



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

CENTRO DE INVESTIGACIONES EN GEOGRAFÍA AMBIENTAL

FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS

**CAMBIO EN LA AMENAZA DE INUNDACIÓN EN CUATRO
SUBCUENCAS DEL SUR DE LA CIUDAD DE MORELIA,
MICHOACÁN, 1995-2050**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN GEOGRAFÍA

P R E S E N T A:

YUNUEN REYGADAS LANGARICA

ASESOR: M. EN C. LUIS MIGUEL MORALES MANILLA



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

A la UNAM porque, al abrirme las puertas de sus aulas, me abrió un universo de posibilidades, desnudó el mundo ante mis ojos, me invitó a explorar culturas y fisiografías y me enseñó el sabor del orgullo universitario.

A mi asesor M. en C. Luis Miguel Morales porque siempre me orientó, muchas veces me mostró la luz y me soportó en todos los estados de ánimo que una tesis puede provocar. A los miembros del sínodo Dr. Manuel Bollo, M. en C. José Antonio Navarrete, Dr. Peter Hasdenteufel y M. en Geogr. Miguel Ángel Backhoff por sus valiosas observaciones con respecto a esta investigación.

A mi madre, Martha Langarica, porque, con el ejemplo, me ha mostrado el significado de la responsabilidad, la constancia y el esfuerzo; me ha impulsado a alcanzar objetivos y cosechar éxitos; pero lo más importante es que, a través de su apoyo e infinito amor, me ha enseñado la cura para los tropiezos. A mi padre, Efrain Reygadas, porque sin necesidad de palabras siempre siento su cobijo y sé que siempre está dispuesto a apoyarme o a quitar obstáculos de mi camino.

A mi hermana, Yoatzin, porque si hay alguien que muestre interés en mis locuras es ella, además, durante esta etapa, junto con Carlos, me regaló a Iker, un motivo casi increíble para seguir adelante.

A mis abuelos, tíos y primos porque, durante estos dos años, siempre estuvieron al pendiente de mi desde la distancia.

A Aldo Becerril por ser mi motor, porque desde que tomé las maletas para estudiar este posgrado me apoyó en todos los sentidos, porque sé que a cada paso que doy tengo su respaldo y porque junto a él ninguna dificultad es grande.

A Trina porque sin importar el tiempo o la distancia, de una u otra manera está ahí, apoyándome y confirmando que somos pilares una de la otra.

A Ana Fernández porque no imagino haber cursado este posgrado sin su presencia, fuimos cómplices, consejeras y lo más importante es que compartimos un espacio con olor a hogar, sinceramente, muchas gracias Ana...

A Cynthia porque siempre tiene una palabra de aliento que me reconforta; a Paco por el apoyo incondicional y porque siempre me dibuja una sonrisa; a Beto, simplemente, por estar.

A mis compañeros de maestría Ana, Yuri, Camilo, Carlos, Gerardo, Lupita, Avelardo y Bety porque con su presencia hicieron de esta maestría una de las mejores etapas de mi vida.

A Alejandro, Raquel y Magi porque le dieron el toque de diversión a mis días de trabajo en el laboratorio de análisis espacial del CIGA.

A mis amigos de toda la vida Cynthia, Trina, Daniela, Isaura, Aldo, Marco, Javier, Antonio, David, Felipe y Hugo porque, después de tanto años, siguen dándole sentido a la palabra amistad.

A Katya Méndez y al Dr. Manuel Bollo por el inmenso apoyo administrativo tanto en el proceso de estancia en el extranjero como en el de graduación.

Índice general

Introducción	1
Capítulo 1. Marco teórico-conceptual	4
1.1. Amenazas	4
1.1.1. Procesos asociados	4
1.1.2. Particularidades	6
1.2. Inundaciones	9
1.2.1. Factores involucrados	10
1.2.2. Tipos	20
Capítulo 2. Contexto histórico-geográfico del área de estudio	22
2.1. Experiencias investigativas	22
2.2. Antecedentes territoriales	31
2.3. Características geográficas	43
Capítulo 3. Materiales y métodos	48
3.1. Materiales	48
3.2. Métodos	48
3.2.1. Estimación del volumen de escurrimiento	49
A. Cálculo de la precipitación	54
B. Elaboración de mapas de cubierta y uso del suelo	57
C. Determinación del grupo hidrológico del suelo	59
D. Integración de la información en la ecuación	61
3.2.2. Modelado de la amenaza de inundación	62
A. Simulación de la acumulación del escurrimiento	62
B. Estimación del potencial topográfico de inundación	64
C. Cálculo del período de retorno	65
D. Determinación del cambio en la amenaza de inundación	65
3.2.3. Validación	66
Capítulo 4. Resultados y discusión	68
4.1. Resultados	68
4.1.1. Volumen de escurrimiento	68
A. Precipitación	68
B. Cubierta y uso del suelo	72
C. Grupo hidrológico del suelo	81
D. Ecuación	84
4.1.2. Amenaza de inundación	97
A. Acumulación del escurrimiento	97
B. Potencial topográfico de inundación	100
C. Período de retorno	103
D. Cambio en la amenaza de inundación	106
4.1.3. Validación	108
4.2. Discusión	110
4.2.1. Con respecto al cambio en la amenaza de inundación	110
4.2.2. Con respecto al método	114
Conclusiones y recomendaciones	117
Bibliografía	121
Anexos	127

Índice de cuadros

Cuadro 1.1.	Tipos de factores que contribuyen a la formación de inundaciones	11
Cuadro 2.1.	Cuenca Río Grande: balance hidrológico	25
Cuadro 3.1.	Números de curva para áreas urbanas	51
Cuadro 3.2.	Número de curva para áreas no urbanas seleccionadas	52
Cuadro 3.3.	Clasificación de condiciones antecedentes de humedad	53
Cuadro 3.4.	Números de curva para cada condición antecedente de humedad	53
Cuadro 3.5.	Prueba de recorrido: límites de distribución normal	56
Cuadro 3.6.	Prueba de recorrido: intervalos para el número de cambios de acuerdo con la cantidad de años de la serie climática	56
Cuadro 4.1.	Área de estudio: cubierta vegetal y uso del suelo, 1995	74
Cuadro 4.2.	Área de estudio: cubierta vegetal y uso del suelo, 2011	76
Cuadro 4.3.	Área de estudio: cubierta vegetal y uso del suelo, 2050	79
Cuadro 4.4.	Área de estudio: números de curva (CN _{II})	86
Cuadro 4.5.	Estación meteorológica Morelia: período de retorno de un evento de tormenta mayor a 30 mm/día durante el mes de septiembre	103
Cuadro 4.6.	Estación meteorológica Jesús del Monte: período de retorno de un evento de tormenta mayor a 30 mm/día durante el mes de septiembre	104
Cuadro 4.7.	Área de estudio: coincidencia espacial entre la amenaza de inundación (2011) y la susceptibilidad a inundaciones de Corona (2009)	109

Índice de figuras

Figura 1.1.	Factores que participan de manera constante en las inundaciones	11
Figura 1.2.	Tipos de precipitación según su origen	14
Figura 1.3.	Influencia de la urbanización en los componentes del ciclo hidrológico	15
Figura 1.4.	Efectos de la urbanización sobre el volumen y las tasas de escurrimiento superficial	16
Figura 1.5.	Influencia de la forma de la cuenca sobre el escurrimiento	19
Figura 2.1.	Ciudad de Morelia: áreas inundables	23
Figura 2.2.	Ciudad de Morelia: susceptibilidad a inundaciones	27
Figura 2.3.	Ciudad de Morelia: vulnerabilidad total de la población en la vivienda	28
Figura 2.4.	Ciudad de Morelia: correlación entre los modelos de inundación y precariedad urbana	29
Figura 2.5.	Ciudad de Morelia: estructura urbana, 1619-2005	40
Figura 2.6.	Ciudad de Morelia: crecimiento y dinámica de la población, 1580-2010	41
Figura 2.7.	Ciudad de Morelia: expansión territorial, 1619-2009	41
Figura 2.8.	Ciudad de Morelia: plan maestro de <i>Altozano la Nueva Morelia</i>	41
Figura 2.9.	Área de estudio: ubicación con respecto a la división político administrativa	43

Figura 2.10.	Área de estudio: ubicación con respecto a la red hidrológica	44
Figura 2.11.	Área de estudio: relieve	45
Figura 2.12.	Área de estudio: geología	45
Figura 2.13.	Estación meteorológica Morelia: climograma	46
Figura 3.1.	Escurrimiento generado para un rango determinado de precipitación y números de curva	51
Figura 3.2.	Esquema metodológico utilizado para definir áreas susceptibles a inundaciones	67
Figura 4.1.	Área de influencia de la zona de estudio: estaciones meteorológicas	69
Figura 4.2.	Área de influencia de la zona de estudio: precipitación máxima promedio en 24 horas	69
Figura 4.3.	Área de estudio: precipitación máxima promedio en 24 horas, 1995	70
Figura 4.4.	Área de estudio: precipitación máxima promedio en 24 horas, 2011	71
Figura 4.5.	Ortofotomosaico	72
Figura 4.6.	Fusión de imágenes satelitales	72
Figura 4.7.	Área de estudio: cubierta vegetal y uso del suelo, 1995	73
Figura 4.8.	Área de estudio: cubierta vegetal y uso del suelo, 2011	75
Figura 4.9.	Área de estudio: zonas con potencial para la expansión urbana	77
Figura 4.10.	Área de estudio: cubierta vegetal y uso del suelo, 2050	78
Figura 4.11.	Área de estudio: cambio de cubierta y uso del suelo, 1995-2050	80
Figura 4.12.	Área de estudio: cambio en la extensión de cubiertas y usos del suelo, 1995-2050	81
Figura 4.13.	Área de estudio: sitios potenciales de muestreo de suelos y criterios de selección	82
Figura 4.14.	Área de estudio: sitios definitivos de muestreo de suelos	83
Figura 4.15.	Área de estudio: grupo hidrológico del suelo	84
Figura 4.16.	Área de estudio: números de curva (CN _{II})	85
Figura 4.17.	Área de estudio: obtención de los componentes de la ecuación a partir del número de curva (CN _{II})	86
Figura 4.18.	Área de estudio: valores de precipitación máxima promedio en 24 horas que generan escurrimiento de acuerdo con el número de curva, 1995	87
Figura 4.19.	Área de estudio: valores de precipitación máxima promedio en 24 horas que generan escurrimiento de acuerdo con el número de curva, 2011	88
Figura 4.20.	Área de estudio: valores de precipitación máxima promedio en 24 horas que generan escurrimiento de acuerdo con el número de curva, 2050	89
Figura 4.21.	Área de estudio: escurrimiento generado por la precipitación máxima promedio en 24 horas de mayo, 1995-2050	90
Figura 4.22.	Área de estudio: escurrimiento generado por la precipitación máxima promedio en 24 horas de julio, 1995-2050	91
Figura 4.23.	Área de estudio: escurrimiento generado por la precipitación máxima promedio en 24 horas de septiembre, 1995-2050	92
Figura 4.24.	Área de estudio: escurrimiento generado por la precipitación máxima promedio en 24 horas de noviembre, 1995-2050	93

Figura 4.25.	Área de estudio: escurrimiento generado por la precipitación máxima promedio de mayo, julio, septiembre y noviembre, 1995-2050	94
Figura 4.26.	Área de estudio: aporte de las cubiertas y usos al escurrimiento de cada subcuenca, con base en una tormenta de 30 mm/día en septiembre, 1995-2050	96
Figura 4.27.	Área de estudio: magnitud del escurrimiento acumulado, 1995-2050	98
Figura 4.28.	Área de estudio: cambio en la magnitud del escurrimiento acumulado, 1995-2050	99
Figura 4.29.	Área de estudio: alturas máximas locales y Modelo de Elevación Digital	100
Figura 4.30.	Área de estudio: profundidad relativa del terreno	101
Figura 4.31.	Área de estudio: cauces mayores y unidades de paisaje	101
Figura 4.32.	Área de estudio: potencial topográfico de inundación	102
Figura 4.33.	Área de influencia de la zona de estudio: eventos mayores a 30 mm/día durante el mes de septiembre	105
Figura 4.34.	Área de estudio: elementos que intervienen en el cambio de la amenaza de inundación	106
Figura 4.35.	Área de estudio: cambio en la amenaza de inundación, 1995-2050	107
Figura 4.36.	Área de estudio: Coincidencia espacial entre la amenaza de inundación (2011) y la susceptibilidad a inundaciones de Corona (2009)	108
Figura 4.37.	Área de estudio: aporte de las cubiertas y usos del suelo al escurrimiento generado por una precipitación mayor a 30 mm/día en septiembre, 1995-2050	112

Introducción

La ocurrencia de eventos hidrometeorológicos extremos, como inundaciones o sequías, ha aumentado de forma acelerada en los últimos decenios. A nivel mundial, entre 1990 y 2005, más de cuatro mil desastres fueron ocasionados por este tipo de fenómenos. En el caso de México, entre 1990 y 2010, se registraron 37 desastres provocados por inundaciones, los cuales significaron la pérdida de más de 1 600 vidas humanas, casi dos millones de habitantes afectados y daños materiales de poco más de cuatro mil millones de dólares (OFDA-CRED, 2011). Las afirmaciones anteriores son particularmente significativas para territorios como el sur de la ciudad de Morelia, donde situaciones como la expansión del casco urbano, al margen o sobre los cauces de los ríos, y la urbanización de porciones altas de las cuencas, pueden contribuir al crecimiento del volumen del escurrimiento y al incremento en el grado de exposición de la población.

Entre los eventos que han causado mayores daños en la ciudad de Morelia, particularmente en la zona sur, destacan los ocurridos en los meses de septiembre de 2003 y 2005. El más reciente fue ocasionado por la precipitación de 75 mm de lluvia en un periodo inferior a dos horas, la inundación afectó 35 colonias, mil viviendas y más de diez mil personas, además, generó pérdidas materiales de varios millones de pesos (Arreygue, 2007 y Corona, 2009). La suspensión de servicios y la pérdida de bienes materiales son ejemplos de consecuencias que actúan en perjuicio de la ciudadanía y que han motivado múltiples investigaciones concebidas bajo diversas perspectivas; entre los estudios realizados destacan los de Corona (2009), Hernández y Vieyra (2010), y varios de Arreygue, *et. al.*, publicados entre 1998 y 2007, además, existen documentos oficiales como el Atlas de Riesgos de Morelia y diversas obras de ingeniería orientadas a la mitigación de la amenaza.

Sin embargo, de acuerdo con los estudios previos, la amenaza de inundación, junto con la vulnerabilidad y el riesgo, se perfilan como procesos cada vez más complejos que están condicionados, en gran medida, por cambios urbanos basados en relaciones de poder que

no toman en consideración planes de mitigación de inundaciones. En este sentido, son necesarias investigaciones actualizadas que faciliten la comprensión del fenómeno y examinen las nuevas tendencias de expansión del área urbana, principalmente, en la Loma de Santa María. Asimismo, es preciso determinar el creciente aumento en la magnitud del escurrimiento, derivado de la expansión mencionada, y considerar los cambios, actuales y futuros, en la amenaza de inundación. Lo anterior permitirá determinar la amenaza que podría enfrentar el sur de la ciudad de Morelia en los próximos años y, en consecuencia, ofrecer algunas recomendaciones para su mitigación.

Con base en estos antecedentes, se planteó la hipótesis siguiente: la urbanización en el sur de la ciudad de Morelia ha aumentado, de forma acelerada, en los últimos decenios; situación que ha ocasionado un crecimiento en el volumen del escurrimiento y, con ello, un incremento en la amenaza de inundación; por lo tanto, de seguir la misma tendencia de expansión urbana, la situación se agravará en los próximos años. Así, esta investigación tiene como objetivo general explorar el cambio en la amenaza de inundación en cuatro subcuencas del sur de la ciudad de Morelia, Michoacán, entre 1995 y 2050 y, como particulares, los siguientes:

- Identificar las posturas teórico-conceptuales sobre la amenaza de inundación.
- Revisar el contexto histórico-geográfico del área de estudio.
- Estimar el cambio en el volumen de escurrimiento.
- Modelar la forma en que el escurrimiento se acumula sobre el territorio.
- Reconocer el potencial topográfico de inundación.
- Determinar los sitios en los que el cambio en el volumen de escurrimiento puede causar inundaciones.
- Validar los resultados finales de la investigación.

En correspondencia con estos planteamientos, esta investigación se estructura en cuatro capítulos. En el primero, se examinan las vertientes cognoscitivas relacionadas con las amenazas y, enseguida, se revisan algunos aspectos relativos a las inundaciones. En el segundo capítulo se muestran algunos trabajos previos al presente relacionados con la

temática de estudio en la ciudad de Morelia y, posteriormente, se describen los acontecimientos históricos asociados con el origen y evolución de los eventos que han modelado el caso urbano; por último, se presentan las características geográfico-físicas más relevantes de la zona de interés.

En el tercer capítulo, se exponen las estrategias metodológicas empleadas durante el proceso de investigación y; en el último, se muestran y discuten los resultados derivados de la aplicación del método del Número de Curva para calcular el volumen de escurrimiento; asimismo, se examinan los productos obtenidos de la simulación de la acumulación de flujo y de la estimación del potencial topográfico de inundación; como característica asociada, se incluyen algunas consideraciones sobre el período de retorno y, enseguida, como fruto de la combinación de los elementos anteriores, se revela el cambio en la amenaza de inundación. Finalmente, se incluye la validación de los resultados finales de esta tesis.

Capítulo 1. Marco teórico-conceptual

En los últimos decenios, la ocurrencia de fenómenos, de origen natural y/o social, que derivan en daños económicos y humanos ha aumentado de forma significativa. De manera particular, se ha mostrado interés en el estudio de las inundaciones, debido a que entre 1990 y 2010, cerca del 40% de los desastres, ocurridos en Latinoamérica, fue provocado por una inundación (OFDA-CRED, 2011). Esta situación ha generado diversas investigaciones, concebidas bajo diferentes perspectivas, entre las cuales se han incluido discusiones teóricas sobre la delimitación conceptual entre amenaza (también llamada peligro), vulnerabilidad, riesgo y desastre. Con base en estas premisas, en este capítulo se examinan las vertientes cognoscitivas relacionadas con las amenazas y, enseguida, se revisan algunos aspectos relativos a las inundaciones.

1.1. Amenazas

A pesar de que, en sentido estricto, esta investigación está motivada por la noción de amenaza, la interdependencia que guarda con otros procesos hace pertinente la revisión de las expresiones vinculadas. Por lo tanto, en este apartado se describen los nexos con otros procesos y, posteriormente, se exponen las características inherentes a las amenazas.

1.1.1. Procesos asociados

Desde sus inicios, los seres humanos han convivido con fenómenos potencialmente perjudiciales, sin embargo, a medida que la sociedad ha evolucionado, se han originado nuevos tipos de amenazas y los procesos asociados se han hecho complejos. En este sentido, el crecimiento demográfico, la creación de asentamientos irregulares y los cambios en la cubierta del suelo, por mencionar algunos, han provocado que la población esté, cada vez, más expuesta a diferentes eventos que tienen potencial para causar daño.

Como respuesta a estos sucesos y debido a la multiplicidad de enfoques relacionados con la temática, en 1979, un grupo de expertos se reunió, en Geneva, Suiza, para realizar uno

de los primeros esfuerzos por homologar el contenido de los términos empleados en este campo. De acuerdo con UNDRP (1979), los resultados del debate sugerían que los conceptos se emplearan de la manera siguiente:

- *Amenaza Natural*. Probabilidad de ocurrencia, dentro de un período de tiempo específico y zona determinada, de un fenómeno natural potencialmente dañino.
- *Vulnerabilidad*. Grado de pérdida de un elemento, o conjunto de elementos, en situación de riesgo como resultado de la ocurrencia de un fenómeno natural cuya magnitud se expresa en una escala de 0 (sin daño) a 1 (pérdida total).
- *Elementos de riesgo*. Población, construcciones, obras de ingeniería civil, actividades económicas, servicios públicos, infraestructura, entre otros que se encuentren en riesgo, en un área determinada.
- *Riesgo específico*. Grado esperado de pérdida debido a un fenómeno natural particular y como una función de la amenaza y la vulnerabilidad.
- *Riesgo*. Número esperado de vidas perdidas, personas heridas, daños a la propiedad y la interrupción de la actividad económica debido a un fenómeno natural particular y, por lo tanto, el producto del riesgo específico y los elementos de riesgo.

Estas posturas conceptuales han servido como base para estudios posteriores, no obstante, las reflexiones teóricas han continuado hasta el presente. En esta línea, aproximaciones más modernas, como la de Lavell (2003), apuntan que "...los riesgos que enfrenta la sociedad son resultantes de procesos sociales que derivan de las modalidades de desarrollo vigentes y que de alguna forma tienen repercusiones en términos de la conformación y construcción de amenazas y vulnerabilidades que por sí mismas constituyen factores de riesgo".

Bajo esta perspectiva, en este documento, se reconoce la idea, ampliamente aceptada en los últimos años, que señala que el término amenaza se refiere a la "probabilidad de ocurrencia, en un espacio y tiempo determinado, de un evento físico potencialmente perjudicial, fenómeno natural y/o actividad humana que puede causar muertes o lesiones,

daños materiales, interrupción de la actividad social y económica o degradación ambiental...” (ISDR, 2004). En el mismo contexto, la vulnerabilidad se considera como un “conjunto de condiciones y procesos resultantes de factores físicos, sociales, económicos y ambientales, que aumentan la susceptibilidad de una comunidad al impacto de las amenazas” (*Ibid*).

Como consecuencia, el riesgo se concibe como la “probabilidad de consecuencias perjudiciales o pérdidas de vidas, personas heridas, pérdida de propiedades o medios de subsistencia e interrupción de actividades económicas (o daños ambientales) como resultado de la interacción entre amenazas naturales o antrópicas y las condiciones de vulnerabilidad. El riesgo es convencionalmente expresado mediante la ecuación: riesgo = amenaza x vulnerabilidad” (UNDP, 2004).

En síntesis, los términos amenaza y vulnerabilidad constituyen factores de riesgo, por lo tanto, este último, se conforma por la coexistencia, en un espacio y tiempo determinado, de una amenaza y ciertos escenarios de vulnerabilidad. Finalmente, un desastre se entiende como la materialización de un riesgo donde un evento físico participa como detonador, pero no es la única causa que lo configura (Lavell, 1996; Lavell, 2000; Lavell, 2003).

1.1.2. Particularidades

Entre las características más relevantes de las amenazas, la territorialidad es uno de los aspectos que se manifiesta con mayor singularidad pues, a diferencia del riesgo y los desastres que comparten un mismo espacio geográfico, el territorio en donde se gesta una amenaza puede diferir del lugar de impacto; por ejemplo, la deforestación en porciones altas de una cuenca puede contribuir al incremento de la amenaza de inundación en zonas bajas de la misma cuenca (Lavell, 2003).

Por su parte, las características propias de cada amenaza permiten su clasificación en función de ciertos criterios. Según Lavell (1996), de acuerdo con su origen, se pueden agrupar de la manera siguiente:

- *Naturales*. Comprenden, como su nombre lo indica, aquellas que derivan de procesos naturales como los geológicos, geomorfológicos, climatológicos y oceanográficos, entre otros; algunos ejemplos de este tipo son sismos, erupciones volcánicas, deslizamientos de tierras, huracanes y tsunamis.
- *Socio-naturales*. Se refiere a las que resultan de la relación de la naturaleza con la sociedad; en este caso la urbanización, la deforestación, el monocultivo, la creación de minas a cielo abierto, entre otros, generan amenazas como inundaciones, deslizamientos de tierras, sequías y erosión de suelos, por mencionar algunas.
- *Antropogénicas*. Este grupo debe su origen a las actividades humanas, por lo tanto, se incluyen explosiones, incendios, guerras, derrames de sustancias peligrosas, accidentes tecnológicos, contaminación a causa de productos industriales, etcétera.

El DMTP (1997) señala que la lista de amenazas es muy larga y que un gran número de éstas ocurren con poca frecuencia o impactan sólo a localidades pequeñas. Las tormentas de nieve, por ejemplo, ocurren en territorios preparados para recibirlas y, por ello, es poco probable que se conviertan en desastres. En concordancia con estos argumentos, las amenazas de interés para la comunidad internacional son aquellas que afectan a grandes poblaciones y que pueden provocar el auxilio externo. Así, la misma fuente declara que las principales amenazas se pueden ordenar de la forma siguiente:

- *Geológicas*
 - Terremotos
 - Tsunamis
 - Erupciones volcánicas
 - Deslizamientos
- *Climáticas*
 - Ciclones tropicales
 - Inundaciones

- Sequías
- Ambientales
 - Contaminación ambiental
 - Deforestación
 - Desertificación
 - Plagas
- Epidémicas
 - SIDA
 - Malaria
 - Dengue...
- Accidentes químicos e industriales
 - Fugas
 - Explosiones
 - Incendios de fábricas...

Después de haber reconocido algunos de los tipos específicos de amenaza, es importante considerar que, con frecuencia, existe una combinación o concatenación de eventos, situación que genera amenazas complejas y territorios multi-amenaza. Las primeras se producen cuando un evento inicial, como un sismo, desencadena otros, tales como deslizamientos, fugas o epidemias. En el segundo caso se trata de regiones bajo la influencia de más de una amenaza, esto implica situaciones donde varios eventos pueden presentarse al mismo tiempo; un ejemplo concreto es el caso de asentamientos con amenaza de sismo, erupción volcánica y deslizamientos, las cuales pueden manifestarse de manera aislada o en conjunto (Lavell, *op.cit.*).

Los fundamentos teórico-conceptuales hasta ahora expuestos, junto con el estudio particular de cada peligro, son de suma importancia para comprender la dinámica de las amenazas y lograr, entre otras cosas, elaborar recomendaciones para su mitigación. En este rubro, uno de los quehaceres científicos más relevantes se enfoca en la evaluación de la amenaza; a este respecto, de acuerdo con Soldano (2009), se han desarrollado cuatro

tipos de evaluación que, bajo el supuesto de que “el pasado es la clave para entender el futuro”, se dividen como sigue:

- *Histórica*. Este método se realiza por medio de la cartografía de eventos históricos, con ello es posible determinar magnitudes y períodos de retorno.
- *Heurística*. En este caso, con base en la experiencia de un especialista, quien establecerá criterios y su ponderación, se define la susceptibilidad del territorio ante cierto tipo de amenaza.
- *Estadística*. De acuerdo con relaciones estadísticas de los datos disponibles, se estudian las condiciones bajo las cuales ocurrieron los eventos generadores de amenazas.
- *Determinística*. Esta evaluación recurre a la simulación de eventos a partir de modelos matemáticos basados en leyes físicas que actúan en los fenómenos involucrados.

En suma, el estudio de este tema debe considerar que se trata de un proceso socialmente construido; así, el total de amenazas existentes en el mundo contemporáneo tiende a aumentar en función de la dinámica social. La respuesta de los expertos a estos escenarios ha sido el desarrollo de métodos de evaluación como los mostrados, para el caso de las inundaciones, por Islam y Sado (2000), Pelletier, *et.al.*, (2005), Stuebe y Johnston (1990) y Zhang, *et.al.*, (2010).

1.2. Inundaciones

Dentro de la extensa variedad de amenazas, las inundaciones inspiraron el desarrollo de este estudio; en este sentido, una inundación se define como “...un escenario inusual de alta en un río debido a que el escurrimiento de la lluvia y/o la fusión de nieve se presenta en cantidades demasiado grandes como para ser almacenadas en proporciones normales en un río, esto se crea como resultado de una combinación meteorológica inusual” (Raghunath, 2006). Por otro lado, CENAPRED (2009) se refiere al mismo concepto como “un evento que, debido a la precipitación, oleaje, marea de tormenta o falla de

estructuras hidráulicas, provoca un incremento en el nivel de los ríos o el mar; esta situación genera invasión de agua en sitios donde usualmente no hay y puede causar daños en la población, agricultura, ganadería e infraestructura”.

Las citas anteriores denotan la complejidad del tema y, de manera particular, la segunda hace evidente la variedad de elementos involucrados en el proceso; en contraste, existen fuentes como el DMT (*op. cit.*) que, independientemente de las causas y consecuencias, conciben las inundaciones como la presencia de agua en áreas donde, por lo general, la superficie está seca, o bien, cuando el agua se desborda de sus confinamientos “normales”. Al margen de la discusión, hay aseveraciones incuestionables, como las de Garnica y Alcántara (2004), que señalan que las inundaciones se convierten en amenazas cuando los asentamientos humanos se establecen sobre llanuras de inundación de ríos y, como consecuencia, la acumulación de agua afecta sus actividades. Para dar contexto al conjunto de planteamientos anteriores, este apartado focaliza la atención, por un lado, en los factores que configuran las inundaciones y, por otro, en los tipos existentes.

1.2.1. Factores involucrados

De acuerdo con la WMO/GWP (2008), las inundaciones son producto de la combinación de factores meteorológicos, hidrológicos y humanos (cuadro 1.1); en este contexto, particularmente los eventos que ocurren en ámbitos urbanos deben ser considerados como consecuencia de factores tanto naturales como antrópicos.

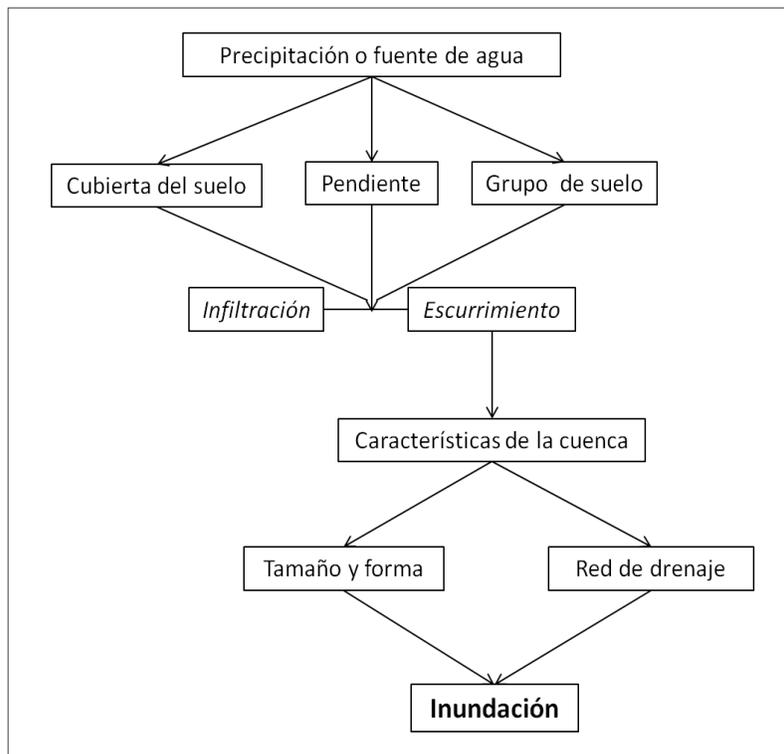
Con este orden de ideas, las inundaciones se diferencian entre sí por las características que adquieren tras la conjunción de los factores que intervienen en su formación; independientemente del tipo de inundación, algunos factores participan de manera constante (figura 1.1). Es importante mencionar que existen diversas formas de interpretar este proceso en función, entre otros motivos, de la perspectiva del especialista o los objetivos de la investigación; en este caso, en la figura 1.1 se presenta un modelo conceptual con fines explicativos que, aunque no incluye el universo de

Cuadro 1.1. Tipos de factores que contribuyen a la formación de inundaciones

Meteorológicos	Hidrológicos	Antrópicos
<ul style="list-style-type: none"> · Precipitación · Tormentas ciclónicas · Tormentas de menor escala · Temperatura · Tormenta de nieve · Deshielo 	<ul style="list-style-type: none"> · Humedad del suelo · Nivel del agua subterránea antes de la tormenta · Tasa de infiltración natural de la superficie · Presencia de cubierta impermeable · Forma y rugosidad de la sección transversal del canal · Presencia o ausencia de laderas de amortiguamiento en la red de canales · Sincronización de escurrimiento procedente diversas partes de la cuenca · Marea alta 	<ul style="list-style-type: none"> · Cambio de uso de suelo · Ocupación de planicies de inundación · Infraestructura ineficiente o sin mantenimiento · Drenaje demasiado eficiente aguas arriba · Cambio climático · Microclimas urbanos

Fuente: WMO/GWP, 2008.

Figura 1.1. Factores que participan de manera constante en las inundaciones



Fuente: elaboración propia con base en Davie, 2008; DMTP, 1997; Maderey, 2005 y Raghunath, 2006.

elementos involucrados, muestra aquellos que permiten comprender la generalidad del fenómeno; tal modelo desglosa a continuación:

Infiltración y escurrimiento

A pesar de que el proceso inicia con un aporte de agua, es preciso, primero, hacer referencia a la infiltración y al escurrimiento debido a que los demás factores que dan origen a las inundaciones tienen una influencia directa sobre el comportamiento de éstos; así, la forma en que varían, en función de ciertos escenarios, se revisa en las páginas siguientes de este apartado.

Se denomina *infiltración* a la penetración de agua desde la superficie hacia el interior del suelo; en consecuencia, la cantidad de agua que el suelo puede absorber, en una unidad de tiempo determinada, se conoce como capacidad de infiltración (Raghunath, *op.cit.*). Por su parte, el *escurrimiento* se refiere “al agua, proveniente de la precipitación, que circula sobre o bajo la superficie terrestre y que llega a una corriente para ser drenada hasta la salida de la cuenca” (Aparicio, 1992). De acuerdo con Maderey (2005), el escurrimiento se divide en superficial, subsuperficial y subterráneo; el primero corresponde al agua que escurre sobre el suelo, mientras que el segundo y el tercero se forman con el agua que se desliza en los horizontes del suelo y en los mantos subterráneos, respectivamente. Aún cuando el lugar de transporte es diferente, cualquier tipo de escurrimiento llega a una corriente y, por lo tanto, puede contribuir a la gestación de una inundación; sin embargo, el escurrimiento superficial, también llamado escorrentía, es el que ejerce la influencia más evidente o directa sobre las inundaciones.

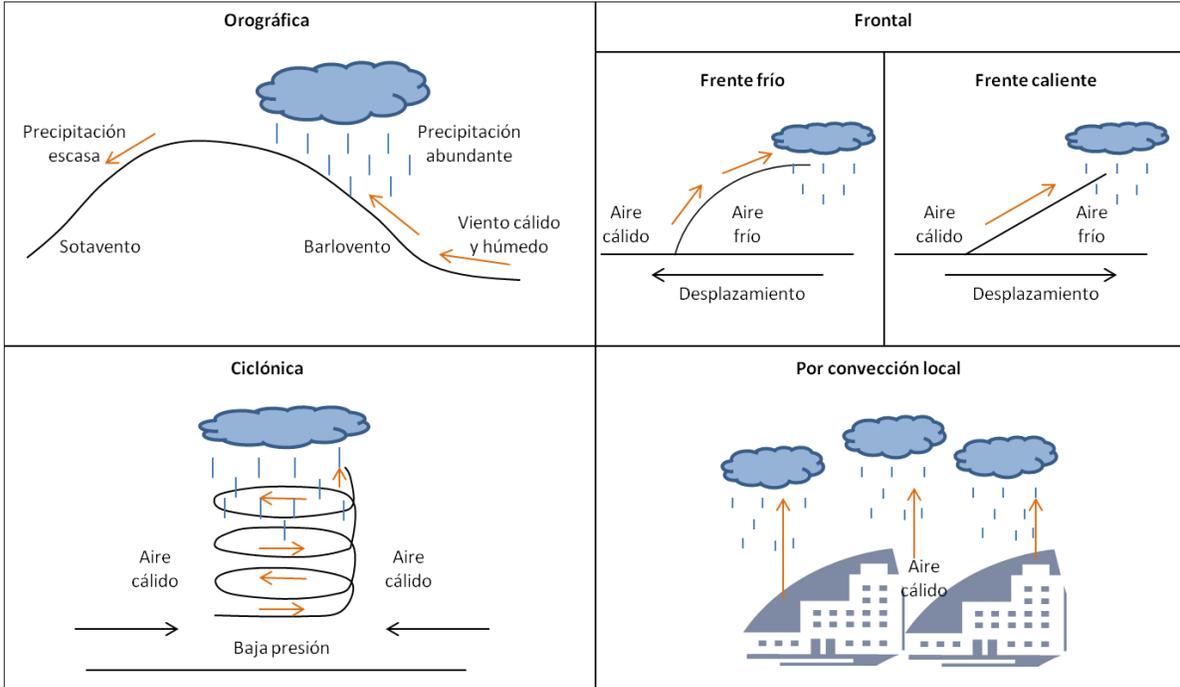
Precipitación o fuente de agua

Para su formación, las inundaciones requieren de un aporte de agua derivado, entre otras fuentes, de descargas pluviales, mareas de tormenta, tsunamis u obras de infraestructura hidráulica. Sin embargo, en la gran mayoría de los casos, el agua proviene de precipitaciones, las cuales, según su origen, pueden clasificarse en las categorías siguientes (figura 1.2):

- *Orográfica*. Se genera por vientos cálidos y húmedos que chocan contra barreras montañosas, por lo tanto, conforme ascienden sobre las laderas, el vapor de agua se condensa y, finalmente, se precipita.
- *Frontal*. Puede ser ocasionada por frentes fríos o cálidos; los primeros suceden cuando una masa de aire frío desplaza a una caliente que, por ser menos densa, remonta al aire frío, durante el ascenso, la temperatura disminuye y se produce una precipitación. Los segundos ocurren cuando el aire cálido reemplaza una masa de aire frío que retrocede, de la misma forma que en el caso anterior, el aire cálido sube y el vapor de agua se condensa para, posteriormente, caer en forma de algún tipo de precipitación.
- *Ciclónica*. Ésta resulta del levantamiento del aire que converge en un área de baja presión.
- *Por convección local*. Como su nombre lo indica, esta precipitación se atribuye a la presencia de movimientos convectivos que pueden ser creados por aportes de calor de superficies urbanas, pedregosas o arenosas; así, las altas temperaturas emitidas provocan que el aire suba y al enfriarse origine una descarga pluvial.
- *Mixta*. Se deriva de la conjunción de dos o más de los tipos anteriores; en algunas zonas costeras, por ejemplo, se pueden presentar lluvias por convección local, al tiempo que se desarrolla un ciclón.

En cuanto a la forma, la precipitación puede presentarse de manera líquida (llovizna, lluvia o chubasco), sólida (granizo o nevada) o mixta (aguanieve). De las modalidades anteriores, las lloviznas producen los eventos menos perjudiciales y con mayores beneficios, pues proceden de nubes bajas con bases muy amplias (stratus, stratocúmulus o nimbostratos) que generan descargas de poca intensidad y larga duración; estas características permiten que el agua se infiltre con mayor facilidad y se produzca menos escurrimiento, además, las pequeñas dimensiones de las gotas favorecen el aporte de nitrógeno al suelo y no dañan los cultivos u otros tipos de cubiertas vegetales.

Figura 1.2. Tipos de precipitación según su origen



Fuente: elaboración propia con base en Ayllón, 2003.

En contraste, los chubascos o aguaceros pueden causar inundaciones, deterioro del follaje de las plantas y erosión en los suelos; esta forma de precipitación proviene de nubes de desarrollo vertical con bases angostas (cúmulus y cumulonimbus), por lo tanto, se caracterizan por descargar grandes cantidades de agua en muy poco tiempo y acompañarse de granizo, vientos fuertes y relámpagos (Ayllón, 2003).

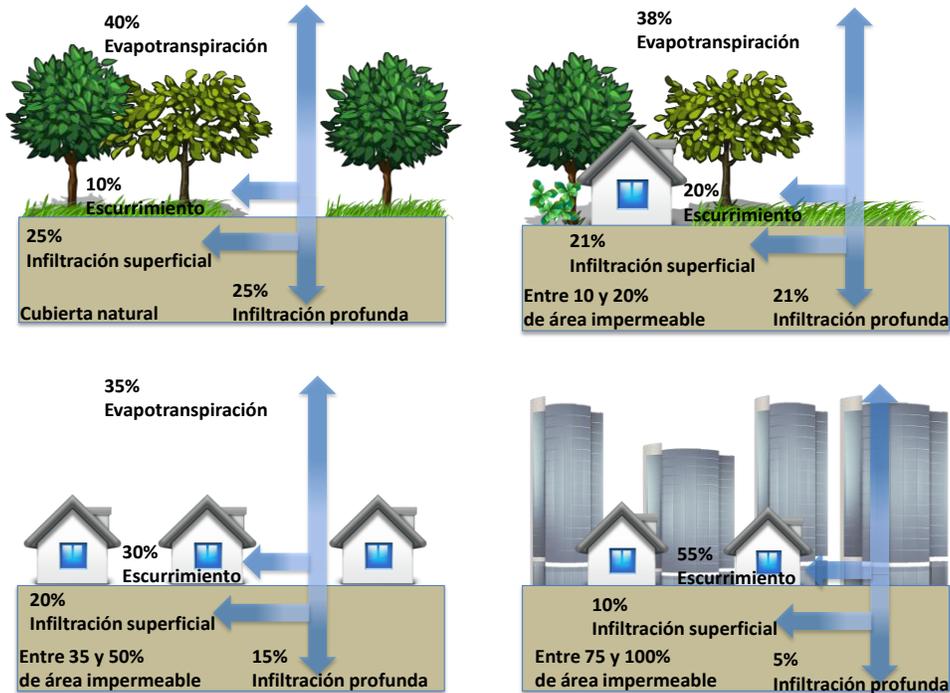
Además de la forma, intensidad y duración; la distribución de la precipitación y la dirección de su movimiento también determinan la cantidad de agua que puede escurrir y contribuir a una inundación. En una cuenca de poca superficie los mayores escurrimientos resultan de precipitaciones que abarcan áreas pequeñas y, en cuencas grandes, proceden de descargas poco intensas que cubren una mayor extensión. Con relación a la dirección, si la tormenta se mueve dentro de la cuenca, el escurrimiento será mayor que si únicamente la atraviesa; por otro lado, si avanza en sentido contrario del drenaje, el escurrimiento será más uniforme y moderado que si se mueve en el sentido de la corriente (Maderey, *op.cit.*).

Cubierta del suelo

El tipo de cubierta del terreno repercute, de forma significativa, en el comportamiento de las inundaciones; en general, la conversión de superficies naturales en otras con algún grado de influencia humana, ocasiona un cambio en la magnitud del escurrimiento. La deforestación, por ejemplo, implica la eliminación de los sistemas de raíces, situación que provoca el aumento de la esorrentía y con ello la erosión del terreno, ésta última, a su vez, contribuye a la disminución de la capacidad de los cauces debido a la sedimentación (DMT, *op. cit.*).

Como respuesta a la hipótesis de la investigación, en esta sección se pone especial interés en las cubiertas urbanas; cuyas áreas impermeables impiden la infiltración y, como resultado, incrementan el volumen y la velocidad del escurrimiento (Peterson, Stone y Houle, 2010). De esta manera, a medida que las superficies impermeables crecen, las tasas de infiltración disminuyen y el escurrimiento superficial aumenta (figura 1.3).

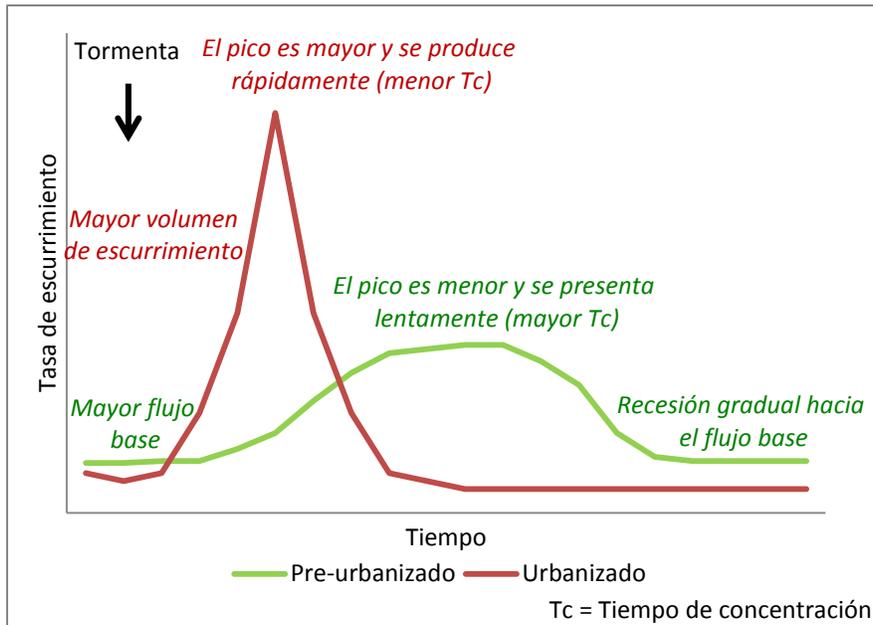
Figura 1.3. Influencia de la urbanización en los componentes del ciclo hidrológico



Fuente: WMO/GWP, 2008.

En una cuenca moderadamente urbanizada se produce 50% más volumen de escurrimiento que en una con cubierta forestal durante la misma tormenta; además, se reduce, hasta en un 50%, el tiempo de concentración (Spaulding, 1996); período en el que una gota de agua, caída en el punto hidráulicamente más alejado, tarda en llegar a la salida de la cuenca; tal lapso de tiempo depende de la longitud máxima que el agua deba viajar y de la velocidad promedio que adquiera durante el recorrido (Aparicio, *op.cit.*). Los cambios mencionados se reflejan al calcular el hidrograma unitario (variación en el tiempo del caudal generado por una precipitación en una cuenca determinada) producido por una tormenta en una zona urbana y una pre-urbana (figura 1.4).

Figura 1.4. Efectos de la urbanización sobre el volumen y las tasas de escurrimiento superficial



Fuente: Spaulding, 1996.

Desde la perspectiva de Rivera (s/f), los principales cambios hidrológicos provocados por la urbanización son los siguientes:

- El coeficiente de escurrimiento medio anual incrementa una y media veces.
- La avenida media anual; entendida como el número de ocasiones que el nivel de un curso de agua se eleva por encima del flujo medio, de forma que el lecho del río resulta insuficiente para contenerlo; aumenta tres veces.

- El tiempo de retraso, concebido como el período que transcurre del centro de masa de la precipitación al pico del hidrograma unitario, se reduce tres veces.
- El gasto pico, conocido como el volumen máximo de escurrimiento por unidad de tiempo producido por una tormenta, crece tres y media veces en el hidrograma unitario.

En suma, las alteraciones hidrológicas que se presentan en áreas urbanas se traducen en un incremento en la frecuencia y severidad de las inundaciones.

Pendiente

Conforme la pendiente del terreno crece, el tiempo para la infiltración se reduce y tanto el volumen como la velocidad del escurrimiento aumentan; asimismo, entre más larga sea una pendiente mayor será la acumulación de flujo. La curvatura también determina algunas características del escurrimiento, puesto que las pendientes convexas representan mayor energía potencial para el transporte que las cóncavas. Por último, la orientación repercute en la cantidad de agua evaporada debido a que la energía solar que recibe una pendiente con exposición sur (en el hemisferio norte) es mayor a la que obtiene cualquier otra cuya orientación sea la opuesta (Ward y Elliot, 1995)

Grupo de suelo

La capacidad de infiltración del suelo ejerce una gran influencia sobre las inundaciones, pues entre mayor sea la cantidad de agua infiltrada menor será el volumen de escurrimiento superficial producido. De acuerdo con Ward y Elliot (*ibid*), los principales factores edáficos que intervienen en la infiltración son la textura, porosidad, estructura, la variación de los elementos anteriores a lo largo del perfil y la profundidad. De esta forma, en función de la tasa mínima de infiltración, obtenida de suelos desnudos sometidos a largos períodos de humedad, la USDA (2007) clasificó los suelos en los cuatro grupos hidrológicos siguientes:

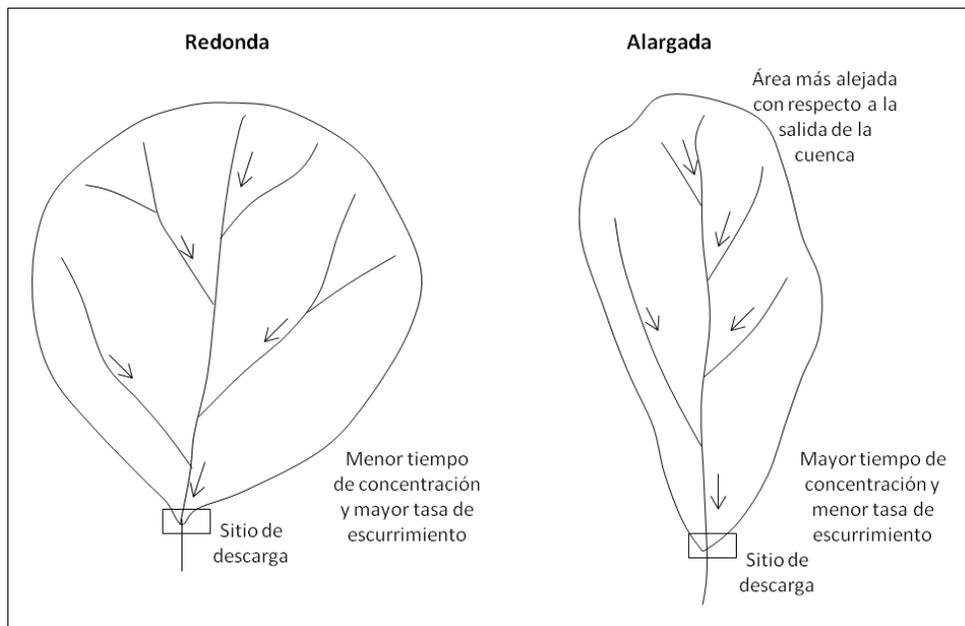
- A. Estos suelos poseen un bajo potencial de escurrimiento cuando están húmedos, lo cual significa que el agua se transmite libremente a través del suelo. En general, se constituyen por texturas arenosas compuestas por menos de 10% de arcilla y más de 90% de arena o grava; aunado a esto, cualquier capa impermeable y el nivel freático se encuentran a más de 50 y 60 centímetros de profundidad, respectivamente. Lo anterior deriva en una tasa de infiltración promedio mayor a 7.62 milímetros por hora.
- B. Muestran un potencial de escurrimiento moderadamente bajo con texturas arenos arcillosas o franco arenosas que, típicamente, contienen entre 10 y 20% de arcilla y entre 50 y 90% de arena; de la misma forma que en el grupo anterior, cualquier capa impermeable y el nivel freático se encuentran a más de 50 y 60 centímetros de profundidad, respectivamente; todas estas características se traducen en una tasa de infiltración promedio que va de 3.81 a 7.62 milímetros por hora.
- C. Dentro de este grupo se encuentran aquellos suelos con un potencial moderadamente alto de escurrimiento y una transmisión de agua a través del perfil limitada; presentan texturas francas, franco limosas, franco arcillo arenosas, franco arcillosas o franco arcillo limosas que comúnmente cuentan con entre 20 y 40% de arcilla y menos de 50% de arena; pueden llegar a tener una capa impermeable que impide el movimiento de agua hacia abajo y su tasa de infiltración promedio va de 1.27 a 3.81 milímetros por hora.
- D. En este grupo los suelos tienen un alto potencial de escurrimiento y, por lo tanto, el movimiento del agua es encuentra muy restringido; las texturas son arcillosas y contienen menos de 50% de arena y más de 40% de arcilla; por su parte, las capas impermeables y el nivel freático aparecen a menos de 50 y 60 centímetros de profundidad, respectivamente; finalmente, la tasa de infiltración promedio es menor a 1.27 milímetros por hora.

En resumen, los suelos cuyas características los colocan dentro de los grupos C y D son los que contribuyen, en mayor medida, a la formación de inundaciones.

Características de la cuenca

Con respecto al *tamaño*, existe una correlación directa entre el área de la cuenca y el volumen de escurrimiento, esto significa que si la primera variable aumenta, la segunda también lo hace. Por otro lado, la *forma* repercute en las tasas y en la duración del escurrimiento (figura 1.5); en una cuenca redondeada, debido a que todos los afluentes poseen longitudes similares, los flujos de agua, provenientes de diversos lugares de la cuenca, se acumulan al mismo tiempo en la salida, en consecuencia, aunque el escurrimiento permanece poco tiempo, se presenta en cantidades significativas; de manera opuesta, en cuencas alargadas los flujos de las corrientes ubicadas en las partes bajas llegan a la salida antes que los de corrientes altas, por lo tanto, el escurrimiento reunido es menor y el tiempo de permanencia mayor (Raghunath, *op.cit.*).

Figura 1.5. Influencia de la forma de la cuenca sobre el escurrimiento



Fuente: elaboración propia con base en Raghunath, 2006.

El conjunto de canales que conforman el sistema fluvial de una cuenca se denomina *red de drenaje* y sus rasgos principales también constituyen un factor importante en la formación de inundaciones. De acuerdo con Maderey (*op.cit.*) y Raghunath (*op.cit.*), las características más relevantes son las siguientes:

- *Densidad hidrográfica*. Se refiere al número de corrientes por kilómetro cuadrado; en este caso, el método de Strahler (1964), utilizado para asignar un orden numérico a los canales, sirve como auxiliar en el conteo de afluentes.
- *Densidad de drenaje*. Se expresa como la longitud total de las corrientes de agua por unidad de superficie de la cuenca; los valores altos indican que la red de drenaje se encuentra bien desarrollada y que el escurrimiento se presenta en grandes cantidades; de forma contraria, los valores pequeños denotan un bajo grado de desarrollo, escorrentía moderada y alta permeabilidad del terreno.
- *Capacidad de almacenamiento*. Esta característica determina la proporción de escurrimiento que se mantendrá dentro del cauce y la que se desbordará para contribuir a la formación de inundaciones.

En conclusión, los múltiples escenarios, que resultan de la combinación de los factores expuestos en este apartado, determinan la ausencia o presencia de inundaciones y, en caso de contribuir a su formación, definen sus características, tales como frecuencia, intensidad, duración o extensión.

1.2.2. Tipos

Según CENAPRED (*op.cit.*), las inundaciones pueden agruparse en función del tiempo de respuesta hidrológica de la cuenca o de acuerdo con su origen. La primera clasificación incluye los tipos siguientes:

- *Rápidas o súbitas*. Se caracterizan por la presencia de grandes cantidades de agua durante un período muy corto de tiempo; según las condiciones generales del paisaje pueden mantenerse desde unos cuantos minutos hasta algunas horas y, comúnmente, se asocian con cuencas alargadas de pendientes pronunciadas.
- *Lentas o progresivas*. Su larga duración está vinculada con terrenos planos y cercanos a las riveras de los ríos; frecuentemente, ocurren tras el desbordamiento de una corriente y pueden permanecer desde algunas horas hasta varios días.

Por otro lado, si se considera el evento que les da origen, las inundaciones se pueden dividir de la manera siguiente:

- *Pluviales*. Son consecuencia de precipitaciones de alta magnitud, el agua se acumula en grandes cantidades y permanece durante horas o días.
- *Fluviales*. Se generan cuando se supera la capacidad de almacenamiento de los ríos y el agua se desborda.
- *Costeras*. Se presentan como resultado de tsunamis o mareas de tormenta provocadas por ciclones o depresiones tropicales; el agua penetra en el continente e inunda las zonas adyacentes a los océanos o mares.
- *Por falla en obras de infraestructura hidráulica*. Este tipo puede derivarse del diseño incorrecto o el manejo inadecuado de presas o cualquier obra hidráulica. Si el nivel de agua supera la capacidad normal de estas construcciones, es necesario descargar los contenedores y, en consecuencia, el flujo liberado desencadena una inundación.

En relación con otras fuentes, la WMO/GWP (*op.cit.*) clasifica las inundaciones como locales, por desbordamiento de ríos, costeras y repentinas; mientras que el DMTP (*op.cit.*) únicamente considera las últimas tres. Finalmente, sin importar la clasificación, cualquier tipo de inundación puede tener efectos adversos sobre la población; entre las consecuencias perjudiciales destacan los daños en la vivienda, infraestructura y equipamiento, alteración de las actividades económicas, disminución de la calidad del agua y problemas de salud pública.

Capítulo 2. Contexto histórico-geográfico del área de estudio

En este capítulo se identifica el contexto regional del área bajo análisis. Para ello, en el primer apartado se examinan algunas de las investigaciones previas a la presente relacionadas con la temática de estudio en la ciudad de Morelia. Posteriormente, se refieren los principales acontecimientos histórico-geográficos asociados con el origen y evolución de los eventos que han modelado el caso urbano de la ciudad de Morelia. Por último, se muestra la delimitación del polígono de interés dentro de la ciudad y se plantean las particularidades geográficas de éste.

2.1. Experiencias investigativas

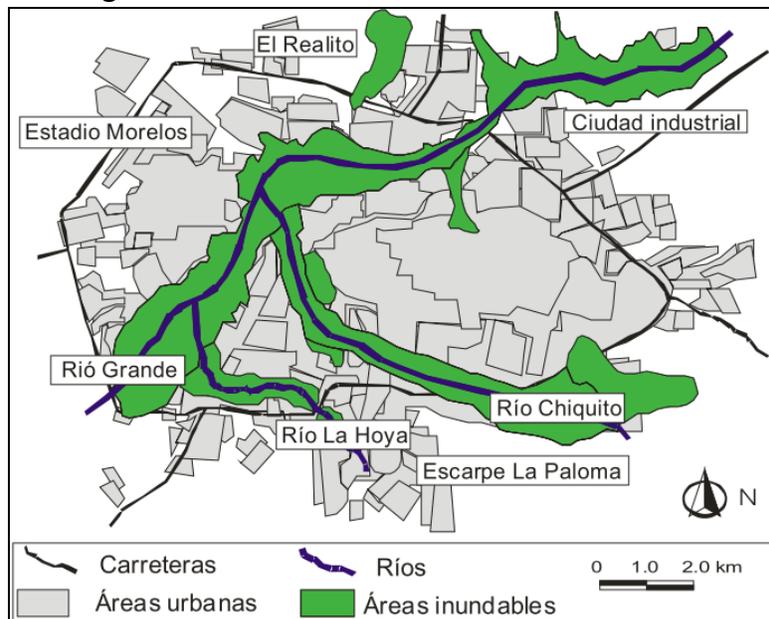
Las inundaciones en la ciudad de Morelia han provocado daños a la vivienda, la infraestructura, las vialidades y a la ciudadanía en general; tan sólo en el año 2002 se registró una pérdida de 50 millones de pesos debido a las lluvias extraordinarias (Arreygue, 2007). Asimismo, durante 2004 se presentaron ocho inundaciones, el mayor número de eventos reconocidos por el diario “La Voz de Michoacán” desde 1950, año de fundación del periódico (Corona, 2009). El aumento tanto en la frecuencia de los eventos como en la magnitud de los daños ha provocado que algunos investigadores dirijan sus estudios a este proceso. En este sentido, de acuerdo con los enfoques encontrados dentro de la literatura especializada, los antecedentes investigativos sobre inundaciones en la ciudad de Morelia se pueden agrupar de la manera siguiente:

Las inundaciones desde perspectivas hidrológicas e hidráulicas

En estos documentos se revisan las características hidrológicas e hidráulicas de la zona, con énfasis en el estudio de los Ríos Grande y Chiquito; entre los resultados derivados de estos análisis se incluyen balances hidrológicos y cálculos de períodos de retorno de los valores de gasto máximo. De igual forma, se exponen algunos antecedentes históricos sobre las inundaciones y el desarrollo urbano de la ciudad, así como una revisión de los riesgos geomorfológicos presentes en el escarpe La Paloma.

Arreygue y Garduño (2004) declaran que las pérdidas económicas relacionadas con las inundaciones están, frecuentemente, asociadas con la mala planificación del territorio, el desconocimiento de factores morfológicos, geológicos y climáticos, así como con la ausencia del enfoque de cuenca hidrológica. Con respecto a la ciudad de Morelia, se reconoce que las primeras edificaciones se localizaron lejos de las zonas inundables de los Ríos Grande, Chiquito y La Hoya (figura 2.1) y que el desarrollo de la urbe fue modesto hasta el decenio de los ochenta, período en el que se experimentó una acelerada expansión urbana sobre tierras ejidales y agrícolas, entre las que se encontraban zonas con un alto grado de peligrosidad hidrológica e hidráulica, como los casos de las áreas donde ahora se encuentran las colonias El Realito, Prados Verdes, Ventura Puente, Molino de Parras y Camelinas.

Figura 2.1. Ciudad de Morelia: áreas inundables



Fuente: Carta de áreas inundables de la ciudad de Morelia; en Arreygue y Garduño, 2004.

En relación con el balance hidrológico del Río Chiquito, se halló que la cuenca, con un área de 81.2 kilómetros cuadrados, recibe 974.2 mm de precipitación media anual y presenta una temperatura promedio de 17.3 °C. De acuerdo con los métodos Turc y Thornthwaite, la evapotranspiración real se estimó en 721 y 638.1 mm anuales, respectivamente. Por su parte, el cálculo de los escurrimientos globales arrojó un total de 11 739.72 metros

cúbicos por año. Sobre estos resultados, los autores comentan lo siguiente “...las precipitaciones superan las suma de la evapotranspiración real del escurrimiento y las precipitaciones infiltradas no se suman al escurrimiento superficial del Río Chiquito, pero alimentan, por vía subterránea, otras cuencas colindantes” (*ibid*).

Sobre la peligrosidad hidráulica del Río Chiquito se afirma que ésta ha aumentado debido al desarrollo urbano, la inadecuada modificación del cauce de los ríos y la existencia de puentes que, de alguna manera, representan un obstáculo para el escurrimiento natural de las aguas superficiales. Así, las principales causas de los desbordamientos de los Ríos Chiquito, Grande y la Hoya se atribuyen a la poca capacidad hidráulica de sus secciones y la presencia de numerosos puentes de dimensiones reducidas en el tramo urbano, donde dos de los puntos críticos son provocados por los puentes Camelinas y Virrey de Mendoza.

Los períodos de retorno fueron calculados con base en los métodos Gumbell y Weibull. De acuerdo con el primero, para un gasto $70 \text{ m}^3/\text{s}$, el tiempo de retorno es de veinte años; mientras que para un valor de $50 \text{ m}^3/\text{s}$ es menor a diez. El segundo método demostró que los gastos de 74.62 (máximo histórico) y $50 \text{ m}^3/\text{s}$ presentan un período de recurrencia de sesenta y de entre cuatro y cinco años, respectivamente.

Dentro de esta investigación, se concluye que el agua de lluvia que se infiltra alimenta a otras cuencas y no se suma al escurrimiento superficial del Río Chiquito. Además, se menciona que el sistema entra en crisis con un de gasto de $47.7 \text{ m}^3/\text{s}$, valor caracterizado por un tiempo de retorno que oscila entre cuatro y diez años, por lo tanto, es normal que, cada vez que se cumpla este intervalo y se produzca un flujo superior, ocurran inundaciones. Finalmente, se pone de manifiesto que si los gastos no se controlan, los períodos de recurrencia se reducirán, por ello, es necesario dar mantenimiento constante al cauce del Río y evitar la construcción de puentes que afecten la escorrentía.

En cuanto a las inundaciones potenciales vinculadas con el Río Chiquito, Arreygue, *et.al.* (2004) argumentan que, a pesar de que las precipitaciones más intensas se registran en el mes de julio, el mayor volumen de escurrimiento se produce en septiembre. Esto significa

que durante los primeros meses de la temporada de lluviosa (mayo a julio) el agua se infiltra con facilidad, mientras que en los meses siguientes (julio a agosto) la lluvia tiene a escurrir debido a que el suelo se encuentra saturado. Por lo tanto, la posibilidad de inundaciones es más elevada durante la segunda mitad de la época de lluvias.

Arreygue, *et.al.* (2005), además de confirmar las aseveraciones antes mencionadas sobre el crecimiento urbano de Morelia y los peligros hidrológicos e hidráulicos, señalan que, en 1939, la rectificación del cauce del Río Chiquito fue planeada para un gasto máximo de 125 m³/s, sin embargo, en la actualidad, éste valor se ha reducido a setenta debido a la sedimentación y la existencia de una densa cobertura vegetal.

En un estudio similar, Arreygue (*op.cit*) amplía el área de análisis a una zona, de más de mil kilómetros cuadrados, que incluye algunas de las subcuencas que alimentan el Río Grande, como las de los Ríos Chiquito, Cointzio e Itzicuaros. Para dar contexto a su trabajo, el autor indica que las inundaciones han aumentado a partir del decenio de los setentas debido al acelerado y mal planeado crecimiento de la ciudad.

Por otro lado, se encontró que la estación meteorológica Zona Militar, ubicada dentro de la ciudad, registró, en 1980, una precipitación anual máxima histórica de 1 151 mm; valor que para la estación Cointzio fue de 1 494, en el año 2000. Con base en esta y otras consideraciones, el balance hídrico (cuadro 2.1) muestra que los aportes de lluvia son superiores a las salidas por evapotranspiración y escorrentía superficial, lo cual sugiere que el flujo subterráneo alimenta a otras cuencas adyacentes.

Cuadro 2.1. Cuenca Río Grande: balance hidrológico

Área total	1 200 K m ²
Temperatura media	17.3 °C
Precipitación media	842.66 mm/año
Evapotranspiración	517.50 mm/año
Escurrimiento	133.73 mm/año
Pérdidas	192.43 mm/año

Fuente: Arreygue, 2007.

Los tramos urbanos de los Ríos Chiquito y Grande se examinaron con el software Hec-Ras y los valores de caudales máximos se sometieron a los métodos de Gumbel y Weibull.

Para el primer Río, los resultados obtenidos, sobre gastos máximos admisibles y períodos de retorno, son similares a los mencionados con anterioridad. Por su parte, el análisis del Río Grande revela que, si no se toman en cuenta sus afluentes y se considera una pendiente de cinco por ciento, una velocidad de tres a cuatro metros sobre segundo y la existencia de siete puentes, su capacidad máxima es de 55 m³/s. Finalmente, de acuerdo con los máximos históricos registrados en las estaciones de monitorio, para un gasto de 70 m³/s, la recurrencia será de entre veinticinco y treinta años, mientras que para un valor de ochenta será de entre setenta y setenta y cinco años.

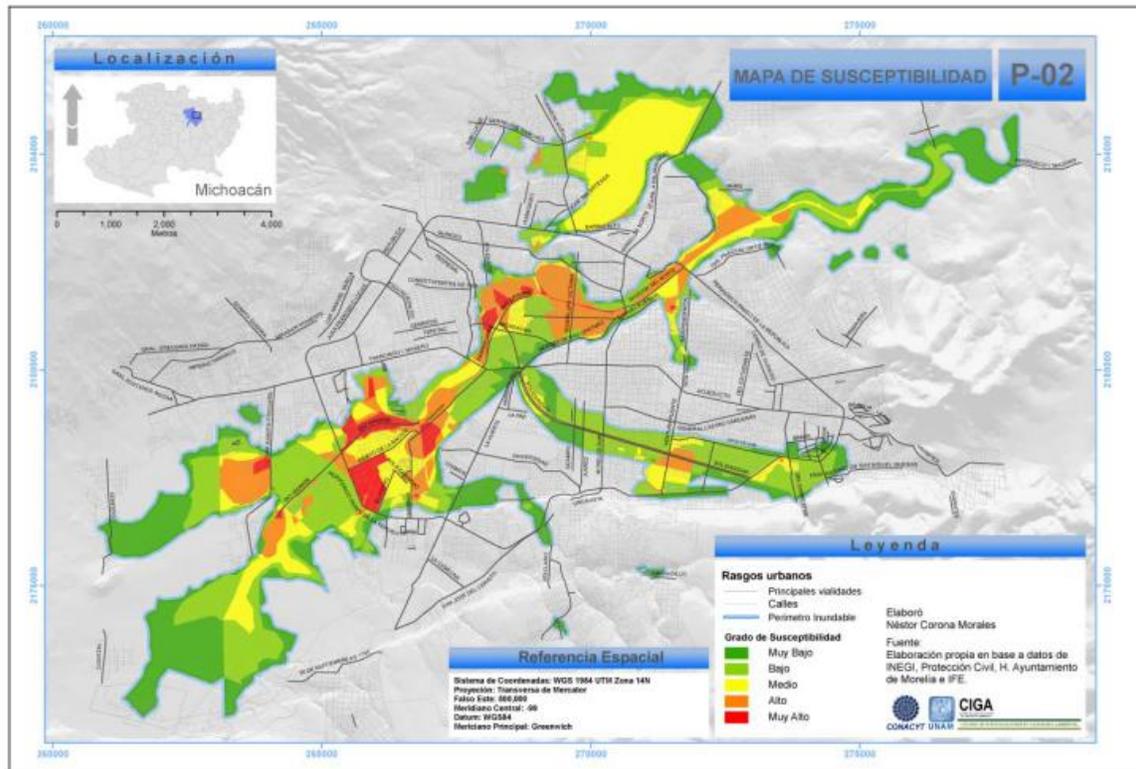
La vulnerabilidad y las condiciones precarias de la población ante las inundaciones

Estos textos se enfocan en la evaluación de la vulnerabilidad tanto de la población como de la infraestructura, las actividades económicas y los recursos naturales; además, identifican las áreas en condición de riesgo sobre el periurbano de la ciudad de Morelia, así como la capacidad de adaptación y respuesta de la población precaria ante las inundaciones en estas zonas.

En este contexto, Corona (*op.cit.*) presenta una investigación donde define las áreas susceptibles a inundaciones con base en una documentación rigurosa, la integración espacial de los datos obtenidos y la validación de la información que resulta de los pasos anteriores (figura 2.2). Posteriormente, este autor se centra en la evaluación de la vulnerabilidad, para ello, implementa el modelo SAVE (Spatial Analysis of the Vulnerability Environment), el cual, de manera general, analiza las condiciones que articulan la vulnerabilidad de cada sujeto. Para comprender lo anterior, es necesario saber que, como sujetos de vulnerabilidad, se consideró a la población, infraestructura, actividades económicas y recursos naturales y que las condiciones de vulnerabilidad, según Turner, son la exposición, sensibilidad y resiliencia.

Entre los resultados de este trabajo se incluyen mapas de exposición, sensibilidad y resiliencia total por cada sujeto, además de algunos relativos a la vulnerabilidad total

Figura 2.2. Ciudad de Morelia: susceptibilidad a inundaciones

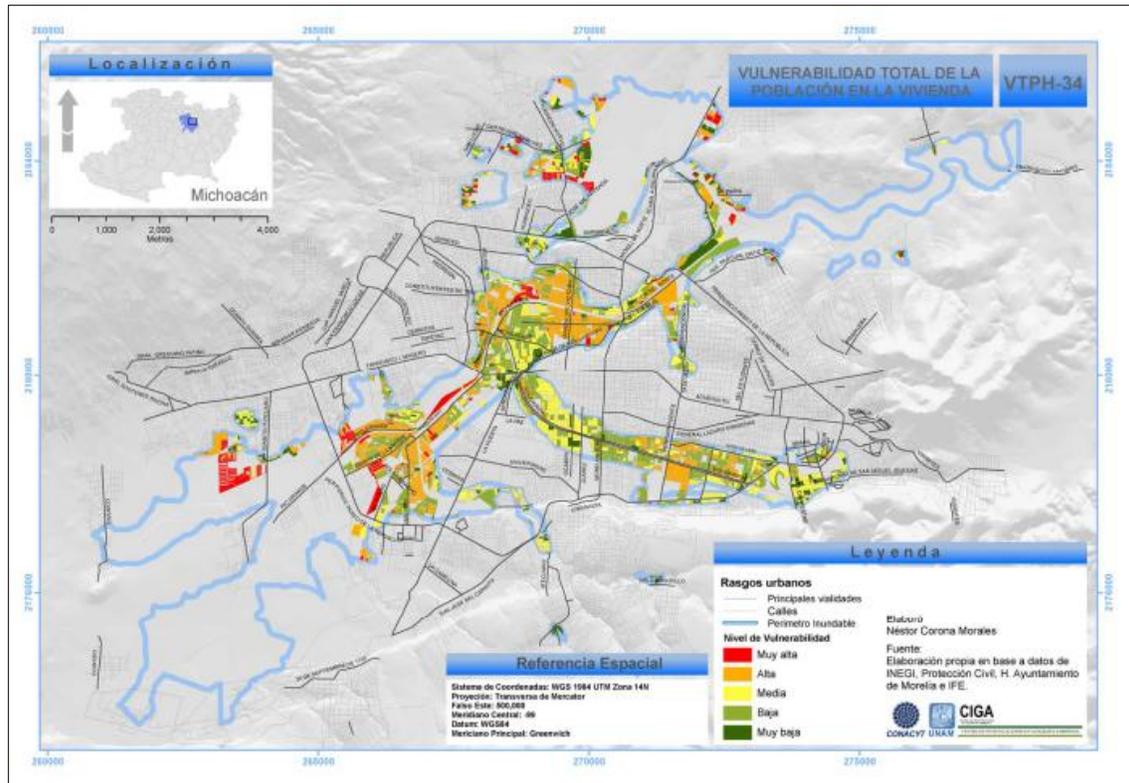


Fuente: Corona, 2009.

como el que se muestra en la figura 2.3 donde nos se percibe un patrón espacial definido, situación que denota la heterogeneidad de las zonas urbanas; asimismo, se observa una gran cantidad de zonas con grados altos de vulnerabilidad, aunque la mayor cantidad de población, poco más de 56 000 habitantes, se encuentra en sitios con nivel medio.

Dentro de las conclusiones y recomendaciones, Corona hace hincapié en la necesidad de registrar y almacenar, de manera adecuada, la información que se genera a través de las instituciones gubernamentales o académicas, pues, hasta el momento, la multiplicidad de formatos existentes y la inconsistencia de las bases de datos obstaculizan el desarrollo de proyectos orientados a mitigar esta amenaza.

Figura 2.3. Ciudad de Morelia: vulnerabilidad total de la población en la vivienda



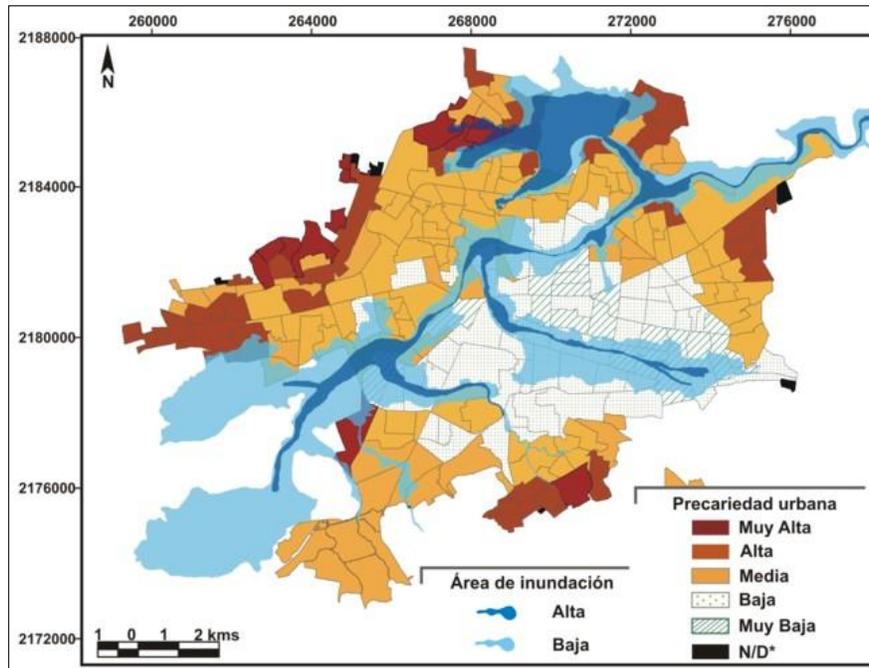
Fuente: Corona, 2009.

Por otro lado, Hernández y Vieyra (2010) revelan las áreas que potencialmente se encuentran en condición de riesgo sobre el periurbano de Morelia. Para lograr este objetivo, los autores muestran la correlación espacial existente entre las zonas precarias y las áreas inundables de la ciudad. En esta línea, la modelación de los sitios propensos a inundarse partió del estudio de la precipitación media y su vinculación con parámetros morfométricos; mientras que la identificación de las áreas precarias se obtuvo a través de la ponderación de variables sociales (relacionadas con la calidad de las viviendas, aspectos económicos y exclusión social) y un análisis multicriterio.

Los resultados sugieren que la ciudad ha crecido sobre tierras sin vocación urbana, ocupadas por personas de bajos recursos cuyas necesidades de vivienda las orillan a establecerse sobre suelos inseguros y proclives a desastres. Como consecuencia, se presentan irregularidades en la tenencia de la tierra, carencia de servicios básicos y viviendas autoconstruidas con materiales precarios que incrementan el grado de riesgo.

Aunado a esto, se demuestra que, si bien el mayor porcentaje de población afectada por inundaciones (cincuenta y nueve por ciento) se encuentra en el centro de la ciudad, los bajos niveles de precariedad en esta zona favorecen una mejor respuesta al impacto. En contraste, aunque las periferias inmediata y exterior agrupan menor cantidad de habitantes afectados (cuarenta y uno por ciento), los elevados niveles de precariedad provocan una mayor susceptibilidad a situaciones de desastre (figura 2.4). En suma, los mayores problemas se presentan en la periferia exterior, particularmente en la porción norte, donde, por su grado de afectación, destacan las colonias Valle del Real, Gertrudis Sánchez, Pastor Ortiz y Solidaridad, por mencionar algunas.

Figura 2.4. Ciudad de Morelia: correlación entre los modelos de inundación y precariedad urbana



Fuente: Hernández y Vieyra, 2010.

Bajo esta misma perspectiva, Hernández (2011), además de delimitar las zonas inundables, reconocer los asentamientos periféricos, determinar la precariedad urbana y llevar a cabo la integración espacial correspondiente, selecciona dos micro-zonas urbanas con riesgo por inundaciones y diferentes niveles de precariedad entre sí. La finalidad de centrar la atención en estas dos secciones es comparar las capacidades de adaptación y respuesta de la población ante las inundaciones.

De este modo, la zona Gertrudis Sánchez (MZUGS), ubicada en la porción norte de la periferia exterior, se eligió por los niveles altos de precariedad que registra; mientras que la zona Santiaguito (MZUS), localizada sobre la confluencia del Río Chiquito con el Grande, por los valores medios. De manera general, la investigación revela que los habitantes de la MZUGS son capaces de tolerar el desastre y aprender a vivir con el riesgo, pues, al no esperar apoyo externo debido a su condición ilegal, responden con la elaboración de adaptaciones para sus viviendas; sin embargo, la deficiencia de los ajustes realizados imposibilita su regreso a una situación estable y aumenta su nivel de precariedad. En contraste, bajo el supuesto de que la legalidad debe proporcionar condiciones óptimas para vivir sin riesgo, la población de la MZUS muestra intolerancia ante el desastre.

Obras de protección contra inundaciones

Con la finalidad de disminuir el volumen y la fuerza de los escurrimientos provenientes de las cuencas Cointzio, Itzicuaros y del Río Chiquito, Servin (2007) propone un proyecto que consiste en el desazolve de los ríos y drenes de la ciudad y la construcción de las obras siguientes:

- Tres colectores pluviales (Libramiento Oriente, Ocampo y Camelinas-Ventura Puente)
- Tres lagunas de regulación (Itzicuaros, Bodega Aurrerá y Alfalfar)
- Presas para el control de las avenidas del Río Chiquito
- Conexión del colector pluvial Avenida Poliducto al dren Carlos Salazar
- Obra de control en el Canal Mintzita
- Bordo izquierdo del Río Grande en el tramo Madero Poniente - Morelos Norte
- Ampliación del puente Camelinas
- Reconstrucción del puente de Avenida Periodismo
- Reestructuración del paso del ferrocarril sobre el Río Chiquito
- Rectificación del Río Chiquito en la confluencia con el Río Grande
- Hincado de tubería bajo la vía del tren en Arroyo de Tierras

Es importante mencionar que la ciudad de Morelia ya cuenta con obras para el control de los escurrimientos, entre las que destacan la presa Cointzio, cárcamos de bombeo, sistemas de regulación por compuertas, vasos de regulación y presas rompe picos. Sin embargo, el documento antes citado resalta la necesidad de nuevas medidas que ayuden a reducir el impacto de las avenidas. En este contexto, como parte de la investigación, se prueba la rentabilidad del proyecto y se incluye un ejercicio que indica que la puesta en marcha de estas obras puede aportar un beneficio neto de más de 11 372 millones de pesos (según precios de 2006). También, se considera una vida útil de treinta años, por lo tanto, se recomienda que, después de este período, se realice un diagnóstico para revisar las condiciones de los cauces y detectar las nuevas necesidades.

Finalmente, además de las aportaciones de los trabajos considerados en los tres grupos anteriores, es preciso resaltar los esfuerzos realizados por las dependencias gubernamentales como Protección Civil y Bomberos del Municipio de Morelia, institución que, entre otras actividades, ha elaborado reportes con los cuales es posible identificar las colonias susceptibles a inundaciones y su grado de afectación. Asimismo, se ha logrado la publicación de un Atlas de Riesgos de Morelia, donde se incluye un modelo que estima la distribución de la lámina de agua en los bordes del Río Grande (Corona, *op.cit.*).

2.2. Antecedentes territoriales

Debido a que la hipótesis de esta investigación hace referencia a la urbanización de una porción de la ciudad de Morelia, aquí se tratan los aspectos históricos que han configurado el actual casco urbano. Así, es preciso considerar el origen de los asentamientos y el incremento poblacional consiguiente; del mismo modo, se deben señalar las migraciones más significativas, la anexión de localidades rurales y algunas situaciones político-socioeconómicas como conflictos bélicos e incorporación de obras públicas, por mencionar algunas.

Para mostrar de manera conjunta los sucesos citados, tras una búsqueda bibliográfica, se realizó un registro cronológico de acontecimientos territoriales que, posteriormente, se

sistematizaron en períodos delimitados en función de procesos análogos o agrupables. Con tales consideraciones, los principales acaecimientos relacionados con la expansión territorial de la ciudad de Morelia se generalizan en las etapas siguientes:

I. Primeros pobladores y fundación de la ciudad (antes de 1610)

Algunas fuentes señalan que, durante los siglos XIV o XV, los matlalzincas se establecieron en Valle de Guayangareo (actualmente Morelia) y recibieron el nombre de pirindas; una de las hipótesis indica que este territorio les fue concedido como recompensa por haber participado en la defensa del imperio purépecha durante la invasión de los tecos de Jalisco (López, 1999). Otros autores argumentan que existió un asentamiento prehispánico conocido como Rincón de Guayangareo, ubicado en las cercanías del nacimiento del Río Chiquito (Ávila, 1991); asimismo, reportan hallazgos de cerámica y obsidiana en Santa María, el cauce del Río Chiquito y el cerro Quinceo (Arreola, 1978; citado en *idid*). En contraste, hay quienes sostienen que no existieron pobladores prehispánicos en el lugar y que, por lo tanto, Morelia fue creada por y para los españoles (Herrejón, 1991 y Schwartz, 1967; citados en Ávila, 1998).

En concordancia con unos de los planteamientos anteriores, el PDDUM (1991, citado en López, *op.cit.*) señala que, en 1531, los franciscanos, Fray Juan de San Miguel y Fray Antonio de Lisboa, constituyeron un poblado cerca del lugar que ahora ocupa el Templo de las Capuchinas y aconsejaron a los pirindas cambiarse a este sitio. Es así como, en 1537, se funda la Villa y, en 1541, la ciudad de Valladolid (actual Morelia); la cédula de fundación se conoce como “Traslado de la ciudad de Mechuacan al Valle Guayangareo”. La nueva ubicación respondió a cuestiones físico-geográficas, como la cercanía a los ríos, y al deseo de trasladar funciones político-económicas que hasta el momento se realizaban en Pátzcuaro (Aguilar, 1999; Juárez, 1982 y Martínez, 1989; citados en Ávila, 1991).

La creación de la ciudad significó la lucha entre dos instituciones, la Diócesis de Michoacán y el Virreinato de la Nueva España, representadas por Don Vasco de Quiroga y el Virrey Antonio de Mendoza, respectivamente. El primero era un hombre partidario de

los indígenas y en desacuerdo con la fundación de Valladolid en el Valle de Guayangareo debido a los problemas referentes al agua; esta ideología, que atentaba contra las intenciones de poder real, motivó al Virrey a establecer una ciudad que no estuviera sujeta a Don Vasco de Quiroga, como lo estaban Tzintzuntzan o Pátzcuaro. Bajo este contexto se fundó Valladolid, lugar que se delimitó con una superficie amplia para efectos agropecuarios y presentó un poblamiento muy lento hasta principios del siglo XVII (Aguilar, *op.cit.*; Antaramian, *et.al.*, 1993; citado en López, *op.cit.*).

II. **Consolidación urbana bajo un ritmo moderado de expansión territorial (1610-1960)**

Debido a que, hasta ese momento, Morelia no se caracterizó por el alto número de habitantes, en 1610, se atrajo población indígena con la intención de consolidar y edificar la ciudad, a este proceso se le llamó Congregación de Valladolid. De esta manera, en 1619, la ciudad ya contaba con una estructura ortogonal bien definida constituida por 60 hectáreas y 1 000 habitantes (figura 2.5, A) (Hernández, 2011). Los primeros barrios indígenas que se formaron fueron Santa Catarina, Santa Anita, San Diego, San Pablo, San Miguel Ichaqueo, Guayangareo, Santa María e Itzicuaru; todos estos establecidos fuera del primero cuadro de la Villa.

Durante los siglos XVII y XVIII, en los alrededores de Valladolid, se formaron grandes latifundios propiedad de españoles y órdenes religiosas (Aguilar, *op.cit.*). Para el año 1793, la urbe ya tenía poco más de 17 000 habitantes, sin embargo, la guerra de Independencia causó que la población descendiera hasta menos de 12 000 personas. En esta época, la mancha urbana se extendía 1 000 metros tanto de norte a sur como de oriente a poniente (Ramírez, 1985; citado en Ávila, 1998).

Una vez consumado el movimiento de Independencia, con el objeto de honrar la memoria de José María Morelos y Pavón, la Legislatura del Estado cambió el nombre de la ciudad de Valladolid por Morelia (López, *op.cit.*). En los años posteriores a este suceso y a la intervención francesa, se presentó una recuperación demográfica que permitió que, en

1852, la población se elevó a 25 000 habitantes. También se inició un período de ascenso económico que estimuló la comercialización y el consumo, situación que, a su vez, provocó la demanda de fuerza de trabajo y la generación de insumos agrícolas para el impulso de pequeñas industrias. De esta manera, en 1867, se creó el primer establecimiento industrial de hilados y tejidos, al cual le siguieron otros que pretendían acceder al proceso de industrialización local y regional; sin embargo, a pesar de la introducción del ferrocarril, el desarrollo sólo se logró a escala micro y pequeña industria (Aguilar, *op.cit.*).

En 1898, la mancha urbana mostraba con una superficie de 287 hectáreas y estaba limitada por los ríos que, hasta ese momento, bordeaban la ciudad; por su parte, la población ascendía a casi 36 000 habitantes (figura 2.5, B) (Hernández. *op.cit.*). A finales del siglo XIX y principios del XX, se realizaron diversas obras públicas como la canalización de agua potable y drenaje, pavimentación y la introducción de alumbrado público y electricidad; asimismo, se inició el uso del telégrafo y teléfono. Estos nuevos elementos contribuyeron tanto a la consolidación del casco viejo como a la ampliación de los límites de ciudad (Aguilar, *op.cit.*).

En 1910, Morelia contaba con 40 000 personas, cifra que la colocó como el territorio más poblado de Michoacán y el octavo a nivel nacional. No obstante, después de los conflictos bélicos, provocados por la Revolución Mexicana, la población se redujo a menos de 32 000 habitantes (Ávila, *op.cit.*). Para 1930, hubo un crecimiento demográfico y se registraron más de 39 900 personas establecidas en un área de 584 hectáreas (figura 2.5, C) (Hernández, *op.cit.*).

Durante el decenio de los treinta, comenzó la transición entre la monopolización de la tierra, por religiosos y hacendados españoles, y el régimen de tenencia ejidal; éste y otros sucesos provocaron que, en esta década, se presentaran diversos cambios en la estructura urbana. Entre los hechos más relevantes que sustentan la afirmación anterior, se puede mencionar la construcción de la carretera México-Guadalajara y la presa Cointzio, la rectificación del Río Chiquito, la sustitución del acueducto y la red de canales internos por

nuevas tomas domiciliarias, la dotación de infraestructura agraria, la conformación de nuevas colonias, como Quiroga y Juárez, y el desplazamiento urbano hacia antiguas exhaciendas como Molino de Parras, Norma y La Soledad que, posteriormente, se convertirían en fraccionamientos. Aunado a esto, Morelia amplió sus funciones comerciales y de servicios y se consolidó como centro académico, religioso y político-administrativo (Ávila, *op.cit.*; Ávila, 2007 y Vargas, 2008).

En el transcurso de los decenios treinta y cuarenta, se sentaron las bases para el desarrollo regional. Así, desde 1940, Morelia se convirtió en el principal núcleo comercial de Michoacán; los productos que más destacaron dentro de esta actividad económica fueron los alimentos, bebidas, tabaco, equipo de transporte, refacciones y accesorios, cuya producción se polarizó en pocos establecimientos de grandes dimensiones (Aguilar, *op.cit.*).

En cuanto al crecimiento poblacional, en 1940, se registraron más de 44 000 habitantes distribuidos en nueve colonias. Para esta época, los problemas de inundaciones ya se habían manifestado, puesto que algunos poblados se extendieron sobre ciénegas antiguas adyacentes a los márgenes de los ríos (Hernández, *op.cit.*). A pesar de lo anterior, Morelos (1941; citado en Aguilar, *op.cit.*) indica que, para 1941, el ensanchamiento del núcleo urbano había sido poco notable y, para contextualizar, refiere que al oriente se distinguían las colonias Atenógenes Silva, Vasco de Quiroga, Socialista, Obrera e Independencia; al poniente Cortijo de Morelos; mientras que al sur y al norte los barrios Juárez y Melchor Ocampo, respectivamente.

En 1950, la urbe tenía 724 hectáreas de superficie y un poco más de 63 000 habitantes. En este decenio, se trazaron vías de comunicación fuera de los límites marcados por los ríos, tal infraestructura contribuyó a que se integraran a la ciudad colonias como Isaac Arriaga, Matamoros, Felix Ireta, Bocanegra, Lomas de Hidalgo, Chapultepec y el Porvenir, por mencionar algunas (Vargas, *op.cit.*).

III. Proceso de expropiación de tierras bajo un ritmo acelerado de expansión territorial (1960-2000)

A pesar de que, en 1960, la mancha urbana aún mostraba una expansión territorial moderada, representada por 1 000 hectáreas y poco más de 100 000 habitantes (figura 2.5, D), en esta época comenzó la integración de poblados rurales adyacentes y la ocupación de exhaciendas contiguas a los Ríos Grande y Chiquito. Del mismo modo, empezó un proceso de expropiación de tierras que desarticuló el ambiente ejidal y, mediante la regularización de la tenencia del suelo y la aparición de agentes inmobiliarios, colocó en manos de particulares cientos de predios. Estas situaciones marcaron las bases para el inicio de una urbanización acelerada que, a su vez, contribuyó a la conformación de zonas de riesgo por inundación (Aguilar, *op.cit.*; Hernández, *op.cit.*).

En términos generales, la desestabilización de la dinámica de la tenencia ejidal y el crecimiento urbano consiguiente tienen su origen en la mengua de la producción agrícola, derivada del agotamiento de los suelos, y en la disminución de la necesidad de mano de obra debido a la tecnificación del sector productivo primario; razones que desencadenaron un abandono masivo del campo y la migración de campesinos hacia las principales ciudades o el extranjero. Por otro lado, la urbanización dio pie al desarrollo del fenómeno de segregación residencial socioeconómica, entendida como la aglomeración de familias de un mismo grupo socioeconómico en porciones específicas del territorio (Sánchez, 2009).

En 1970, con una tasa de incremento anual superior al cuatro por ciento, la población se elevó a más de 160 000 habitantes, con lo que alcanzó un ritmo de crecimiento similar al de la ciudad de México en uno de sus momentos de mayor expansión urbana. Este aumento se debió, en gran parte, a las migraciones intraestatales, la alta natalidad y el descenso en los niveles de mortalidad (Ávila, 1991; Schwartz, 1967 y Commons, 1972; citados en Ávila, 1998). Con respecto al caso urbano, éste se amplió hasta casi 1 400 hectáreas que, como se mencionó, ya incluían terrenos ubicados fuera de los límites que anteriormente establecían los ríos (figura 2.5, E) (Hernández, *op.cit.*).

Según Garza (1980), de acuerdo con los ingresos brutos industriales, en 1970, Morelia ocupaba, entre 50 ciudades mexicanas, el lugar 47; esta posición denotaba los aportes incipientes de la industria a la economía de la urbe. En contraste, las actividades destacadas estaban representadas por el comercio y, principalmente, los servicios; estos últimos impulsados por la presencia de organismos estatales como el Ayuntamiento, grupos financieros como Bancomer y Banamex, el turismo y la población estudiantil atraída, en mayores cantidades, desde la conformación del Colegio de San Nicolás como Universidad, a principios de siglo. Por su parte, el comercio se distinguió, entre otros giros, por los abarroteros mayoristas, concesionarios de automóviles, materiales de construcción, maquinaria agrícola, madererías y la Organización Ramírez dedicada a la administración de cines y la especulación inmobiliaria (Aguilar, *op.cit.*).

En 1975, Morelia se inscribió dentro de la política territorial de Parques y Ciudades Industriales, no obstante, hasta el momento, el equipamiento y las actividades no han sido trascendentales (*ibid*). Un año después, se inauguró la Plaza Morelia y se inició la construcción de la Plaza las Américas, a esos acontecimientos, se les sumaría la introducción de diversas tiendas de autoservicio como Comercial Mexicana, Sears, Aurrerá y Gigante, entre otras (Vargas, *op.cit.*).

En tan sólo diez años, el número de viviendas aumentó casi 50% dentro de la ciudad. De esta forma, para 1980, la superficie edificada era de 2 040 hectáreas, con una población de poco más de 290 000 habitantes (Hernández, *op.cit.*), lo que equivale a casi el doble de las personas censadas en 1970. Este incremento se hace muy notorio al observar el crecimiento poblacional histórico mostrado en la figura 2.6. Con tal escenario, en este decenio, se fomentó el desarrollo de pequeñas y medianas empresas a través de incentivos fiscales y créditos. Asimismo, la ciudad se convirtió en receptora de población originaria del Distrito Federal como consecuencia del sismo de 1985, esta migración contribuyó a la expansión urbana bajo un esquema de falta de planeación y carencia de oferta legal de suelo (Ávila, *op.cit.*).

En 1990, la urbe estaba constituida por poco más de 5 400 hectáreas ocupadas por más de 428 000 habitantes que tendieron a establecerse en la intersección del Río Chiquito con el Grande, zonas bajas y cauces temporales (figura 2.5, F) (Hernández, *op.cit.*). Como se observa en la figura 2.7, el crecimiento urbano de este período representa un parteaguas en la dinámica de la expansión territorial. Así, conforme la ciudad se extendía, se reforzaban sus funciones administrativas, educativas, comerciales y de servicios, lo cual, a su vez, atrajo flujos poblacionales en busca de empleo y mejores expectativas económicas (Ávila, *op.cit.*).

Durante el decenio de los noventa, el personal empleado en el sector terciario rebasó el 70% con respecto al total de la población económicamente activa; tal panorama estuvo estimulado por la declaración del centro histórico como patrimonio cultural de la humanidad. El proceso de terciarización de la economía fomentó una tendencia hacia la creación de complejos habitacionales cerrados, principalmente, al sur y suroriente de la ciudad (Sánchez, *op.cit.*). A mediados de la década, se construyó la principal vía de comunicación *el libramiento*, eso favoreció la consolidación de asentamientos periféricos de difícil acceso, los cuales estaban constituidos por personas de bajos recursos que adquirieron predios a bajo costo sobre terrenos marginales, laderas con pendientes pronunciadas y zonas inundables o con fallas geológicas (Ávila, *op.cit.*; Hernández, *op.cit.*).

En suma, durante el período comprendido entre 1962 y 1997, ocurrieron acontecimientos que ayudaron a configurar la estructura actual de la ciudad. Entre los más destacados se puede mencionar el establecimiento de 139 colonias, de las 256 existentes hasta 1990, sobre tierra ejidal; la expropiaron más de 1 700 hectáreas, pertenecientes a 22 ejidos, y la enajenación de 500. Lo anterior sucedió bajo un contexto donde, por lo general, el gobierno, después de haber asumido el control sobre el suelo, concesionaba tierras ejidales a propietarios privados para promover la inversión por medio del fraccionamiento y urbanización. Sin embargo, muchos fraccionadores vendieron a precios elevados sin que los predios contaran con los servicios básicos (Sánchez, *op.cit.*).

IV. Nuevas tendencias de urbanización (2000 hasta el presente)

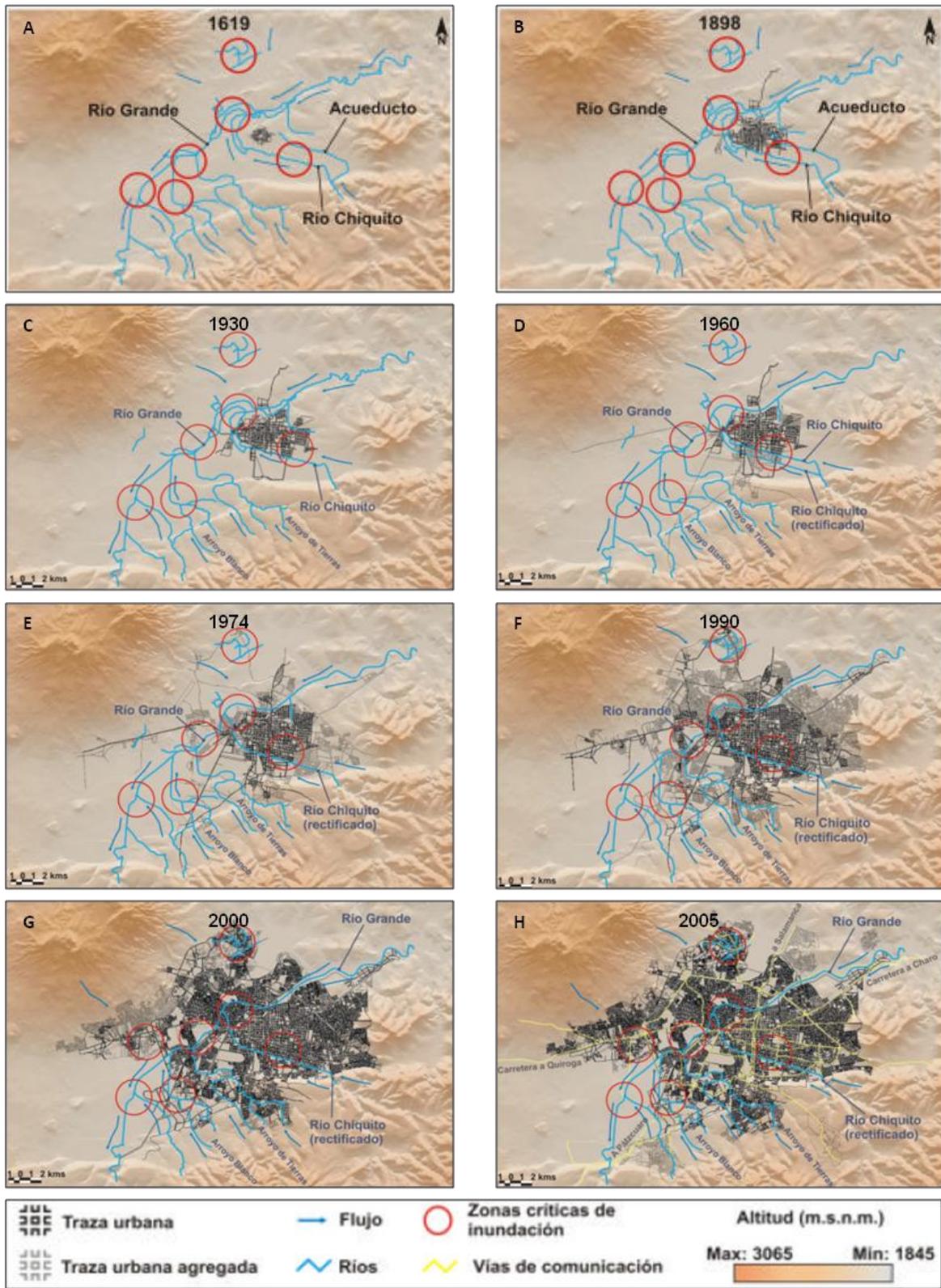
En el año 2000, el casco urbano de Morelia contaba con más de 9 100 hectáreas y 540 000 habitantes. Para 2005, la expansión territorial y el crecimiento poblacional continuaron hasta alcanzar 9 800 hectáreas y más de 600 000 personas, respectivamente (figura 2.5, G y H). Del mismo modo que en años anteriores, los nuevos asentamientos se establecieron sobre zonas de inundación, principalmente, al norte y suroccidente de la ciudad, lo que provocó la densificación, mal planeada, de espacios de riesgo (Hernández, *op.cit.*).

Como se mencionó, la terciarización de la economía motivó a los gobiernos local y estatal a asistir a este sector a través del apoyo tanto al desarrollo inmobiliario como al comercio, turismo y actividades recreativas. Es así como, en los últimos años, la periferia de Morelia ha sido impactada por el surgimiento de dos megaproyectos dirigidos a la creación de los complejos habitacionales cerrados *Ciudad Tres Marías* y *Altozano La Nueva Morelia*, promovidos por la Organización Ramírez y el Grupo FAME (conocidos como los Medina), respectivamente.

Ambos proyectos implican la presencia del fenómeno de segregación residencial socioeconómica, están dirigidos a la población de clase media y alta, tanto nacional como extranjera, y se basan en la existencia de elementos urbanos como accesos restringidos, seguridad privada, inversión corporativa, desarrollos habitacionales, campos de golf, hoteles, hospitales, instituciones educativas privadas, áreas verdes, avenidas amplias y centros comerciales, culturales y de negocios (Sánchez, *op.cit.*).

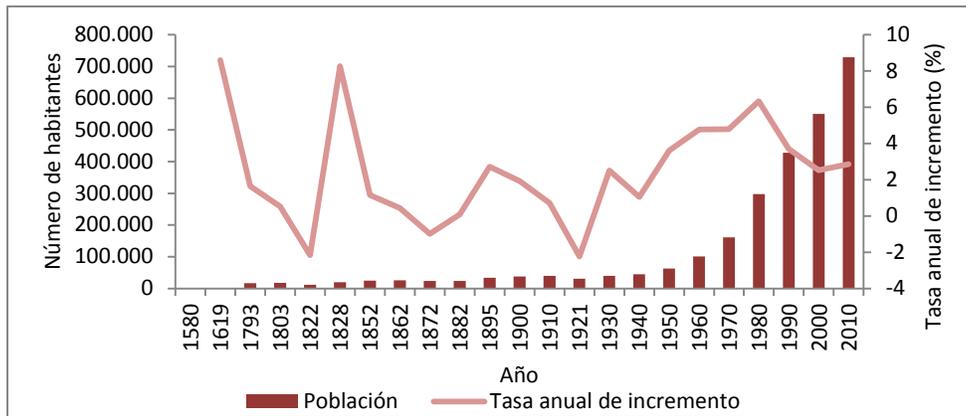
Debido a su ubicación en la porción sur de la ciudad, el complejo *Altozano La Nueva Morelia* merece especial atención dentro de esta tesis. Con esta perspectiva, es importante mencionar que la superficie donde, desde 2004, se edifica este proyecto corresponde a terrenos particulares que fueron comprados por el Grupo FAME y un predio adquirido del ejido Jesús del Monte (*ibid*). El plan maestro (figura 2.8) señala que *Altozano* comprende 650 hectáreas que serán urbanizadas en, por lo menos, tres etapas (Internet 1).

Figura 2.5. Ciudad de Morelia: estructura urbana, 1619-2005



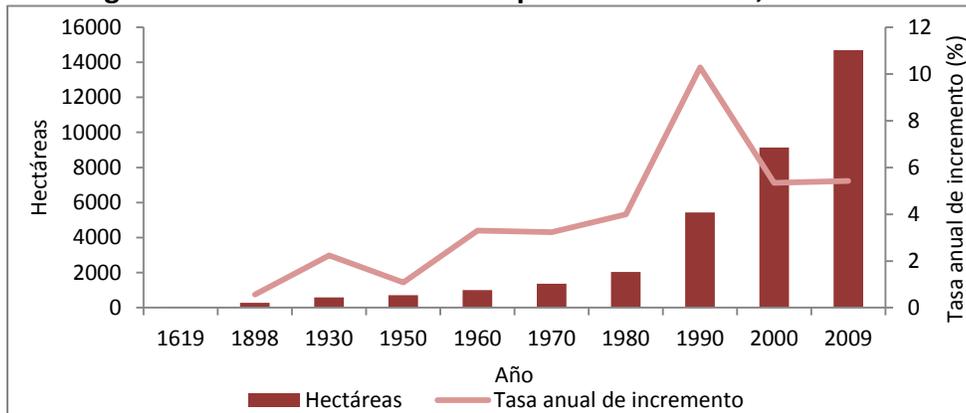
Fuente: Hernández, 2011.

Figura 2.6. Ciudad de Morelia: crecimiento y dinámica de la población, 1580-2010



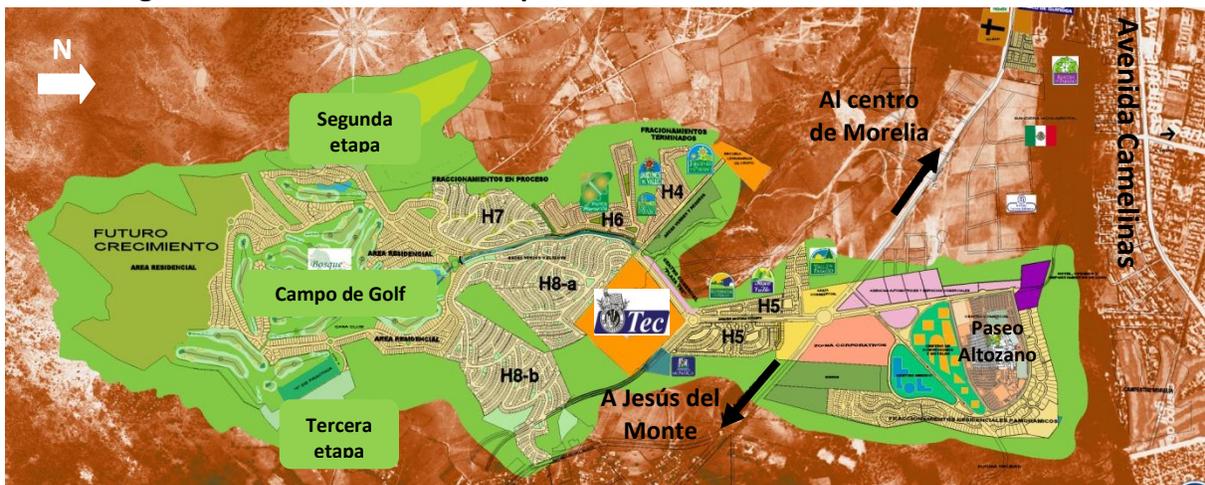
Fuente: Aguilar, 1999; Hernández, 2011; INEGI, 2010.

Figura 2.7. Ciudad de Morelia: expansión territorial, 1619-2009



Fuente: Hernández, 2011; PDUCPM2010.

Figura 2.8. Ciudad de Morelia: plan maestro de Altozano la Nueva Morelia



Fuente: Internet 1

Junto con el desarrollo de estos complejos habitacionales se ha propuesto la construcción de vialidades de gran magnitud. En este contexto, desde 2005, se han presentado proyectos cuyo objetivo es establecer un camino que conecte el sureste de la Avenida Camelinas con la Tenencia de Jesús del Monte. Sin embargo, académicos y la sociedad civil se han opuesto a la ejecución de esta obra debido a que es inviable económicamente, viola los decretos de protección del Área Natural Protegida (ANP) "Loma de Santa María" y representa beneficio sólo para la clase alta de Morelia (Sánchez, *op.cit.*).

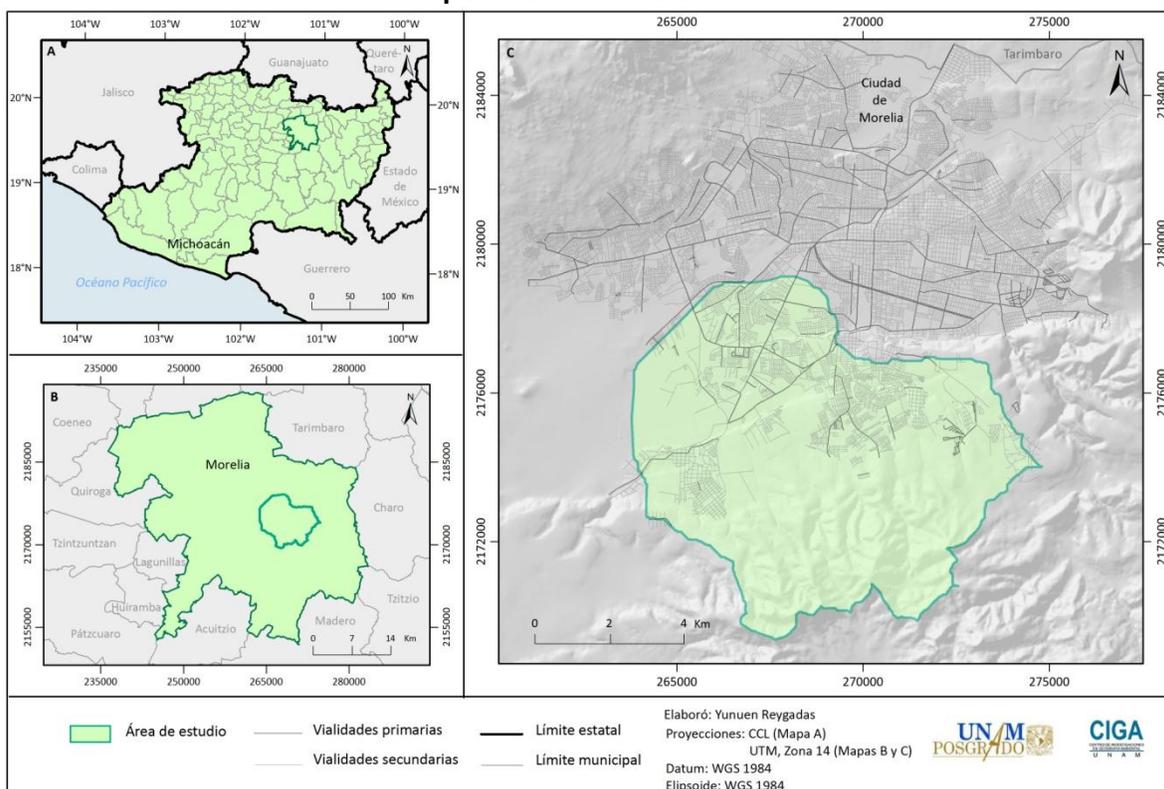
Después de una gran polémica, al término del gobierno de Lázaro Cárdenas Batel en 2008, se aseguró que no se llevaría a cabo alguna obra que implicara riesgo para la ciudadanía. No obstante, en 2009, con la intención de posibilitar la realización de la vialidad, el gobernador Leonel Godoy modificó el estatus del ANP y la declaró Zona de Restauración y Protección Ambiental, asimismo, redujo su extensión 30%. Esta acción desencadenó diversas manifestaciones de inconformidad por parte de la sociedad civil y, en 2011, se logró que la Comisión Estatal de Derechos Humanos hiciera evidente la violación de los derechos humanos y recomendara la elaboración de un documento que declarara como ANP "La Loma de Santa María y zonas aledañas" (Ávila, 2011; Ferrer, 2010).

Es importante mencionar que, recientemente, se construyó una pequeña parte de la "Avenida de las Torres", una vialidad derivada de la propuesta, *Proyecto Vial Sur Morelia*, elaborada por los académicos locales como alternativa a lo antes mencionado. En esta obra se pretende pavimentar el tramo torres de energía que entronca al libramiento a la altura de la tienda Costco y un ramal que conecta con la antigua carretera a Pátzcuaro (Sánchez, *op.cit.*). Esta y otras construcciones han favorecido la ampliación del casco urbano que, hasta 2011, estaba constituido por más de 14 500 hectáreas. Finalmente, el conjunto de situaciones expuestas denotan la inquietud por urbanizar, de forma acelerada, el sur de la ciudad. Sin embargo, algunos actos encaminados a la realización de ese fin no se han apegado a la ley y atentan contra el medio ambiente y los derechos humanos.

2.3. Características geográficas

Con base en la revisión de investigaciones previas, el reconocimiento de las tendencias de urbanización y observaciones de campo, se delimitó el área de estudio. Con respecto a la organización político-administrativa, el estado de Michoacán, ubicado en la región occidental de México, está dividido en 113 municipios; de éstos Morelia ocupa la porción noreste y, en su parte centro-occidente, contiene a la ciudad homónima donde, al sur, se encuentra la zona de interés (INEGI, 2005) (figura 2.9).

Figura 2.9. Área de estudio: ubicación con respecto a la división político-administrativa

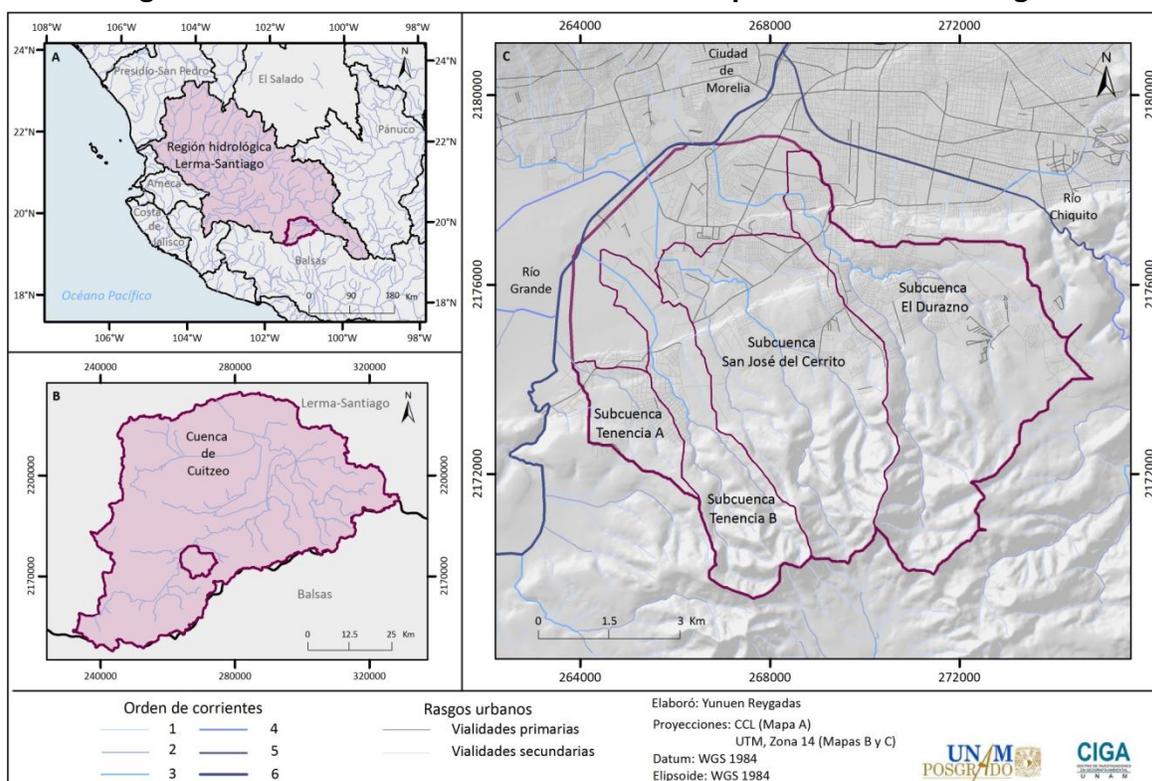


Fuente: elaboración propia con base en INEGI, 2005.

En términos hidrológicos, el polígono está constituido por cuatro subcuencas cuyas corrientes drenan hacia el Río Grande, afluente principal de la cuenca del lago Cuitzeo en la región hidrológica Lerma-Santiago. La superficie total del área de estudio es de 67 kilómetros cuadrados, de los cuales 23 corresponden a la subcuenca El Durazno, 20.7 a la subcuenca San José del Cerrito, 9.6 a la subcuenca Tenencia B, 3.6 a la subcuenca

Tenencia A y, por último, 10.1 pertenecen a la planicie de inundación donde el relieve es plano y los afluentes desembocan a una corriente de mayor jerarquía (figura 2.10). En conjunto, las subcuencas cubren el 1.7% del área total de la cuenca del lago Cuitzeo (CONABIO, 2011; INEGI, 2012) (figura 2.10).

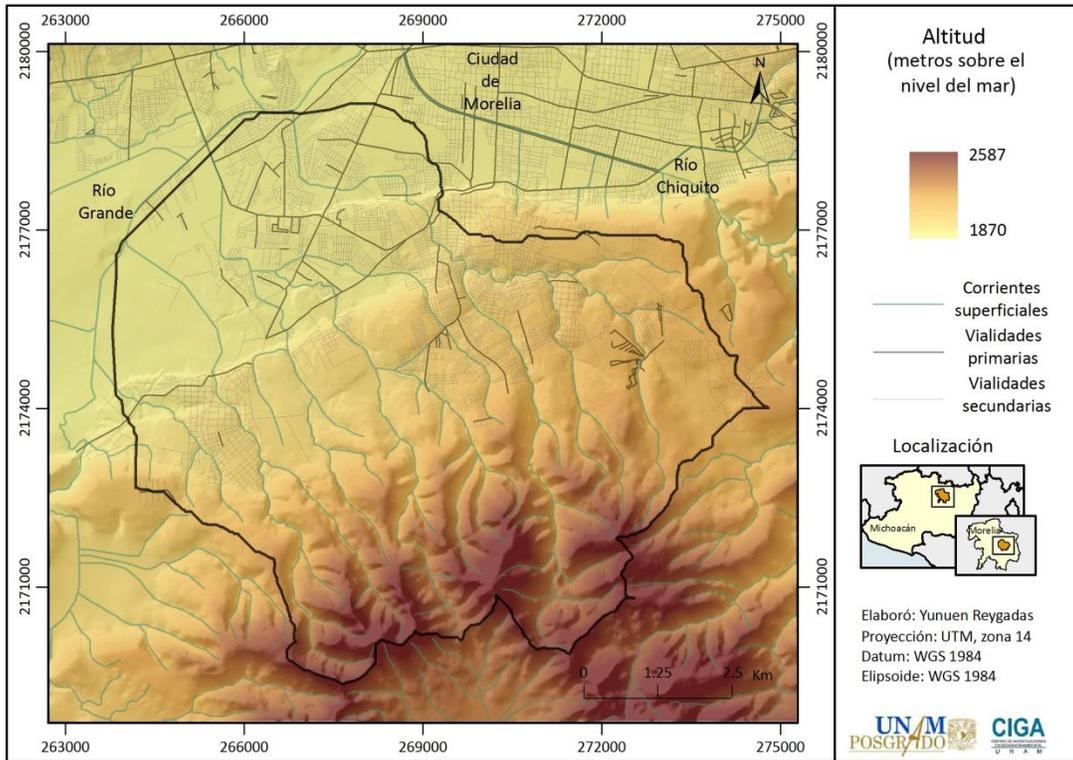
Figura 2.10. Área de estudio: ubicación con respecto a la red hidrológica



Fuente: elaboración propia con base en CONABIO, 2011; INEGI, 2012.

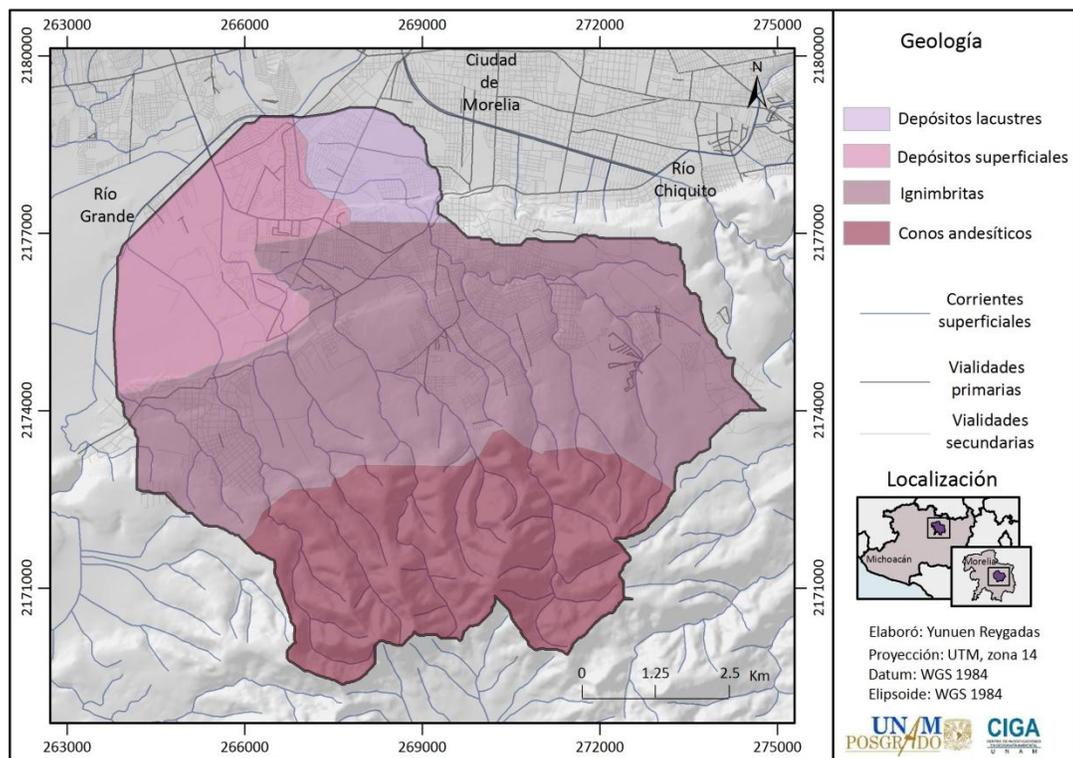
La zona de interés posee un rango altitudinal que decrece en dirección sureste-noroeste y va de los 1 870 a los 2 587 metros sobre el nivel del mar (figura 2.11). Este territorio pertenece a la provincia fisiográfica del Eje Neovolcánico y a las subprovincias Mil Cumbres y Sierras y Bajíos Michoacáños; su geología tiene su origen en los eventos tectónicos más recientes, por lo tanto, la génesis volcánica se evidencia en la presencia de conos andesíticos e ignimbritas en las pociones sur y central, respectivamente; por otro lado, la existencia de depósitos superficiales y lacustres demuestra la influencia que ejerce el relieve y las corrientes superficiales sobre el transporte y acumulación de materiales (figura 2.12) (INEGI, 2005).

Figura 2.11. Área de estudio: relieve



Fuente: elaboración propia con base en INEGI, 2005.

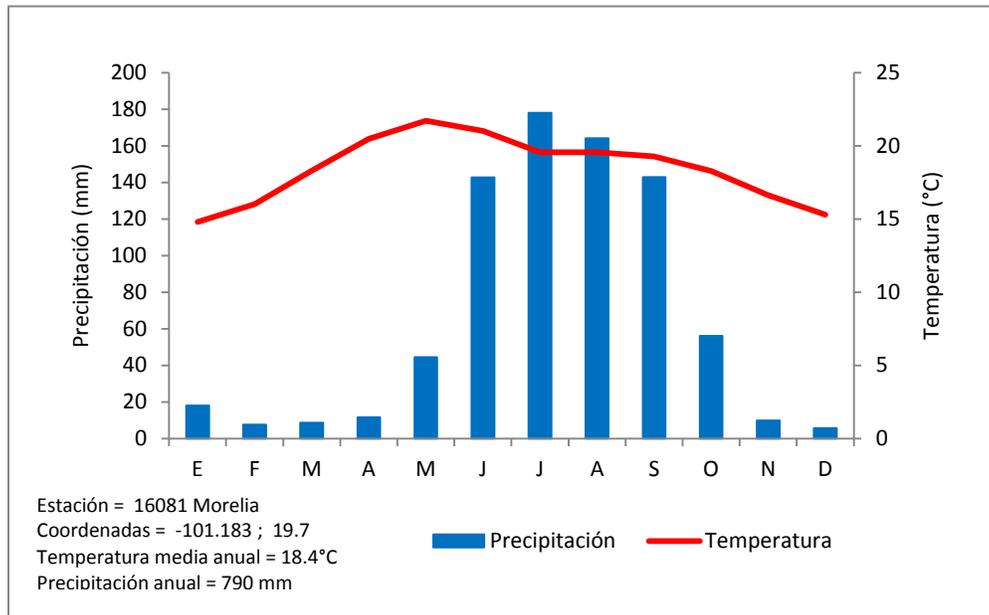
Figura 2.12. Área de estudio: geología



Fuente: elaboración propia con base en INEGI, 2005.

El tipo climático que prevalece en la región es $Cw_1(w)$, templado subhúmedo con régimen de lluvias de verano; sin embargo, el procesamiento de los datos capturados en la estación meteorológica más cercana a las cuencas bajo estudio arroja un clima $(A)Cbw_0(w)(i')g$ semicálido subhúmedo, con verano fresco largo, régimen de lluvias de verano, poca oscilación térmica y marcha de la temperatura tipo Ganges. La descripción anterior pertenece al grupo de los climas templados cuya temperatura media anual es mayor a $18^{\circ}C$. Por lo general, el mes más caliente no sobrepasa los $22^{\circ}C$ y durante el invierno se presentan valores que oscilan entre 11 y $18^{\circ}C$. En cuanto a la humedad, aunque se registra una precipitación total anual de casi 800 mm, este clima se considera como el más seco del conjunto de los subhúmedos (CLICOM, 2010; García, 2004) (figura 2.13).

Figura 2.13. Estación meteorológica Morelia: climograma



Fuente: elaboración propia con base en CLICOM, 2010.

Según INEGI (1979), en la zona predominan los grupos de suelo Acrisol, Luvisol y Vertisol. Por su parte, las cubiertas más representativas son el casco urbano de Morelia y agricultura de riego en las porciones bajas, pastizales inducidos y agricultura de temporal en altitudes medias y, finalmente, bosques templados en las partes altas. En suma, el conjunto de rasgos geográficos mencionados han repercutido en la dinámica hidrológica

del lugar, sin embargo, en los capítulos siguientes se ahondará sobre los grupos de suelo, las cubiertas del terreno y otras características geográfico-físicas que influyen en el comportamiento de las inundaciones en las cuencas bajo estudio.

Capítulo 3. Materiales y métodos

Para demostrar los supuestos que motivaron la realización de esta tesis, se llevó a cabo un proceso metodológico que requirió el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG's) y el procesamiento de información derivada de bases de datos climáticos, ortofotos, imágenes de satélite y cartografía vectorial. Por lo tanto, en este capítulo se mencionan los insumos geográficos empleados y, enseguida, se refieren los pasos metodológicos que guían la investigación.

3.1. Materiales

Los elementos que sirvieron como materia prima para el desarrollo metodológico de este trabajo se enlistan a continuación:

- Ortofotos digitales (E14A23A, E14A23B, E14A23D y E14A23E) derivadas de fotografías aéreas, escala 1:75000, tomadas por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), en febrero de 1995.
- Una imagen pancromática y otra multiespectral de 8 bandas, con una resolución espacial de 50 centímetros y 1 metro, respectivamente; ambas procedentes del satélite *WorldView2 (Digital Globe)* y tomadas en noviembre de 2011 sobre la zona de estudio.
- Sistema de información climática computarizada (CLICOM).
- Curvas de nivel, en formato shapefile, con intervalo de 1 y 5 metros.
- Con excepción del ortofotomosaico que se generó con el programa ERDAS, todas las operaciones se llevaron a cabo con el *software* ArcGIS 9.3.

3.2. Métodos

La amenaza de inundación se estimó por medio de una evaluación determinística, la cual implicó la simulación de los eventos a partir de modelos matemáticos que utilizan los fenómenos físicos involucrados como variables. Con base en este enfoque, se calculó el

volumen de escurrimiento generado tras un evento de precipitación determinado, posteriormente, se modeló la forma en que esta escorrentía se acumula sobre el territorio y, de acuerdo con la topografía, se identificaron las zonas en las que existe alguna posibilidad de que tal acumulación produzca una inundación; asimismo, se determinó la frecuencia con la cual se puede presentar un evento detonador. Los pasos metodológicos anteriores se desarrollaron en función de diferentes escenarios de lluvia y para tres momentos seleccionados (pasado, presente y futuro); el primero, que corresponde al año 1995, se eligió con base en la revisión histórica realizada en el capítulo 2, donde se halló que durante el decenio de los noventa la terciarización de la economía fomentó un nuevo proceso de urbanización a través de la creación de complejos habitacionales cerrados, principalmente, al sur y suroriente de la ciudad; el segundo muestra el panorama actual y corresponde a 2011; finalmente, el tercero representa una condición futura, cuya fecha se determinó con base en la proyección de un escenario de urbanización máxima.

3.2.1. Estimación del volumen de escurrimiento

Para estimar el volumen de escurrimiento en las cuencas bajo estudio se recurrió al método *SCS Runoff Curve Number*, conocido como Número de Curva en la literatura hispana. Este procedimiento fue desarrollado, en el decenio de los cincuenta, por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA) a través del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) y establece que la escorrentía resulta de una relación entre la precipitación, el grupo hidrológico del suelo y el uso o cubierta del terreno; por lo tanto, estos aspectos se integran en la ecuación siguiente (USDA, 1986):

$$Q = (P - I_a)^2 / (P - I_a) + S$$

Donde:

Q = escurrimiento

P = precipitación

S = potencial máximo de retención

I_a = abstracción inicial

Unidades en mm

La abstracción inicial (I_a) corresponde a todas las pérdidas generadas antes de que el escurrimiento comience, en este sentido, incluye la evaporación, la infiltración, el agua retenida en depresiones y la interceptada por la vegetación. Por medio de diversos estudios en pequeñas cuencas agrícolas se encontró que la I_a equivale, aproximadamente, al 20% del potencial máximo de retención después de que el escurrimiento haya comenzado (S). Con estas consideraciones, la ecuación se puede concebir de la manera siguiente:

$$Q = (P - 0.2 S)^2 / (P + 0.8 S)$$

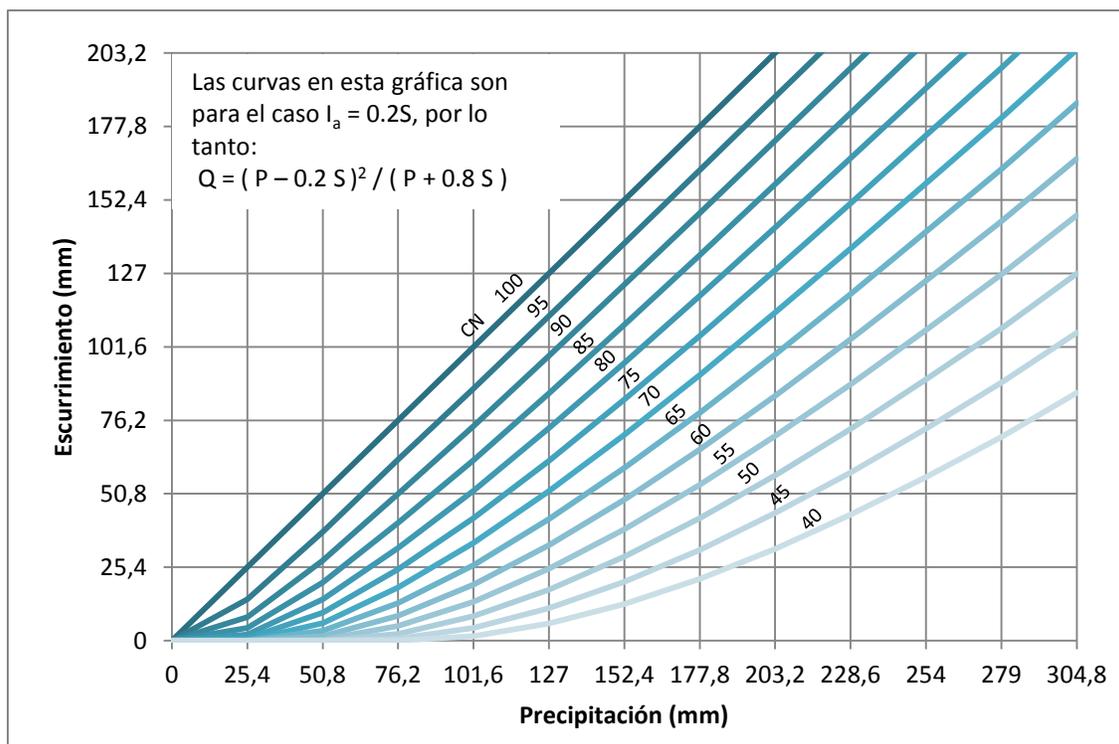
En este caso, S se vincula con el uso y condiciones hidrológicas del suelo a través del número de curva (CN, por sus siglas en inglés) y su relación se expresa como sigue:

$$S = (25400 / CN) - 254$$

La relación, entre escurrimiento y precipitación, que resulta al aplicar los supuestos anteriores se demuestra en la figura 3.1, donde se hace evidente que a medida que el CN aumenta, el potencial de escurrimiento también lo hace. El CN es un parámetro adimensional que, teóricamente, puede tomar valores entre 0 y 100, para determinarlo, cada uso o cubierta vegetal del suelo es asociado con un grupo hidrológico del suelo (cuadros 3.1 y 3.2). Este último depende, en gran medida, de la capacidad de infiltración, por lo tanto, se han establecido cuatro grupos cuyas características se detallan en el capítulo uno de esta tesis y, de forma sintética, se mencionan a continuación:

- A. Texturas arenosas, capacidad de infiltración rápida y potencial bajo de escurrimiento.
- B. Texturas areno arcillosas o franco arenosas, capacidad de infiltración moderada y potencial moderadamente bajo de escurrimiento.
- C. Texturas francas, franco limosas, franco arcillo arenosas, franco arcillosas o franco arcillo limosas; capacidad de infiltración lenta y potencial moderadamente alto de escurrimiento.
- D. Texturas arcillosas, capacidad de infiltración muy lenta y potencial alto de escurrimiento.

Figura 3.1. Ecurrimiento generado para un rango determinado de precipitación y números de curva



Fuente: adaptado a mm de USDA, 1986.

Cuadro 3.1. Números de curva para áreas urbanas

Uso del suelo y condición hidrológica	Área impermeable (%)	Número de curva de acuerdo con el grupo hidrológico del suelo			
		A	B	C	D
Espacio abierto (jardines, parques, campos de golf, cementerios)					
Pobre (cubierta herbácea <50%)		68	79	86	89
Regular (cubierta herbácea entre 50 y 75%)		49	69	79	84
Buena (cubierta herbácea >75%)		39	61	74	80
Área impermeable					
Estacionamientos pavimentados, techos		98	98	98	98
Calles pavimentadas		98	98	98	98
Zanjas abiertas		83	89	92	93
Caminos de grava		76	85	89	91
Caminos de tierra		72	82	87	89
Paisajes desérticos					
Naturales		63	77	85	88
Artificiales		96	96	96	96
Distritos urbanos					
Comercial y de negocios	85	89	92	94	95
Industrial	72	81	88	91	93

Uso del suelo y condición hidrológica	Área impermeable (%)	Número de curva de acuerdo con el grupo hidrológico del suelo			
		A	B	C	D
Distritos residenciales por tamaño promedio de lote (acres)					
1/8 o menos	65	77	85	90	92
1/4	38	61	75	83	87
1/3	30	57	72	81	86
1/2	25	54	70	80	85
1	20	51	68	79	84
2	12	46	65	77	82

Fuente: USDA, 1986.

Cuadro 3.2. Número de curva para áreas no urbanas seleccionadas

Uso o cubierta vegetal del suelo	Condición hidrológica		Número de curva de acuerdo con el grupo hidrológico del suelo				
			A	B	C	D	
Barbecho: suelo desnudo			77	86	91	94	
Barbecho: superficie con residuos del cultivo	Pobre	Se determina con base en la densidad del dosel, el período anual cubierto, la proporción de residuos cubriendo el suelo y el grado de rugosidad de la superficie, entre otras características.	76	85	90	93	
	Buena		74	83	88	90	
Cultivos en hileras rectas	Pobre		72	81	88	91	
	Buena		67	78	85	89	
Pastizal	Pobre (cubierta <50%, muy pastoreada y sin mantillo)		68	79	86	89	
	Regular (cubierta entre el 50 y 75%, sin pastoreo intenso)		49	69	79	84	
	Buena (cubierta >75% , ligera o ocasionalmente pastoreada)		39	61	74	80	
Pradera			30	58	71	78	
Matorral: mezcla de pastos y maleza, esta última como mayor elemento	Pobre (cubierta <50%)		48	67	77	83	
	Regular (cubierta entre el 50 y 75%)		35	56	70	77	
	Buena (cubierta >75%)		30	48	65	73	
Bosque	Pobre (afectado por pastoreo y prácticas regulares de quema)		45	66	77	83	
	Regular(afectado por pastoreo, pero no por quema, la hojarasca cubre ligeramente el suelo)		36	60	73	79	
	Buena (protegido del pastoreo y la hojarasca cubre adecuadamente el suelo)		30	55	70	77	
Hierba: mezcla de pastos y maleza, esta última como menor elemento	Pobre (cubierta <30%)		--	80	87	93	
	Regular (cubierta entre el 30 y 70%)		--	71	81	89	
	Buena (cubierta >70%)		--	62	74	85	

Fuente: USDA, 1986.

El método del CN reconoce tres condiciones antecedentes de humedad (AMC, por sus siglas en inglés) que corresponden a escenarios secos (I), normales o promedio (II) y húmedos (III) (cuadro 3.3). Los cuadros 3.1 y 3.2 muestran CN's asociados con AMCI, para obtener los valores de las condiciones restantes Chow, Maidment y Mays (1994) emplean las abstracciones siguientes:

$$CN_I = 4.2 CN_{II} / 10 - 0.058 CN_{II}$$

$$CN_{III} = 23 CN_{II} / 10 + 0.13 CN_{II}$$

Cuadro 3.3. Clasificación de condiciones antecedentes de humedad

AMC	Lluvia antecedente total de 5 días (mm)	
	Estación inactiva	Estación de crecimiento
I	Menor que 12.7	Menor que 35.56
II	De 12.7 a 27.95	De 35.56 a 53.34
III	Mayor que 27.7	Mayor que 53.34

Fuente: USDA, 1972; en Chow, Maidment y Mays, 1994.

En el cuadro 3.4 se presentan los CN's que propone la USDA (2004) para las tres AMC, así como los valores de lluvia a partir de los cuales, teóricamente, cada CN comienza a generar escurrimiento.

Cuadro 3.4. Números de curva para cada condición antecedente de humedad

CN's para AMC			Para los CN's en AMCI la curva comienza cuando P (mm) =	CN's para AMC			Para los CN's en AMCI la curva comienza cuando P (mm) =
II	I	III		II	I	III	
100	100	100	0.00	61	41	78	32.51
99	97	100	0.51	60	40	78	33.78
98	94	99	1.02	59	39	77	35.31
97	91	99	1.52	58	38	76	36.83
96	89	99	2.03	57	37	75	38.35
95	87	98	2.79	56	36	75	39.88
94	85	98	3.30	55	35	74	41.66
93	83	98	3.81	54	34	73	43.18
92	81	97	4.32	53	33	72	44.96
91	80	97	5.08	52	32	71	46.99
90	78	96	5.59	51	31	70	48.77
89	76	96	6.35	50	31	70	50.80
88	75	95	6.86	49	30	69	52.83
87	73	95	7.62	48	29	68	54.86
86	72	94	8.38	47	28	67	57.40

Continuación cuadro 3.4			Para los CN's en AMCII la curva comienza cuando P (mm) =	CN's para AMC			Para los CN's en AMCII la curva comienza cuando P (mm) =
II	I	III		II	I	III	
85	70	94	8.89	46	27	66	59.44
84	68	93	9.65	45	26	65	61.98
83	67	93	10.41	44	25	64	64.52
82	66	92	11.18	43	25	63	67.06
81	64	92	11.94	42	24	62	70.10
80	63	91	12.70	41	23	61	73.15
79	62	91	13.46	40	22	60	76.20
78	60	90	14.22	39	21	59	79.25
77	59	89	15.24	38	21	58	82.80
76	58	89	16.00	37	20	57	86.36
75	57	88	17.02	36	19	56	90.42
74	55	88	17.78	35	18	55	94.49
73	54	87	18.80	34	18	54	98.55
72	53	86	19.81	33	17	53	103.12
71	52	86	20.83	32	16	52	107.70
70	51	85	21.84	31	16	51	112.78
69	50	84	22.86	30	15	50	118.36
68	48	84	23.88	25	12	43	152.40
67	47	83	24.89	20	9	37	203.20
66	46	82	26.16	15	6	30	288.04
65	45	82	27.43	10	4	22	457.20
64	44	81	28.45	5	2	13	965.20
63	43	80	29.72	0	0	0	Infinito
62	42	79	31.24				

Fuente: USDA, 2004.

Debido a que el proceso de análisis y los resultados de esta investigación se expresan espacialmente, una vez identificadas las variables que alimentan el método del Número de Curva, se generó la información geográfica necesaria a través de las estrategias metodológicas que se muestran en los apartados siguientes.

A. Cálculo de la precipitación

Para resolver este paso metodológico se descartó el uso de las bases de datos generadas por la red de estaciones meteorológicas del Organismo Operador de Agua Potable y Saneamiento de Morelia (OOAPAS) debido a que no cuentan con registros anteriores al año 2007 y los posteriores poseen interrupciones significativas. En consecuencia, se empleó la información del banco de datos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN),

contenida en el sistema de consulta computarizado *Mexico Climatological Station Network Data* (CLICOM, 2010).

De la fuente anterior, se extrajeron las coordenadas geográficas de cada estación meteorológica del país y, posteriormente, se elaboró un mapa de puntos que permitió conocer su distribución espacial. El criterio de selección de estaciones respondió a un examen visual mediante el cual, en un primer momento, se incluyeron todas las estaciones, con excepción de las que pertenecen a otra región hidrológica, ubicadas dentro de un cinturón de 27 kilómetros en torno a la zona de interés. Las estaciones que resultaron del proceso anterior se sometieron a una revisión que consistió en identificar aquellas con un récord histórico mayor o igual a 25 años recientes.

Para verificar la confiabilidad y homogeneidad de los registros contenidos en las estaciones seleccionadas, por medio del método Sved-Eisenhart, se llevó a cabo un procedimiento conocido como prueba de recorrido o *run test* (Medina, 1995). Para realizar esta prueba, se utilizaron los datos históricos de precipitación con los cuales se desarrollaron las actividades siguientes:

- Se ordenaron, cronológicamente, los totales mensuales de cada año y se calculó el promedio mensual de la serie histórica.
- Con base en lo anterior, se obtuvieron tres columnas. La primera constituida por los años de la serie histórica; la segunda por la serie de precipitación total mensual del mes más lluvioso dentro del periodo de lluvias (mayo a octubre) o, en su defecto, el mes con información continua; por último, la tercera se formó con el promedio mensual del mes seleccionado.
- Con tales columnas se creó un gráfico con el que fue posible observar la precipitación histórica del mes más lluvioso y su relación con el valor de la media (anexo 1).
- Con el fin de comprobar la aleatoriedad de la serie climática, sobre el gráfico obtenido, se contó el número de cambios (u), positivos o negativos, que la precipitación muestra con respecto a la media. Al valor u , se le adicionó una

unidad y el resultado se comparó con los límites de distribución normal (cuadro 3.5), en donde n es el número de años de la serie climática. Enseguida, el resultado se verificó con el cuadro 3.6, donde se determinó si el valor u se ajusta al intervalo aceptado de acuerdo con el número de años de la serie climática.

- Finalmente, las estaciones, cuyo valor u se ubicó dentro del rango admitido, se clasificaron como homogéneas, en el caso contrario, se catalogaron como heterogéneas y se descartó su uso debido a la inconsistencia de los datos.

Cuadro 3.5. Prueba de recorrido: límites de distribución normal

Límite superior	Límite inferior
$1 + 1.1 (n/2)$	$-1 + 0.9 (n/2)$

Fuente: Medina, 1995.

Cuadro 3.6. Prueba de recorrido: intervalos para el número de cambios de acuerdo con la cantidad de años de la serie climática

Años	Intervalo (u)	Años	Intervalo (u)	Años	Intervalo (u)
12	5-8	26	10-17	40	16-25
14	5-10	28	11-18	50	22-30
16	6-11	30	12-19	60	26-36
18	7-12	32	13-20	70	31-41
20	8-13	34	14-21	80	35-47
22	9-14	36	15-22	90	40-52
24	9-16	38	16-23	100	45-57

Fuente: Doorenbos, 1976; en Medina, 1995.

De cada una de las estaciones homogéneas resultantes, se obtuvieron los datos históricos de precipitación máxima en 24 horas y, a partir de éstos, se calculó el valor de la media mensual en dos bloques. En el primero se incluyó el conjunto de datos comprendido entre el primer año de registro y 1995; mientras que en el segundo se consideraron los valores obtenidos de 1996 en adelante, aunque, en los casos que, bajo esta regla, no se superó un periodo de por lo menos dos sexenios, se trabajó con los últimos doce años. La obtención de estos promedios responde a los dos primeros momentos del análisis (1995 y 2011), para el tercero no se realizó ningún cálculo debido a que se pretende probar el aumento del volumen de escurrimiento bajo las condiciones lluvia actual, pero con un escenario de urbanización máxima.

En función de la distribución de la lluvia a lo largo del año, se eligieron los valores de precipitación máxima promedio en 24 horas de mayo, julio, septiembre y noviembre. Con esta información, se crearon dos mapas de puntos (uno correspondiente a 1995 y otro a 2011) a partir de los cuales se aplicó el método geoestadístico de interpolación *Kriging*. Bajo el supuesto de que la distancia o dirección entre los puntos de la muestra reflejan una correlación espacial que puede ser utilizada para explicar la variación en la superficie, este procedimiento permite estimar valores de precipitación en sitios donde no hay información y, además, es capaz proporcionar una medida de certeza en las predicciones (Huang, Wang y Zhang, 2012; internet 2). De este modo, como resultado final, se obtuvo un conjunto de ocho mapas raster.

B. Elaboración de mapas de cubierta vegetal y uso del suelo

Para cada momento del análisis (pasado, presente y futuro) se elaboró un mapa de cubierta vegetal y uso del suelo; así, los dos primeros productos cartográficos se obtuvieron a partir de la interpretación visual de cuatro ortofotos de 1995 y dos imágenes de satélite (*WorldView-2*, pancromática y multiespectral) de 2011. Como primer paso, los materiales antes mencionados se sometieron a los procesos siguientes:

- *Creación de un ortofotomosaico*. Debido a que la superficie del polígono de interés se extiende sobre cuatro ortofotos, mediante la extensión LPS (*Leica Photogrammetry Suite*) del programa ERDAS, se produjo un mosaico que muestra de manera conjunta y continua la zona de estudio.
- *Fusión de imágenes de satélite*. Se combinó la información espectral de la imagen multiespectral con la espacial de la pancromática, de esta forma, se logró un producto híbrido de alta resolución espectral y espacial. Lo anterior se consiguió a través un proceso de *Pan-Sharpning* en el que se aplicó el método de fusión IHS (Intensidad–Saturación-Brillo).

Para ambos mapas se empleó una escala de interpretación 1: 2 000 a partir de la cual se digitalizaron polígonos cuya forma corresponde a los límites de cada cubierta vegetal o

uso del suelo. Por su parte, el mapa que representa la condición futura se construyó con base en la proyección de un escenario de urbanización máxima que tomó como punto de partida el producto cartográfico de 2011. Los pasos metodológicos ejecutados para su obtención se muestran a continuación:

- *Identificación de áreas con potencial para la expansión urbana.* El valor de la pendiente y la existencia de cauces se establecieron como criterios de selección de superficies con potencial para la urbanización. Por lo tanto, con base en el enfoque booleano, para cada criterio se creó un mapa, en formato raster de celdas de 1 x 1 metro, donde las variables se clasificaron en dos categorías de potencial (con y sin potencial). En este contexto, para obtener las pendientes con potencial, se calculó el rango de inclinación en el cual, hasta 2011, se extendía el 90% del caso urbano. Para el segundo criterio, los cauces, con excepción de los tramos que son cruzados por una carretera, se consideraron como sin potencial. Finalmente, en un tercer mapa, los sitios con potencial de acuerdo con ambos criterios se establecieron como áreas susceptibles de ser urbanizadas.
- *Simulación de la expansión urbana.* Para este propósito, se empleó la herramienta *Cost Allocation*, la cual utilizó, como datos de entrada, un mapa de usos urbanos, extraídos de la cubierta vegetal y uso del suelo de 2011, y el producto final del paso metodológico anterior. Con esta información, la herramienta calculó el uso urbano más cercano para cada celda clasificada como con potencial para la urbanización; la cercanía se determinó en función del menor costo acumulativo medido sobre el mapa de superficies con potencial que, en este caso, tiene un valor constante de uno.
- *Generación del mapa final.* El resultado anterior se integró con las cubiertas y usos ubicados, hasta 2011, en áreas catalogadas como sin potencial para el crecimiento de la ciudad. Asimismo, se respetó la estructura urbana que había hasta 2011, por lo tanto, se reintegraron los usos urbanos que, por sus características, no fueron considerados para la proyección; tales usos son vialidades y espacios abiertos

como parques y cementerios. Por último, se realizó una conversión de formato raster a polígonos que se etiquetaron según el uso o cubierta correspondiente.

- *Estimación del año de la proyección.* En función de la tasa de crecimiento urbano hallada entre 1995 y 2011, se calculó el año en el que, teóricamente, se podría presentar el escenario de urbanización proyectado.

C. Determinación del grupo hidrológico del suelo

La información edafológica disponible para la zona de estudio no cuenta con el nivel de detalle necesario para determinar los grupos hidrológicos del suelo, en consecuencia, se optó por generar información nueva. Para lograr este objetivo, se establecieron sitios potenciales de muestreo seleccionados con base en los criterios siguientes:

- *Unidad de paisaje.* La delimitación de las principales unidades se llevó a cabo por medio de una interpretación visual de las formas del terreno. Tal diferenciación del relieve se realizó a partir de un Modelo de Elevación Digital (MED) en combinación con el sombreado del terreno. Para obtener el primero de estos elementos, se utilizó la herramienta *topo to raster*, la cual emplea, como insumo, las curvas de nivel; el segundo se derivó del anterior, a través de un proceso de *hillshade*; ambos mapas se crearon con una resolución espacial de 2 x 2 metros. Una vez reconocidas las unidades, se procedió a asociarlas con la geología y el clima correspondiente.
- *Pendiente.* Con base en el MED y la herramienta *slope*, se calculó la inclinación del terreno y, posteriormente, se eligieron los valores medios de cada unidad de paisaje.
- *Uso o cubierta vegetal del suelo.* De acuerdo con la cartografía generada para 2011, se identificó la categoría predominante en cada unidad de paisaje.

La asociación de los elementos anteriores se representó en un mapa que muestra las superficies aptas para el muestreo de acuerdo con los tres criterios. Por lo tanto, a partir de esta información, se realizó un reconocimiento de campo, cuya finalidad fue

determinar los sitios definitivos de muestreo, en los cuales, con base en la metodología de Siebe, Reinhold y Stahr (2006), se efectuaron las actividades siguientes:

- *Observación directa del paisaje.* Se reconocieron las condiciones físico-geográficas próximas al lugar de muestreo. Por lo tanto, se registró la localización, relieve, algunas inferencias climáticas, cuerpos de agua adyacentes y uso o cubierta del suelo.
- *Preparación de calicatas.* Con el fin de descubrir algunos perfiles de suelo, se abrieron calicatas. Las excavaciones se basaron en cuadrados de, aproximadamente, dos por uno y medio metros, donde, cuando fue posible, la cara norte fue destinada a la descripción del perfil y toma de muestras, esto debido a la incidencia de los rayos solares. Durante la excavación se tuvo especial cuidado con la pared norte para que el contacto no alterara los resultados de la descripción. Cuando se llegó a la profundidad deseada, el perfil se limpió con espátula y brocha y se procedió a realizar los análisis pertinentes.
- *Descripción de las propiedades físicas y químicas del suelo.* Con énfasis en el análisis de los aspectos relacionados con la capacidad de infiltración, se determinaron, de forma cualitativa, propiedades como horizontes, porosidad, raíces, pedregosidad y densidad aparente. Una vez realizadas las descripciones necesarias sobre el perfil, se tomaron muestras de, aproximadamente, un kilo de suelo por cada horizonte. Algunas de las propiedades obtenidas directamente de las muestras fueron textura, color, pH, estructura y presencia de carbonatos.

De acuerdo con la metodología antes citada, la información recabada en cada sitio de muestreo se organizó, de manera sistematizada, y se utilizó para realizar una evaluación ecológica (anexo 2), la cual permite estimar, entre otros parámetros, la capacidad de campo, conductividad hidráulica y drenaje natural; por lo tanto, después de analizar los resultados obtenidos, se asignó un grupo hidrológico a cada suelo encontrado y, mediante una generalización espacial, se produjo la cartografía final.

D. Integración de la información en la ecuación

Para calcular el volumen de escurrimiento, la información obtenida en los apartados anteriores se integró en la ecuación del método del Número de Curva. Para ello, fue necesario realizar los pasos metodológicos siguientes:

- *Unión del mapa de cubierta vegetal y uso del suelo con el de grupo hidrológico.* La fusión se realizó con la herramienta *union*, esta operación permitió asignar a cada polígono un grupo hidrológico del suelo. Con fines prácticos, el mapa resultante se denominó UGH.
- *Cálculo de campos sobre el mapa UGH.* Dentro de la base de datos de este mapa se adicionaron cinco campos. En el primero se asignó el CN, en el segundo se calculó el parámetro S y, en el tercero y cuarto, se colocó el producto de $0.2S$ y $0.8S$, respectivamente. Por último, en el quinto campo se introdujo la condición de lluvia para que cada CN genere escurrimiento.
- *Obtención de mapas finales para los valores $0.2S$ y $0.8S$.* Para uniformizar los valores que se introdujeron en la ecuación, fue necesario convertir la información de los campos tres y cuatro a formato raster con una resolución espacial de 1×1 metro.
- *Generación del mapa final de precipitación.* De la misma manera que en el paso anterior, para resolver este objetivo, fue necesario convertir la información del campo cinco a formato raster. En función de las características de la superficie, el escurrimiento es posible sólo si la lluvia supera cierto valor, por esta razón, con base en los mapas de precipitación (p) y condición de la lluvia (c), se generó un tercero, donde, cuando el valor de p fue mayor o igual a c , las celdas conservaron el valor de p , mientras que las que no cumplieron esta condición, se convirtieron en *NoData*, categoría que, en el mapa final, se tradujo como cero escorrentía. Tras aplicar esta condición se obtuvo un mapa de lluvia con la misma resolución espacial que el resto de los mapas.

Finalmente, con base en los mapas finales y por medio de la herramienta de análisis espacial *raster calculator*, se corrió la ecuación $Q = \text{Sqr}(P - 0.2S) / (P+0.8S)$, la cual dio como resultado un valor de escurrimiento en milímetros por cada metro cuadrado. Debido a que la esorrentía se estimó para cuatro escenarios de lluvia (mayo, julio, septiembre y noviembre) por cada fecha del análisis, el procedimiento anterior se realizó doce veces, con la diferencia de que para las estimaciones de los meses de mayo se utilizaron CN_I, para junio CN_{II} y para septiembre y noviembre CN_{III}.

3.2.2. Modelado de la amenaza de inundación

La información del mes con mayor volumen de escurrimiento se utilizó como una de las bases para modelar la amenaza de inundación e identificar los cambios ocurridos entre 1995 y 2011, además de los que pudieran suceder bajo el escenario proyectado. Con este orden de ideas, en las páginas siguientes se describe la metodología empleada para simular la forma en que el escurrimiento se acumula sobre el territorio, estimar el potencial topográfico de inundación y calcular el período de retorno; asimismo, se muestra el procedimiento de integración que permitió, como paso final, determinar la amenaza y sus cambios a través del tiempo.

A. Simulación de la acumulación del escurrimiento

La acumulación del flujo se simuló para las tres fechas del análisis, por lo tanto, con base en los mapas del mes con mayor volumen de escurrimiento y el MED, se realizaron los pasos siguientes:

- *Homologación de la resolución espacial.* Debido a que los mapas de escurrimiento y el MED tienen resoluciones espaciales diferentes (1 x 1 y 2 x 2 metros, respectivamente), a través de la herramienta *aggregate*, se generó una versión de resolución reducida de los mapas de escurrimiento, donde cada celda contiene la suma de las que, en el formato anterior, eran abarcadas por la extensión de un pixel del MED. Se debe señalar que éste último posee esas características debido a

que la herramienta con que se creó (*topo to raster*) tiene un límite de resolución espacial.

- *Determinación de la dirección del flujo.* Con base en el MED y por medio de la herramienta *flow direction*, se produjo un mapa raster que muestra la dirección que toma el flujo que sale de cada celda. Éste atributo se asigna en función de la celda vecina con mayor pendiente.
- *Simulación de la acumulación del flujo.* El mapa de dirección del flujo, junto con los de escurrimiento, sirvieron para alimentar la herramienta *flow accumulation* que, como resultado, arrojó un raster cuyas celdas exhiben un valor de escurrimiento acumulado, el cual se determina con base en la suma del escurrimiento de todas la celdas que fluyen hacia un punto determinado. Es importante señalar que esta herramienta sobreestima los valores de esorrentía debido a que no considera que el agua se mantiene en movimiento, sin embargo, proporciona órdenes de magnitud que indican las zonas de mayor acumulación en función del relieve. Por esta razón, se establecieron rangos cualitativos (magnitud de escurrimiento acumulado baja, media, alta y muy alta) clasificados por medio de una escala logarítmica.

De los tres mapas que resultaron del proceso anterior, el de 1995 se utilizó como línea base, por lo tanto, con el objeto de reconocer los cambios entre los períodos, se calcularon las diferencias en la magnitud del flujo acumulado entre 2011 y 1995, y entre este último y el escenario proyectado. Los valores de los dos mapas anteriores se reclasificaron en tres categorías positivas y una negativa, las primeras fueron separadas en función de una escala logarítmica y la segunda incluye todas las cifras menores a cero. De acuerdo con los criterios mencionados, se obtuvieron las clases siguientes: cambio negativo (0), positivo bajo (1), positivo medio (2) y positivo alto (3); esta clasificación pone énfasis en los valores positivos debido a que, en este estudio, interesan los hallazgos que apuntan hacia un incremento en la amenaza.

B. Estimación del potencial topográfico de inundación

Para estimar el potencial topográfico de inundación se realizaron las actividades siguientes:

- *Cálculo de la profundidad relativa del terreno.* Esta característica resultó de la diferencia entre el MED y las alturas máximas locales. Para obtener estas últimas, a partir de la herramienta *neighborhood statistics*, se generó un mapa raster, de la misma resolución que los anteriores, donde cada celda contiene el valor de altura máximo registrado en un bloque vecino de 30 x 30 celdas (60 x 60 metros), dimensión que corresponde a la anchura promedio de los cauces en la zona intermedia del área de estudio. Así, en términos generales, mientras más profundidad relativa tenga el terreno, menor será la posibilidad de que se presente una inundación.
- *Delimitación de los cauces mayores.* Para lograr este objetivo, se realizó una interpretación visual del mapa de profundidad relativa en combinación con las curvas de nivel y la red de drenaje. Esta última se obtuvo al extraer las cifras mayores o iguales a 10 000 unidades de un mapa de acumulación de flujo que, en lugar de presentar valores de escurrimiento, muestra el número de celdas que fluyen hacia un punto determinado.
- *Obtención del potencial topográfico de inundación.* Con ayuda de los cauces mayores y las unidades de paisaje se discriminaron las zonas que, aunque poseen superficies planas que en el mapa de profundidad relativa podrían interpretarse como susceptibles a inundarse, se encuentran en mesetas o altiplanos donde el agua fluye en lugar de acumularse. Con base en estas áreas y los valores de profundidad relativa del terreno, se obtuvo un mapa final con los cuatro potenciales siguientes:
 - *Nulo (0).* Superficies cumbrales y zonas de más de seis metros de profundidad.
 - *Bajo (1).* Zonas de entre dos y medio y seis metros de profundidad.

- *Medio (2)*. Zonas de entre uno y dos y medio metros de profundidad.
- *Alto (3)*. Zonas planas de menos de un metro de profundidad.

C. Cálculo del período de retorno

Con el fin de conocer el tiempo promedio en que la precipitación que provocó los mayores volúmenes de escurrimiento es igualada o superada, con base en Westen, Mijde y Parodi (2010), se llevó a cabo el procedimiento siguiente:

- Se seleccionaron las bases de datos de precipitación máxima diaria de las dos estaciones meteorológicas más cercanas a la zona de estudio.
- Se ordenaron, cronológicamente, los valores del mes en el que se generó el mayor escurrimiento.
- Se identificaron las cifras mayores o iguales a la precipitación que ocasionó los volúmenes más altos; se sumaron los años que transcurrieron entre cada evento y, por último, se dividieron entre el número de intervalos encontrados.

El producto de las operaciones anteriores corresponde al periodo de retorno, el cual, además de aportar información acerca de la recurrencia del evento, permitió determinar la probabilidad anual de que en el mes en cuestión se exceda la precipitación de interés. Esto último se obtuvo al dividir una unidad entre el periodo de retorno, por lo tanto, el resultado es un valor que va de 0 (imposibilidad) a 1 (certeza).

D. Determinación del cambio en la amenaza de inundación

Para reconocer el cambio ocurrido entre las tres fechas del análisis, se emplearon las diferencias en la magnitud del escurrimiento acumulado y el potencial topográfico de inundación. La manera en que se integró la información se describe a continuación:

- *Cruce del mapa de potencial topográfico de inundación con los de diferencias en el escurrimiento acumulado.* Con el fin de identificar las zonas en que el aumento del flujo puede causar inundaciones, los mapas referidos se multiplicaron. Como

resultado, se obtuvieron valores que oscilan entre 0 (incremento de la amenaza nulo) y 9 (alto).

- *Generación de los mapas finales.* Los productos anteriores se reclasificaron en las tres categorías siguientes: incremento de la amenaza nulo (0), bajo (1 - 2), medio (3 - 4) y alto (6 - 9). Las clases se obtuvieron por medio del algoritmo de agrupamiento *k-means*, el cual define *k* centroides (uno para cada grupo) y, enseguida, toma cada valor de la base de datos y lo sitúa en su centroide más cercano; posteriormente, recalcula el centroide de cada grupo y vuelve a distribuir todas las cifras según el centroide más cercano; este proceso se repite hasta que no se registren cambios entre un paso y el siguiente (Pascual, Pla y Sánchez, 2007). Con este método se minimiza la varianza intraclase y, a su vez, se maximiza la varianza interclase.

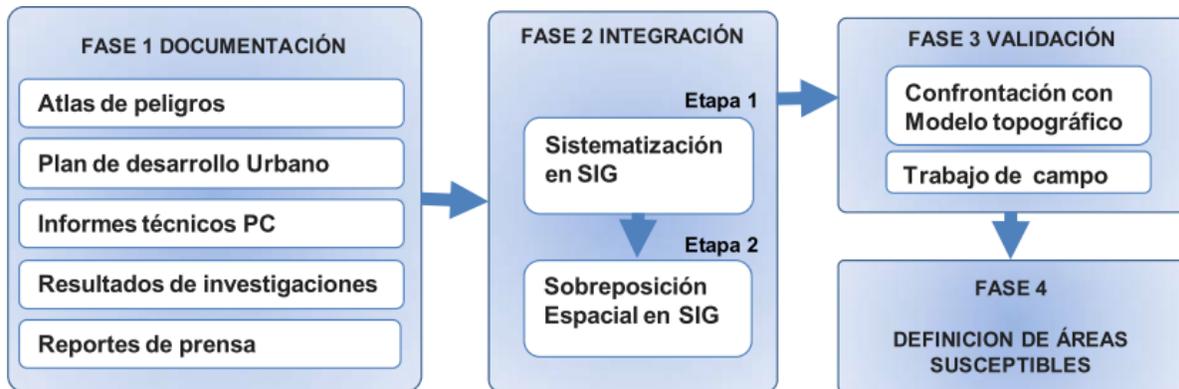
Como último paso, para conocer la frecuencia con que se puede presentar un evento que genere las probabilidades ocurrencia mostradas en la cartografía, esta última se asoció con el período de retorno.

3.2.4. Validación

La amenaza de inundación, calculada para el año 2011 de acuerdo con la metodología descrita, se comparó con la cartografía, obtenida por Corona (2009), sobre áreas susceptibles a inundarse en la ciudad de Morelia. Estas últimas fueron delimitadas con base en un proceso constituido por las cuatro fases siguientes: documentación, integración, validación y definición de zonas susceptibles (figura 3.2). La confrontación de la información consistió en calcular la coincidencia espacial de los grados de susceptibilidad determinados por Corona (muy bajo, bajo, medio, alto, muy alto) con las categorías de amenaza establecidas en esta investigación (nula, baja, media, alta). Se debe mencionar que aunque los términos amenaza y susceptibilidad son expresiones conceptuales distintas, en este caso, pueden ser comparadas debido a que ambas muestran las posibilidades (altas o bajas) de que ocurra una inundación en un espacio determinado. La diferencia radica en que la amenaza también incorpora la temporalidad

de los eventos, esto significa que los resultados de este estudio permiten conocer la frecuencia con la que se presentará un evento que confirme las probabilidades de inundación señaladas en la cartografía.

Figura 3.2. Esquema metodológico utilizado para definir áreas susceptibles a inundaciones



Fuente: Corona, 2009.

Capítulo 4. Resultados y discusión

En el primer apartado de este capítulo se revelan los resultados investigativos derivados del conjunto de pasos metodológicos desarrollados en el capítulo anterior, por lo tanto, se incluyen productos que pueden ser o no finales. En esta línea, en el segundo apartado se discuten los hallazgos más significativos emanados de los resultados de la investigación.

4.1. Resultados

La presentación de los resultados está dividida en dos secciones; en la primera se exponen los relacionados con el volumen del escurrimiento y, en la segunda, se dan a conocer los vinculados con la acumulación del flujo, el potencial topográfico de inundación y el período de retorno que, en conjunto, permiten determinar la amenaza de inundación.

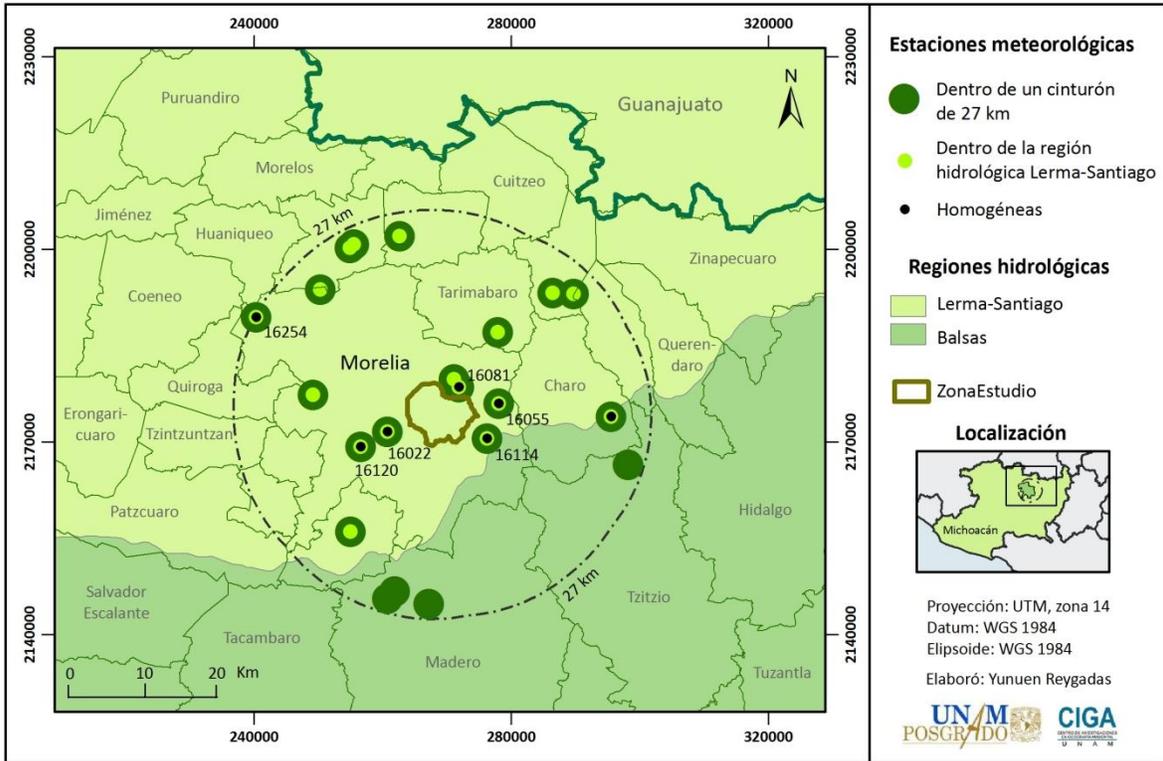
4.1.1. Volumen de escurrimiento

Los resultados principales de esta sección están constituidos por el conjunto de mapas que muestra el volumen de escurrimiento bajo distintos escenarios de lluvia y urbanización. Sin embargo, durante el proceso de cálculo se generó información relativa a la precipitación, la cubierta vegetal y uso del terreno y el grupo hidrológico del suelo; por lo tanto, los productos, intermedios y finales, se presentan y describen a continuación:

A. Precipitación

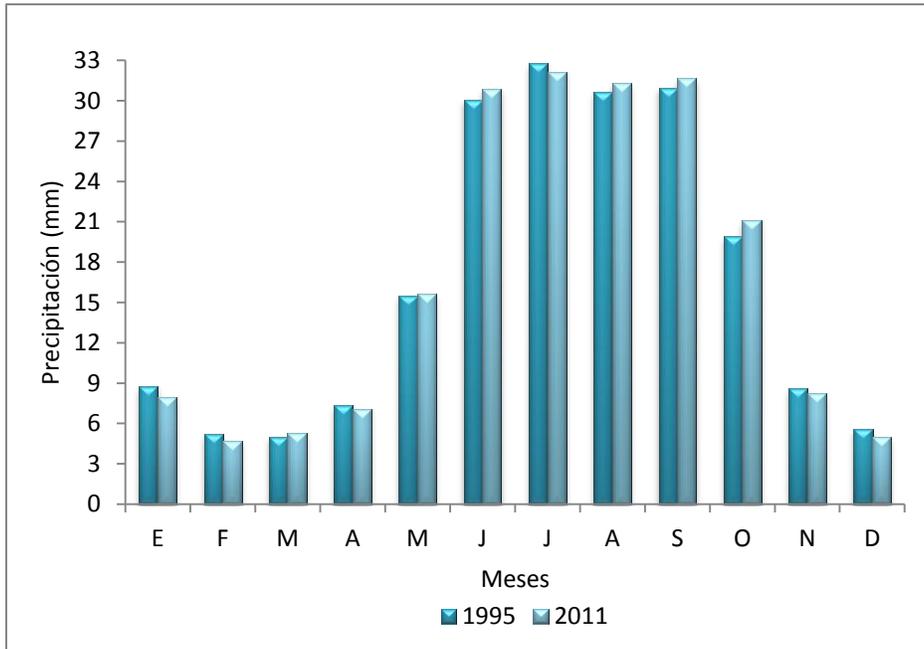
De las 21 estaciones meteorológicas ubicadas dentro de un cinturón de 27 kilómetros con respecto a la zona de estudio, 17 pertenecen a la misma región hidrológica y de éstas 14 cuentan con un récord histórico mayor o igual a 25 años recientes, sin embargo, únicamente siete cumplen con los requisitos de confiabilidad y homogeneidad de los registros (figura 4.1). Por lo tanto, con base en estas últimas estaciones, se obtuvo un promedio general mensual de precipitación máxima en 24 horas (figura 4.2), así como las medias mensuales de cada estación, a partir de las cuales se llevó a cabo la interpolación para los dos primeros momentos del análisis (1995 y 2011) (figuras 4.3 y 4.4).

Figura 4.1. Área de influencia de la zona de estudio: estaciones meteorológicas



Fuente: elaboración propia con base en CLICOM, 2010.

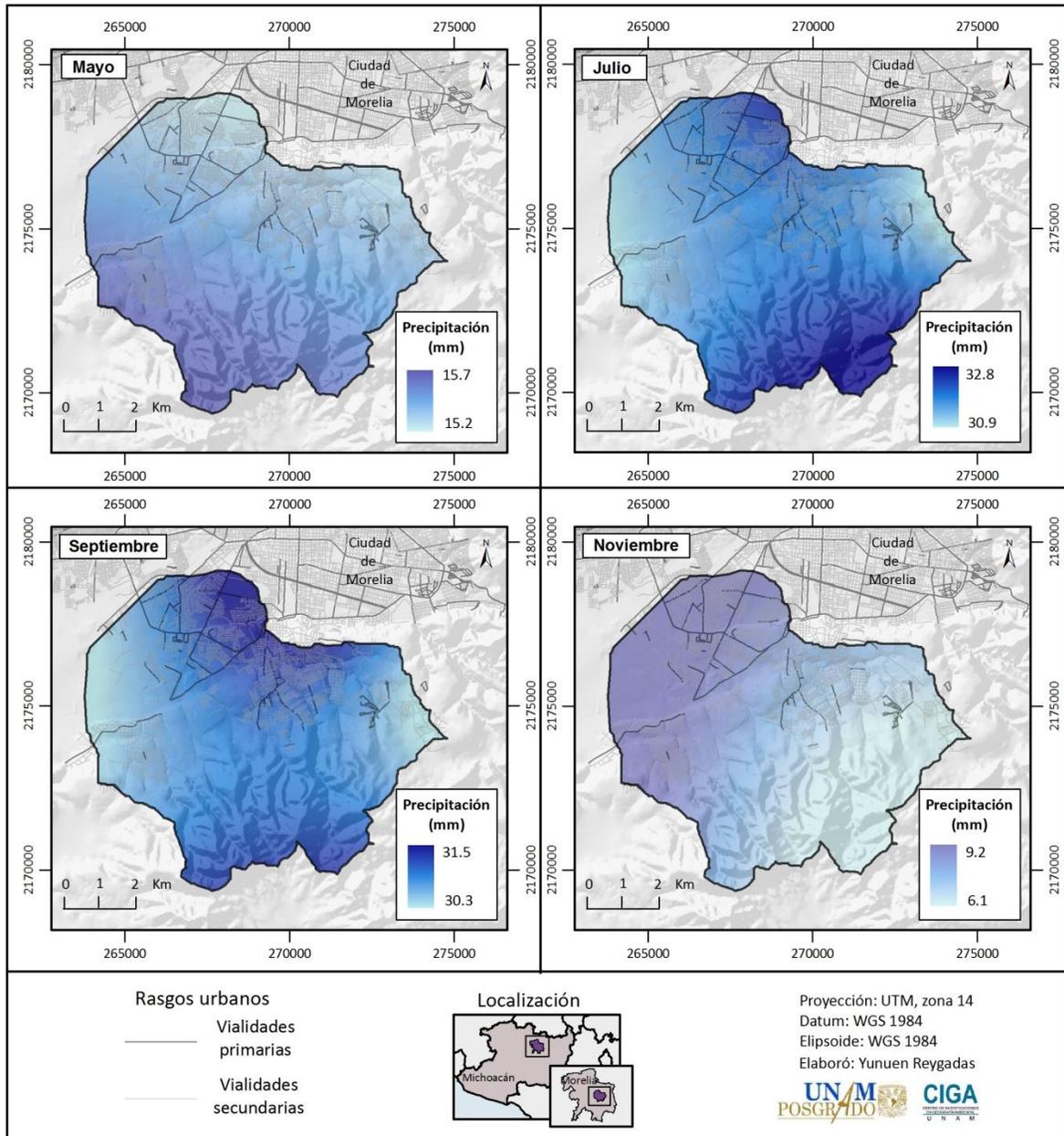
Figura 4.2. Área de influencia de la zona de estudio: precipitación máxima promedio en 24 horas



Fuente: elaboración propia con base en CLICOM, 2010.

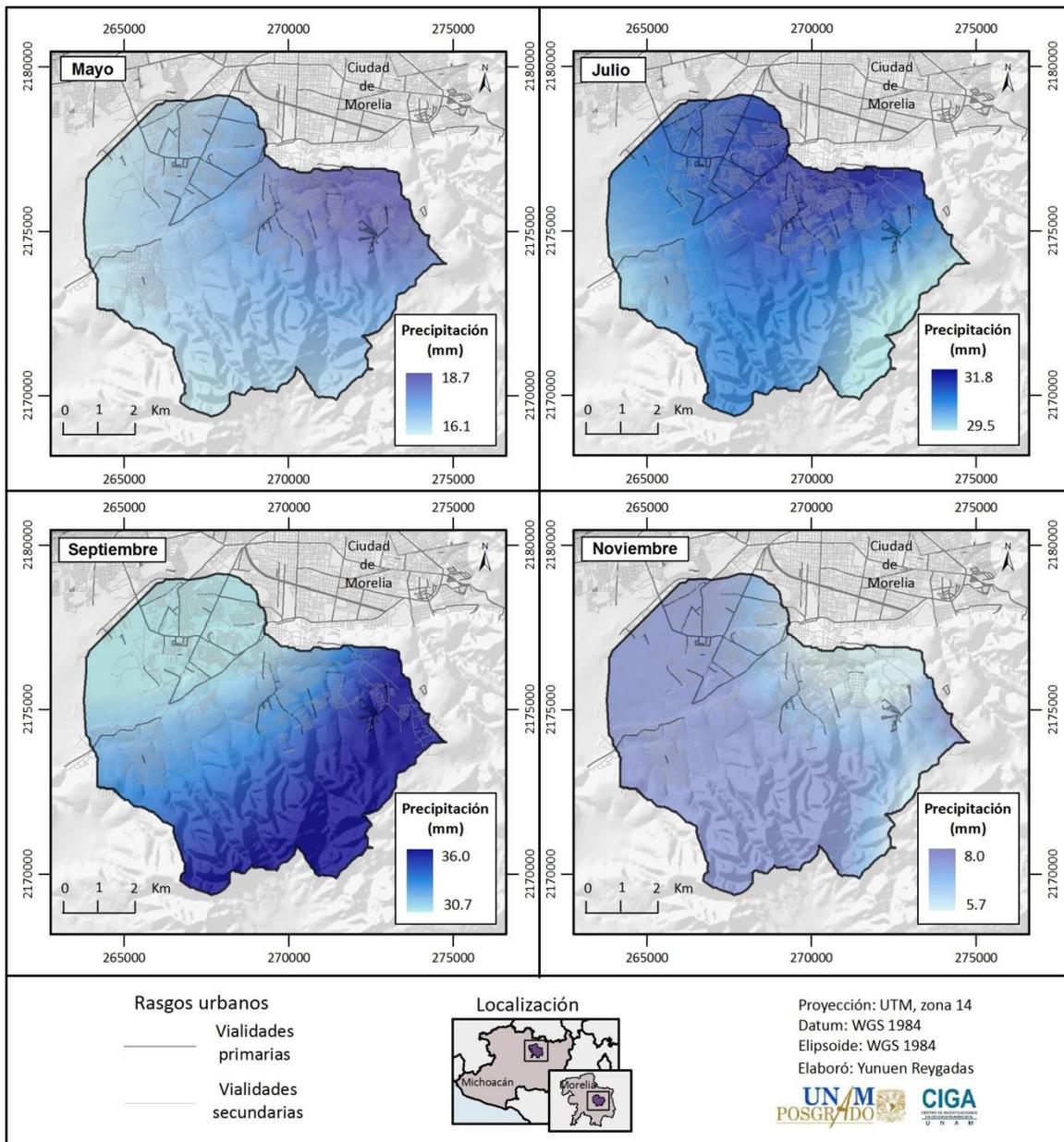
Aunque no existen diferencias significativas entre las dos fechas del análisis, se observa un ligero aumento de la precipitación durante la época de lluvias y una disminución en la temporada seca. En cuanto a la magnitud, de junio a septiembre se presentan días con una precipitación superior a 30 mm, en contraste con el período comprendido entre noviembre y abril, donde no se rebasan 10 mm de lluvia durante 24 horas.

Figura 4.3. Área de estudio: precipitación máxima promedio en 24 horas, 1995



Fuente: elaboración propia con base en CLICOM, 2010.

Figura 4.4. Área de estudio: precipitación máxima promedio en 24 horas, 2011



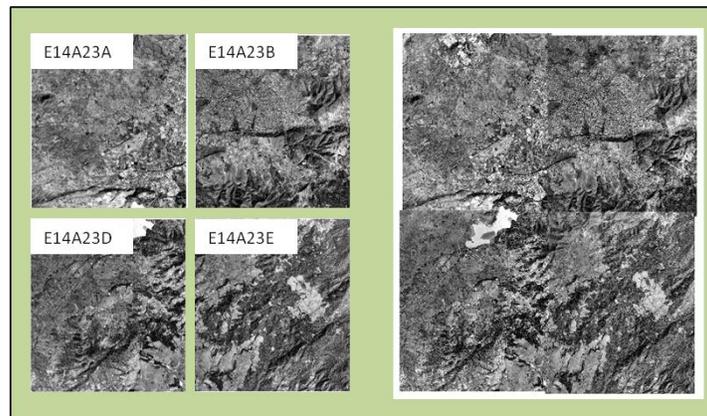
Fuente: elaboración propia con base en CLICOM, 2010

En general, la distribución espacial de la lluvia muestra que no existe un rango de variación muy amplio sobre la zona de estudio. Sin embargo, los mapas que representan la precipitación para el segundo período de análisis poseen intervalos más amplios que los del primer período. En suma, aunque no existen cambios importantes entre las dos fechas de análisis, es posible identificar algunas variaciones en la distribución temporal y espacial de la lluvia.

B. Cubierta vegetal y uso del suelo

La creación del ortofotomosaico y la fusión de las imágenes de satélite (figuras 4.5 y 4.6) arrojaron los productos a partir de los cuales se obtuvieron los mapas de cubierta vegetal y uso del suelo de 1995 y 2011 (figura 4.7 y 4.8). De manera general, se hallaron tres categorías de cubierta vegetal, cuatro de usos del suelo, superficies desnudas y cuerpos de agua. En particular, según el caso, se registró el subtipo de cubierta o uso, la condición hidrológica y el porcentaje de área impermeable (cuadros 4.1 y 4.2); sin embargo, con el fin de no perder eficiencia en la lectura cartográfica, algunas de estas últimas características se generalizaron en los mapas contenidos en las figuras 4.7 y 4.8.

Figura 4.5. Ortofotomosaico



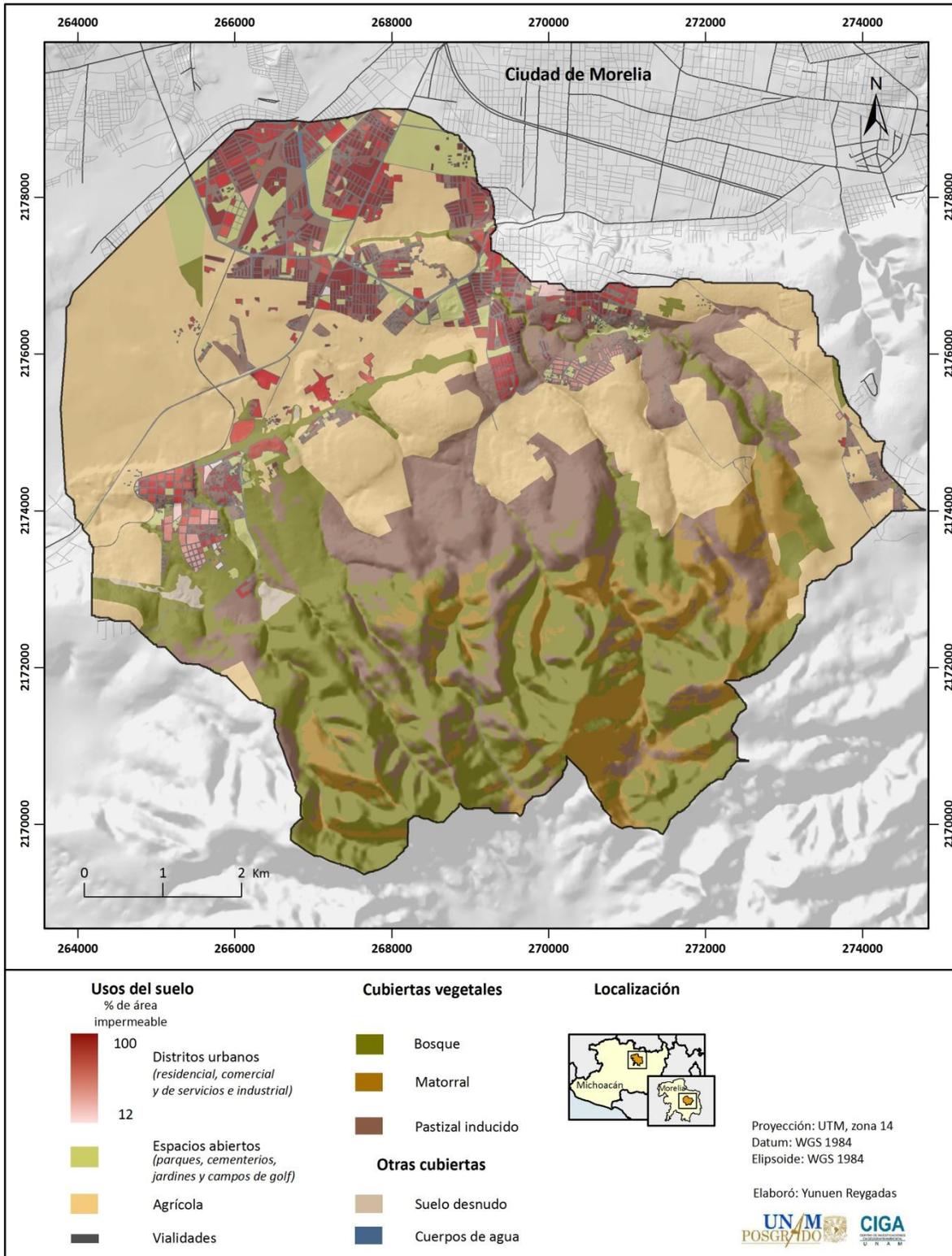
Fuente: elaboración propia con base en INEGI, 1995.

Figura 4.6. Fusión de imágenes satelitales



Fuente: elaboración propia con base en Digital Globe, 2011.

Figura 4.7. Área de estudio: cubierta vegetal y uso del suelo, 1995



Fuente: elaboración propia con base en INEGI, 1995.

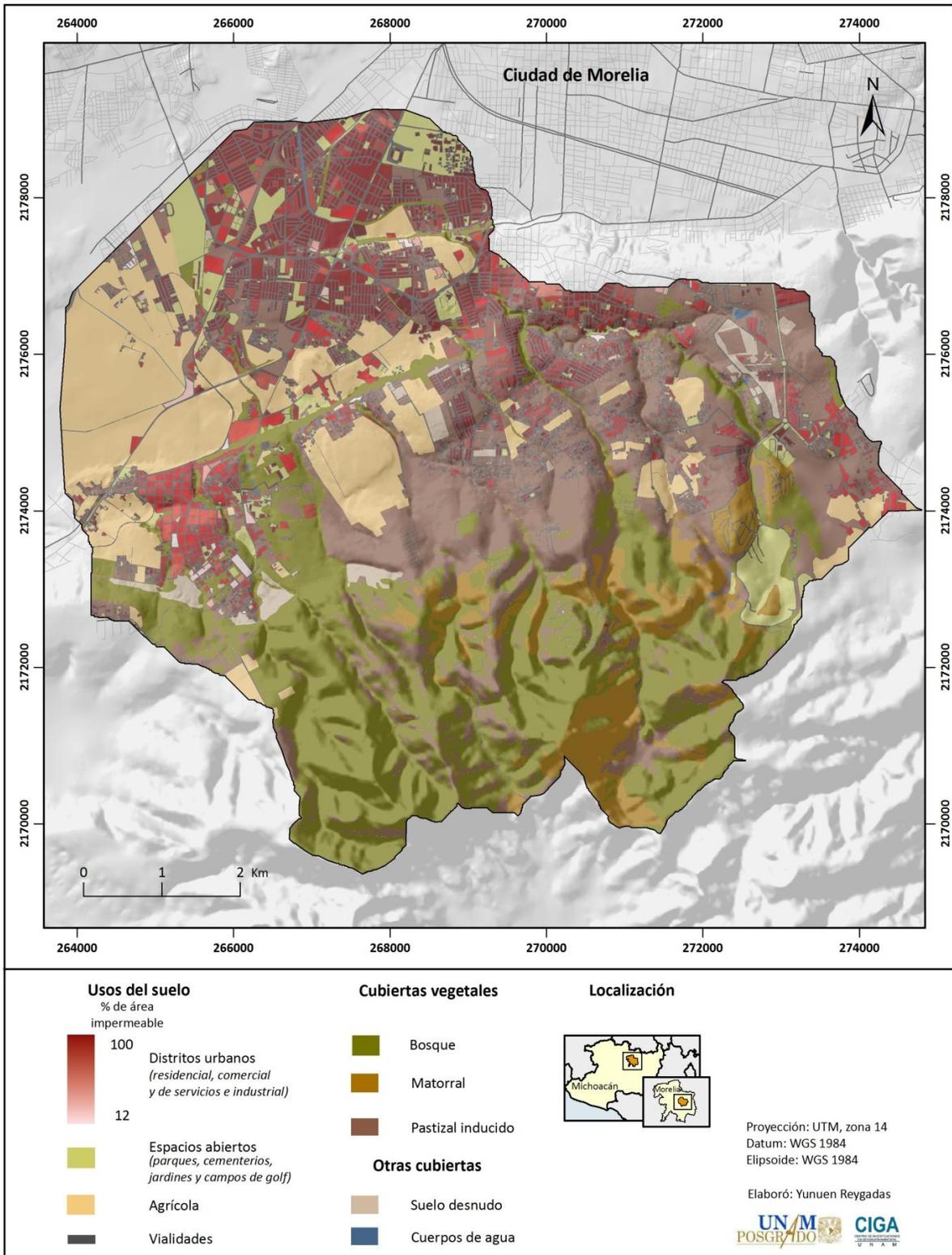
Cuadro 4.1. Área de estudio: cubierta vegetal y uso del suelo, 1995

Tipo de uso o cubierta	Subtipo de uso	Condición hidrológica	Área impermeable (%)	Área			
				m ²	Total parcial		
					m ²	km ²	%
Agricultura		pobre		14430370			
		buena		7196145	21626515	21.6	32.1
Bosque		buena		11565151			
		regular		3477958			
		pobre		2578375	17621483	17.6	26.2
Pastizal inducido		pobre		7542806			
		buena		3996089			
		regular		344961	11883856	11.9	17.7
Matorral		regular		4544798			
		buena		1220415	5765213	5.8	8.6
Distritos urbanos (residencial, comercial y de servicios e industrial)			85	2035339			
			65	1669242			
			72	418411			
			38	320370			
			30	246605			
			100	215911			
			25	175803			
			20	99827			
		12	33691	5215198	5.2	7.8	
Espacios abiertos (parques, cementerios, jardines y campos de golf)		regular		1418610			
		buena		768565			
		pobre		460163	2647337	2.6	3.9
Vialidades	pavimentadas			1683201			
	no pavimentadas			418312			
	férreas			73885	2175398	2.2	3.2
Suelo desnudo				280798	280798	0.3	0.4
Cuerpos de agua				65231	65231	0.1	0.1
				Total general	67281030	67.3	100.0

Fuente: elaboración propia.

En 1995 el uso agrícola ocupaba casi un tercio de la zona de estudio, seguido del bosque, pastizal inducido y matorral (en orden de importancia). Por su parte, los distritos urbanos que engloban usos como el residencial, comercial y de servicios e industrial, se extendían en menos una décima parte de la superficie. Así, las cubiertas vegetales (bosque, pastizal inducido y matorral) en conjunto con el uso agrícola cubrían casi el 85% del polígono, mientras que el grupo de usos propios de la ciudad (distritos urbanos, vialidades y espacios abiertos) no rebasaban el 15%. En suma, el paisaje estaba dominado por campos agrícolas y superficies boscosas.

Figura 4.8. Área de estudio: cubierta vegetal y uso del suelo, 2011



Fuente: elaboración propia con base en Digital Globe, 2011.

Cuadro 4.2. Área de estudio: cubierta vegetal y uso del suelo, 2011

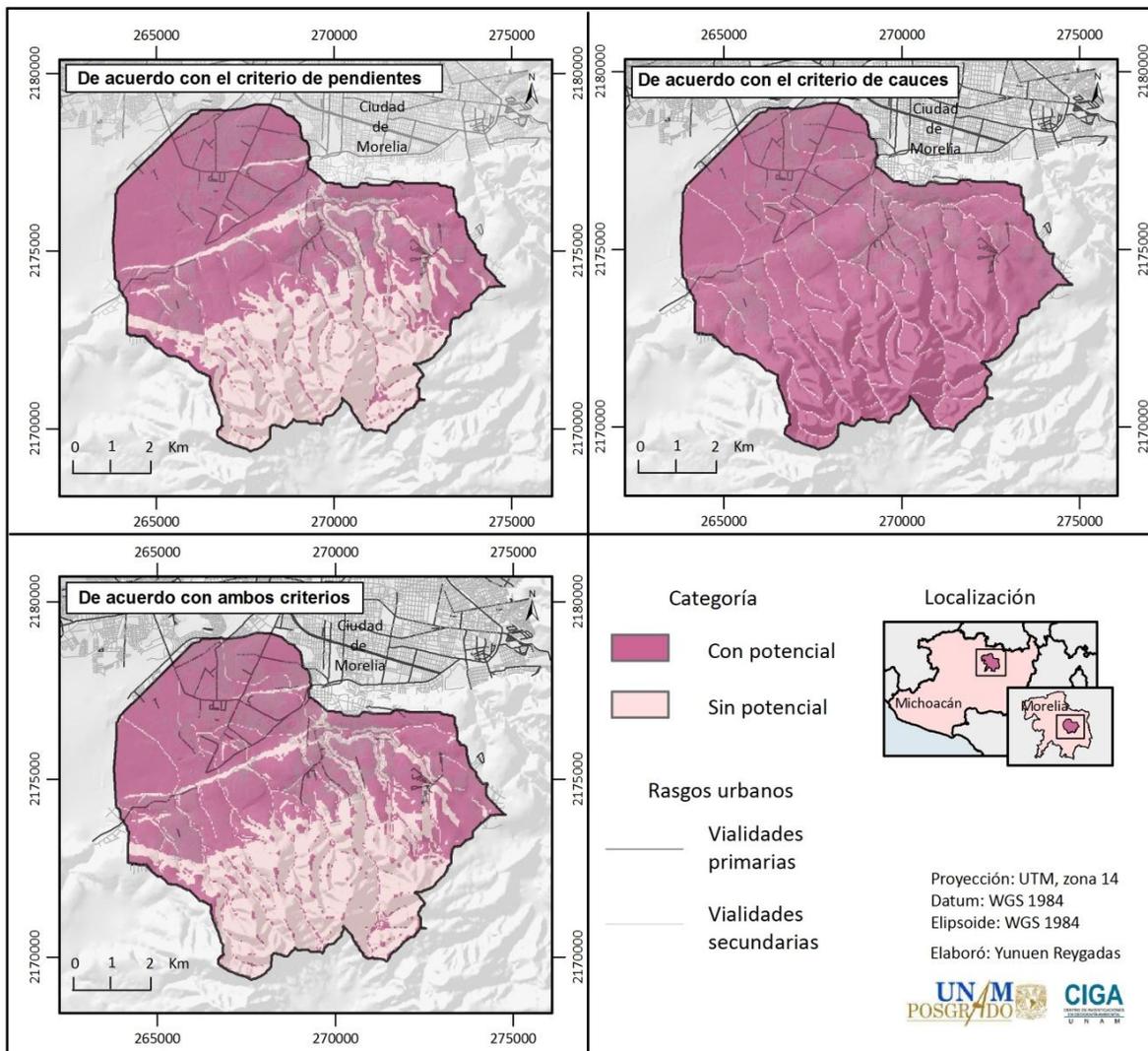
Tipo de uso o cubierta	Subtipo de uso	Condición hidrológica	Área impermeable (%)	Área			
				m ²	Total parcial		
					m ²	km ²	%
Bosque		buena		10022830	17860625	17.9	26.5
		regular		5207233			
		pobre		2630562			
Pastizal inducido		pobre		11084768	15323963	15.3	22.8
		buena		4091773			
		regular		147422			
Distritos urbanos (residencial, comercial y de servicios e industrial)			85	5257684	11091744	11.1	16.5
			65	3338630			
			72	1109571			
			100	498420			
			38	414172			
			12	129783			
			20	128929			
			30	123648			
	25	90907					
Agricultura		pobre		5957537	9843648	9.8	14.6
		buena		3886111			
Vialidades	pavimentadas			4210890	4852769	4.9	7.2
	no pavimentadas			576606			
	férreas			65273			
Matorral		regular		3033958	4143209	4.1	6.2
		buena		1109252			
Espacios abiertos (parques, cementerios, jardines y campos de golf)		buena		1649193	3114997	3.1	4.6
		regular		820994			
		pobre		644810			
Suelo desnudo				938308	938308	0.9	1.4
Cuerpos de agua				111768	111768	0.1	0.2
				Total general	67281030	67.3	100.0

Fuente: elaboración propia.

Para el año 2011, el bosque cubría un poco más de un cuarto de la superficie total, seguido del pastizal inducido que se extendía en más de una quinta parte del área. El uso agrícola disminuyó significativamente con respecto a 1995, en su lugar se desarrollaron pastizales inducidos o se establecieron usos urbanos; de igual forma, aunque en menor proporción, el matorral experimentó una reducción. En consecuencia, el conjunto de usos urbanos duplicó su extensión hasta ocupar cerca del 30% de la zona de estudio, mientras que el grupo conformado por las cubiertas vegetales y el uso agrícola disminuyó a 70%.

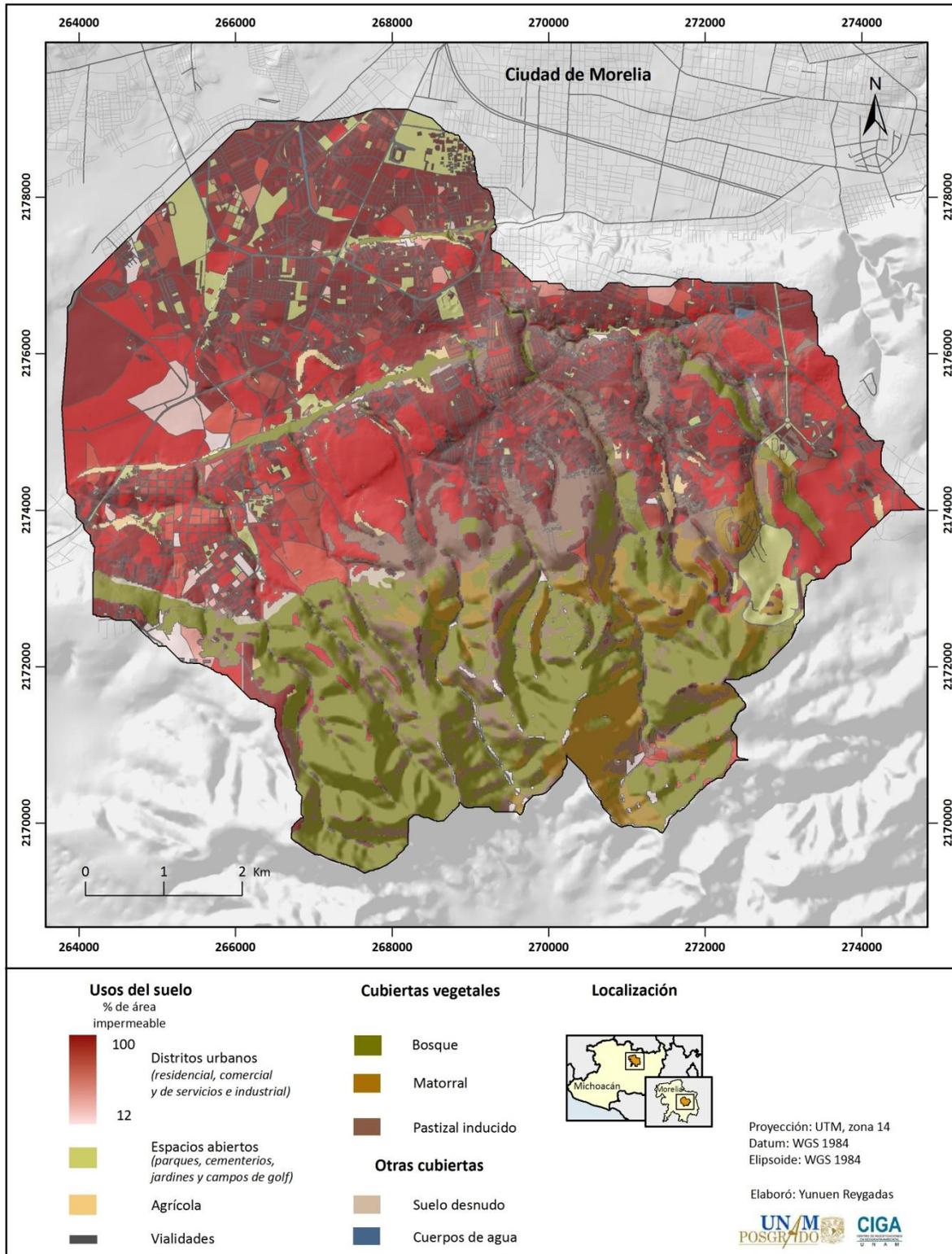
En cuanto a los resultados del proceso de proyección del escenario futuro, se encontró que, hasta 2011, el 90% del casco urbano se extendía en un rango de 0 a 7.6° de pendiente; por lo tanto, las superficies no urbanizadas con valores dentro de este intervalo, con excepción de aquellas donde existen cauces, se establecieron como zonas con potencial para la expansión urbana (figura 4.9). En este sentido, la simulación del crecimiento de la ciudad sobre las áreas con potencial y la generación del mapa final de cubierta vegetal y uso del suelo muestran el escenario que, de seguir la misma tendencia de urbanización, podría presentarse en 2050 (figura 4.10).

Figura 4.9. Área de estudio: zonas con potencial para la expansión urbana



Fuente: elaboración propia.

Figura 4.10. Área de estudio: cubierta vegetal y uso del suelo, 2050



Fuente: elaboración propia.

De este modo, si el ritmo de crecimiento urbano continúa como hasta ahora, en 2050, los distritos urbanos se extenderán en casi el 40% de la zona de estudio, seguidos de los bosques y vialidades que cubrirán alrededor del 20 y 17%, respectivamente; en contraste, la agricultura reducirá su superficie hasta menos del 1% (cuadro 4.3). Por lo tanto, en términos generales, el paisaje quedará dominado por los usos urbanos, mientras que las cubiertas vegetales ocuparán mucho menos de la mitad del polígono de estudio.

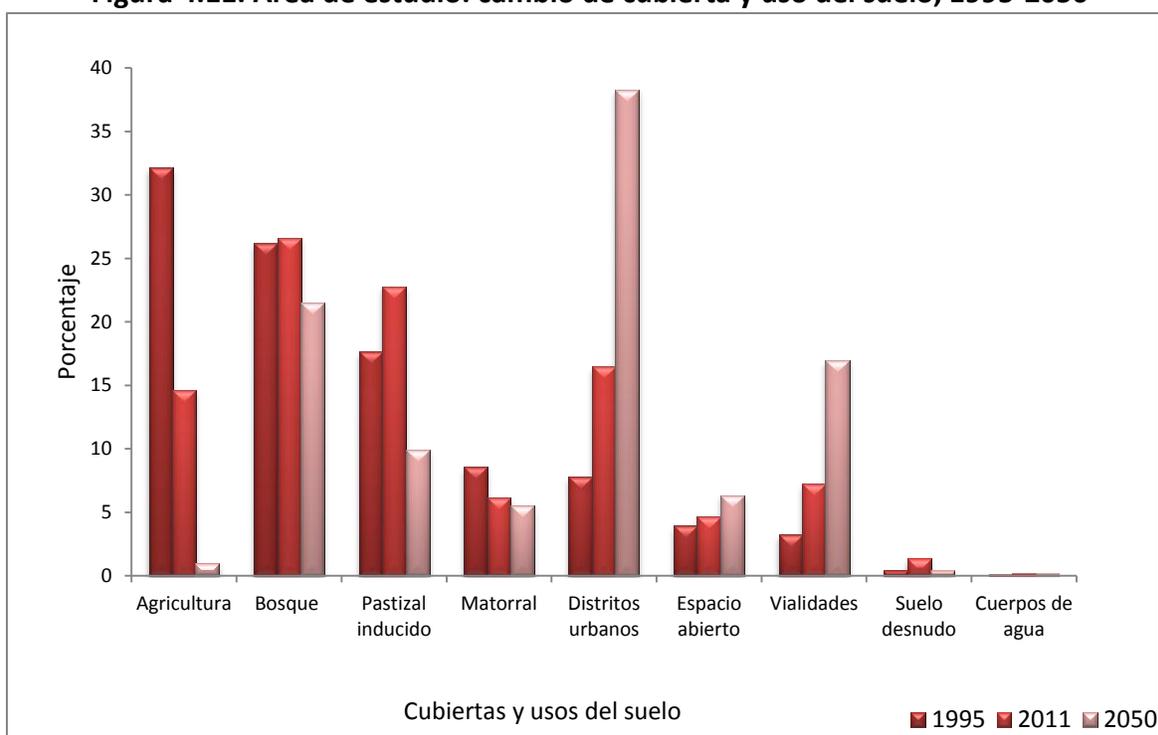
Cuadro 4.3. Área de estudio: cubierta vegetal y uso del suelo, 2050

Tipo de uso o cubierta	Subtipo de uso	Condición hidrológica	Área impermeable (%)	Área			
				m2	Total parcial		
					m2	km2	%
Distritos urbanos <i>(residencial, comercial y de servicios e industrial)</i>			65	10910383			
			85	8800790			
			72	1930852			
			100	1581258			
			38	1100788			
			12	560193			
			20	498081			
			25	243224			
			30	121180	25746749	25.7	38.3
Bosque		buena		9065691			
		regular		3495496			
		pobre		1904869	14466056	14.5	21.5
Vialidades	pavimentadas			9975760			
	no pavimentadas			1366003			
	férreas			65369	11407132	11.4	17.0
Pastizal inducido		buena		3498331			
		pobre		3078895			
		regular		87337	6664562	6.7	9.9
Espacios abiertos <i>(parques, cementerios, jardines y campos de golf)</i>		buena		2252142			
		regular		1121551			
		pobre		880833	4254526	4.3	6.3
Matorral		regular		2707238			
		buena		1009897	3717134	3.7	5.5
Agricultura		pobre		508986			
		buena		132765	641752	0.6	1.0
Suelo desnudo				270205	270205	0.3	0.4
Cuerpos de agua				112912	112912	0.1	0.2
				Total general	67281030	67.3	100

Fuente: elaboración propia.

Con el objeto de ilustrar los supuestos anteriores, en la figura 4.11 se muestra la proporción de cambio de cada cubierta o uso del suelo en función de las tres fechas de análisis. De esta forma, se hace evidente que el uso agrícola presenta uno de los cambios más significativos al reducir su extensión, en un 50%, entre 1995 y 2011 y casi desaparecer en el escenario proyectado; otro de los cambios importantes, pero en sentido inverso, es el de los distritos urbanos y vialidades, cuyas superficies aumentaron en proporciones mayores al 50% entre cada fecha. Los espacios abiertos, conformados por parques, cementerios, jardines y campos de golf, muestran una expansión menos acelerada que el resto de usos urbanos. Por otro lado, aunque algunas cubiertas como los bosques, pastizales inducidos y el suelo desnudo exhiben un crecimiento entre 1995 y 2011, para 2050 se calcula una disminución importante; en contraparte, el matorral presenta una pérdida gradual de extensión y, por último, los cuerpos de agua no revelan cambios sustanciales.

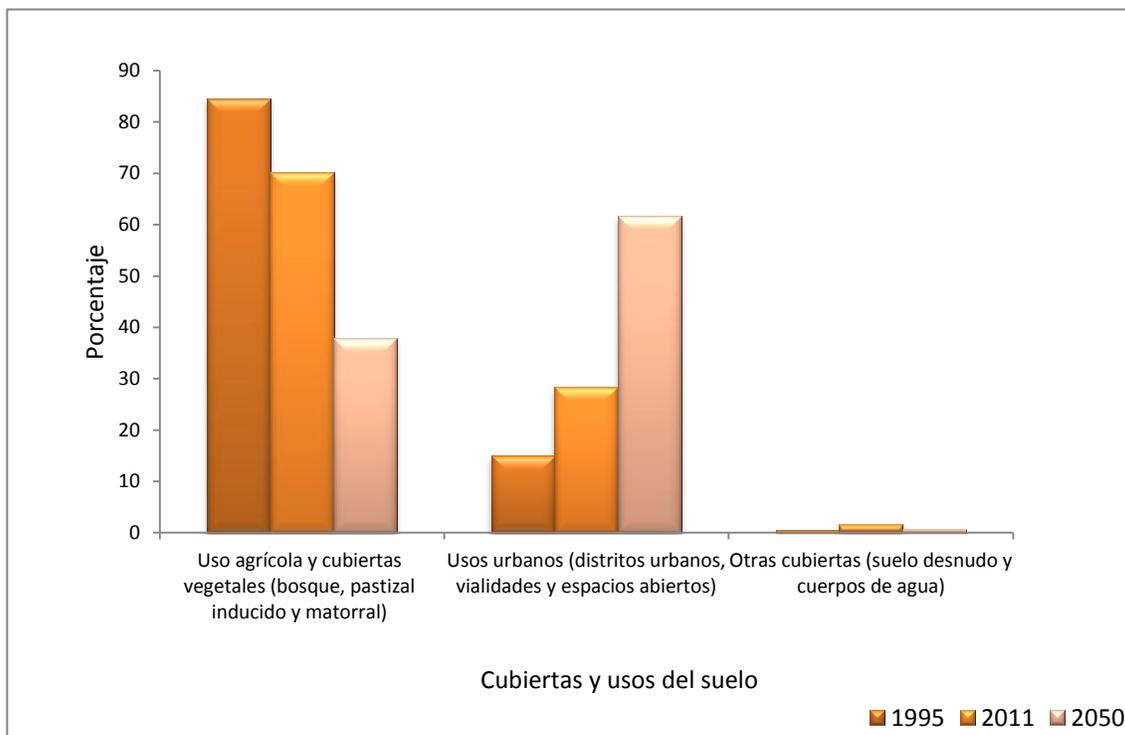
Figura 4.11. Área de estudio: cambio de cubierta y uso del suelo, 1995-2050



Fuente: elaboración propia.

Finalmente, para visualizar la dinámica de expansión urbana, las cubiertas y usos del suelo se agruparon en tres bloques; el primero comprende el uso agrícola y las cubiertas vegetales, el segundo los usos urbanos y el tercero el suelo desnudo y los cuerpos de agua (figura 4.12). Bajo esta perspectiva, se hace evidente que los usos urbanos tienden a desplazar tanto a las cubiertas vegetales como al uso agrícola, además, se advierte que, de seguir la misma tendencia, en 2050 la mancha urbana se extenderá en un área superior al 60% de la zona de estudio, lo que corresponde a más del doble de la superficie actual.

Figura 4.12. Área de estudio: cambio en la extensión de cubiertas y usos del suelo, 1995-2050



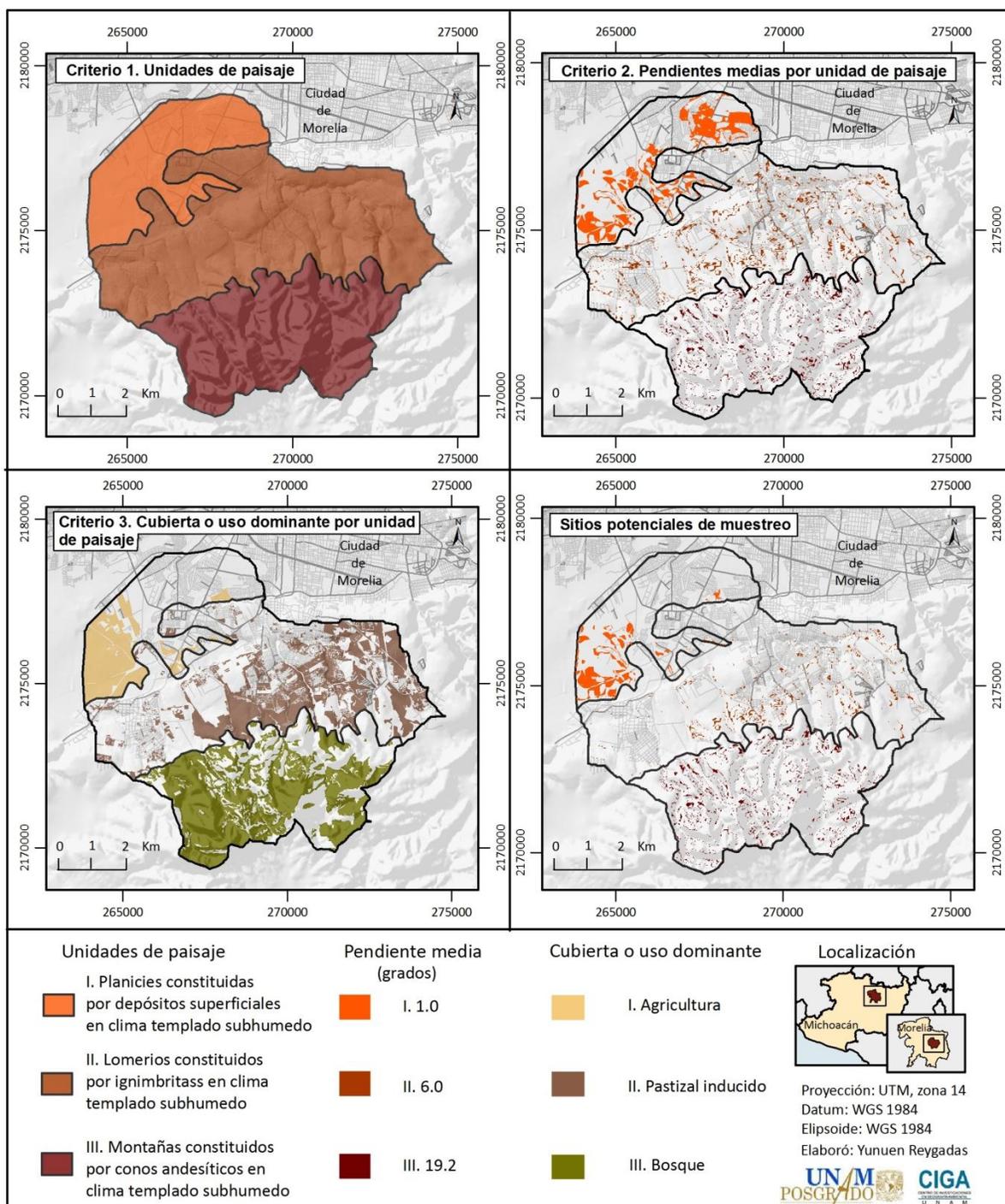
Fuente: elaboración propia.

C. Grupo hidrológico del suelo

Como se mencionó en el capítulo anterior, para obtener la cartografía relacionada con el grupo hidrológico del suelo, se delimitaron sitios potenciales de muestreo (figura 4.13), a partir de los cuales, y con ayuda de un recorrido de campo, se seleccionaron los puntos definitivos para descubrir perfiles de suelo. De acuerdo con la metodología, se eligió un sitio por cada unidad de paisaje, sin embargo, debido a que, en la unidad tres, existe un

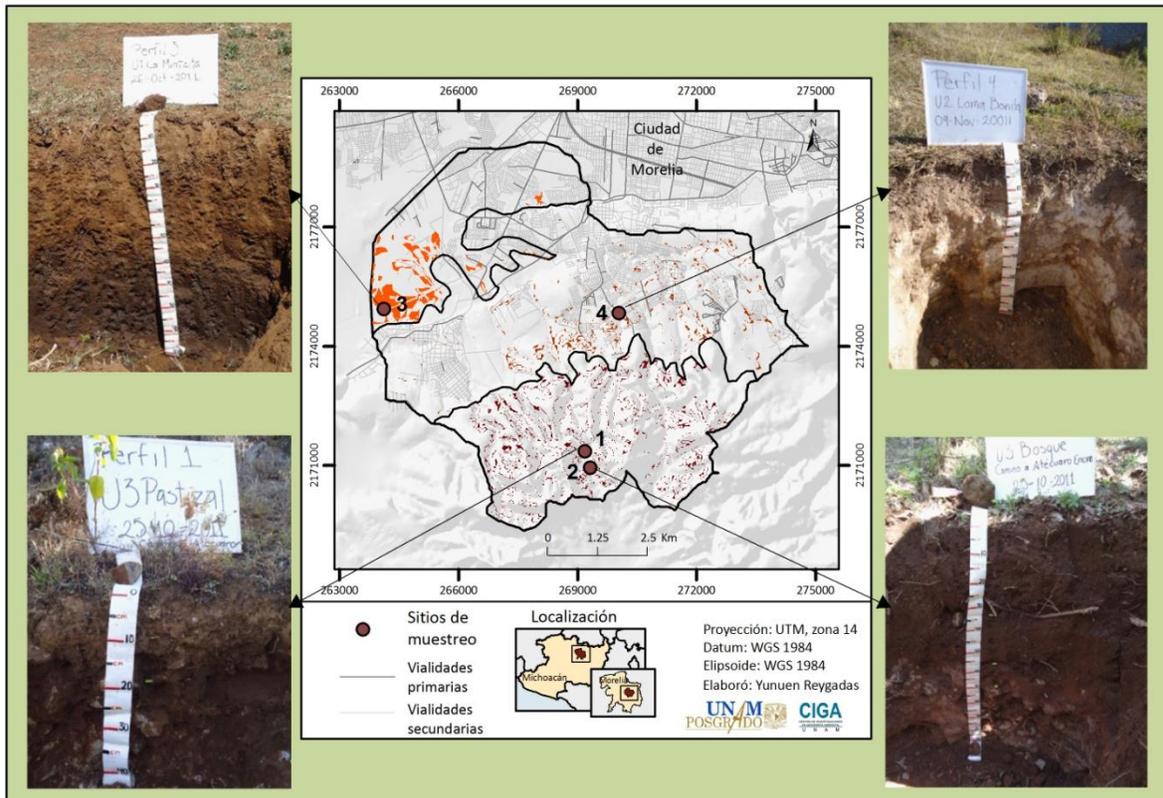
contraste importante entre la densidad de la cubierta del bosque y la del pastizal inducido, se optó por realizar una calicata por cada una de estas cubiertas (figura 4.14).

Figura 4.13. Área de estudio: sitios potenciales de muestreo de suelos y criterios de selección



Fuente: elaboración propia.

Figura 4.14. Área de estudio: sitios definitivos de muestreo de suelos



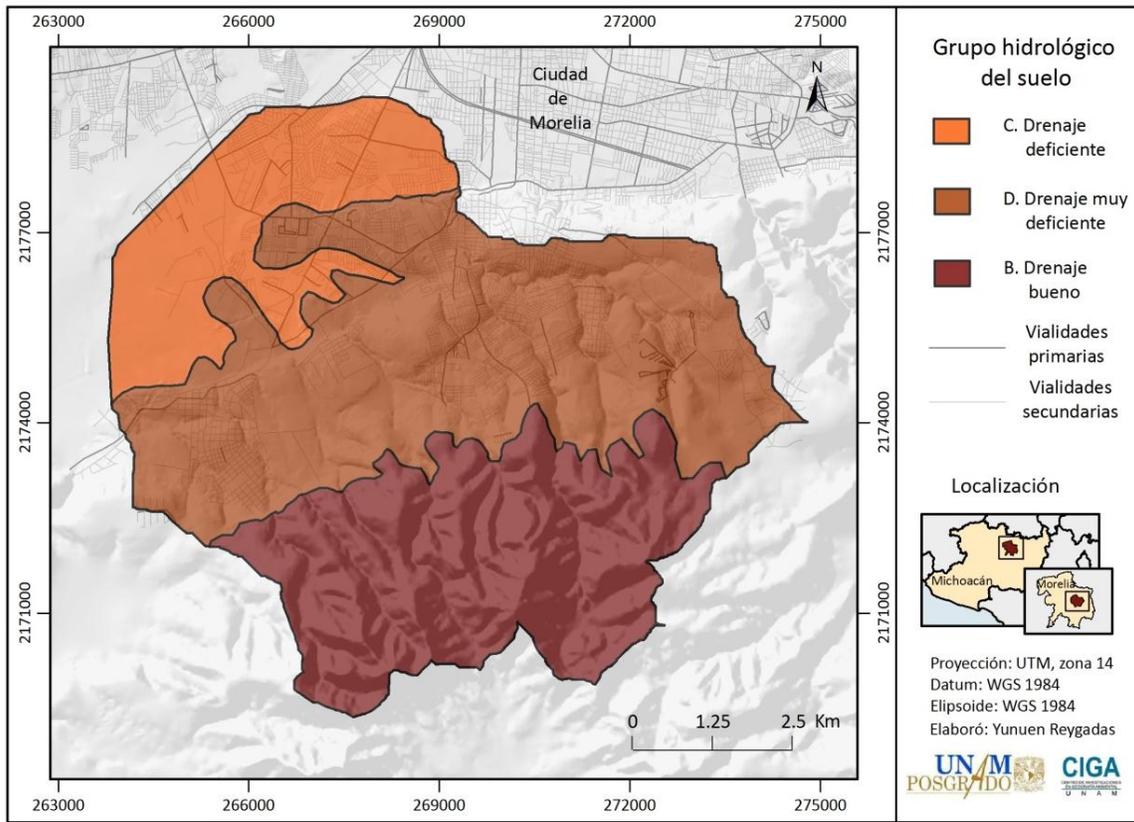
Fuente: elaboración propia con base en trabajo de campo, 2011.

De acuerdo con la descripción físico-química y la evaluación ecológica de cada sitio de muestreo, se hallaron los grupos hidrológicos siguientes:

- B. A pesar de que las calicatas de los sitios uno y dos se realizaron en lugares con cubiertas muy diferentes entre sí (pastizal inducido y bosque), los resultados mostraron que ambos suelos poseen un patrón de drenaje bueno que deriva en un potencial moderadamente bajo de escurrimiento.
- C. En el sitio tres se encontró un suelo con patrón de drenaje deficiente, característica que contribuye a que el potencial de escurrimiento sea moderadamente alto.
- D. En el último sitio de muestreo se registró un suelo con patrón de drenaje muy deficiente, donde el potencial de escurrimiento es alto.

Con la información anterior se realizó una generalización espacial con la que arrojó la cartografía final (figura 4.15).

Figura 4.15. Área de estudio: grupo hidrológico del suelo



Fuente: elaboración propia con base en trabajo de campo, 2011.

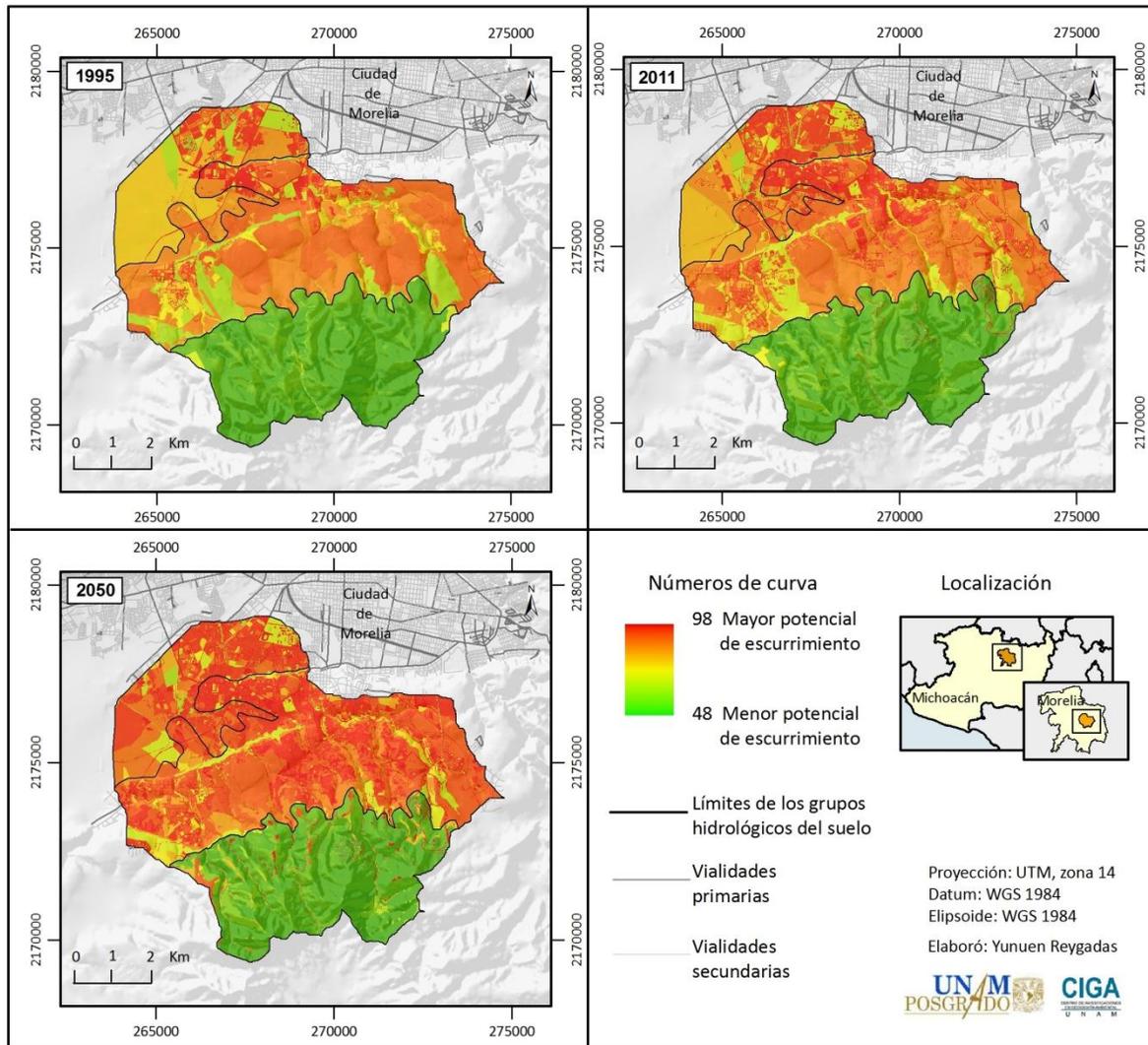
D. Ecuación

El primer paso para integrar la información en la ecuación del volumen de escurrimiento dio como resultado un conjunto de mapas donde las cubiertas vegetales y usos del suelo se asociaron con un grupo hidrológico; tales productos cartográficos permitieron asignar un número de curva (CN) a cada polígono de cubierta o uso (figura 4.16). Los valores resultantes corresponden a condiciones de humedad antecedente promedio (CN_{II}) (cuadro 4.4) a partir de los cuales se determinaron valores para condiciones de humedad antecedente secas y húmedas (CN_I y CN_{II}).

Como se mencionó en el capítulo metodológico, con base en los CN's se calculó el resto de componentes de la ecuación, incluso la condición de lluvia mínima para que cada CN genere escurrimiento (figura 4.17). Así, en función de esta última consideración, se construyeron los mapas finales de precipitación donde se incluyen, únicamente, los

valores que, de acuerdo con el CN, producen escorrentía (figuras 4.18 a la 4.20). Los mapas anteriores, junto con los derivados de la conversión de 0.25 y 0.85 a formato raster, constituyen los elementos finales que se emplearon para aplicar la ecuación del volumen de escurrimiento.

Figura 4.16. Área de estudio: números de curva (CN_{II})



Fuente: elaboración propia.

Cuadro 4.4. Área de estudio: números de curva (CN_{II})

Tipo de uso o cubierta	Subtipo de uso	Condición hidrológica	Área impermeable (%)	CN para los grupos hidrológicos del suelo		
				B	C	D
Agricultura		pobre		81	88	91
		buena		78	85	89
Bosque		pobre		66	77	83
		regular		60	73	79
		buena		55	70	77
Pastizal inducido		pobre		79	86	89
		regular		69	79	84
		buena		61	74	80
Matorral		regular		56	70	77
		buena		48	65	73
Distritos urbanos (residencial, comercial y de servicios e industrial)			100	98	98	98
			85	92	94	95
			72	88	91	93
			65	85	90	92
			38	75	83	87
			30	72	81	86
			25	70	80	85
			20	68	79	84
Espacios abiertos (parques, cementerios, Jardines y campos de golf)		pobre		79	86	89
		regular		69	79	84
		buena		61	74	80
Vialidades	pavimentadas			98	98	98
	no pavimentadas			82	87	89
	férreas			85	89	91
Suelo desnudo				82	87	89
Cuerpos de agua				98	98	98

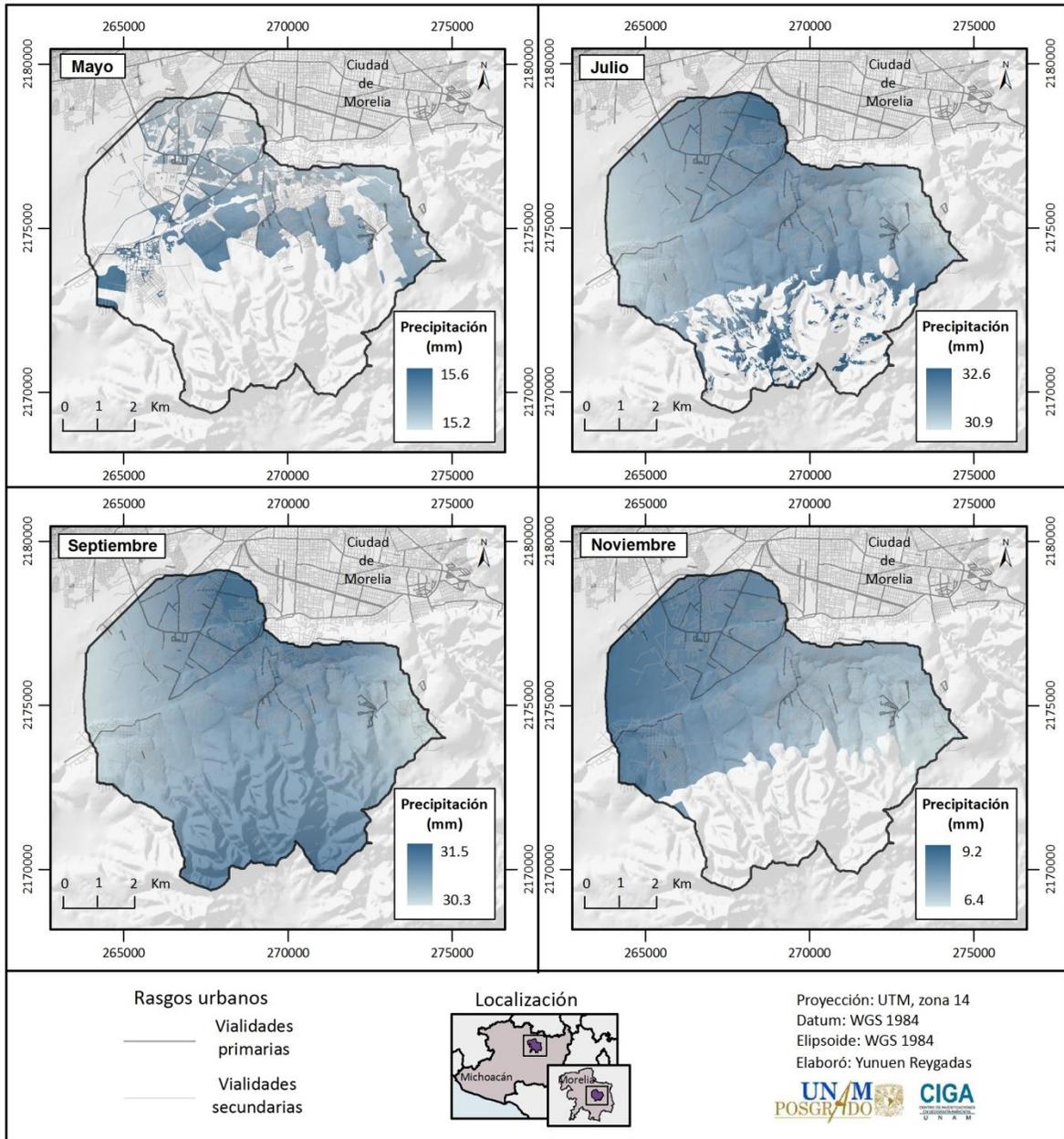
Fuente: elaboración propia con base en USDA, 1986.

Figura 4.17. Área de estudio: obtención de los componentes de la ecuación a partir del número de curva (CN_{II})

FID	Shape *	Id	Cub_uso	ÁrealImper	ConHidro	UPaisaj	GH	CNII	S	02S	08S	ConLUvi	Área
9	Polygon	1	Agricultura		pobre	1	C	88	34.636	6.9273	27.709	6.86	40093.94
10	Polygon	1	Agricultura		pobre	1	C	88	34.636	6.9273	27.709	6.86	568240.8
11	Polygon	1	Agricultura		buena	1	C	85	44.823	8.9647	35.858	8.89	4244882.
273	Polygon	1	Espacio abierto		regular	1	C	79	67.519	13.503	54.015	13.46	392708.1
273	Polygon	1	Bosque abierto		pobre	1	C	77	75.870	15.174	60.696	15.24	99887.23
12	Polygon	1	Residencial	65		1	C	90	28.222	5.6444	22.577	5.59	32631.49
13	Polygon	1	Residencial	65		1	C	90	28.222	5.6444	22.577	5.59	11326.86

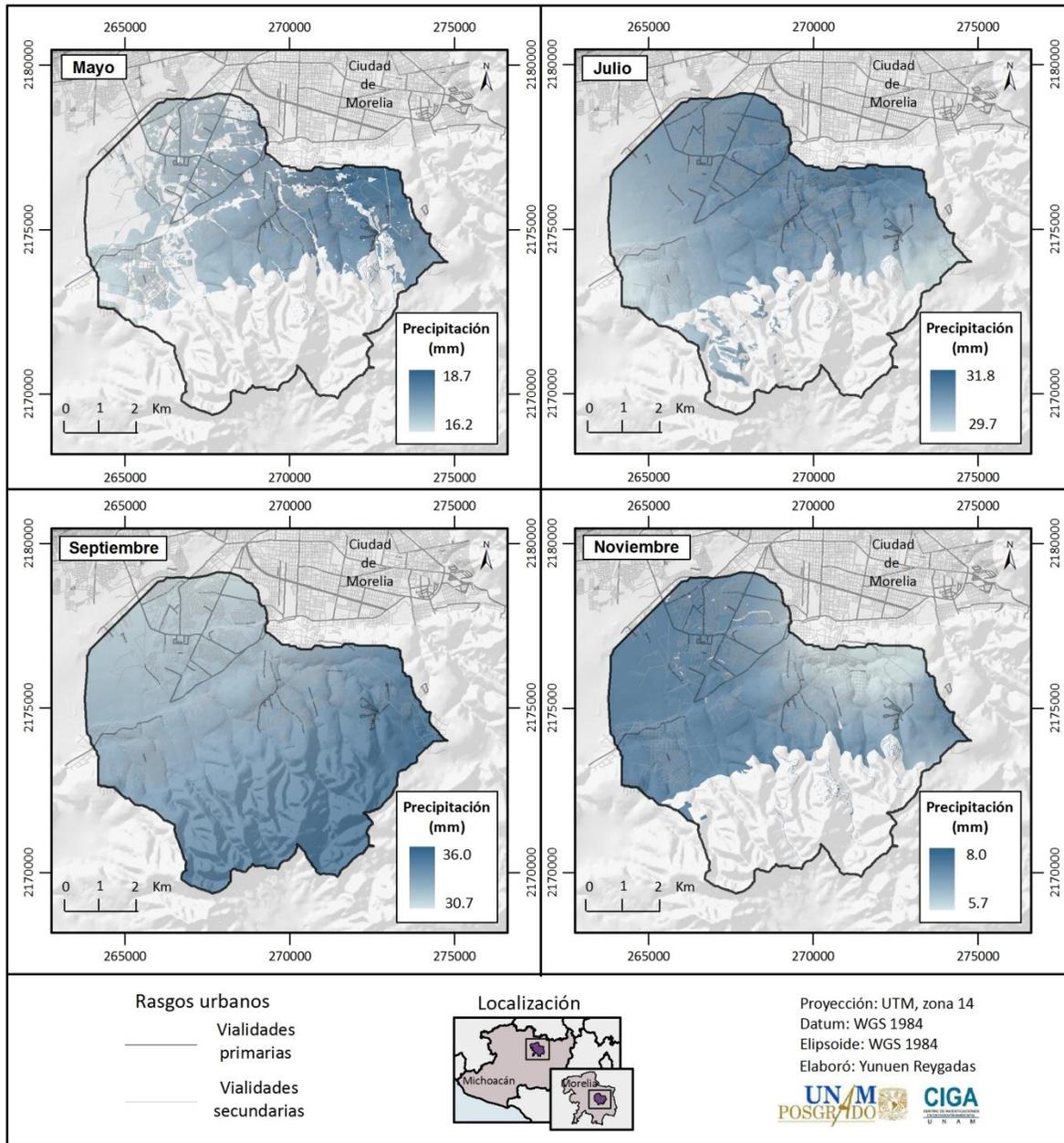
Fuente: elaboración propia.

Figura 4.18. Área de estudio: valores de precipitación máxima promedio en 24 horas que generan escurrimiento de acuerdo con el número de curva, 1995



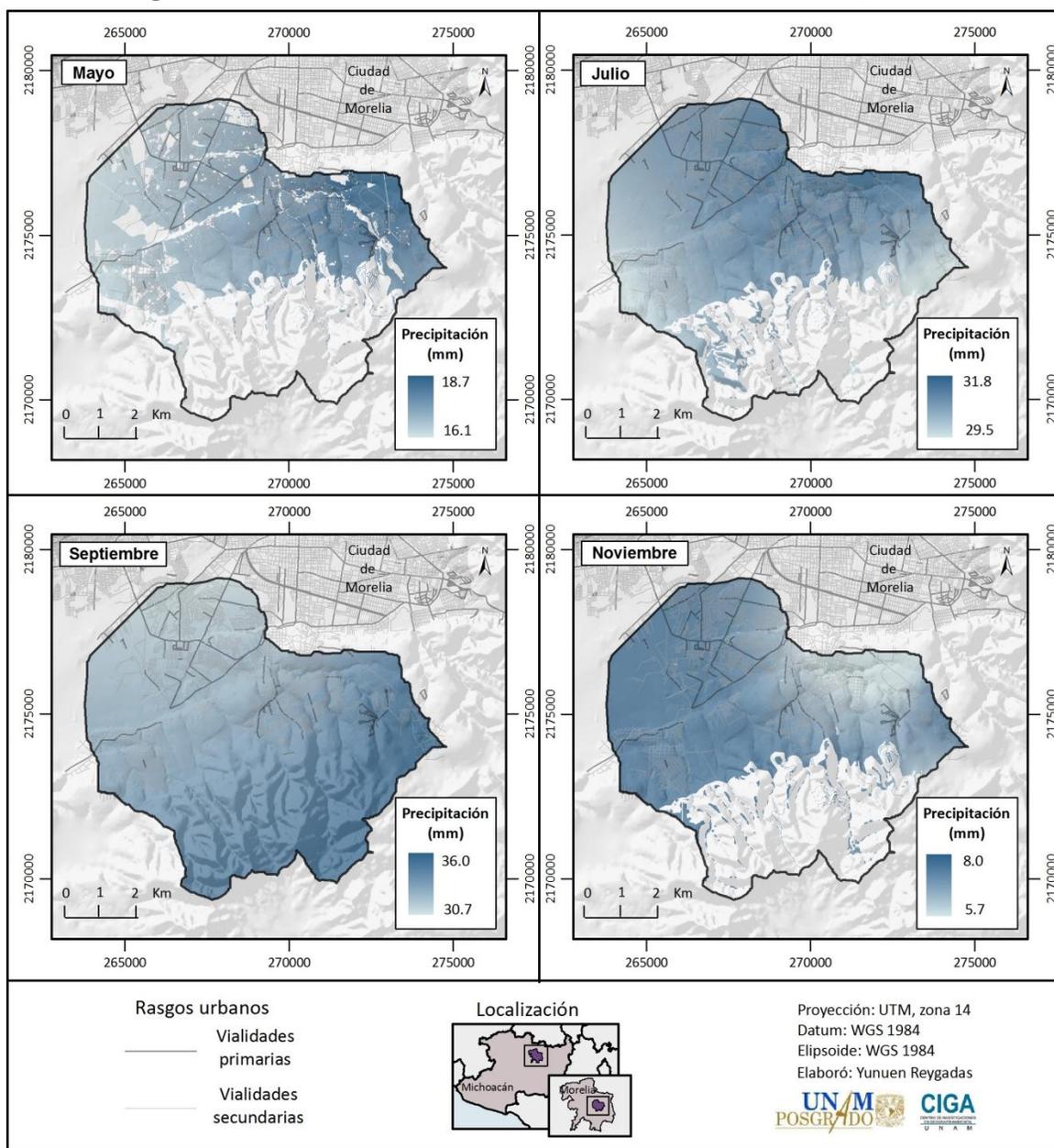
Fuente: elaboración propia.

Figura 4.19. Área de estudio: valores de precipitación máxima promedio en 24 horas que generan escurrimiento de acuerdo con el número de curva, 2011



Fuente: elaboración propia.

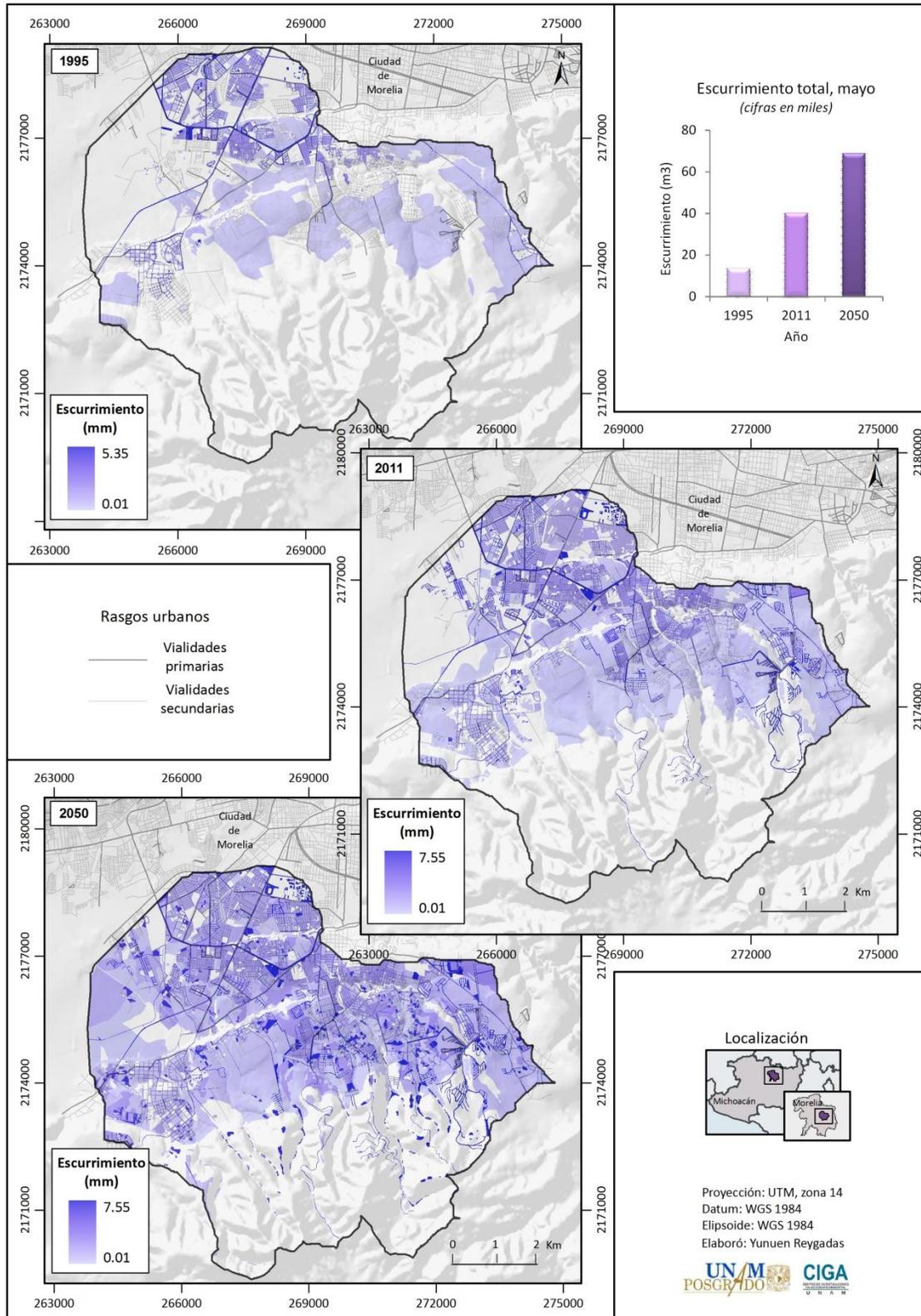
Figura 4.20. Área de estudio: valores de precipitación máxima promedio en 24 horas que generan escurrimiento de acuerdo con el número de curva, 2050



Fuente: elaboración propia.

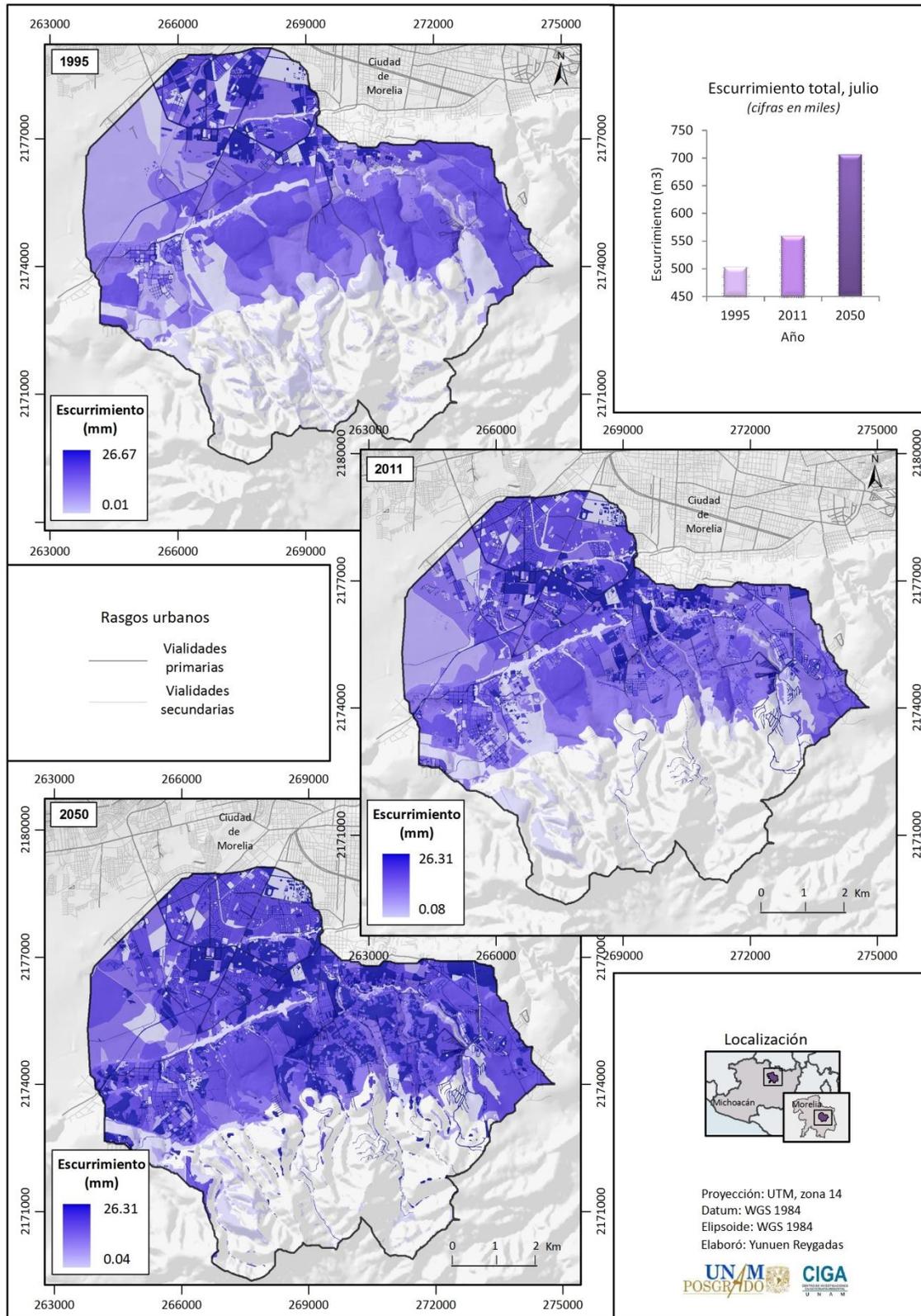
Con el fin de no perder claridad en la demostración de la forma en que se integró la información, algunos de los resultados sólo se muestran para CN_{II} , obviando que se obtuvieron productos análogos para CN_I y CN_{III} . En este sentido, el volumen de escurrimiento calculado para mayo de 1995, 2011 y 2050, se obtuvo con la información procedente de CN_I ; la escorrentía de julio se estimó con CN_{II} , mientras que la de septiembre y noviembre surgió de CN_{III} (figuras 4.21 a la 4.24).

Figura 4.21. Área de estudio: escurrimiento generado por la precipitación máxima promedio en 24 horas de mayo, 1995-2050



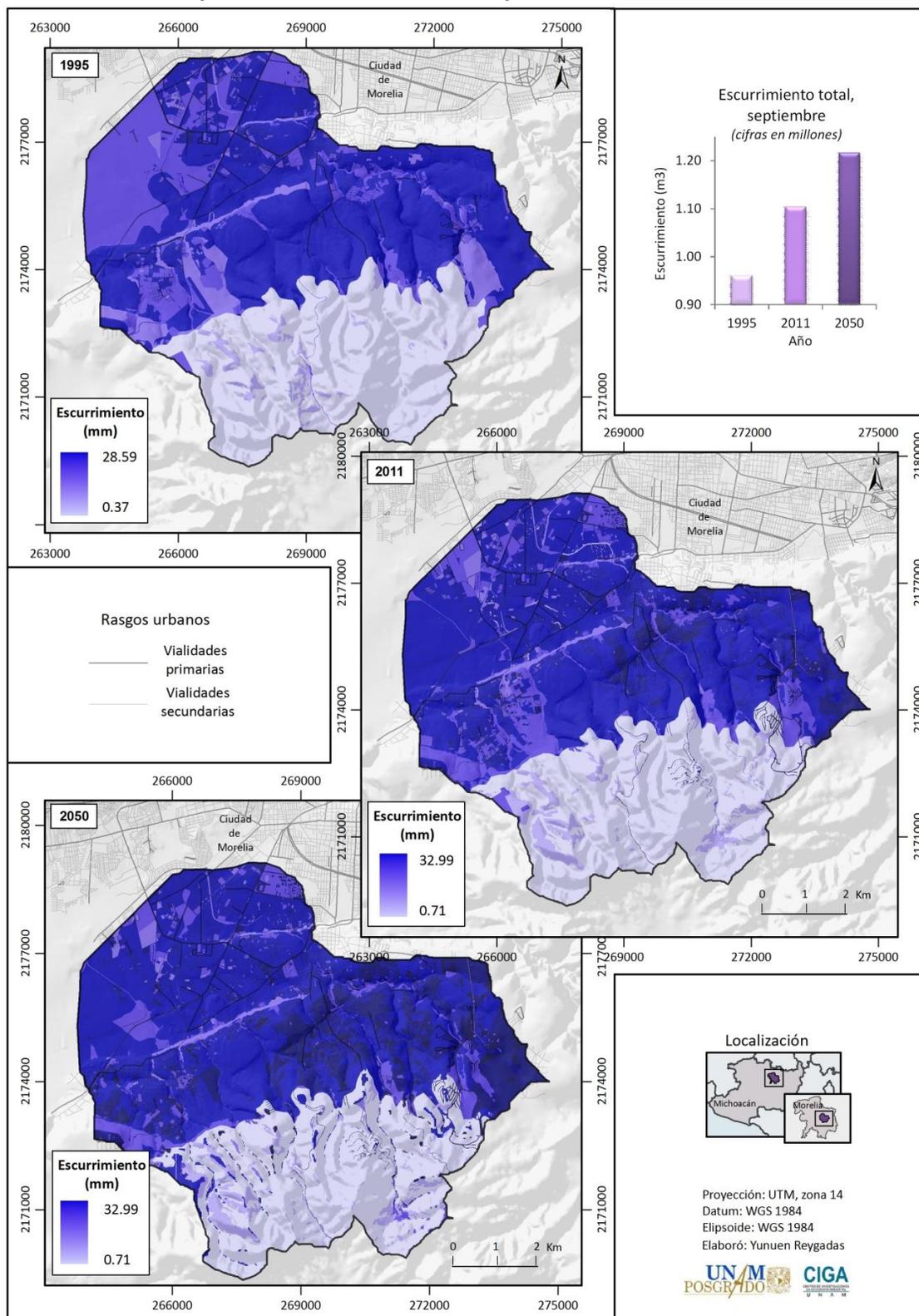
Fuente: elaboración propia

Figura 4.22. Área de estudio: escurrimiento generado por la precipitación máxima promedio en 24 horas de julio, 1995-2050



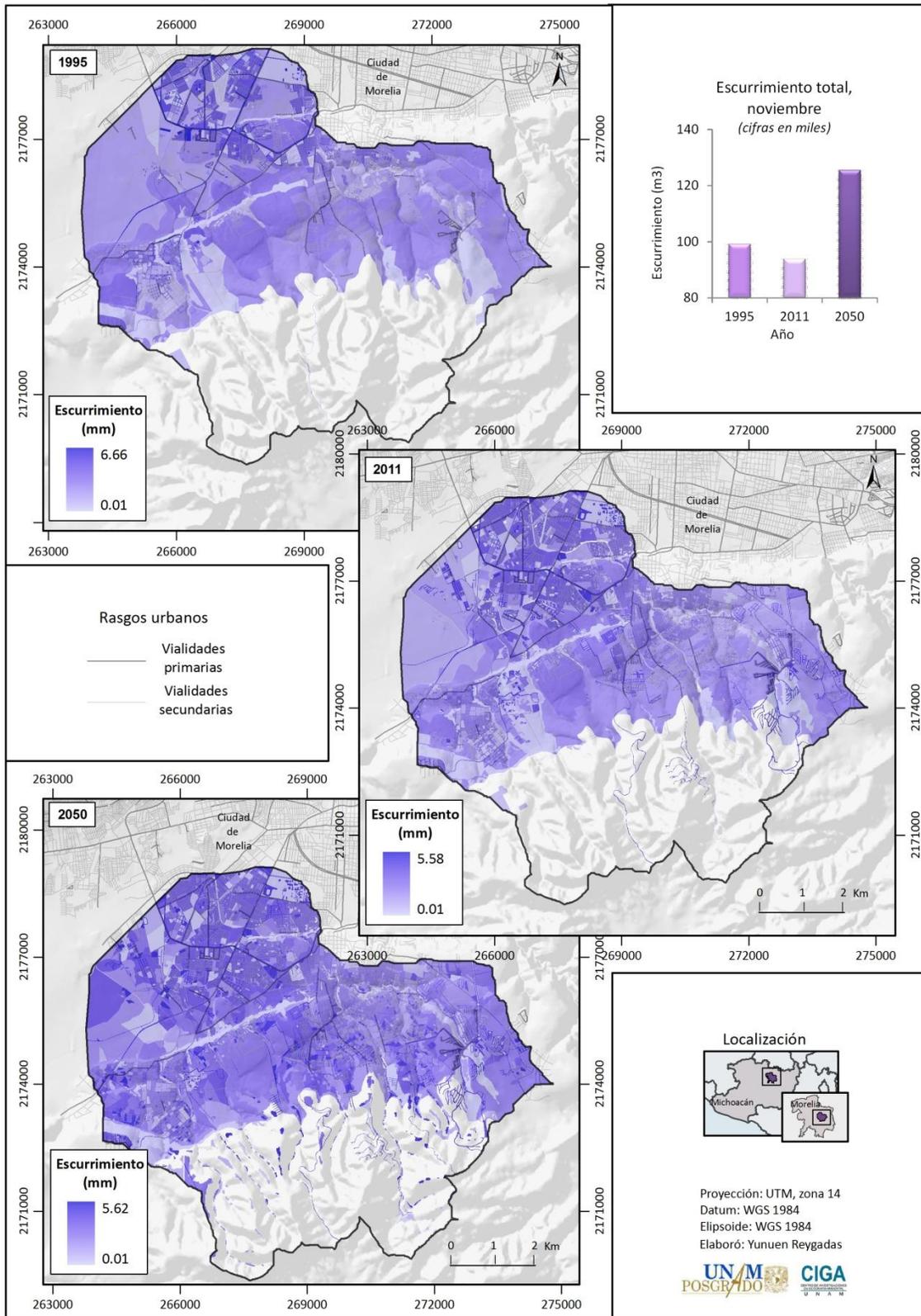
Fuente: elaboración propia.

Figura 4.23. Área de estudio: escurrimiento generado por la precipitación máxima promedio en 24 horas de septiembre, 1995-2050



Fuente: elaboración propia.

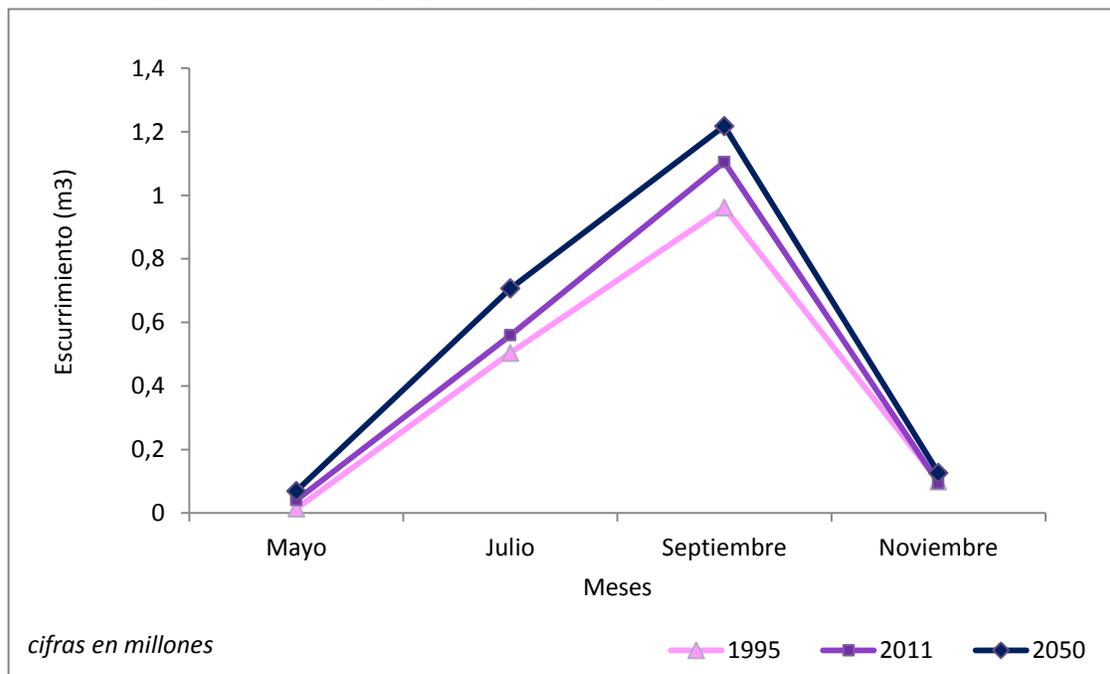
Figura 4.24. Área de estudio: escurrimiento generado por la precipitación máxima promedio en 24 horas de noviembre, 1995-2050



Fuente: elaboración propia.

Las figuras anteriores presentan patrones espaciales y temporales definidos. En cuanto a los primeros, se observa mayor escurrimiento en las áreas planas y de lomeríos, en contraste con las zonas montañosas donde la esorrentía es menor y, en la mayoría de los casos, nula. Por su parte, la distribución temporal muestra un aumento progresivo de mayo a septiembre y una disminución en noviembre, cuando la época de lluvias ha terminado. Con respecto a los cambios encontrados entre 1995, 2011 y 2050, la tendencia general apunta hacia un crecimiento del volumen de escurrimiento, con énfasis en el que se produce en los meses más lluviosos como julio y septiembre (figura 4.25).

Figura 4.25. Área de estudio: escurrimiento generado por la precipitación máxima promedio de mayo, julio, septiembre y noviembre, 1995-2050

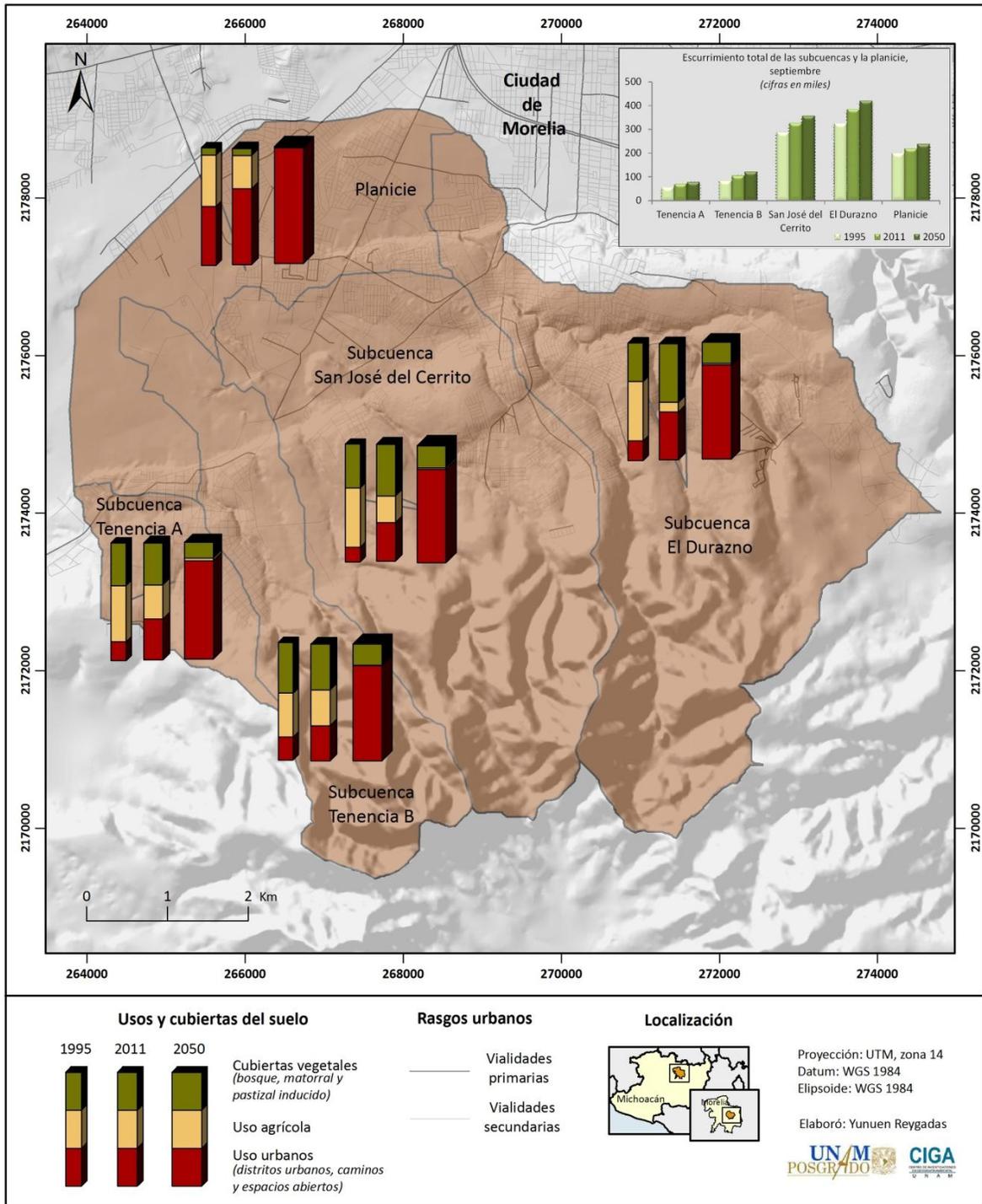


Fuente: elaboración propia.

Finalmente, para comprender esta tendencia, en la figura 4.26 se desglosan los aportes de escurrimiento por tipo de uso y cubierta tanto en la planicie como en las cuatro subcuencas, para este ejercicio se seleccionó septiembre, mes en el que cualquier superficie del polígono produce alguna cantidad de escurrimiento. De acuerdo con el comportamiento hidrológico observado en las diferentes categorías de uso y cubierta, éstas se dividieron en tres bloques; el primero contiene los usos propios de la ciudad (distritos urbanos, vialidades y espacios abiertos), el segundo las cubiertas vegetales

(bosque, matorral y pastizal inducido) y, el tercero, el uso agrícola. Los suelos desnudos y los cuerpos de agua se excluyeron de este análisis debido a su mínima influencia en los resultados del escurrimiento. Con base en estas consideraciones, se encontró que la contribución de los usos urbanos al escurrimiento total va en aumento, mientras que la del uso agrícola va en descenso; las cubiertas vegetales presentan una dinámica particular, pues entre 1995 y 2011 su aporte crece y, de manera opuesta, entre 2011 y 2050 disminuye hasta proporciones menores que en 1995.

Figura 4.26. Área de estudio: aporte de las cubiertas y usos al escurrimiento de cada subcuenca, con base en una tormenta de 30 mm/día en septiembre, 1995-2050



Fuente: elaboración propia.

4.1.2. Amenaza de inundación

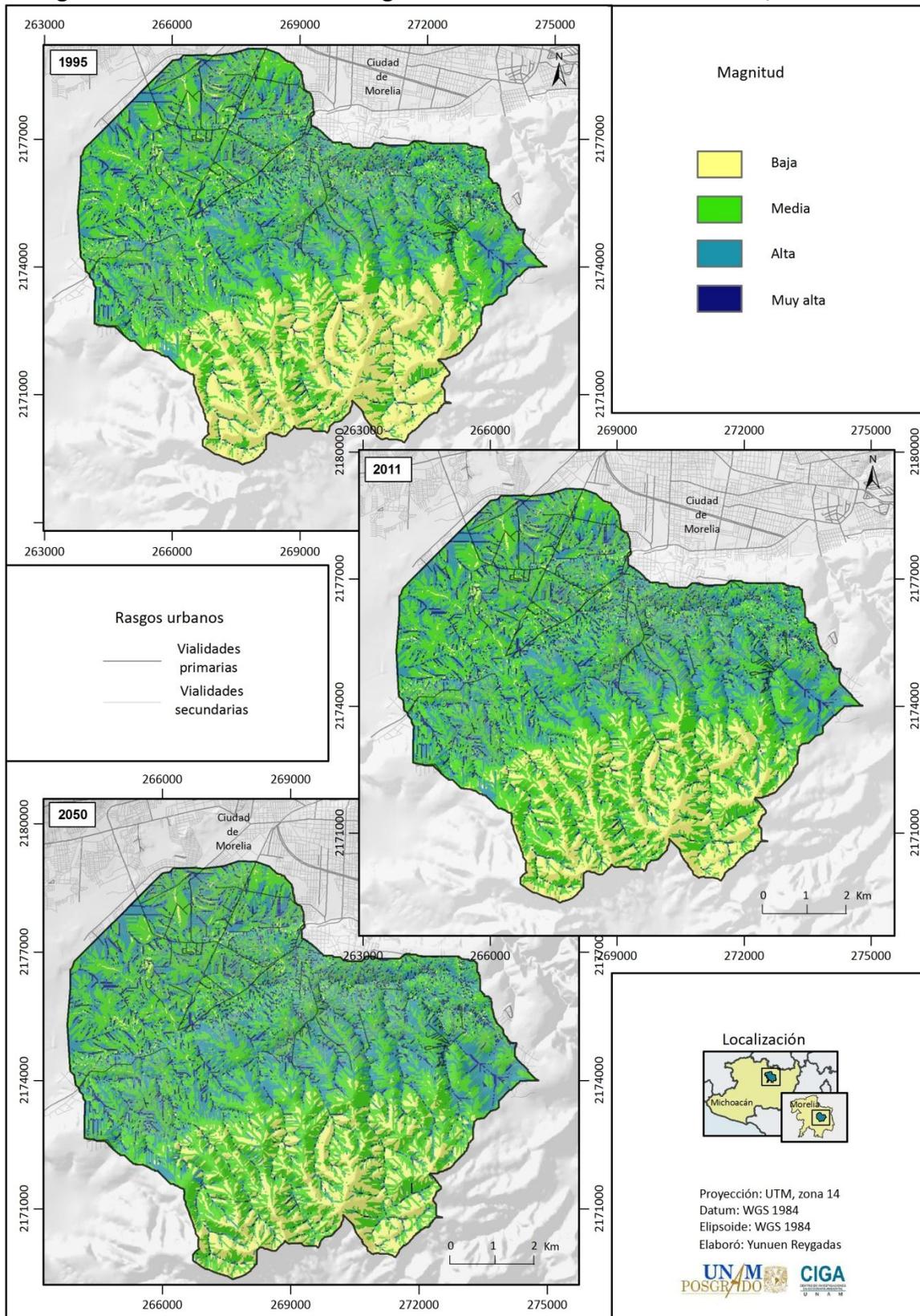
Los resultados de septiembre fueron seleccionados para modelar la amenaza de inundación debido a que, además de registrar los mayores volúmenes de escurrimiento, bajo los escenarios de este mes, cualquier superficie de la zona de estudio produce alguna cantidad de esorrentía. Con esta consideración, en las páginas siguientes se muestran las simulaciones de la manera en que el escurrimiento se acumula sobre el territorio; asimismo, se presenta el potencial topográfico de inundación y el período de retorno de la precipitación máxima promedio en 24 horas de septiembre. Finalmente, con base en los elementos anteriores, se revelan los cambios en la amenaza de inundación entre 1995, 2011 y 2050.

A. Acumulación del escurrimiento

La distribución espacial del escurrimiento acumulado demuestra que la mayor parte del flujo se concentra en los cauces, sin embargo, los sitios adyacentes también reciben volúmenes significativos de agua, más aún si el escurrimiento generado en las partes altas de las cuencas es abundante, como en el caso del escenario proyectado para 2050 (figura 4.27). Para dar contexto a las clasificaciones, en la figura antes mencionada cada clase representa los valores siguientes: 0-1000 (magnitud baja), 1000-10000 (media), 10000-100000 (alta) 100000- en adelante (muy alta).

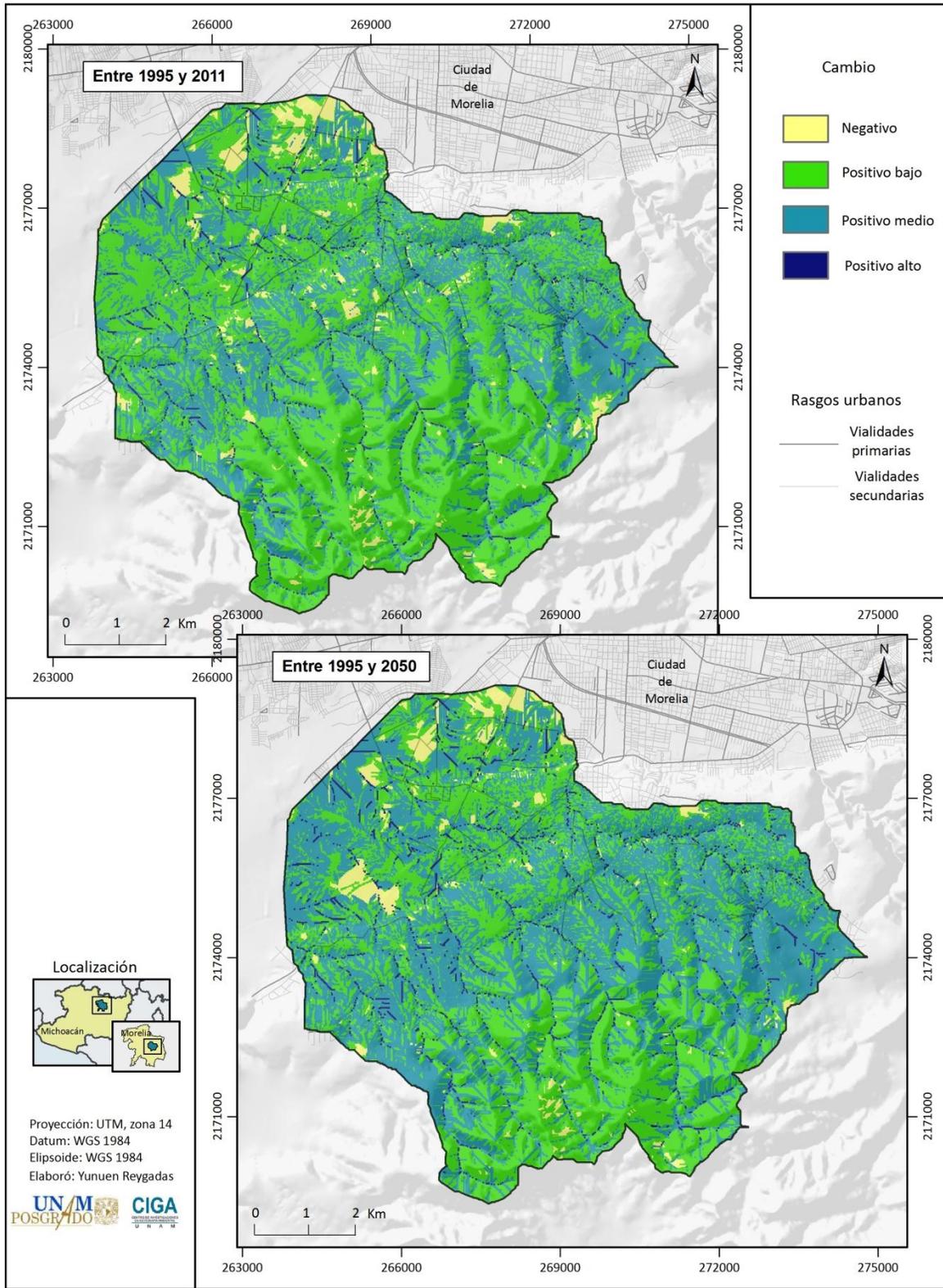
Respecto a las diferencias encontradas entre las tres fechas, se observan cambios negativos y positivos, no obstante, estos últimos son mucho más patentes; así, los incrementos más notorios se presentan en la planicie de inundación del río Grande y en los márgenes de los cauces que se encuentran en la zona de lomeríos. Este patrón se hace más evidente entre 1995 y 2050, período en el se registra un aumento generalizado tanto en la planicie como en los lomeríos, con excepción de algunas porciones donde los cambios de uso y cubierta del suelo favorecieron la infiltración (figura 4.28).

Figura 4.27. Área de estudio: magnitud del escurrimiento acumulado, 1995-2050



Fuente: elaboración propia.

Figura 4.28. Área de estudio: cambio en la magnitud del escurrimiento acumulado, 1995-2050

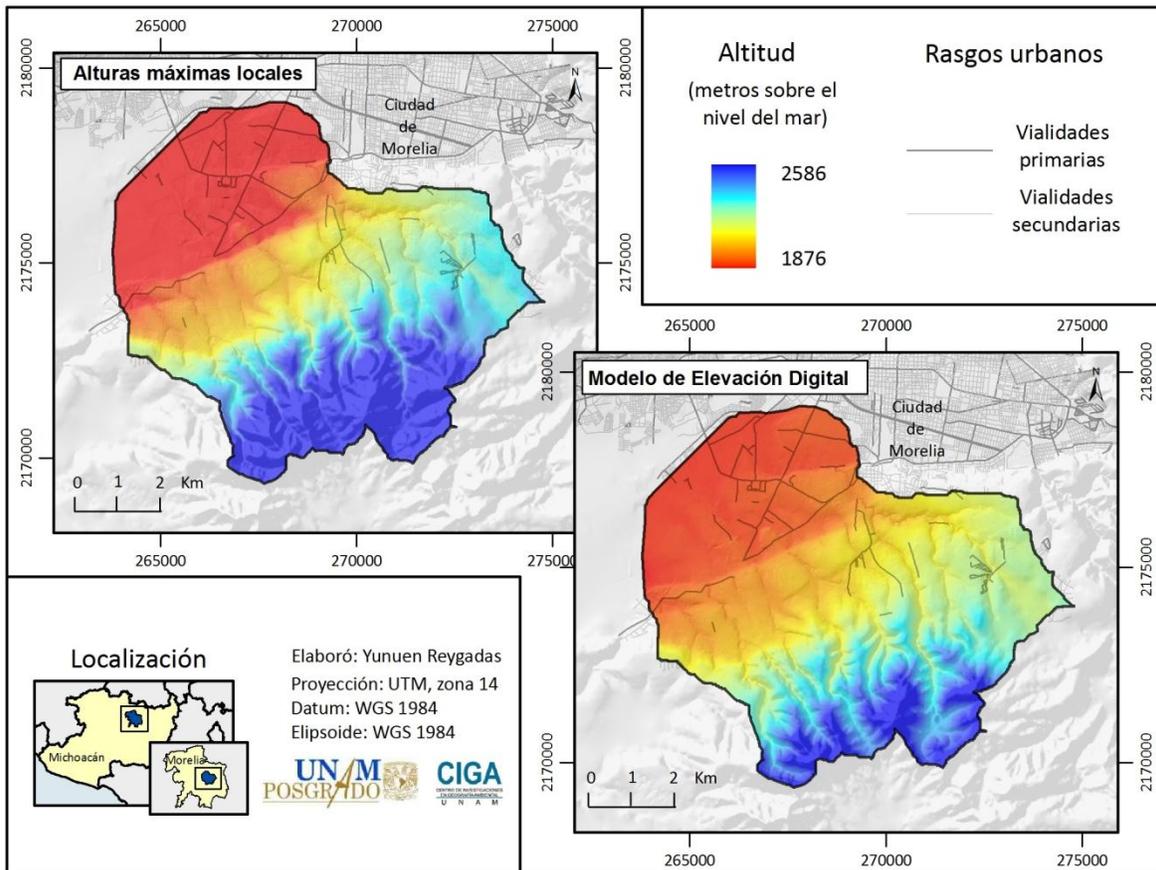


Fuente: elaboración propia.

B. Potencial topográfico de inundación

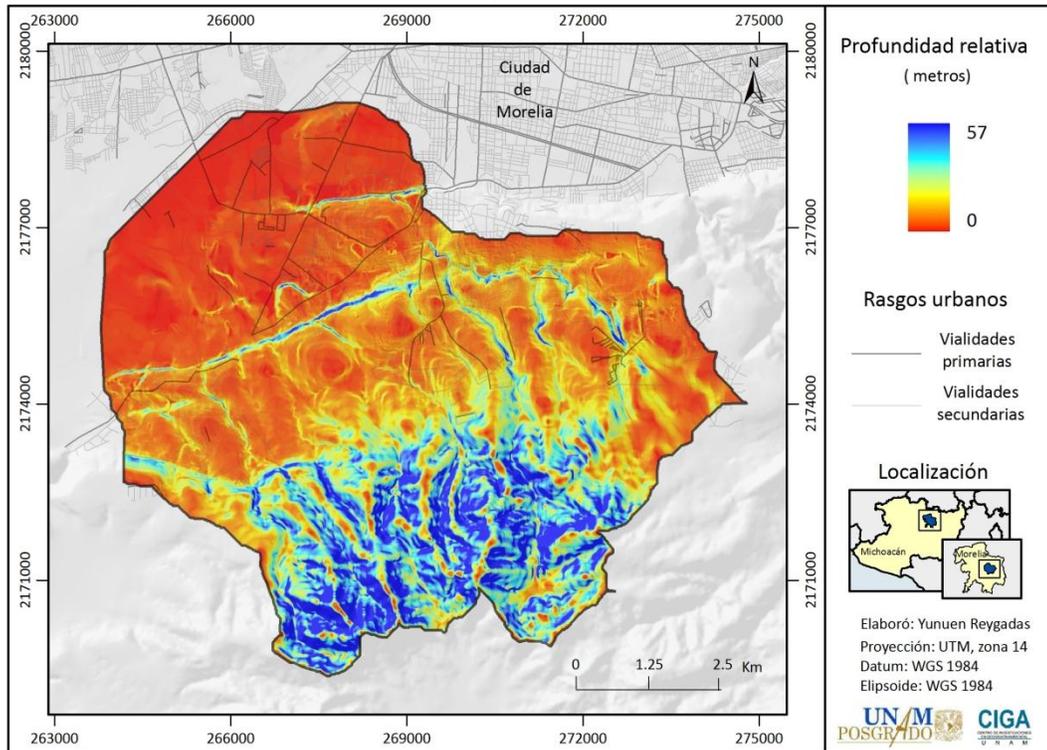
La diferencia entre las alturas máximas locales y el Modelo de Elevación Digital (MED) (figura 4.29) arrojó la profundidad relativa del terreno (figura 4.30), característica que, en términos generales, puede ser interpretada como el potencial topográfico de inundación, pues a medida que ésta disminuye las posibilidades de que se presente una anegación aumentan. Sin embargo, como excepción a la afirmación anterior, existen algunas zonas que aunque poseen poca profundidad relativa y pueden ser consideradas como susceptibles a inundarse, se encuentran en superficies cumbreales amplias que favorecen el flujo de agua. Por lo tanto, la identificación y discriminación de estos sitios resultó del estudio de los cauces mayores en conjunto con las unidades de paisaje (figura 4.31). Así, el producto final, muestra que el mayor potencial se encuentra en la planicie, en contraste con las zonas montañosas, lomeríos y escarpes pronunciados (figura 4.32).

Figura 4.29. Área de estudio: alturas máximas locales y Modelo de Elevación Digital



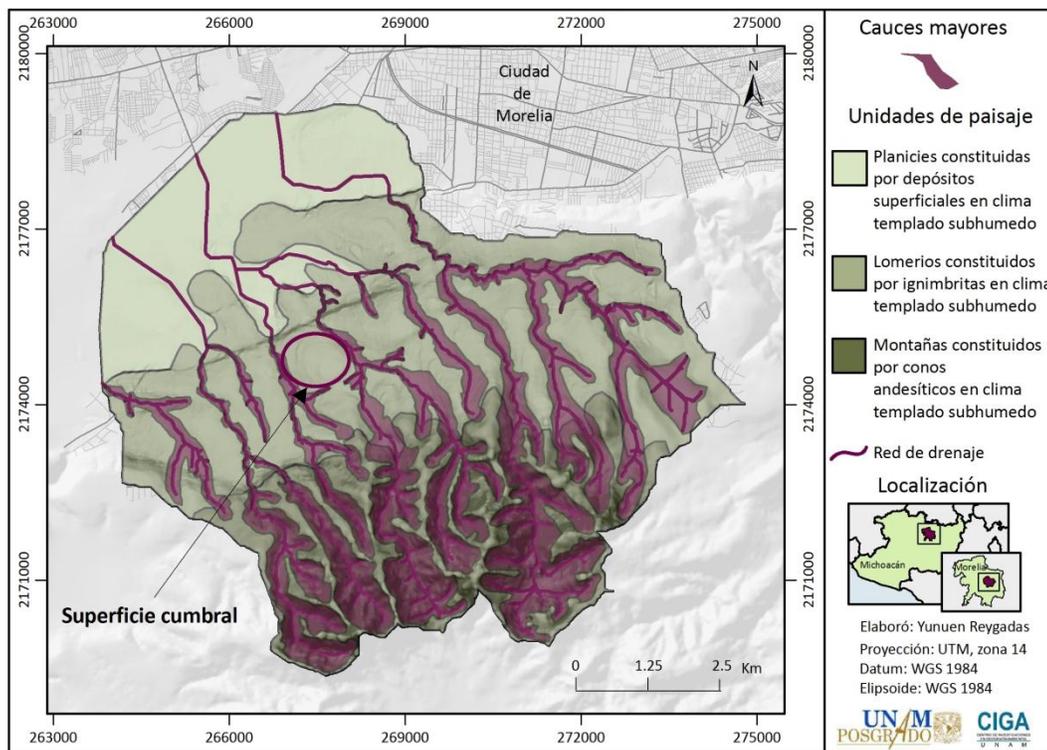
Fuente: elaboración propia.

Figura 4.30. Área de estudio: profundidad relativa del terreno



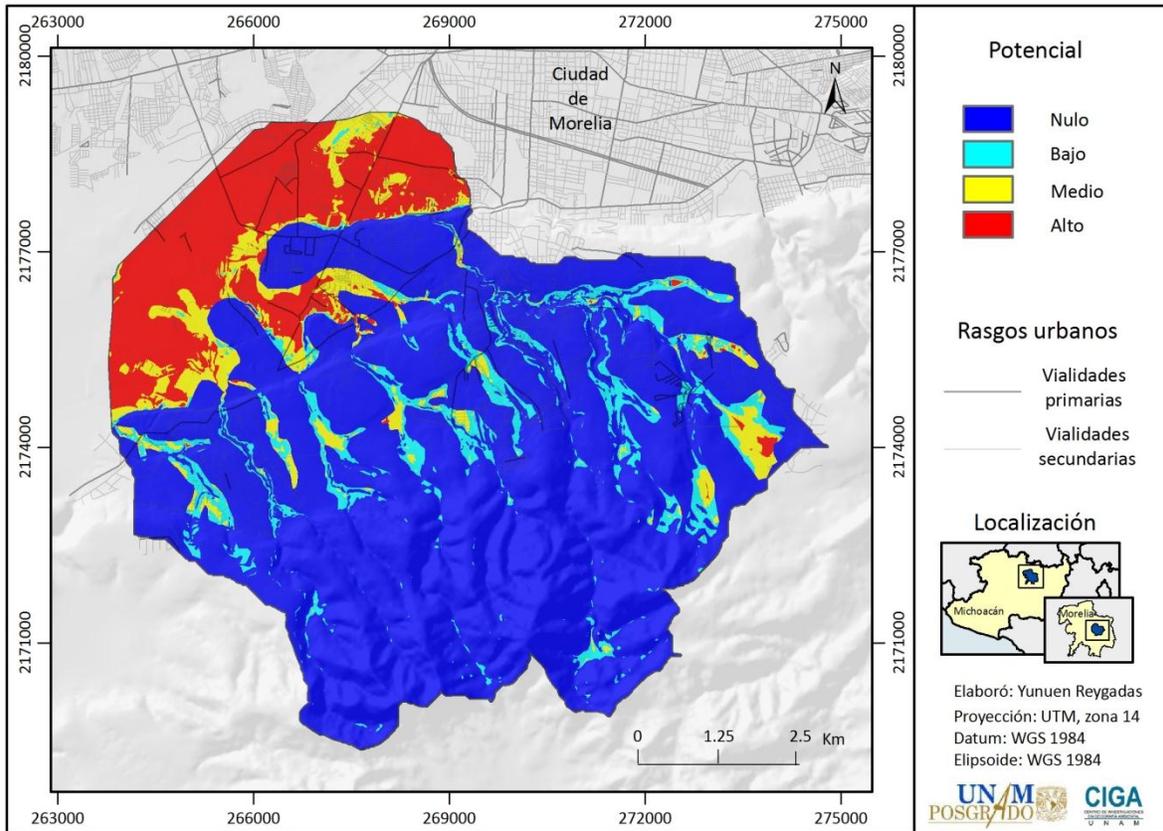
Fuente: elaboración propia.

Figura 4.31. Área de estudio: cauces mayores y unidades de paisaje



Fuente: elaboración propia.

Figura 4.32. Área de estudio: potencial topográfico de inundación



Fuente: elaboración propia.

C. Período de retorno

De acuerdo con los datos de la estación meteorológica “16081 Morelia”, el período de retorno de un evento de tormenta mayor a 30 mm /día, durante el mes de septiembre, es de, aproximadamente, dos años; por lo tanto, la probabilidad anual de excedencia es de 50% (cuadro 4.5). Por otro lado, según la serie histórica de la estación “16055 Jesús del Monte”, el período de retorno para el mismo evento es de alrededor de cuatro años, lo cual se traduce como 25% de probabilidad de que durante septiembre de cualquier año se rebase la precipitación señalada (cuadro 4.6).

Cuadro 4.5. Estación meteorológica Morelia: período de retorno de un evento de tormenta mayor a 30 mm/día durante el mes de septiembre

Año	Precipitación máxima en 24 horas (mm)	Años entre cada evento	Año	Precipitación máxima en 24 horas (mm)	Años entre cada evento	Año	Precipitación máxima en 24 horas (mm)	Años entre cada evento
1950	53.8		1970	24.3		1990	22.1	
1951	25.8		1971	22.7		1991	50.2	2
1952	38.2	2	1972	39.6	3	1992	33.4	1
1953	20.6		1973	60.2	1	1993	15.0	
1954	37.2	2	1974	34.2	1	1994	28.7	
1955	23.6		1975	33.7	1	1995	ND	
1956	24.5		1976	47.3	1	1996	36.4	4
1957	15.0		1977	35.6	1	1997	11.3	
1958	31.5	4	1978	32.6	1	1998	48.3	2
1959	32.5	1	1979	39.5	1	1999	38.0	1
1960	22.2		1980	15.6		2000	12.4	
1961	20.0		1981	11.7		2001	31.4	2
1962	48.5	3	1982	33.2	3	2002	46.0	1
1963	32.7	1	1983	11.6		2003	30.2	1
1964	24.5		1984	24.8		2004	33.7	1
1965	22.0		1985	18.3		2005	42.0	1
1966	13.0		1986	31.1	4	2006	43.5	1
1967	64.7	4	1987	18.0		2007	27.5	
1968	35.2	1	1988	66.0	2	2008	18.2	
1969	56.5	1	1989	40.6	1	2009	36.8	3
Período de retorno (promedio de años transcurridos entre cada evento) = 1.8 Probabilidad anual de excedencia = 0.55								

Fuente: elaboración propia con base en CLICOM, 2010.

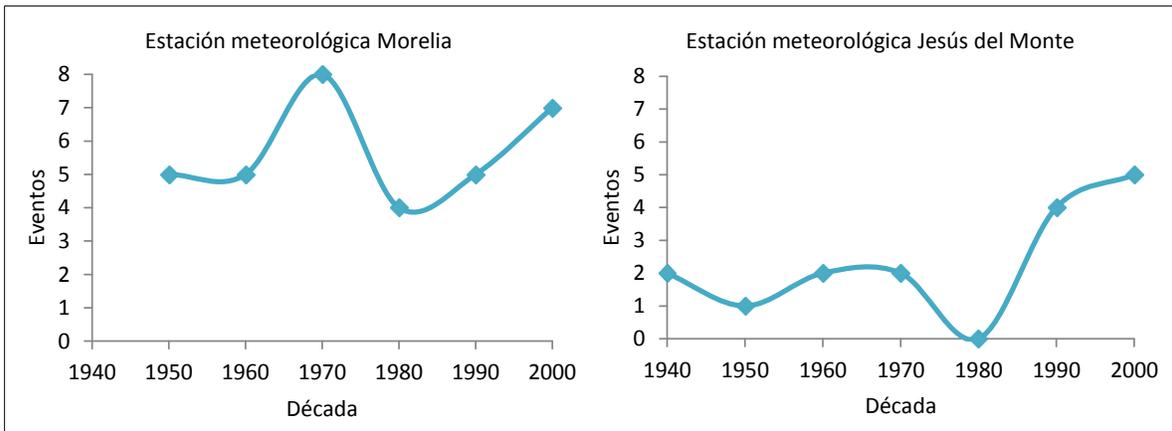
Cuadro 4.6. Estación meteorológica Jesús del Monte: período de retorno de un evento de tormenta mayor a 30 mm/día durante el mes de septiembre

Año	Precipitación (m)	Años entre cada evento	Año	Precipitación (m)	Años entre cada evento	Año	Precipitación (m)	Años entre cada evento
1943	35.4		1965	28.0		1987	8.3	
1944	40.2	1	1966	28.0		1988	20.5	
1945	21.8		1967	38.2	11	1989	25.0	
1946	20.7		1968	40.5	1	1990	28.2	
1947	25.4		1969	28.3		1991	40.5	14
1948	16.3		1970	25.0		1992	28.5	
1949	20.5		1971	20.5		1993	38.5	2
1950	20.5		1972	28.2		1994	25.0	
1951	20.5		1973	20.5		1995	20.9	
1952	8.2		1974	28.2		1996	40.5	3
1953	20.3		1975	ND		1997	20.5	
1954	20.4		1976	35.5	8	1998	ND	
1955	16.2		1977	40.5	1	1999	31.0	3
1956	30.3	12	1978	25.1		2000	20.5	
1957	16.3		1979	20.8		2001	38.2	2
1958	20.8		1980	28.5		2002	23.0	
1959	10.4		1981	20.5		2003	28.2	
1960	20.4		1982	20.5		2004	19.7	
1961	20.8		1983	20.5		2005	54.2	4
1962	29.3		1984	15.0		2006	32.0	1
1963	10.5		1985	28.2		2007	68.5	1
1964	20.0		1986	25.0		2008	97.0	1
Período de retorno (promedio de años transcurridos entre cada evento) = 4.3 Probabilidad anual de excedencia = 0.23								

Fuente: elaboración propia con base en CLICOM, 2010.

Si se estudia la distribución temporal de los eventos, se advierte un descenso en el decenio de los ochentas y una tendencia a la alza en los últimos veinte años (figura 4.31). De manera particular, en la estación Morelia se presenta un promedio de seis eventos por década, mientras que en la de Jesús del Monte la media es de dos. En suma, de acuerdo con las series de datos estudiadas, el período de recurrencia de una tormenta mayor a 30 mm/día en el mes de septiembre, oscila entre dos y cuatro años; sin embargo, según los registros históricos, la frecuencia de los eventos ha aumentado en años recientes.

Figura 4.33. Área de influencia de la zona de estudio: eventos mayores a 30 mm/día durante el mes de septiembre

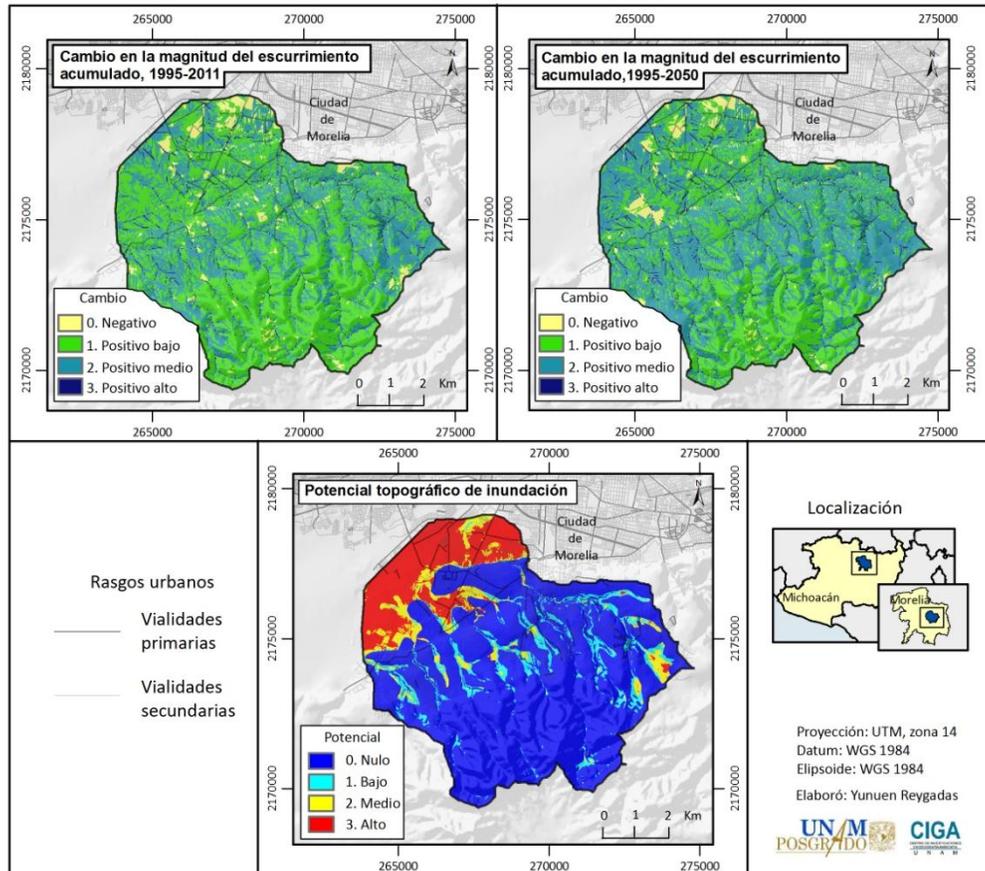


Fuente: elaboración propia con base en CLICOM, 2010.

D. Cambio en la amenaza de inundación

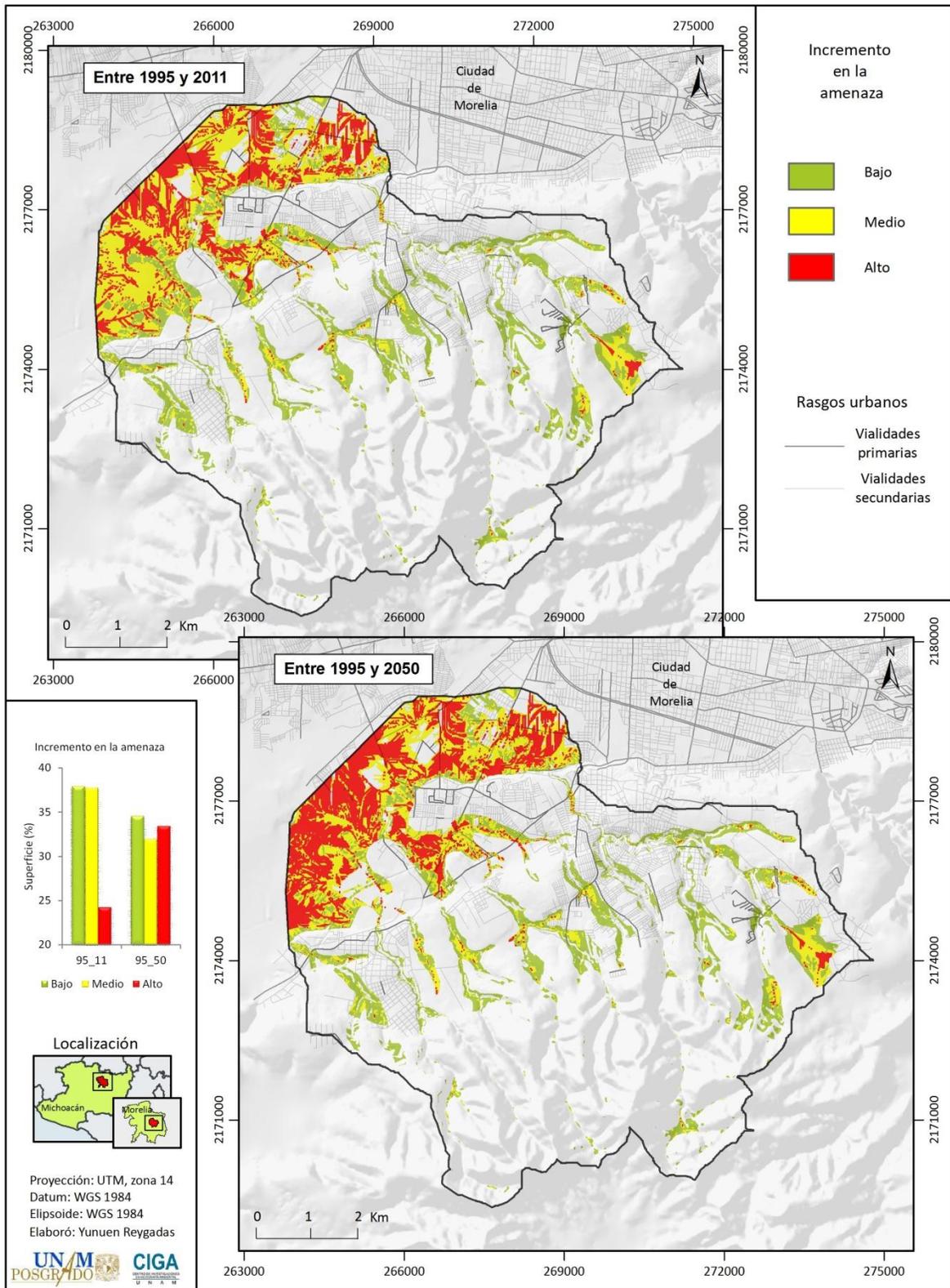
La asociación entre los cambios en la magnitud del escurrimiento acumulado y el potencial topográfico de inundación permitió reconocer las zonas en las que el aumento del flujo puede causar inundaciones (figura 4.34). De esta manera, el producto de la multiplicación de los elementos anteriores arrojó dos mapas que, en función de la combinación entre magnitud de escurrimiento y potencial topográfico, presentan superficies con incremento de amenaza nulo, bajo, medio y alto. La comparación de la cartografía resultante pone de manifiesto el aumento de la amenaza en el período comprendido entre 1995 y 2011; sin embargo, de acuerdo con el escenario de urbanización proyectado, el incremento entre 1995 y 2050 es considerablemente mayor. Finalmente, los cambios más evidentes afectan la planicie y los márgenes de algunos cauces (figura 4.35).

Figura 4.34. Área de estudio: elementos que intervienen en el cambio de la amenaza de inundación



Fuente: elaboración propia.

Figura 4.35. Área de estudio: cambio en la amenaza de inundación, 1995-2050

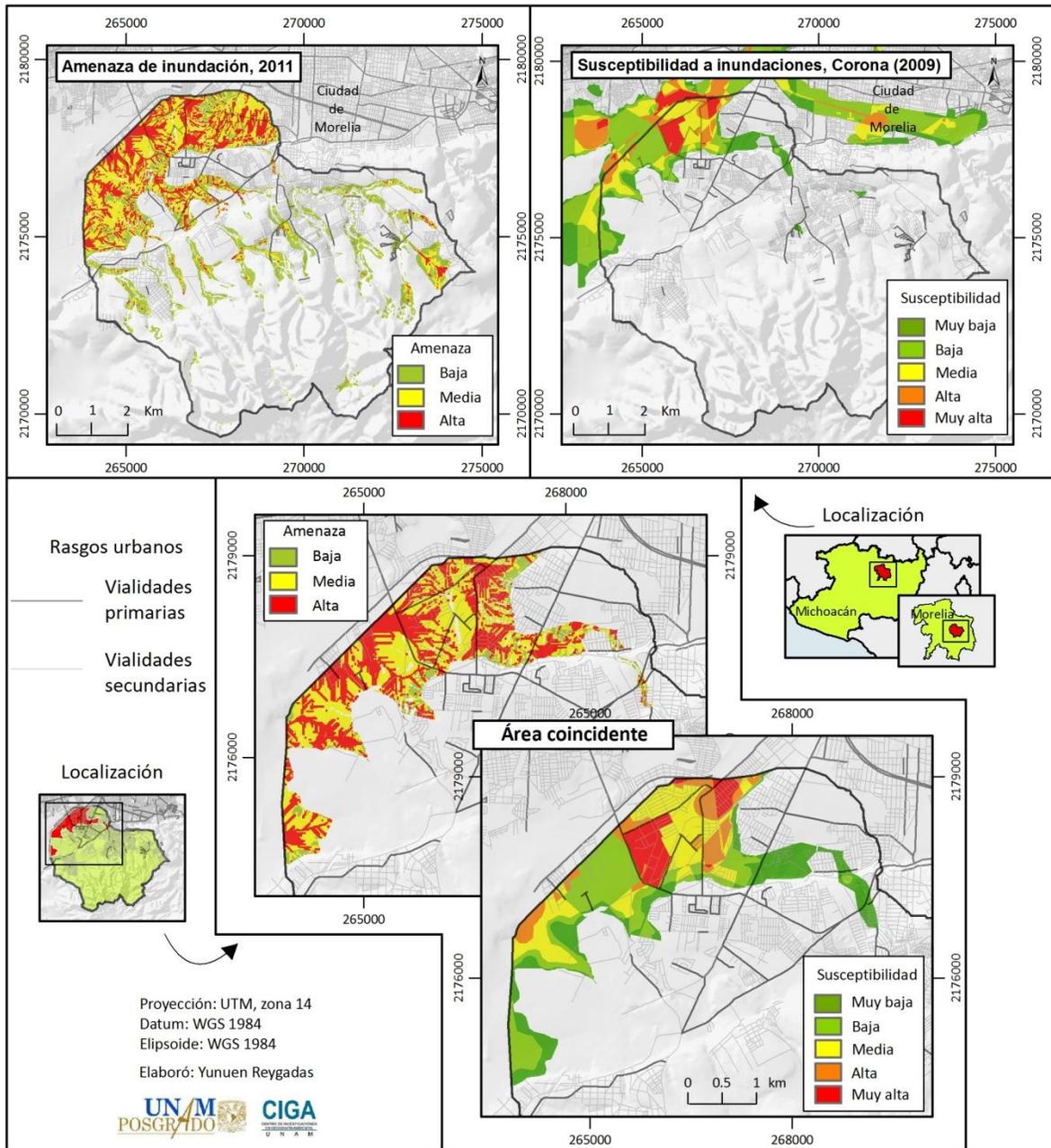


Fuente: elaboración propia.

4.1.3. Validación

La comparación de la amenaza de inundación de 2011 con la información sobre susceptibilidad generada por Corona (2009) muestra una coincidencia espacial de poco más de seis kilómetros cuadrados (figura 4.36.). La concordancia entre clases y la

Figura 4.36. Área de estudio: coincidencia espacial entre la amenaza de inundación (2011) y la susceptibilidad a inundaciones de Corona (2009)



Fuente: elaboración propia con base en los resultados de esta investigación y Corona, 2009.

distribución de los grados altos de susceptibilidad con respecto a las tres categorías de amenaza se presentan en el cuadro 4.7. La información obtenida focaliza la atención en la distribución de las clases altas debido a que éstas representan zonas prioritarias para las cuales se exige mayor precisión en la delimitación. Con esta perspectiva, se encontró que 53.5% de la superficie con grado de susceptibilidad alto y muy alto, según el mapa de Corona, coincide con áreas cuya amenaza es alta; mientras que el 40% de susceptibilidad alta y muy alta concuerda con zonas con peligro medio y el 3.3 y 3.1% con sitios con amenaza baja y nula, respectivamente.

Cuadro 4.7. Área de estudio: coincidencia espacial entre la amenaza de inundación (2011) y la susceptibilidad a inundaciones de Corona (2009)

Amenaza	Superficie (m2)	Susceptibilidad	Superficie con respecto al total de cada categoría de amenaza (%)	Superficie con susceptibilidad alta y muy alta con respecto al total de cada categoría de amenaza (%)	Superficie con susceptibilidad alta y muy alta con respecto al total de estas dos categorías (%)
Alta	2600259	Muy alta	12.6	27.3	53.5
		Alta	14.7		
		Media	24.9		
		Baja	31.1		
		Muy baja	16.7		
Media	2715945	Muy alta	9.5	19.5	40.0
		Alta	10.1		
		Media	28.1		
		Baja	29.9		
		Muy baja	22.4		
Baja	437385	Muy alta	2.7	10.2	3.4
		Alta	7.6		
		Media	7.0		
		Baja	25.2		
		Muy baja	57.6		
Nula	412361	Muy alta	3.5	9.8	3.1
		Alta	6.3		
		Media	15.1		
		Baja	15.5		
		Muy baja	59.5		

Fuente: elaboración propia con base en los resultados de esta investigación y Corona, 2009.

4.2. Discusión

Hasta este momento, los resultados se han presentado y descrito de manera individualizada; sin embargo, los hallazgos de esta investigación muestran relaciones causales que se discuten en la primera parte este capítulo; mientras que en la segunda se debate sobre las características de la metodología implementada y se mencionan sus fortalezas y debilidades.

4.2.1. Con respecto al cambio en la amenaza de inundación

En términos generales, los resultados de la investigación revelan que el incremento en la amenaza de inundación deriva del aumento en la magnitud del escurrimiento acumulado y de la existencia de formas del relieve susceptibles a inundarse. No obstante, las causas que contribuyen a una mayor generación de escorrentía son diversas e involucran la combinación de factores físicos y sociales. En este contexto, el cambio en los eventos de precipitación máxima diaria, entre 1995 y 2011, muestran un muy ligero aumento de lluvia durante la época húmeda y una pequeña disminución en la temporada seca, situación que, de seguir la misma tendencia, podría dar origen a un clima más extremo; sin embargo, de acuerdo con la temática de estudio, las variaciones registradas no son significativas; por lo tanto, el crecimiento del volumen de escurrimiento no es efecto directo de un mayor aporte de lluvia, menos aún si se considera que los resultados de 2050, año con la mayor cantidad de escurrimiento total, se obtuvieron con los mismos valores de precipitación de 2011.

Por su parte, los cambios en la cubierta y uso del suelo si mostraron una consecuencia evidente sobre el volumen de escurrimiento. A este respecto, se debe señalar que el escenario de urbanización futura se proyectó bajo los criterios de pendiente y cercanía a los cauces debido a que, hasta este momento, el crecimiento de la ciudad no ha mostrado un patrón de expansión definido o apegado a un plan de desarrollo urbano. De este modo, aunque es muy importante reconocer el cambio en la extensión de las cubiertas y usos, lo

más relevante, de acuerdo con los objetivos de esta investigación, es discutir su relación con la proporción en la que aportan escurrimiento a las cuencas.

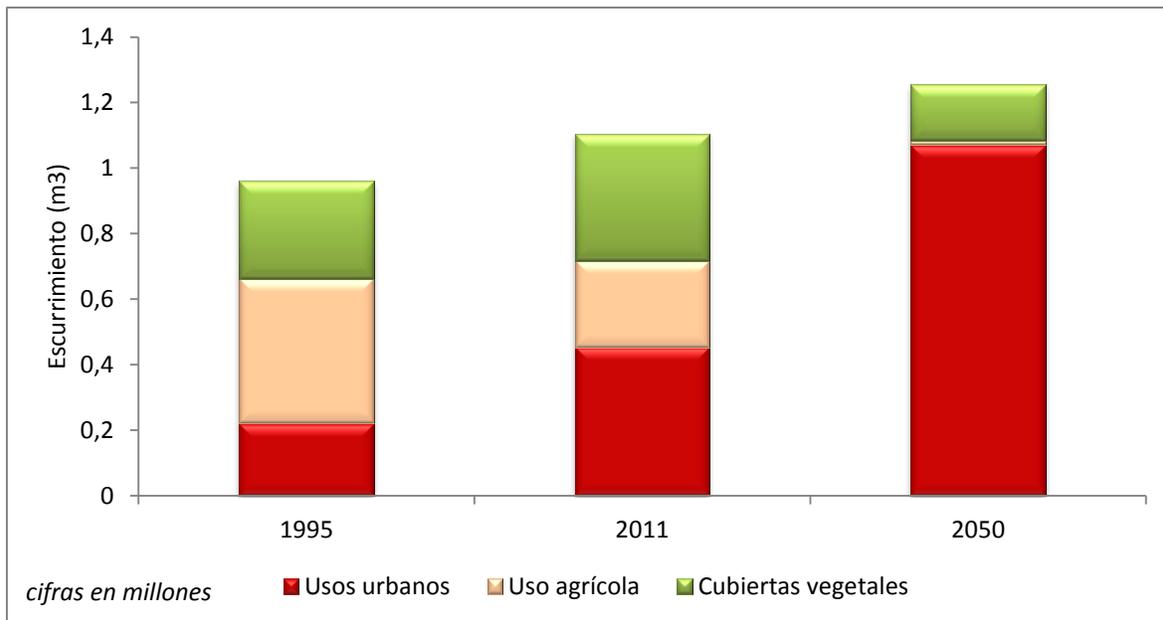
En esta línea, se debe considerar que la contribución de cada cubierta o uso no es uniforme a lo largo del año. En mayo, por ejemplo, cuando la época de lluvias comienza, el suelo está seco y es capaz de infiltrar mayor proporción de agua que la que escurre; incluso, existen superficies que, por sus características de permeabilidad, no producen escorrentía, aunque su extensión tiende a disminuir a medida que el suelo se ocupa con usos como los urbanos, los cuales significan la impermeabilización del terreno y, en consecuencia, requieren de una cantidad muy baja de lluvia para generar alguna cantidad de flujo. Esta situación se refleja de manera muy clara en el conjunto de mapas que muestran el escurrimiento que origina una precipitación máxima en 24 horas de mayo, bajo los escenarios de 1995, 2011 y 2050 (figura 4.21).

En el mes de julio, el volumen de escurrimiento crece considerablemente pues, además de que la lluvia máxima se incrementa casi el doble con respecto a mayo (alrededor de 31 mm/día), el suelo comienza a disminuir su capacidad de infiltración. De este modo, para el mes de septiembre se alcanza el nivel de saturación, característica que provoca que incluso las cubiertas vegetales más densas generen escorrentía. Las condiciones de humedad del suelo también influyen en la cantidad de flujo que se produce al término de la temporada de lluvias, pues a pesar de que los valores de precipitación máxima de noviembre son menores que los de mayo, el escurrimiento derivado es mayor.

Así, de acuerdo con los resultados del mes de septiembre, se encontró que, en 1995, el uso agrícola aportaba el mayor porcentaje de escurrimiento (46% con respecto al total), seguido de las cubiertas vegetales (31%) y los usos urbanos (23%). Para 2011, estas proporciones cambiaron como resultado de dos procesos principales; el primero se refiere a la expansión de los usos propios de la ciudad sobre campos agrícolas y, en el menor de los casos, sobre cubiertas vegetales y; el segundo, se relaciona con el abandono de las tierras de cultivo y el consecuente crecimiento de pastizales inducidos. Bajo este escenario, los usos urbanos y las cubiertas vegetales (particularmente los pastizales)

desplazaron al uso agrícola, lo que provocó que el casco urbano aportara el mayor porcentaje de escurrimiento (41% con respecto al total), seguido de las cubiertas vegetales (35%) y la agricultura (24%). El volumen que, de acuerdo con el escenario proyectado, se producirá en septiembre de 2050 con una lluvia máxima, es mayor al del resto de las fechas, pues los usos urbanos, cuyo potencial de escurrimiento es muy alto, aportarán casi la totalidad del escurrimiento (85% con respecto al total), mientras que las cubiertas vegetales y la agricultura contribuirán con un porcentaje muy bajo (14 y 1%, respectivamente) (figura 4.37).

Figura 4.37. Área de estudio: aporte de las cubiertas y usos del suelo al escurrimiento generado por una precipitación mayor a 30 mm/día en septiembre, 1995-2050



Fuente: elaboración propia.

La figura anterior esquematiza los procesos de cambio ocurridos en los tres momentos del análisis. Entre 1995 y 2011, el abandono de las tierras de cultivo dio paso a un período de especulación del suelo en el que se desarrollaron pastizales inducidos que infiltran mejor que el uso agrícola y, por lo tanto, generan menor cantidad de escurrimiento; sin embargo, en 2050, cuando los pastizales son urbanizados, el volumen de escurrimiento crece significativamente.

De acuerdo con los argumentos hasta ahora expuestos, los usos urbanos son capaces de producir escurrimiento casi bajo cualquier escenario de lluvia; en contraste, las cubiertas vegetales necesitan una cantidad relativamente alta de precipitación para hacerlo. En concordancia con esta afirmación, aunque después de una tormenta ocurrida en septiembre una proporción considerable de esorrentía es producida por las cubiertas vegetales, en los meses con menos precipitación, éstas dejan de aportar escurrimiento, mientras que los usos urbanos no detienen su contribución. De esta manera, en 2050, cuando la mayor parte del área de estudio esté cubierta por el casco urbano, casi cualquier evento de lluvia generará escurrimiento.

En términos generales, se halló un aumento progresivo del volumen de escurrimiento entre 1995 y 2050. El único escenario donde se registró una disminución fue entre los meses de noviembre de 1995 y 2011; situación que debe su origen al descenso de la precipitación en este mes, particularmente, en la parte centro-oriente de la zona de estudio donde el proceso de conversión de campos agrícolas a pastizales inducidos fue más evidente. Sin embargo, para 2050, aún con el mismo escenario de disminución de lluvia, los resultados señalan un incremento notable; esto pone de manifiesto el hecho de que, incluso con cantidades pequeñas de lluvia, los usos urbanos generan más esorrentía que el resto de las cubiertas o usos.

El lugar de origen del escurrimiento difiere del sitio en el cual se concentra, en este sentido, la mayor parte converge en los cauces y en las zonas adyacentes planas. La disminución en la magnitud del escurrimiento acumulado responde a cambios en la cubierta o uso del suelo que favorecen la infiltración; tal es el caso de la conversión de tierras de cultivo en pastizales, o bien, la transformación de estos últimos en parques arbolados o en zonas residenciales de baja densidad con un alto porcentaje de áreas verdes. Estos cambios ideales son alentadores en cuanto a la reducción de la amenaza de inundación se refiere, además, dan un ejemplo de la manera en que la urbanización no causa un efecto hidrológico adverso; sin embargo, este panorama no domina en la zona

de estudio, por el contrario, casi la totalidad de la superficie presenta aumentos en la magnitud del escurrimiento acumulado.

Este ascenso generalizado advierte sobre los posibles efectos en la frecuencia y magnitud de las inundaciones, no obstante, no todos los sitios con algún grado de aumento significan un incremento en la amenaza, para que esto suceda se necesitan ciertas condiciones topográficas. Así, la combinación de lugares planos y altas cantidades de flujo acumulado se traduce en zonas con algún grado de amenaza. Por lo tanto, aunque el mayor crecimiento en el volumen de escurrimiento se genere en la porción de lomeríos donde la expansión urbana es más evidente y el suelo presenta la peor tasa de infiltración, esto se refleja en la planicie donde el flujo producido aguas arriba se acumula.

Los incrementos en la amenaza de inundación afectan vialidades de gran importancia como Periférico-Independencia, La Huerta y Periodismo; además de colonias como Los Fresnos, Real Universidad, Villa Universidad, José María García Obeso, Jardines de Torremolinos y Ampliación Club Campestre La Huerta, por mencionar algunas; otras zonas perjudicadas son los campos de cultivo de la Mintzita y los cercanos a San Juanito Itzicuaró. En este rubro, entre 1995 y 2011, 24% de la superficie bajo peligro tuvo un incremento alto en la amenaza de inundación; mientras que, entre 1995 y 2050, 33% del área presentó esta condición. Esto indica que, de seguir la misma tendencia de urbanización, el peligro aumentará de forma sustancial, principalmente, en la planicie y zonas llanas ubicadas dentro de los cauces. En suma, los resultados finales de esta investigación muestran el cambio en la probabilidad de que ocurra una inundación después de una tormenta mayor a 30 mm/día en el mes de septiembre, la cual presenta un período de retorno de entre dos y cuatro años.

4.2.2. Con respecto al método

Al inicio de la investigación se descartó la posibilidad de trabajar con mediciones hidrométricas o datos históricos de eventos extraordinarios debido a que, a pesar de los esfuerzos realizados hasta el momento, la información no es suficiente ni se encuentra

organizada de manera sistematizada. Por lo tanto, se optó por calcular el volumen de escurrimiento bajo diferentes escenarios de lluvia y en tres momentos determinados (1995, 2011 y 2050) para, posteriormente, identificar los lugares en los que su acumulación puede causar inundaciones. De esta forma, la estimación del volumen de escurrimiento se llevó a cabo por medio del método *SCS Runoff Curve Number* debido a que no requiere datos hidrométricos o información histórica sobre inundaciones; además, considera la variable cubierta/uso del suelo, la cual involucra, de manera indirecta, el crecimiento de la mancha urbana, característica que motivó la realización de esta tesis.

Este método ha sido ampliamente usado desde la segunda mitad del siglo pasado y aunque existen autores, como Paz-Pellat (2009), que señalan que este procedimiento no tiene fundamentos hidrológicos, su implementación permite establecer una plataforma de análisis común con la que es posible obtener la magnitud de las diferencias entre las tres fechas. Expresado de otra forma, aunque este procedimiento no fuera acertado en la estimación de la cantidad de precipitación que se convierte en escurrimiento, el hecho de utilizar los mismos criterios en cada uno de los escenarios, permite conocer la proporción con la que el escurrimiento aumenta o disminuye entre cada fecha.

Por su parte, el empleo de clasificaciones digitales no fue considerado para la elaboración de los mapas de cubierta vegetal y uso de suelo debido a que, para 1995, no existen imágenes de satélite con la resolución espacial requerida en esta investigación. En consecuencia, para esta fecha se utilizaron ortofotos sobre las cuales se realizó una clasificación visual llevada a cabo con el mismo criterio de interpretación aplicado sobre la imagen de satélite *WorldView2* de 2011.

El resultado final de la aplicación del método del Número de Curva fue un conjunto de mapas con un valor estimado de escurrimiento en milímetros por cada celda de un metro cuadrado, por lo tanto, con base en esta información, se aplicó la herramienta *flow accumulation*, la cual trabaja bajo el fundamento de que el flujo acumulado corresponde a la suma del escurrimiento de todas las celdas que fluyen hacia un punto determinado. Sin embargo, esta supuesto no considera que el agua que llega a cada celda continúa en

movimiento y, como resultado, los valores de esorrentía son sobreestimados. En respuesta a esta limitación, las cifras obtenidas se tradujeron en órdenes de magnitud que indican las zonas de mayor acumulación en función del relieve. En síntesis, los métodos empleados permitieron conocer la proporción de cambio en la amenaza de inundación entre 1995 y 2050.

Conclusiones

El incremento en la amenaza de inundación en el sur de la ciudad de Morelia responde a un aumento en el volumen de escurrimiento, el cual no es un efecto directo de variaciones en la magnitud de la precipitación; la causa más evidente de su crecimiento deriva de la conversión de cubiertas vegetales o agrícolas a usos urbanos que sellan el terreno e impiden que el agua de lluvia se infiltre a través de los horizontes del suelo. En 1995, la mancha urbana cubría 15% de la zona de estudio y, para 2011, creció hasta ocupar más del 28%; con este ritmo de urbanización, se calcula que, en 2050, los usos urbanos se extenderán en más del 60% del área de interés. Asimismo, se prevé que la mayor parte de esta expansión se llevará a cabo sobre la zona de lomeríos donde se encuentra el suelo con la peor tasa de infiltración y, por lo tanto, el mayor potencial de escurrimiento.

La distribución anual del volumen del escurrimiento muestra que, en general, durante los primeros meses de la época de lluvias (mayo a julio) la proporción de agua que se infiltra es mayor a la que escurre, mientras que en los meses siguientes (agosto a octubre) esta relación se invierte debido a que el suelo se encuentra saturado. En consecuencia, los valores más altos de escorrentía se producen en septiembre, mes que registra una precipitación máxima promedio en 24 horas de, aproximadamente, 30 mm. En función de un evento de tormenta de la magnitud señalada y durante la época de saturación del suelo, se determinó que a pesar de que el aumento en la producción de escorrentía (entre 1995, 2011 y 2050) se presenta en la mayor parte del área de estudio, ésta afecta los sitios que, topográficamente, son susceptibles a inundarse como la planicie y las zonas llanas ubicadas dentro de los cauces de los ríos, lugares en los que el flujo generado aguas arriba se acumula.

En este sentido, el 27% del polígono muestra alguna categoría de amenaza y, de ésta superficie, el 24% presentó, entre 1995 y 2011, un incremento alto en la amenaza de inundación, condición que, de acuerdo con los resultados de esta investigación, en 2050

se extenderá en un 33% del área. Las cifras anteriores demuestran el crecimiento de las zonas con probabilidades altas de inundación después de una tormenta mayor a 30 mm/día durante el mes de septiembre, evento que se presenta con un frecuencia de entre dos y cuatro años.

En cuanto al procedimiento elegido para dar respuesta a los objetivos, el método del Número de Curva, además de ayudar a calcular el volumen de escurrimiento, posibilitó el análisis y contabilización de los cambios de cubierta y uso del suelo ocurridos entre las tres fechas del análisis. Por su parte, la acumulación del flujo limitó los resultados a clases cualitativas, sin embargo, permitió reconocer las zonas de mayor concentración de escurrimiento; finalmente, la determinación de la amenaza surgió de la combinación de los sitios topográficamente susceptibles a inundarse con las superficies de mayor acumulación.

Las argumentos anteriores emanan de la aplicación de diversas técnicas cuantitativas y cualitativas de investigación que, en conjunto con algunas consideraciones teórico-conceptuales y una revisión histórico-geográfica, permiten confirmar la hipótesis planteada al inicio de esta tesis, la cual señala que la reciente y acelerada urbanización del sur de la ciudad de Morelia ha ocasionado un crecimiento en el volumen del escurrimiento y, con ello, un incremento en la amenaza de inundación; por lo tanto, de seguir la misma tendencia de expansión urbana, la situación se agravará en los próximos años. Así, los objetivos propuestos se desarrollaron satisfactoriamente y el producto de su elaboración servirá como referencia a futuros estudios que, desde una perspectiva geográfica, analicen la amenaza de inundación.

Recomendaciones

De este trabajo de investigación se derivan las recomendaciones siguientes:

- Almacenar, de manera sistematizada, los datos generados por la red de estaciones meteorológicas del Organismo Operador de Agua Potable y Saneamiento de Morelia (OOAPAS), pues, hasta el momento, la falta de organización en el acopio no ha permitido que se explote el potencial informativo las mediciones actuales e históricas.
- Realizar mediciones hidrométricas sobre los afluentes del Río Grande aquí estudiados, principalmente, las relacionadas con el caudal.
- Obtener información detallada sobre la topografía del terreno, se recomienda que las curvas de nivel tengan un intervalo menor o igual a un metro; esta información permitiría conocer, de manera precisa, las dimensiones de los cauces y, con base en éstas, se podría modelar la forma en que el agua se desborda una vez que se ha superado la capacidad del cauce.
- En términos de planeación, se aconseja controlar el tipo de urbanización pues, dentro de este trabajo, se encontró que la conversión de campos agrícolas o pastizales inducidos a zonas urbanas que incluyen áreas verdes arboladas puede resultar en una mejor tasa de infiltración que la registrada con otro tipo cubiertas. Por lo tanto, una urbanización de menor densidad y planificada en función de la conservación o creación de algunas áreas verdes puede evitar el desarrollo de efectos hidrológicos adversos.
- Iniciar estudios sobre la vulnerabilidad de la población que, en un futuro, sería afectada, pues si bien existen algunos autores, como Corona (2009) y Hernández (2011), que han estudiado las condiciones actuales de la población ante las inundaciones, no existen investigaciones sobre la vulnerabilidad futura.
- Reunir la información sobre amenaza y vulnerabilidad generada hasta el momento y determinar los niveles de riesgo existentes en la zona.

- Fortalecer lazos de cooperación entre instituciones académicas y gubernamentales.

Bibliografía

- Aguilar, F. (1999) *Morelia: urbanización en tierra ejidal, 1927-1994*. Tesis de maestría en Historia. Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa. México.
- Aparicio, F.J. (1992) *Fundamentos de hidrología de superficie*. Editorial Limusa, Grupo Noriega Editores. México.
- Arreygue, E. (2007) *Evaluación de las constantes inundaciones en la Ciudad de Morelia, Michoacán, México*. 8º Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. Cusco.
- Arreygue, E., Garduño, V.H., Canuti, P., Casagli, N. y A. Lotti (2004) *Inundaciones históricas y potenciales en la Ciudad de Morelia relacionadas con el Río Chiquito: Contribuciones a la geología e impacto ambiental de Morelia*. México.
- Arreygue, E., Garduño, V.H., Canuti, P., Casagli, N. y A. Lotti (2005) "Riesgos geomorfológicos e hidrológicos en la Ciudad de Morelia, Michoacán, México". *Geotermia, Vol. 18, No. 1*. Comisión Federal de Electricidad. México. pp 26-36
- Arreygue, E. y V.H. Garduño (2004) "Eventos excepcionales e inundaciones en la Ciudad de Morelia, Michoacán". *Ciencia Nicolaita, no. 39*. México. pp. 47-60.
- Ávila, P. (1991) "Estudio preliminar sobre el deterioro socioambiental en la ciudad de Morelia: el caso del agua". *Urbanización y desarrollo en Michoacán*. El Colegio de Michoacán, Gobierno del Estado de Michoacán. México.
- (1998) "Nuevas tendencias de urbanización y problemática urbana en una ciudad media: el caso de Morelia". *Ciudades provincianas de México, historia, modernización y cambio cultural*. El Colegio de Michoacán. México.
- (2007) *Agua, ciudad y medio ambiente. Una visión histórica de Morelia*. Universidad Nacional Autónoma de México, Secretaría de Desarrollo Social de Michoacán, H. Ayuntamiento de Morelia. México.
- (2011) *Sobre los proyectos viales en Morelia*. Información sobre ecología social y medio ambiente. <http://huacruz.blogspot.com/2011/09/sobre-los-proyectos-viales-en-morelia.html>.
- Ayllón, T. (2003) *Elementos de Meteorología y Climatología*. Trillas. México.
- CENAPRED (2009) *Inundaciones*. Secretaría de Gobernación, Centro Nacional de Prevención de Desastres. México.
- Chow, Maidment y Mays (1994) *Hidrología aplicada*. Mc Graw Hill. Estados Unidos de América.

- CLICOM (2010). *Mexico Climatological Station Network Data*. México.
- CONABIO (2011) *Portal de Geoinformación, Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- Corona, N. (2009) *Vulnerabilidad de la Ciudad de Morelia a inundaciones*. Tesis de Maestría en Geografía. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- Davie, T. (2008) *Fundamentals of hidrology*. Routledge fundamentals of physical geography series, Routledge. Estados Unidos de América-Canadá.
- Digital Globe (2011) *Imágenes de la ciudad de Morelia (pancromáticas y multiespectrales de 8 bandas)*. Satélite WorldView2. Estados Unidos de América.
- DMTP (1997) *Introduction to Hazards*. United Nations Development Programme, Disaster Management Training Programme. Estados Unidos de América.
- Ferrer, E. (2010) “La Loma de Santa María dejó de ser Área Natural Protegida”. *La Jornada*. <http://www.lajornadamichoacan.com.mx>
- García, E. (2004) *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- Garnica, R.J. e I. Alcántara (2004) “Riesgos por inundación asociados a eventos de precipitación extraordinaria en el curso bajo del río Tecolutla, Veracruz”. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, n° 55*. Universidad Autónoma de México. México. pp 23 -45.
- Garza, G. (1980) *Industrialización de las primeras ciudades de México: hacia una estrategia espacio temporal de descentralización industrial*. El Colegio de México. México.
- Hernández, J.A. (2011) *Inundaciones y Precariedad: Adaptación y respuesta en la zona Peri-Urbana de la ciudad de Morelia, Michoacán*. Tesis Doctorado en Geografía. Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- Hernández, J. A. y A. Vieyra (2010) “Riesgo por inundaciones en asentamientos precarios del periurbano. Morelia, una ciudad media mexicana. ¿El desastre nace o se hace?”. *Revista de Geografía Norte Grande, no. 47*. Chile. pp 45-52.
- Huang, Wang y Zhang (2012) “An Improved Kriging Interpolation Technique Based on SVM and its Recovery Experiment in Oceanic Missing Data”. *American Journal Computational Mathematics, no. 2*. Estados Unidos de Norte América.

- INEGI (1979) *Carta edafológica E14-A23*. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática.
- (1995) *Ortofotos digitales (E14A23A, E14A23B, E14A23D y E14A23E)*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.
- (2005) *Marco geoestadístico*. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática.
- (2010) *XIII Censo General de Población y Vivienda*. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. www.inegi.org.mx
- (2012) *Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas*. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. www.inegi.org.mx
- ISDR (2004) *Living with risk : A global review of disaster reduction initiatives*. Naciones Unidas, International Strategy for Disaster Reduction. Suiza.
- Islam, M. y K. Sado (2000) "Flood hazard assessment in Bangladesh using NOAA AVHRR data with geographical information system". *Hydrological Processes*, 14. pp 605–620.
- Lavell, A. (1996) *Sobre la gestión del riesgo: Apuntes hacia una definición*. <http://desastres.unanleon.edu.ni/pdf/2004>.
- (2000) "Desastres urbanos: una visión global". *Momentos, año 15, número 5. Asociación de Investigación y Estudios Sociales (ASIES)*. Guatemala. pp. 17 – 28.
- Lavell, A., et. al (2003) *La gestión local del riesgo. Nociones y precisiones en torno al concepto y la práctica*. Centro de Coordinación para la Prevención de los Desastres Naturales en América Central - Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Guatemala – Panamá.
- López, E. (1999) *Cambio de uso de suelo y el crecimiento urbano en la ciudad de Morelia, Michoacán*. Tesis de maestría en Conservación y Manejo de Recursos Naturales. Facultad de Biología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México.
- Maderey, L.E. (2005) *Principios de Hidrogeografía, Estudio del Ciclo Hidrológico*. Serie Textos Universitarios, no. 1, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- Medina, M. P. (1995) *Metodología para obtener Índices Agroclimáticos*. Tesis de Licenciatura en Geografía. Facultad de Filosofía y Letras. Universidad Nacional Autónoma de México. 266 p.

- OFDA/CRED (2011) *EM-DAT: The OFDA/CRED International Disaster Database*. Université Catholique de Louvain – Brussels – Belgium. www.emdat.be –
- Pascual, D., Pla, F. y S. Sánchez (2007) *Algoritmos de agrupamiento*. Departamento de Computación, Universidad de Oriente y Departamento de Lenguajes y Sistemas Informáticos, Universidad Jaume. España-Cuba. <http://marmota.dlsi.uji.es>
- Paz-Pellat (2009) “Mitos y falacia del método hidrológico del número de curva del SCS/NRCS”. *Agrociencia*, vol. 43, no. 5. México. pp 521-528.
- PDUCPM (2010). Programa de Desarrollo Urbano de Centro de Población de Morelia 2010. Ayuntamiento de Morelia. México.
- Pelletier, J.D., Mayer, L., Pearthree, P.A., House, P. K., Demsey, K.A., Klawon, J.E. y K.R. Vicent (2005) “An integrated approach to flood hazard assessment on alluvial fans using numerical modeling, field mapping, and remote sensing”. *GSA Bulletin*, vol. 117, no. 9/10. Geological Society of America. Estados Unidos de América. pp. 1167-1180.
- Peterson, J., Stone, A. y J. Houle (2010) *Protecting Water Resources and Managing Stormwater: A Birds Eye View For New Hampshire Communities*. Environmental Protection Agency, Natural Resources Outreach Coalition, Sea Grant New Hampshire, University of New Hampshire Stormwater Center, University of New Hampshire Cooperative Extension. Estados Unidos de América.
- Raghunath, H.M. (2006) *Hydrology: principles, analysis and design*. New Age International Publishers. India.
- Rivera, J (s/f) *La influencia de la urbanización en los escurrimientos pluviales*. Centro de Investigación y Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí. México.
- Sánchez, H. U. (2009) *Historia ambiental del ejido de Jesús del Monte, Morelia, Michoacán. Trabajo de archivo como metodología para la investigación integral*. Tesis de Licenciatura en Ciencias Ambientales. Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Morelia. México.
- Servin, F. (2007) *Obras de protección contra inundaciones en la ciudad de Morelia*. Tesis de licenciatura en Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México.
- Siebe, Reinhold, J y K Stahr (2006) *Manual para la descripción y evaluación ecológica de los suelos en el campo*. Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México. México.

- Soldano, A. (2009) *Conceptos sobre riesgo*. Foro virtual de la RIMD, Comisión Nacional de Actividades Espaciales y Departamento de Desarrollo Sostenible de la Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos. Argentina.
- Spaulding, J.T. (1996) *Best management practices for urban stormwater runoff*. New Hampshire Department of Environmental Services Water Supply and Pollution Control Division. Estados Unidos de América.
- Strahler, A.N. (1964) "Quantitative geomorphology of drainage basin and channel networks". *Chow VT (ed) Handbook of applied hydrology*. McGraw Hill Book. Estados Unidos de América. pp. 4–76.
- Stuebe, M.M y D.M. Johnston (1990) "Runoff volume estimation using GIS techniques". *Water Resources Bulletin, vol. 26, no. 4*. American Water Resources Association. Estados Unidos de América. pp. 611-620.
- UNDP (2004) *Reducing Disaster Risk. A challenge for development*. United Nations Development Programme. Estados Unidos de América.
- UNDRO (1979) *Natural Disasters and Vulnerability Analysis in Report of Expert Group Meeting*. United Nations Disaster Relief Coordinator. Suiza.
- USDA (1986) *Urban Hydrology for Small Watershed TR-55, Technical Release 55*. Natural Resources Conservation Service. Conservation Engineering Division. United States Department of Agriculture. Estados Unidos de Norte América.
- (2004) "Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall". *Hydrology National Engineering Handbook, chapter 10*. Natural Resources Conservation Service. United States Department of Agriculture. Estados Unidos de Norte América.
- (2007) "Hydrologic Soil Groups". *210-VI-NEH, Hydrology National Engineering Handbook*. United States Department of Agriculture. Estados Unidos de América. pp 7i-7-5.
- Vargas, G. (2008) *Urbanización y configuración territorial en la región de Valladolid-Morelia, 1541-1991*. Morevallado Editores, Secretaría de Cultura de Michoacán. México.
- Ward, A.D. y Elliot, W.J. (1995) *Environmental Hydrology*. Boca Raton. FL: CRC Press. Estados Unidos de América.
- Westen, Mijde y Parodi (2010) *Introducción al análisis de frecuencias de eventos de peligro*. Apuntes de clase, Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation (ITC). Holanda.

WMO/GWP (2008) *Urban flood risk management, a tool for integrated flood management*. Technical document, no. 11. Associated Programme on Flood Management. World Meteorological Organization/Global Water Partnership. Suiza-Suecia.

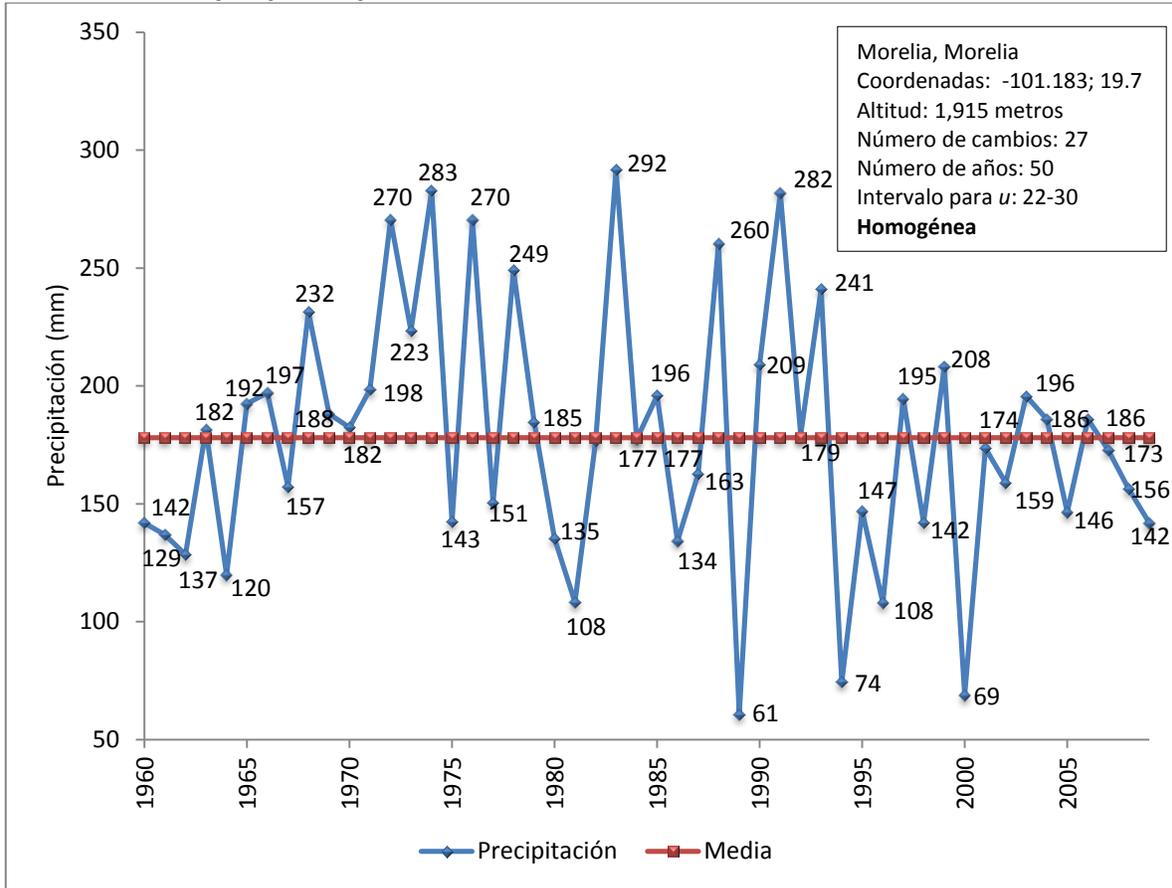
Zhang, X., Ball, G., Guertin, P., Halper, E. y L. Zhang (2010) "Integrating GIS and Remote Sensing with urban hydrology". *Advanced Resource Technology Group School of Renewable Natural Resources*. University of Arizona, Tucson. Estados Unidos de América.

Sitios de internet

1. Disponible en: www.altozano.com (Plan Maestro de Altozano)
2. Disponible en: <http://help.arcgis.com/es/arcgisdesktop> (Centro de ayuda ArcGis)

Anexo 1

Ejemplo de prueba de recorrido: estación "16081 Morelia"



Anexo 2

Hoja de levantamiento de campo para perfiles de suelo y evaluación ecológica del sitio

Levantamiento de campo	Localidad																	
	Fecha:	UTM Hor:	Mapa No.		Clima:			Uso de suelo y vegetación:				Forma de terreno:		Paisaje:				
	autor:	UTM Ver:	msnm	epoca seca:	oC	Os. t. oC					Inclinación:		Material Parental:					
	Estado del tiempo	prec.(mm)		Recurrencia y duracion de periodos humedos							Exposición :							
				F: 0	D: -	DAC: -					Evidencia de erosión:							
	Profundidad (cm)	Textura	Piedras (Vol %)	Color (Húmedo)		pH	sales o C.E. 1:2.5 (mS/cm)	m.o. %	CaCO3 (%)	Humedad	pF	Estructura tipo, tamaño, grado	estab. agreg	poros	D.A. g/cm3	Dens. raices	Limite	Hori zontes
Prof. De desarrollo			princ espacio radicular de				Clasificación del suelo (WRB):											
Prof. Max. De raices			nivel piezométrico actual --				Nivel piezométrico											tipo de humus:

Evaluación ecológica	espesor dm	penetrabilidad de raices		Volumen de suelo sin piedras	VPT		CA		dCC		CC		Kf	CIC		bases intercambio			Humus	Nt	Nd	P mo	
		DA corregida		Vol (%)	eval	Vol %	eval	(Vol %)	dCC L/m2	hasta 1 m Vol%	L/m2	cm/d	eval	cmol/kg	eval	cmol/Kh	mol/m2	Ax1	Kg/m2	Kg/m2	g/m2	(g/m2)	
	Prof. Fisiológica								dCC:		cc:		drenaje natural			Bi:		Humus:					
	evaluación:								evaluac:		evaluac:		erodabilidad (Ah)			evaluac:							
													K: eval:										