10.4%	11.5%	11.5%	11.5%	10.4%
Unidad Proletaria	1.5%	4.4%	6.0%	8.5%	12.7%	13.3%	17.4%	21.5%	23.5%	22.5%	18.6%	18.1%	16.6%	16.0%
Universidad Autónoma de Chih. Campus II	1.5%	3.2%	4.8%	6.6%	8.2%	8.3%	15.2%	28.9%	32.6%	30.8%	27.9%	26.6%	23.7%	22.1%
Universitario	2.0%	4.1%	5.9%	11.6%	15.7%	16.7%	17.1%	17.7%	16.7%	15.7%	15.2%	14.9%	14.3%	14.2%
Valle de San Pedro	1.0%	1.4%	5.8%	7.6%	13.4%	15.7%	13.0%	11.7%	24.6%	24.7%	24.7%	24.7%	15.0%	15.0%
Valle de San Pedro III Etapa I	1.3%	4.3%	8.9%	10.0%	12.7%	15.1%	15.5%	16.2%	19.4%	19.6%	18.3%	18.2%	16.4%	15.3%
Valle Dorado	1.9%	3.5%	5.3%	7.3%	8.5%	9.1%	9.3%	9.3%	9.3%	9.5%	9.5%	9.5%	9.5%	9.5%
Vicente Guerrero	2.1%	3.8%	5.2%	5.9%	7.0%	7.0%	7.0%	7.0%	7.0%	7.0%	7.0%	7.0%	8.7%	10.6%
Villa Dorada	1.9%	2.1%	4.9%	6.9%	9.3%	13.0%	15.2%	15.2%	15.2%	15.2%	13.0%	13.0%	13.0%	11.9%
Vista Hermosa	1.6%	4.1%	5.1%	6.4%	7.1%	7.1%	7.1%	7.1%	7.1%	7.1%	7.1%	7.1%	15.1%	16.7%
Vista Hermosa Norte	2.9%	3.6%	7.4%	7.7%	9.5%	9.5%	9.5%	9.5%	9.5%	9.5%	9.5%	9.5%	9.5%	9.5%
Vistas Cerro Grande	1.5%	3.5%	5.2%	7.6%	8.3%	8.5%	12.4%	16.9%	18.3%	17.8%	17.0%	16.9%	16.4%	16.3%
Vistas del Prado Etapa I	1.6%	2.9%	4.8%	6.4%	6.9%	20.4%	43.3%	48.3%	42.1%	38.9%	33.6%	29.9%	23.8%	21.1%



Vistas del Prado	0.3%	0.7%	2.4%	2.6%	3.0%	2.8%	18.4%	39.0%	48.1%	45.2%	33.5%	26.8%	20.6%	17.7%
Etapla II														
Zona Centro	1.8%	4.0%	6.6%	7.8%	9.7%	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%	14.7%	18.8%	21.3%	20.9%

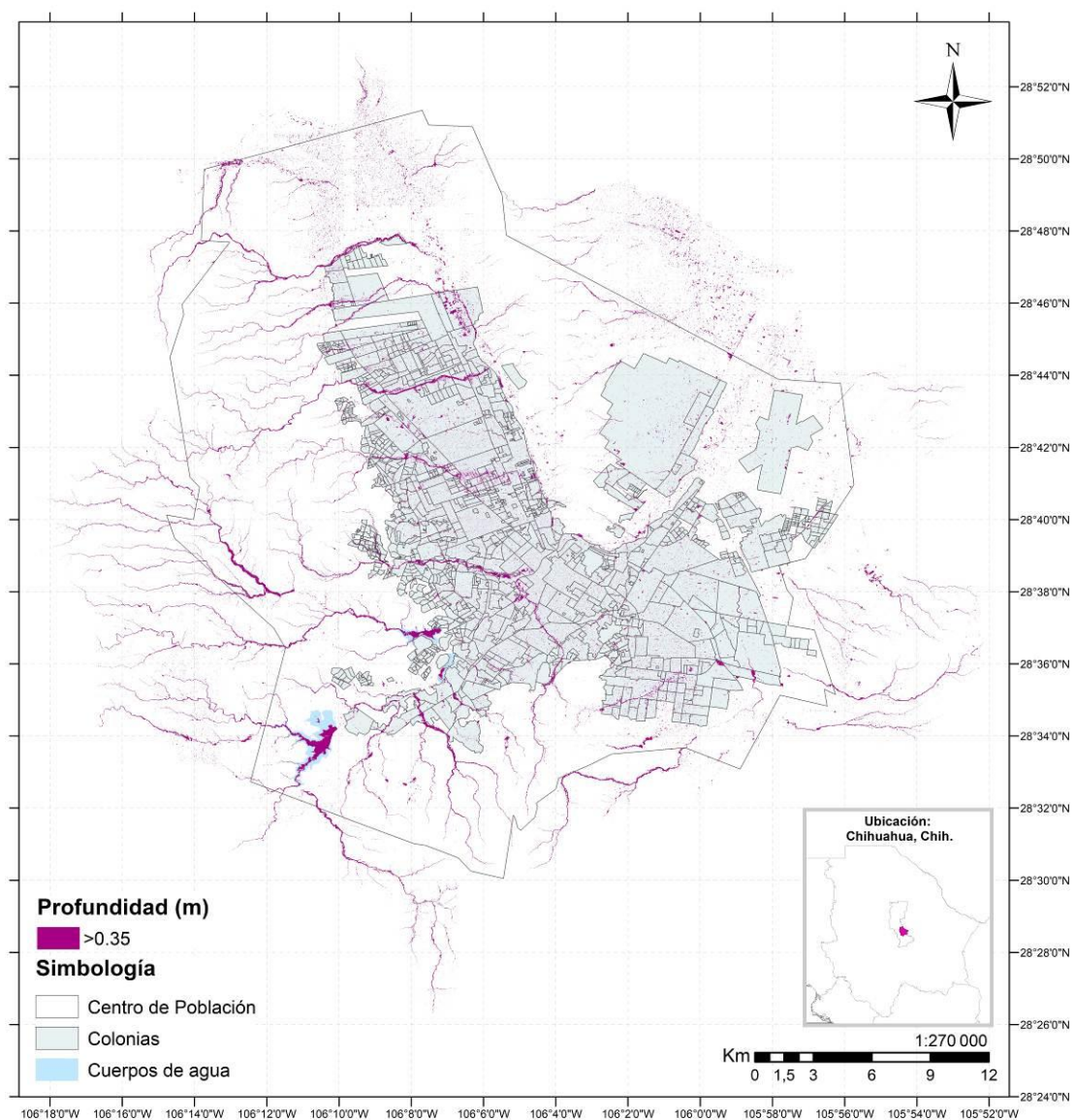


Figura 37. Mapa de las zonas de mayor riesgo a inundación y colonias en el centro de población de Chihuahua.

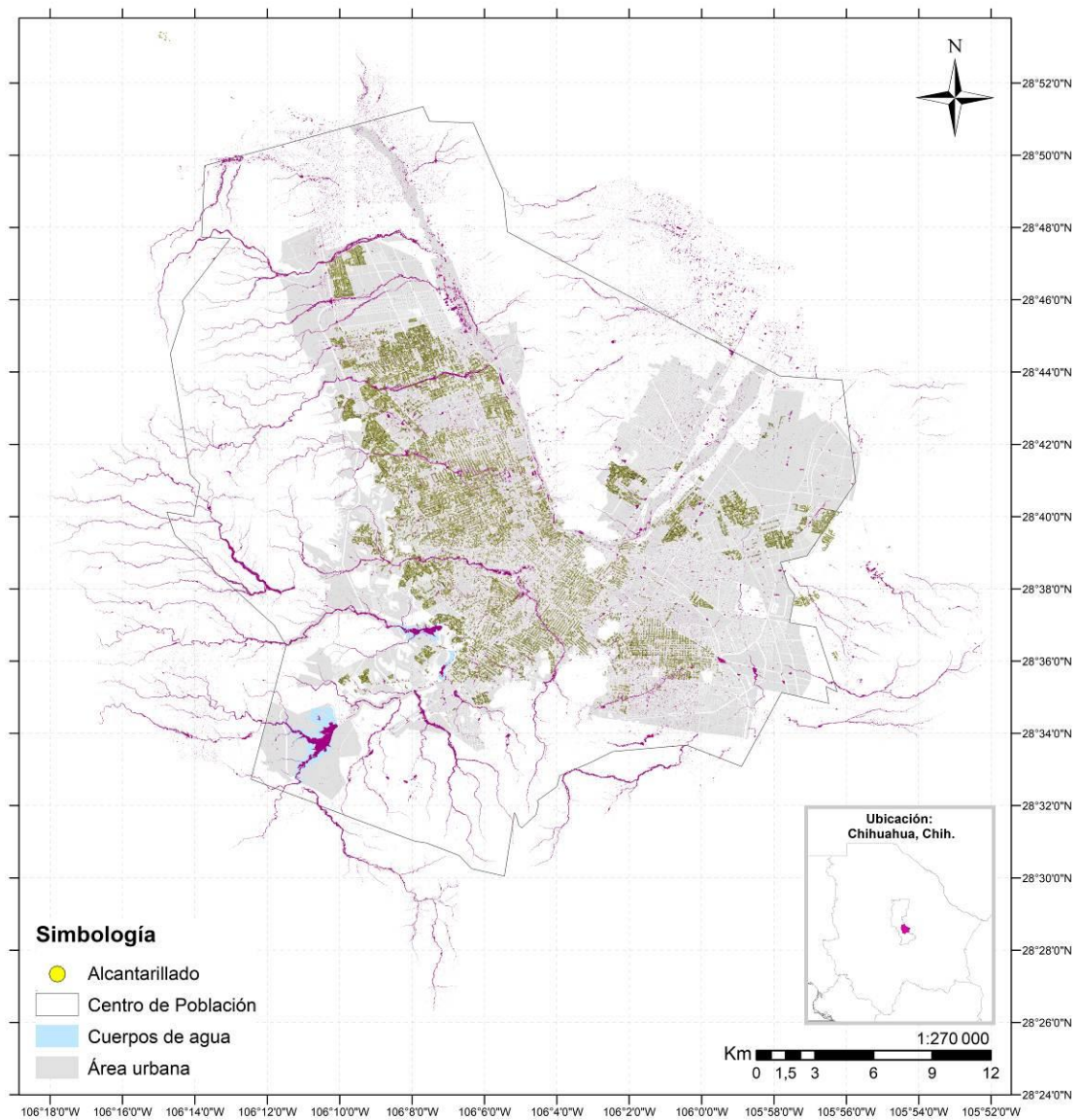


Figura 38. Mapa de las zonas de mayor riesgo a inundación y alcantarillado en el centro de población de Chihuahua.

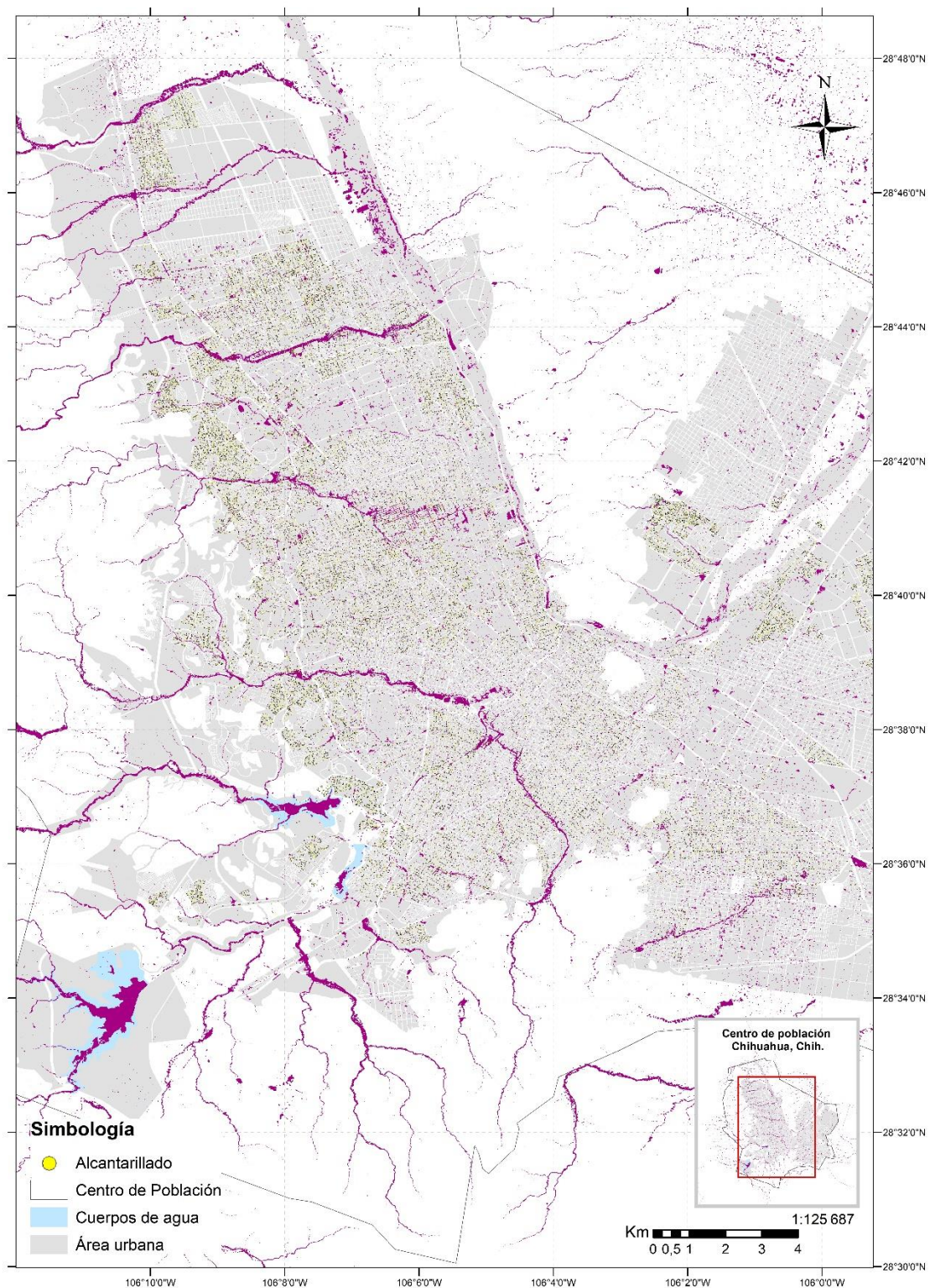


Figura 39. Acercamiento de las zonas de mayor riesgo a inundación y alcantarillado en el centro de población de Chihuahua.

