

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO



FACULTAD DE CIENCIAS

El efecto del crecimiento urbano sobre el clima
local de la ZMCM y sus implicaciones
socio-ambientales

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

Licenciada en Ciencias de la Tierra

PRESENTA:

Erika Luna Pérez

TUTORA:

Dra. Yosune Miquelajauregui Graf

Ciudad Universitaria, Cd.Mx., 2019





Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

1. Datos del alumno

Luna

Pérez

Erika

55 85 51 80 41

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ciencias

Licenciatura en Ciencias de la Tierra (Ciencias Ambientales)

311519828

2. Datos del tutor

Dra. en Ciencias Forestales

Yosune

Miquelajauregui

Graf

3. Datos del sinodal 1

Dra.

Erika Danaé

López

Espinoza

4. Datos del sinodal 2

Dr.

Arón

Jazcilevich

Diamant

5. Datos del sinodal 3

Dr.

Pedro Carlos

Álvarez Icaza

Longoria

6. Datos del sinodal 4

María Fernanda

Figueroa

Díaz Escobar

7. Datos del trabajo escrito

El efecto del crecimiento urbano sobre el clima local de la ZMCM y sus implicaciones socio-ambientales

112 p.
2019

Resumen

La Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) es una de las más grandes e importantes megalópolis a nivel mundial. La sinergia de las presiones a las que se encuentra sometida, como el crecimiento poblacional, y el consecuente cambio de uso de suelo, pueden atentar contra su sostenibilidad y capacidad de brindar y regular servicios ecosistémicos necesarios para el bienestar de la población. La literatura es extensa respecto al impacto en la meteorología local por el histórico cambio de uso de suelo en las zonas urbanas. La región donde se encuentra la ZMCM ha enfrentado cambios en la meteorología por la desecación del lago que naturalmente inundaba la cuenca. Si este cambio de uso de suelo sigue sin cesar sobre los remanentes cuerpos de agua y las áreas destinadas a la conservación, entonces se podrían seguir presentando cambios sobre las variables meteorológicas, con consecuencias para la vulnerabilidad urbana. En este trabajo se realizó una proyección del crecimiento del suelo urbano al año 2060 utilizando el modelo *Slope, Land Use, Exclusion, Urban, Transportation and Hillshade* (SLEUTH). Los resultados del modelo de crecimiento urbano, se incorporaron al modelo *Weather Research and Forecasting* (WRF) para modelar las variables meteorológicas de temperatura y precipitación durante la semana del 1 al 7 de julio del 2060. Los resultados de ambos modelos muestran que el cambio de uso de suelo y el consecuente cambio meteorológico, interferirán con la sostenibilidad de la urbe; específicamente en ciertas regiones dentro de la zona metropolitana, las cuales fueron identificadas, a través de un análisis geoespacial, como las zonas más vulnerables. Se concluye que, debido a que los cambios de uso de suelo y meteorológicos suceden en los tres estados que conforman la metrópoli, las políticas públicas que se construyan deben de ser un esfuerzo interestatal e inter-institucional, que contemple la ciencia y propuestas de iniciativas tanto globales como locales.

Para Oli

Acrónimos

- **UNAM** Universidad Nacional Autónoma de México
- **LANCIS** Laboratorio Nacional de Ciencias de la Sostenibilidad
- **CCA** Centro de Ciencias de la Atmósfera
- **ZMCM** Zona Metropolitana de la Ciudad de México
- **CDMX** Ciudad de México
- **SLEUTH** *Slope, Land Use, Exclusion, Transportation & Hillshade Model*
- **WRF** *Weather Research Forecasting Model*
- **OSM** *Optimum Sleuth Metric*
- **EMAS** Estaciones Meteorológicas Automáticas
- **SC** Suelo de Conservación
- **SMN** Servicio Meteorológico Nacional
- **CONABIO** Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad
- **CONAPO** Consejo Nacional de Población
- **INEGI** Instituto Nacional de Estadística y Geografía
- **SEDEMA** Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México
- **PAOT** Programa Ambiental y de Ordenamiento Territorial de la Ciudad de México
- **IPCC** *Intergovernmental Panel on Climate Change*
- **ONU** Organización de las Naciones Unidas
- **CEPAL** Comisión Económica para América Latina y el Caribe
- **CAM** Comisión Ambiental Metropolitana

Índice general

Resumen	v
Acrónimos	vii
Índice de figuras	xi
Índice de tablas	xv
1. Introducción	1
1.1. Objetivos	5
2. Marco Teórico	7
2.1. Área de estudio	7
2.1.1. Uso de suelo en la ZMCM	8
2.1.2. Vulnerabilidad Urbana	12
2.2. El modelo SLEUTH	14
2.3. El modelo WRF	15
2.3.1. Validación del modelo WRF	15
3. Métodos	21
3.1. El modelo SLEUTH	21
3.1.1. Calibración	22
3.1.2. Proyección de crecimiento urbano al año 2060	24
3.2. El modelo WRF	25
3.2.1. Validación del modelo WRF	29
3.2.2. Simulación numérica con escenario urbano 2060:	31
3.3. Análisis de las salidas de WRF-SLEUTH:	31
4. Resultados y Discusión	33
4.1. Validación del modelo WRF	33
4.1.1. Temperatura	33
4.1.2. Precipitación	38
4.2. Proyección de crecimiento urbano al 2060	43

4.2.1. SLEUTH: expansión de la urbanización y posibles cambios de uso de suelo.	43
4.2.2. WRF: posibles cambios en la magnitud y distribución temporal y espacial de la temperatura y la precipitación	47
4.3. Discusión sobre la sinergia de los cambios proyectados con la vulnerabilidad actual de la población	61
5. Conclusiones	63
5.1. Limitaciones del estudio y sugerencias para futuras investigaciones:	64
A. Insumos: capas geográficas	65
B. Gráficas	69
C. Mapas	83

Índice de figuras

1.1. Proyección de la población en cada entidad federativa de la ZMCM desde 1970 hasta 2050. Fuente: Elaboración propia con datos de CONAPO (2018)	4
2.1. Localización y extensión de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Fuente: Elaboración propia con datos de CONAPO (2010)	8
2.2. urbanorural	9
2.3. Uso de suelo dentro de la ZMCM. Fuente: Elaboración propia con base en la serie VI del INEGI (2014).	11
2.4. Vulnerabilidad Sociodemográfica por municipio en la ZMCM. Fuente: Elaboración propia con datos de CONAPO (2010).	13
3.1. Trece subregiones definidas en la Cuenca de México para la calibración del modelo SLEUTH.	22
3.2. Dominios utilizados en WRF	26
3.3. Niveles verticales para la simulación realizada por WRF del año control 2013 en la ZMCM.	27
3.4. Precipitación mensual observada en 2013	30
3.5. Distribución	31
4.1. Diagrama que representa el Coeficiente de Correlación (negro), la Desviación Estándar (azul) y la diferencia del error cuadrático medio centrado (verde) de la temperatura simulada en cada estación meteorológica con respecto a las temperatura observada (punto de referencia (verde oscuro): con correlación y desviación igual a 1 diferencia y diferencia del RMS centrado igual a 0).	35
4.2. Series de tiempo de la temperatura para el mes de validación (1ro al 31 de julio de 2013) de la simulación del modelo WRF para la ZMCM.	36

4.3.	Error medio, error medio absoluto y RMSE calculados entre los datos observados y los simulados para cada estación de la variable temperatura obtenidos en cada estación de la ZMCM para el mes de validación (1ro al 31 dde julio de 2013).	37
4.4.	Métricas de calidad por estación dentro del dominio para la variable de precipitación.	39
4.5.	Diagrama que representa el Coeficiente de Correlación (negro), la Desviación Estándar (azul) y la diferencia del error cuadrático medio centrado (verde) de la precipitación acumulada simulada en cada estación meteorológica con respecto a las temperatura observada (punto de referencia (verde oscuro): con correlación y desviación igual a 1 diferencia y diferencia del RMS centrado igual a 0).	42
4.6.	Porcentaje del tipo de uso de suelo que cambiará a uso de suelo urbano por la expansión de la zona urbana en el 2060 de acuerdo con la estimación de SLEUTH en la ZMCM.	45
4.7.	SCANPS	46
4.8.	Series de tiempo de la temperatura media horaria en las estaciones localizadas dentro de la zona urbana. Los datos corresponden a la primer semana de julio del 2013 y 2060 respectivamente. . .	48
4.9.	Temperatura media a 2m sobre la superficie. Los datos corresponden a la primer semana de julio del 2013 y 2060 respectivamente.	49
4.10.	Diferencia de la temperatura media a 2m sobre la superficie en la región del dominio 3 de WRF entre la primera semana de julio del año control (2013) y el proyectado (2060).	50
4.11.	Diferencia de la temperatura media a 2m sobre la superficie entre la primera semana de julio del año control (2013) y del proyectado (2060) dentro de la ZMCM. Los círculos azules enmarcan las municipios donde el aumento de temperatura es de entre 2 y 3 grados centígrados.	50
4.12.	Series de tiempo de la precipitación media horaria en las estaciones localizadas dentro o cerca de la zona urbana.	54
4.13.	Precipitación acumulada modelada por WRF de la semana del 1ro al 7 de julio a) del año 2013 y b) del año 2060	56
4.14.	Diferencia de la precipitación acumulada entre la primer semana de julio de los años 2013 y 2060. Región mostrada corresponde al dominio 3 del modelo WRF.	57

4.15. Diferencia de la precipitación acumulada (mm) entre la primer semana de julio del año control (2013) y el proyectado (2060) dentro de la ZMCM. Los círculos rojos enmarcan municipios donde la precipitación aumenta.	58
4.16. Diferencia de precipitación acumulada (mm) sobre los Asentamientos Humanos Irregulares (AHI)dentro del Suelo de Conservación. Las zonas de colores que se aprecian entre las latitudes 19.15 y 19.35 representan los asentamientos irregulares.	59
B.1. Diferencia de la temperatura máxima modelada en cada estación entre el año 2013 (año control) y el año 2060.	70
B.2. Diferencia de la temperatura mínima modelada en cada estación entre el año 2013 (año control) y el año 2060.	70
B.3. Series de tiempo de la temperatura observada y modelada del año 2013.	71
B.4. Series de tiempo de la temperatura observada y modelada del año 2013.	72
B.5. Series de tiempo de la temperatura observada y modelada del año 2013.	73
B.6. Series de tiempo de la temperatura observada y modelada del año 2013.	74
B.7. Series de tiempo de la temperatura media.	75
B.8. Series de tiempo de la temperatura media.	76
B.9. Series de tiempo de la temperatura media.	77
B.10.Series de tiempo de la precipitación media horaria.	78
B.11.Series de tiempo de la precipitación media horaria.	79
B.12.Series de tiempo de la precipitación media horaria.	80
B.13.Series de tiempo de la precipitación media horaria.	81
C.1. Distribución de la temperatura observada en el año 2013 en la Ciudad de México. Fuente: INEGI	84
C.2. Distribución de la temperatura observada en el año 2013 en la Ciudad de México. Fuente: INEGI	84
C.3. Cobertura del Suelo de Conservación de la Ciudad de México.	85
C.4. Niveles de infiltración dentro del Suelo de Conservación de la Ciudad de México.	85
C.5. Localidades marginadas en la ZMCM y su nivel de marginación.	86
C.6. Cantidad de localidades marginadas por municipio en la ZMCM.	86
C.7. Nivel de riesgo a inundaciones dentro de la CMDX.	87

C.8. Municipios de la ZMCM. Ver cuadro ?? para nombres. 87

Índice de tablas

2.1. Ejemplo de una tabla de contingencia para validar la simulación de variables categóricas.	18
3.1. Parámetros del mejor ajuste y métrica de ajuste. Diff: Coeficiente de dispersión, Brd: Coeficiente de reproducción, Sprd: Coeficiente de propagación, Slp: Coeficiente de pendiente, RG: Coeficiente gravitatorio de caminos y OSM: <i>Optimum SLEUTH Metric</i> . . .	24
3.2. Descripción de los datos que se utilizaron para cada una de las capas que necesita el modelo SLEUTH para realizar proyecciones.	25
3.3. Configuración para la física del modelo WRF.	28
4.1. Tablas de contingencia para validar las simulaciones de los eventos de precipitación.	38
4.2. Métricas de calidad obtenidas de las tablas de contingencia (4.1) para validar la cantidad de eventos de precipitación simulada por el modelo WRF del 1 al 31 de julio de 2013.	38
4.3. Comparación de la temperatura máxima a nivel estación. . . .	51
A.1. Datos de capas geográficas utilizadas para la calibración del modelo SLEUTH con su respectivo origen y descripción.	66
A.2. Datos de capas geográficas utilizadas para el análisis geoespacial de los resultados de los modelos SLEUTH y WRF.	67
C.1. Indicadores utilizados para desarrollar el Índice de Vulnerabilidad Sociodemográfica 2010 de CONAPO.	88
C.2. Nombres de los municipios de la ZMCM. Ver C.8 para su localización.	89

Capítulo 1

Introducción

El cambio de uso de suelo es reconocido como una de las principales fuerzas del cambio ambiental a nivel global (Foley *et al.*, 2005; Mills, 2007). La humanidad ha ido transformado el estado natural del suelo para sustentar actividades como la agricultura, la ganadería, y para el desarrollo de asentamientos urbanos (Defries, Foley y Asner, 2004). La transformación del suelo para albergar grandes aglomeraciones de personas trae consigo consecuencias como cambios en el clima regional (*ibíd.*), principalmente por el efecto de la Isla de Calor. Dicho efecto se define como la diferencia termal que existe entre la ciudad y sus alrededores de tipo rural (Jazcilevich *et al.*, 2000). La falta de cobertura vegetal y de superficies impermeables, son los factores que dan lugar a que la superficie se caliente (Foley *et al.*, 2005). La Isla de Calor puede no solo incrementar la temperatura local, sino también influir sobre los patrones de la precipitación (Baklanov, Molina y Gauss, 2016). Además, la intensidad de la Isla de Calor se asocia directamente con la tasa de crecimiento del área urbana, potenciada a su vez, por el aumento de población (Oke, 1973).

Investigaciones en varias regiones geográficas del mundo han demostrado que el cambio de uso de suelo ha alterado variables meteorológicas (Huong y Pathirana, 2013; Devkota y Gyawali, 2015; Pathirana *et al.*, 2014; Arango y Ruiz, 2011; Fernández y Lutz, 2010). Por ejemplo, Shem y Shepherd (2009) llevaron a cabo experimentos en la ciudad de Atlanta, EUA, donde aplicaron tres niveles de urbanización distinta y concluyeron que existe un impacto significativo de la Isla de Calor sobre la cantidad de precipitación acumulada, resultando en un incremento de entre el 10% y 13%. Los datos históricos de cambio de uso de suelo que se utilizaron para el estudio en Atlanta revelan también la velocidad a la que la población aumentó. En general, a nivel global, la población urbana ha ido aumentando exponencialmente desde finales del siglo XX (Vojnovic, 2014).

La población mundial actual supera los 7 mil millones de habitantes, de los cuales, más de la mitad (55 %) habita en ciudades (*World Urbanization Prospects: The 2018 Revision* 2018). La proyección poblacional al 2050, estima que el mundo estará habitado por cerca de 10 mil millones de personas, de los cuales, el 68 % se concentraría en centros urbanos (*ibíd.*). Esta proyección poblacional debe de ir acompañada de proyecciones de crecimiento urbano, de manera que se puedan implementar a tiempo planes de ordenamiento territorial que contemplen acciones de mitigación y adaptación ante el cambio de uso de suelo y el consecuente impacto en la meteorología regional. En un sistema tan complejo como las ciudades, estos cambios de suelo y climáticos pueden afectar de forma diferenciada a la población por el distinto acceso que los habitantes tienen a la infraestructura débil y dura. Tellman *et al.* (2018) describen a la infraestructura dura como todo aquello que comprende el ambiente construido (edificios, calles, drenaje, etc.), mientras que la infraestructura débil comprende las políticas públicas y la toma de decisiones. En conjunto, la infraestructura débil y dura, darán pauta tanto al subsecuente desarrollo urbano, como a la vulnerabilidad dentro de éste.

La vulnerabilidad es definida por Adger (2006), como el estado de susceptibilidad al daño por la exposición a estrés asociado con cambios ambientales y sociales, así como por la falta de capacidad para adaptarse. Por lo tanto, el cambio en el clima local por el crecimiento urbano, podría representar un incremento en la vulnerabilidad urbana, relacionado a eventos extremos como inundaciones y olas de calor.

Para tratar el tema de vulnerabilidad en la ciudades, se han creado una variedad de iniciativas, tales como: “100 Ciudades Resilientes” y la “Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible de la ONU”. Dichas iniciativas identifican un conjunto de problemas y sugieren ejes de acción. No obstante, un punto débil de esta serie de propuestas, es la implementación de políticas basadas en una ciencia que es global y no específica para cada región. Aunque se pueden establecer patrones generales, hay una gran gama de características entre las ciudades del mundo que las hace diferentes: Hay ciudades ubicadas en las costas y ciudades ubicadas a 2,500 m s.n.m.; ciudades de más de 10 millones de habitantes y ciudades con apenas 2 millones; ciudades ubicadas en latitudes altas y ciudades en latitudes bajas; ciudades en países desarrollados y ciudades en el Sur Global.

La Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), participa en las

iniciativas mencionadas anteriormente no solo por ser una de las megaciudades¹ más importantes del mundo, sino también porque estudios de diferentes disciplinas la han identificado como una ciudad altamente vulnerable al cambio climático global y a procesos locales relacionados con su complejidad social, económica y ambiental (Ezcurra *et al.*, 2016, Tellman *et al.*, 2018, Baeza *et al.*, 2018, Vieyra, Méndez-Lemus y Hernández, 2018, Cram *et al.*, 2008, Fernández-Álvarez, 2017). Al igual que otras ciudades del mundo, durante el siglo XX, la ZMCM vivió un rápido y substancial crecimiento tanto poblacional como espacial (*Atlas of Urban Expansion* 2016), ya que se caracterizó por un patrón horizontal de ocupación, lo que impulsó el proceso de metropolitización incorporando progresivamente periferias rurales (López Vázquez y Plata Rocha, 2009). La sinergia entre el aumento poblacional y la alta densidad de población por la que se caracteriza (21.2 millones de habitantes en 2,287 km²), entre otras causas políticas y económicas, condujo a la falta de cumplimiento de la regulación en materia urbana (producto de las restricciones impuestas en la legislación respecto a la creación de nuevos asentamientos dentro del núcleo urbano central) (*ibíd.*).

Los estudios que se han realizado con respecto a este crecimiento urbano y su efecto en el clima local apuntan hacia la importancia que ha tenido el constante cambio de uso suelo sobre la hidro-meteorología, desde la la desecación del Lago de Texcoco, hasta la actualidad (Benson-Lira *et al.*, 2016; López-Espinoza y Zavala-Hidalgo, 2012; Jazcilevich *et al.* (2000); Jáuregui, 1997). Estos estudios indican que el calentamiento histórico de la ZMCM se puede explicar en parte, por la influencia y expansión del área urbana. A partir de datos históricos, Jáuregui (2004) encontró que la Isla de Calor en la ciudad tiene un impacto directo sobre el aumento de la frecuencia de los eventos de precipitación. Por otro lado, (Benson-Lira *et al.*, 2016) reclasificaron el uso de suelo de imágenes MODIS a partir de una base de datos que representa cómo sería el uso de suelo actual si nunca se hubiera urbanizado. Esta reclasificación la usaron como entradas para el modelo de simulación atmosférica con el fin de simular las variables meteorológicas de la época prehispánica y compararlas con los valores que se tienen actualmente. Lo que encontraron fue que la urbanización ha incrementado 4°C la temperatura promedio y ha aumentado la cantidad de precipitación en las horas de la tarde.

Lo anterior demuestra que la literatura es extensa respecto al impacto del

¹Una megaciudad se define como un área metropolitana de más de 10 millones de habitantes (*World Urbanization Prospects: The 2018 Revision* 2018)

cambio histórico de uso de suelo sobre el clima regional. Sin embargo, las proyecciones indican que a nivel metropolitano, la población seguirá en aumento (CONAPO, 2018) (Figura 1.1). Por lo que, si la ZMCM continua creciendo de forma horizontal, entonces la urbanización seguirá en expansión, transformando el suelo y la meteorología local. La necesidad de acompañar a la proyección poblacional con una de crecimiento urbano es vital para la reducción de la vulnerabilidad urbana de la ZMCM, de manera que se contribuya a la construcción de infraestructura dura y suave, en beneficio del socio-ecosistema. El presente estudio de tesis se centra en la proyección de un escenario de crecimiento urbano al año 2060 y las implicaciones que el cambio de uso de suelo proyectado representará para las variables de temperatura y precipitación locales. La urbanización del año 2060 se simuló mediante el modelo de crecimiento urbano *Slope, Land Use, Exclusion, Urban, Transportation and Hillshade* (SLEUTH). Los resultados del modelo de crecimiento urbano, se incorporaron al modelo *Weather Research and Forecasting* (WRF) para modelar las variables meteorológicas de temperatura y precipitación durante la semana del 1 al 7 de julio del 2060 y compararlas con la situación actual. Finalmente, los resultados de ambos modelos se analizaron con base en lo que estos cambios pueden implicar para la población y su vulnerabilidad.

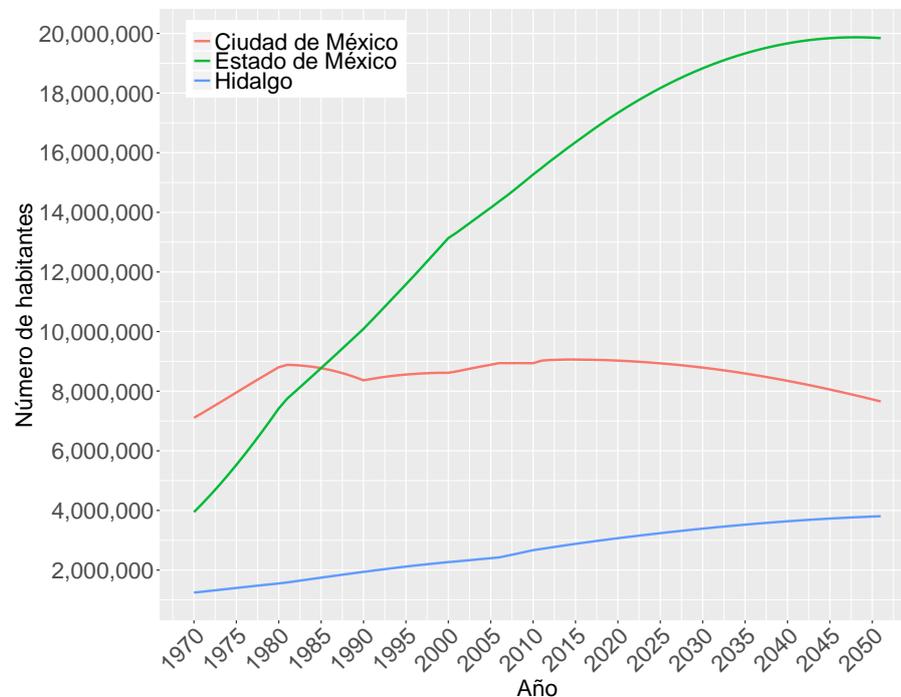


FIGURA 1.1: Proyección de la población en cada entidad federativa de la ZMCM desde 1970 hasta 2050. Fuente: Elaboración propia con datos de CONAPO (2018)

1.1. Objetivos

Objetivo General:

Evaluar el impacto del crecimiento urbano proyectado sobre la temperatura y la precipitación, y sus implicaciones socio-ambientales en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

Objetivos Particulares:

1. Validar el modelo numérico atmosférico WRF en la ZMCM con datos históricos.
2. Evaluar el efecto del crecimiento urbano proyectado a 2060 (Sin Restricción) generado por SLEUTH en la temperatura y la precipitación pronosticado por el modelo WRF.
3. Evaluar el impacto de los cambios meteorológicos sobre la vulnerabilidad socio-ambiental de la ZMCM.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Área de estudio

La ZMCM se encuentra a 2,240 m s.n.m. en el centro de la República Mexicana, entre los 19° 3' y 19° 54' de latitud Norte, y los 98° 38' y 99° 31' de longitud Oeste. Comprende las 16 alcaldías de la Ciudad de México, 58 municipios del Estado de México y uno del estado de Hidalgo. Colinda al norte con los estados de Hidalgo y México; al este con los estados de México, Tlaxcala y Puebla; al sur con los estados de México y Morelos; y al oeste con el Estado de México (Figura 2.1).

En cuanto a su geología, la ZMCM está rodeada de montañas y tiene sus cimientos sobre lo que solía ser naturalmente un ecosistema lacustre. Cemento, edificios y tuberías, así como la alta demanda de agua, se han encargado de desecar los cuerpos de agua que antes fluían por el valle.

El clima es semiarido (categoría BS) en las zona de las planicies centrales y hacia el noreste; mientras que hacia el oeste, sureste y sur, el clima es más húmedo (categoría CW).

La estacionalidad en la ciudad se caracteriza por un periodo caluroso y seco entre marzo y abril; una marcada temporada de lluvias que va de mayo a octubre; y un periodo invernal seco de noviembre a febrero (Benson-Lira *et al.*, 2016). El gradiente de precipitación durante la temporada de lluvias se extiende desde los 400 mm en zonas rurales al noreste de la ciudad, 600 mm en el centro, hasta los 700 mm anuales en los suburbios al suroeste (Jáuregui, 1973; Oke *et al.*, 1999). En las figuras C.1 y C.2 se muestran mapas obtenidos del *Anuario Estadístico y Geográfico de la Ciudad de México 2013* realizado anualmente por el INEGI. Los mapas muestran la distribución espacial de las variables de temperatura y precipitación durante el año 2013 con base en datos observados.

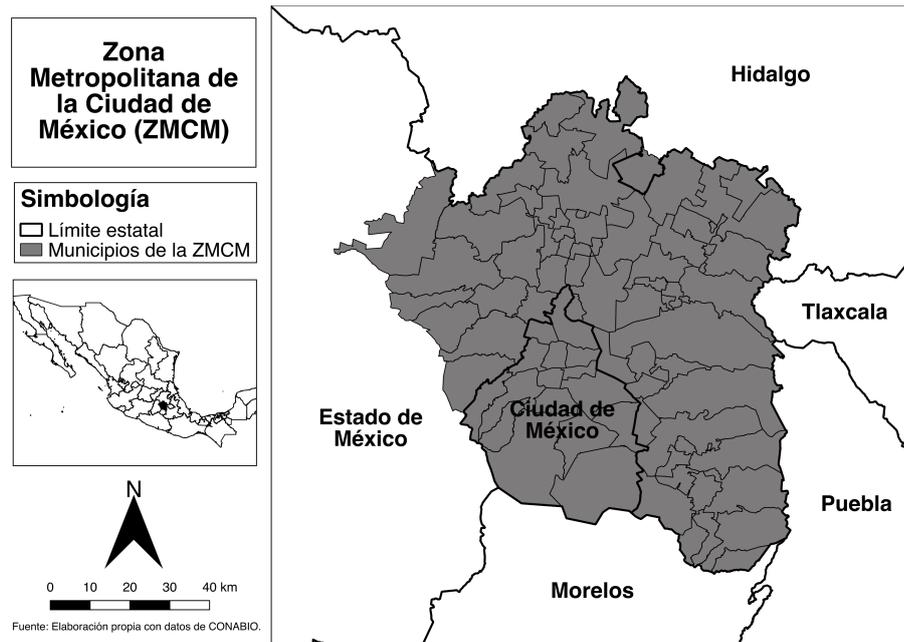


FIGURA 2.1: Localización y extensión de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Fuente: Elaboración propia con datos de CONAPO (2010)

2.1.1. Uso de suelo en la ZMCM

La ZMCM cuenta con una superficie de 7,819 km². El suelo que se ha destinado a la urbanización equivale al 29 %, donde los usos varían entre la habitación, la industria, servicios y comercio (*Programa de Ordenación de la Zona Metropolitana del Valle de México 2011* 2011). La densidad de población en este suelo de tipo urbano es de entre 100 y 200 personas por hectárea (*ibíd.*). Por otro lado, el 71 % de la superficie total es un tipo de suelo no urbano, el cual comprende Áreas Naturales Protegidas y suelo destinado a actividades primarias; y donde la densidad poblacional no supera a los 10 habitantes por hectárea (*ibíd.*). Dentro de los límites políticos de la Ciudad de México (CDMX), al suelo no urbano, se le denomina Suelo de Conservación (SC); mientras que en el Estado de México e Hidalgo, se clasifica como "área no urbanizable" (*Agenda de Sustentabilidad Ambiental para la ZMVM 2010*) (Figura 2.2).

La Figura 2.3 muestra los usos de suelo en toda la metrópoli. De esta figura podemos observar que el grado de urbanización todavía es muy bajo en los municipios de los estados de México e Hidalgo, donde el suelo está dirigido a la agricultura y a bosques de oyamel y de pino-encino.

El Suelo de Conservación de la CDMX comprende el área que se localiza principalmente al sur y surponiente (Figura C.3). En total, abarca una superficie

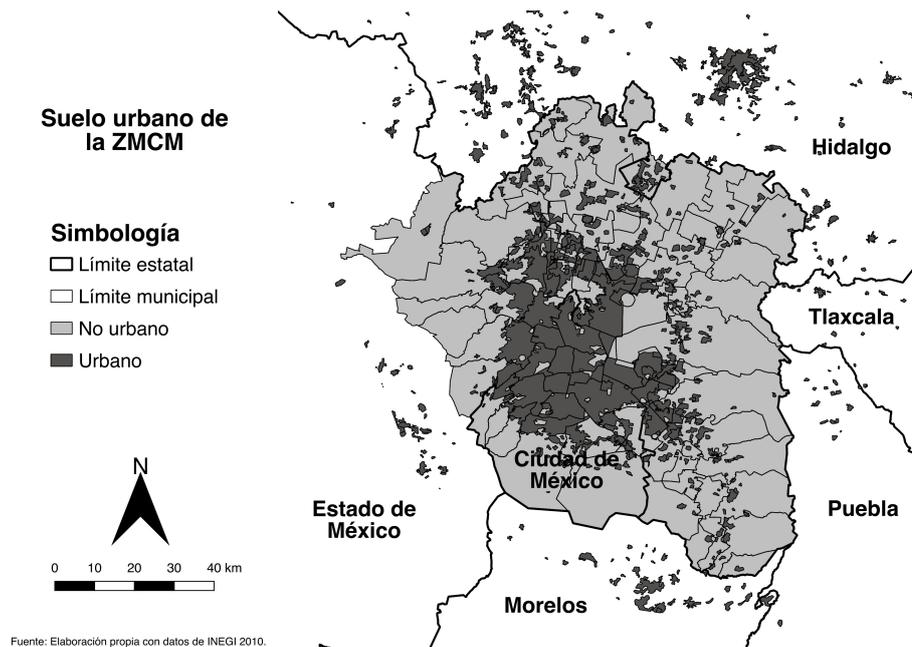


FIGURA 2.2: Suelo urbano y no urbano de la ZMCM. Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI (2010).

de 88,442 ha (Escamilla-Herrera y Santos-Cerguera, 2012). A pesar de estar dentro de los límites políticos y administrativos de la CDMX, el SC es de gran relevancia para la sustentabilidad de toda la metrópoli, pues la provee de varios servicios ambientales, tales como: Regulación del clima a través de la captura de carbono; recarga del acuífero por la infiltración; disminución de la contaminación atmosférica; conservación de la biodiversidad; y actividades recreativas (Cram *et al.*, 2008).

Del total del SC, el 43% está ocupado por bosques, el 32% es de uso agrícola, el 12% son pastizales y el 11% es ocupado por Asentamientos Humanos Irregulares (AHI) (*Atlas Geográfico del Suelo de Conservación del Distrito Federal* 2012). Los asentamientos humanos se intentaron regular desde la década de 1980 cuando se establecieron restricciones para el uso de suelo (Escamilla-Herrera y Santos-Cerguera, 2012). Sin embargo, debido a una variedad de procesos de gentrificación y de desigualdad socio-económica, la urbanización sigue avanzando hacia el suelo de conservación (Sobrino *et al.*, 2015). Las condiciones en las que viven los pobladores de asentamientos irregulares carecen de servicios básicos, lo que contribuye a su vulnerabilidad tanto social como ambiental, pues la topografía no es apta para la vivienda Escamilla-Herrera y Santos-Cerguera (2012).

Debido a las altas tasas de densidad, los altos costos que tiene la vivienda y las restricciones respecto a la creación de nuevos asentamientos al centro de

la metrópoli, los AHI resultan una alternativa para la desigualdad económica a la que se enfrentan los habitantes (López Vázquez y Plata Rocha, 2009). Los AHI contribuyen al proceso de expansión urbana mediante la peri-urbanización (Sobrinho *et al.*, 2015). Este proceso es característico de las ciudades latinoamericanas, donde *"la política urbana favorece este patrón de ocupación de manchones urbanos en las periferias urbanas a través de tierra que pertenece al sector público o a tierras de propiedad comunal"* (ibíd.). Aún más, los asentamientos urbanos en zonas destinadas a la conservación acaban por degradar el suelo y sus servicios ambientales, contribuyendo también al incremento de la vulnerabilidad de la misma población (Cram *et al.*, 2008).

El principal de los problemas al abordar el tema del cambio de uso de suelo a nivel metropolitano y administrativo, es que la clasificación es diferente para la CDMX y los otros dos estados. La Ciudad de México clasifica su suelo como suelo urbano y de conservación; mientras que el Estado de México e Hidalgo lo clasifican como área urbana, área urbanizable, y área no urbanizable (*Agenda de Sustentabilidad Ambiental para la ZMVM 2010*). Además, independientemente de la categoría que se le asigne al suelo, esta no refleja si el suelo está realmente ocupado por asentamientos humanos o no. De la misma forma, la clasificación de los asentamientos humanos puede también ser muy ambigua dentro de la misma ciudad, pues en el caso de la periferia, muchos de estos asentamientos cumplen con características tanto urbanas como rurales. Fernández y Vega (2017), autores del estudio titulado *"¿Lo rural en lo urbano?"* analizan esta distinción y argumentan que hoy en día, sobre todo en lugares como la ZMCM, es imposible seguir usando esta clasificación para el desarrollo de políticas públicas debido a que clasificar a una población como puramente rural o como puramente urbana no refleja la realidad de la población periurbana. Los pobladores periurbanos aportan a la dinámica social, económica y ambiental tanto como los urbanos (Fernández-Álvarez, 2017); sin embargo, las condiciones precarias por la que la mayoría se caracteriza, y las condiciones naturales del lugar donde construyen sus viviendas (suelos en barrancas con pendiente mayor a 10°) (Cram *et al.*, 2008), los convierte en los más socio-ambientalmente vulnerables. Los mapas del anexo C muestran la ubicación de las localidades marginadas así como su nivel de marginación, donde se aprecia que en efecto, la marginación no sucede en la ciudad central, sino en la periferia. Se despliegan también mapas de vulnerabilidad social, económica y ambiental a nivel municipal.

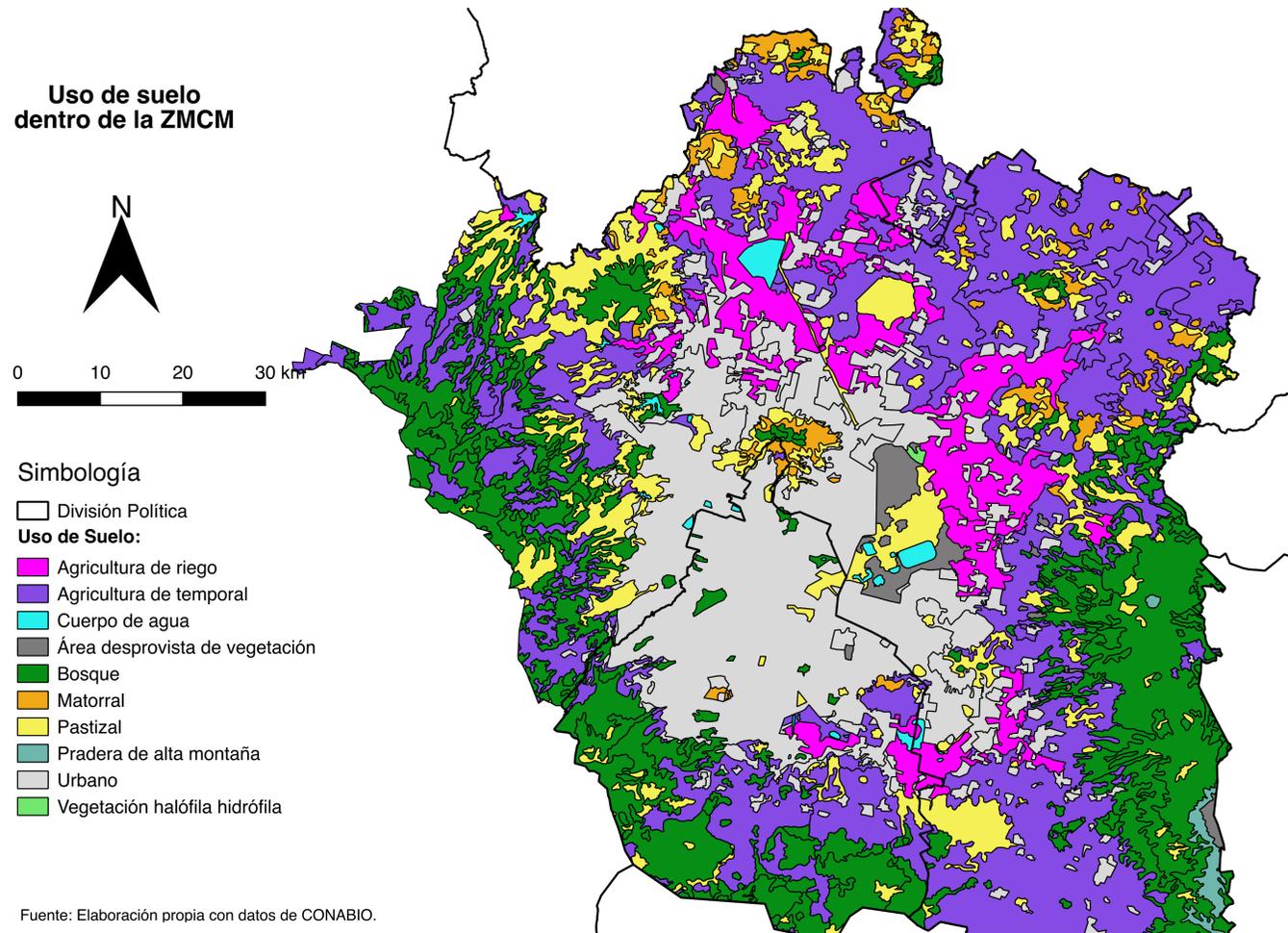


FIGURA 2.3: Uso de suelo dentro de la ZMCM. Fuente: Elaboración propia con base en la serie VI del INEGI (2014).

2.1.2. Vulnerabilidad Urbana

Para entender la vulnerabilidad de la población de la ZMCM al riesgo tanto actual como futuro, hemos recabado y analizado diversos estudios que hablan de dicho concepto, pues Eakin y Luers (2006) argumentan que a pesar de que en otras disciplinas la consistencia entre los métodos es importante para la legitimidad de los resultados, los estudios sobre vulnerabilidad necesitan de la diversidad de definiciones, métodos e ideas reflexivas para entender la complejidad del concepto y su relación con los sistemas socio-ecológicos.

El debate sobre la definición y evaluación de vulnerabilidad se puede englobar en tres grandes categorías: a) estudios enfocados en el riesgo biofísico; b) estudios que se basan en el marco de la ecología política y económica; y más recientemente, c) estudios inspirados en el concepto de resiliencia (*ibíd.*). A pesar de que la vulnerabilidad es en general un concepto fundamentalmente relacionado con temas de justicia social, equidad y oportunidades, estas diferentes opciones metodológicas deriva en la elección de diferentes unidades de análisis (*ibíd.*). Esta tesis aporta a los estudios enfocados en el riesgo biofísico mediante el análisis espacial de los cambios en la meteorología local.

En cuestiones más cuantificables, existen también diversas formas de medir y formular índices de vulnerabilidad. Instituciones, iniciativas y programas de organizaciones multilaterales (como el IPCC, ONU-Habitat, y la CEPAL) han desarrollado índices que incorporan indicadores sobre el contexto demográfico y de riesgo de las ciudades. A nivel local, instituciones gubernamentales nacionales como el Consejo Nacional de Población (CONAPO) se encargan de desarrollar estos índices.

El Índice de Vulnerabilidad Sociodemográfica de CONAPO (Figura 2.4) fue construido para generar una medida resumen de las características que hacen más vulnerable a la población a desastres. Los indicadores que conforman el índice de vulnerabilidad se encuentran en el apéndice C. El conjunto de estos indicadores junto con la dimensión meteorológica que agregamos con este estudio, deriva entonces en un tipo de vulnerabilidad socio-ecológico.

La ZMCM es una región relativamente grande y que por lo tanto comprende diferentes características meteorológicas a lo largo y ancho. De la misma forma en que la población y sus actividades no se distribuyen de manera homogénea, los variables meteorológicas, así como la vulnerabilidad a dichas variables es diferente en cada zona. Tanto en términos demográficos como de uso de suelo, la ZMCM es un sistema heterogéneo. Los eventos extremos de precipitación y

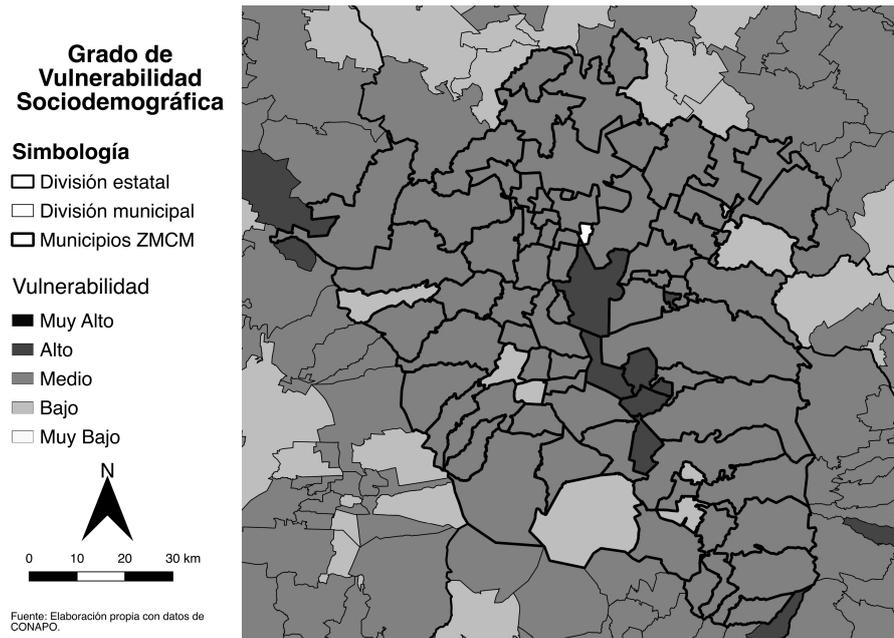


FIGURA 2.4: Vulnerabilidad Sociodemográfica por municipio en la ZMCM. Fuente: Elaboración propia con datos de CONAPO (2010).

temperatura a los que nos hemos enfrentando en los últimos años afectan a la población y a su localidad de diferentes formas. Hemos ya descrito previamente como se distribuye el gradiente de precipitación de noreste a suroeste, por lo cual, un cambio en la distribución de este gradiente en el valle podría convenir en un incremento de la vulnerabilidad en la zona periférica de la zona urbana o incluso beneficiar a localidades donde en la actualidad escasea el agua.

La ZMCM está entonces compuesta por el conjunto de relaciones entre las zonas urbanas y rurales. Las zonas urbanas son caracterizadas por el INEGI con base en el número de habitantes y por el tipo de servicios e infraestructura con los que cuenta. Por otro lado, las localidades rurales son aquellas con menos de 2,500 habitantes, y que por lo general, en términos económicos, se asocian al desarrollo de las actividades del sector primario, como la agricultura y la extracción de recursos naturales. En contraste, existen evidencias de pequeños asentamientos lejanos de la ciudad en los que se observan prácticas vinculadas con la industria, el comercio o los servicios, todas actividades asociadas con lo urbano, y aún así se siguen considerando asentamientos rurales (Ávila-Sánchez, 2011).

Esta asociación económica también suele dirigir las políticas públicas de desarrollo que se centran en “*estrategias de atención a poblaciones marginadas, empobrecidas, invisibles, vulnerables, desarticuladas, dispersas y de alto riesgo*”

(Dirven *et al.*, 2011). Sin embargo, no solo es de gran importancia tomar en cuenta la diversidad demográfica de cada una de estas localidades sino su distribución en el espacio dentro de la metrópoli para conocer su grado de vulnerabilidad a factores ambientales.

2.2. El modelo SLEUTH

Los modelos de crecimiento urbano son esenciales para una planeación del territorio adecuada, dada la rapidez a la que hoy en día crecen las ciudades, tanto en su infraestructura como a nivel poblacional y económico (Vliet *et al.*, 2016). Además, las ciudades, como sistemas socio-ecológicos, deben considerar dentro de su planeación factores como el clima local, los cuerpos de agua y la vegetación que regulan los procesos naturales

Uno de los principales objetivos de este tipo de modelos es anticipar y pronosticar cambios en las tendencias de desarrollo, para describir y evaluar los impactos, para que así, los tomadores de decisiones y planeadores del territorio, puedan explorar los impactos posibles que diferentes políticas públicas podrían generar (Petit *et al.* 2002; Verbug *et al.* 2002; Dietzel y Clarke, 2007). En la literatura hay una gran variedad de modelos computacionales de crecimiento urbano, entre los cuales destaca, por la cantidad de casos de estudio, el modelo SLEUTH (Vliet *et al.*, 2016; Yang y Lo, 2003; Silva y Clarke, 2002; Leao, Bishop y Evans, 2004; Clarke, Hoppen y Gaydos, 1997; Osman, Divigalpitiya y Arima, 2016). SLEUTH es un modelo basado en autómatas celulares que infiere el crecimiento urbano futuro a partir de datos históricos (Clarke, Hoppen y Gaydos, 1997) y contiene un método de calibración incluido en su distribución. SLEUTH es un acrónimo de los datos que el modelo requiere para calibrar y pronosticar: *Slope* (pendiente), *Land Use* (uso de suelo), *Exclusion* (zonas de exclusión), *Urban* (urbanización histórica), *Transportation* (red de calles) y *Hillshade* (sombra). El modelo incluye cuatro modos de crecimiento:

1. Crecimiento espontáneo: Simula la urbanización aleatoria de un píxel y no depende de la proximidad.
2. Crecimiento de nuevos centros: Simula la ampliación del crecimiento espontáneo, es decir urbaniza los píxeles adyacentes a los píxeles urbanizados mediante el crecimiento espontáneo.
3. Crecimiento adyacente: Simula el crecimiento de la frontera de la urbanización existente.

4. Crecimiento influenciado por carreteras: Simula la urbanización influenciada por los caminos y carreteras.

2.3. El modelo WRF

El *Weather Research and Forecasting* (WRF) es un modelo de simulación de la atmósfera, no hidrostático, sensible a las características del terreno y diseñado para predecir la circulación atmosférica a escala sinóptica, mesoescalar y regional.

Sus principales características son:

1. Capacidad de anidamiento múltiple.
2. Dinámicas no hidrostáticas, lo que permite al modelo ser usado en una escala de unos pocos kilómetros.
3. Una gran capacidad de asimilación de información.
4. Múltiples opciones de parametrizaciones físicas.

2.3.1. Validación del modelo WRF

El principal propósito al validar el modelo es asegurarnos que las simulaciones son precisas y confiables. Las medidas que se utilicen para la validación deben de ser seleccionadas en función de lo que el usuario está buscando. Con base en el documento "Guidelines on Performance Assessment of Public Weather Services" de la World Meteorological Organization (2000), hemos seleccionado dos esquemas y sus respectivas medidas de calidad para cada una de las variables de nuestro análisis.

Tipos de variables de un pronóstico:

- Variable continua: Toman un valor específico de la variable, el cual tiene las mismas unidades que la variable.
- Variable categórica: La ocurrencia, dentro de un rango predeterminado, de valores de la variable. Se establece un umbral para delimitar las categorías (dos o más) dentro de las cuales pueden caer los valores.

La validación de las variables continuas se hace mediante el cálculo de medidas de calidad. A continuación se hace una breve explicación de cada una de las

medidas utilizadas en este trabajo. **Error medio (EM)**: El error medio es una medida tradicional de sesgo que calcula el promedio de las diferencias entre el pronóstico y la observación sobre la muestra para la validación. Mide además la fiabilidad de un pronóstico, o en otras palabras, qué tanta confianza en promedio se le puede tener al pronóstico.

$$EM = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (f_k - o_k) = \bar{f} - \bar{o} \quad (2.1)$$

Donde f representa el pronóstico, o las observaciones, n el total de datos, y k indica el k -ésimo par de observaciones y pronósticos. En un rango que va de $-\infty$ a $+\infty$, el EM es útil para identificar si el pronóstico que produce nuestro modelo sobrestima o subestima las observaciones. Los pronósticos que en promedio sobrestimen las observaciones exhibirán $EM > 0$. En cambio, aquellos que en promedio subestimen las observaciones exhibirán $EM < 0$. Si los pronósticos y las observaciones tienen el mismo valor en promedio, $EM = 0$, i.e. no hay sesgo.

Este tipo de sesgo indica si la desviación promedio del pronóstico es positiva o negativa con respecto a las observaciones; sin embargo, no indica la magnitud de los errores. Aún cuando $EM = 0$, todavía es posible que los pronósticos tengan errores grandes.

Error medio absoluto (EMA): Mide la magnitud promedio de los errores de un pronóstico sin considerar su dirección. Debido a que es una medida lineal, las diferencias individuales tienen en promedio el mismo peso. Es una medida de la exactitud y la calidad del modelo, y matemáticamente se define como el promedio de la diferencia absoluta de las observaciones y los pronósticos.

$$EMA = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |(f_k - o_k)| \quad (2.2)$$

El rango del EMA va del 0 al ∞ . Cuando los pronósticos son perfectos ($f_k = o_k$), EMA toma un valor igual a cero. Este valor aumenta conforme las diferencias entre pronósticos y observaciones son mayores, teniendo las mismas unidades que la variable original.

Error Cuadrático Medio (ECM): mide el promedio de la magnitud de los errores. Es la medida más comúnmente utilizada para medir la exactitud y calidad de un pronóstico, la cual nos da información sobre la dispersión de las diferencias entre las observaciones y los pronósticos. Se define como:

$$ECM = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (f_k - o_k)^2 \quad (2.3)$$

La función cuadrática provoca que el ECM sea más sensible a los errores grandes, particularmente a aquellos valores que son atípicos.

Al aplicar la raíz cuadrada al ECM, obtenemos el RMSE (*Root Mean Square Error* por sus siglas en inglés). Esta raíz cuadrada nos permite obtener las mismas unidades que las de nuestra variable.

Tanto el EMA como el RMSE pueden ser analizados paralelamente para diagnosticar la variación de los errores dentro de los valores pronosticados. El RMSE será siempre igual o mayor que el EMA, por lo que entre mayor sea la diferencia entre estas dos medidas, mayor será la varianza entre los errores individuales dentro de la muestra.

Si $RMSE = EMA$, todos los errores son de la misma magnitud. Si $RMSE > EMA$, la magnitud de los errores varía. Ambos tienen un rango de entre 0 a $+\infty$.

Coefficiente de correlación (r): Mide el grado de asociación lineal entre los pronósticos y las observaciones.

Cuando $r > 0$, pronósticos altos (bajos) tienden a estar asociados con valores altos (bajos) de las observaciones, i.e. una relación directamente proporcional. Cuando $r < 0$, los pronósticos altos (bajos) tienden a estar asociados con valores bajos (altos) de las observaciones; i.e. una relación inversamente proporcional. Cuando $r = 0$, no hay ningún tipo de relación lineal.

$$r = \frac{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (f_k - \bar{f})(o_k - \bar{o})}{\sigma_f \sigma_o} \quad (2.4)$$

Diagrama de Taylor: El diagrama de Taylor (2001) es una herramienta útil para representar gráficamente tres métricas (RMSE, correlación y desviación estándar) que al estar relacionadas geoméricamente, nos muestra mediante un solo punto en un gráfico 2D, la calidad que tiene un modelo para reproducir las observaciones.

Para el caso de variables categóricas hemos basado el esquema de validación en tablas de contingencia como la que se muestra en la Tabla 2.1. Al igual que

con el esquema realizado para los datos de tipo continuo, la validación de datos discretos se basa en la exactitud, la confianza y la habilidad del modelo.

TABLA 2.1: Ejemplo de una tabla de contingencia para validar la simulación de variables categóricas.

		Observado	
		Sí	No
Pronóstico	Sí	a Correctos positivos	b Falsos positivos
	No	c Falsos negativos	d Correctos negativos

Las tablas de contingencia se utilizan para analizar la relación entre dos o más variables categóricas (en este caso las variables son el pronóstico y la observación). Es la versión análoga de una gráfica de dispersión utilizada para analizar la relación de dos variables continuas.

Un pronóstico categórico es aquel en donde se registra la ocurrencia o la no ocurrencia de un evento en específico. Dentro de la tabla de contingencia hay cuatro posibilidades; los valores de la tabla se obtienen al contar el número de veces que cada combinación posible ocurrió.

Una vez llenada la tabla, se puede pasar a calcular las medidas de calidad para la variable categórica que queramos validar. Dichas medidas se describen a continuación.

Sesgo: Esta medida de confianza se define como la razón del número total de veces en que el evento fue pronosticado sobre el número de veces en que el evento fue observado.

$$S = \frac{a + b}{a + c} \quad (2.5)$$

Los valores que esta variable puede tomar van de 0 a $+\infty$, donde el valor deseable es $S=1$, lo cual significa que los eventos fueron pronosticados tan a menudo como se observaron. En cambio, cuando $S < 1$, el modelo subpronostica las observaciones, mientras que si $S > 1$, el modelo sobrepronostica las observaciones.

Probabilidad de Detección (PD) y Proporción Correcta (PC): La PD es la razón de las veces en que el evento fue correctamente pronosticado entre las veces en las que el evento fue observado.

$$PD = \frac{a}{a + c} \quad (2.6)$$

Su rango de valores va desde 0 hasta 1, donde 1 es un valor perfecto; es decir, todos los pronósticos de ocurrencia fueron adecuados. Debido a que la fórmula para obtener la PD incluye los errores ζ no las falsas alarmas "b", esta medida es sensible solo a los errores y no a las falsas alarmas.

Por otro lado, la Proporción Correcta (PC) es como la PD pero considera ambas categorías (aciertos y correctos negativos).

$$PC = \frac{a + d}{n} \quad (2.7)$$

Esta es la medida más simple de exactitud, la cual calcula el porcentaje correcto para todos los pronósticos. El mejor valor posible es 1, el peor es 0. Debido a que esta medida le da el mismo peso a los pronósticos donde sí ocurrió el evento y a los pronósticos en donde no ocurrió, la medida se podría inflar por los pronósticos "no.^{en} casos donde el pronóstico "sí" sea muy raro. Para tratar este problema, fue creado el Puntaje de Amenaza (PA).

Puntaje de Amenaza (PA): El PA mide la exactitud del pronóstico. Es una medida más balanceada porque toma en cuenta las falsas alarmas y los errores. Sus valores de igual manera van del 0 al 1, donde el mejor valor posible es 1.

$$PA = \frac{a}{a + b + c} \quad (2.8)$$

Razón de Falsa Alarma (RFA): Medida de confianza y resolución. Es la proporción de los eventos pronosticados que resultaron ser falsas alarmas. Para pronósticos con muy alta confiabilidad, es preferible tener valores muy pequeños, mientras que un valor de 1 es el peor valor posible.

$$RFA = \frac{b}{a + b} \quad (2.9)$$

Probabilidad de Falsa Detección (PFD): Finalmente, la PFD representa la proporción de los pronósticos que resultaron en falsa alarma entre el total de no ocurrencia del evento. Toma un valor cercano a cero cuando el pronóstico es perfecto y no hay falsas alarmas.

$$PFD = \frac{b}{b+d} \quad (2.10)$$

Capítulo 3

Métodos

3.1. El modelo SLEUTH

La calibración y validación del modelo SLEUTH, así como la generación del escenario utilizado en este trabajo, se realizó por parte de investigadores del Laboratorio Nacional de Ciencias de la Sostenibilidad (LANCIS) del Instituto de Ecología, UNAM. La metodología que se utilizó se describe a continuación.

Para generar escenarios de urbanización, fue necesario dividir la región de estudio en subregiones similares y posteriormente, extenderlas de modo tal que se superpongan entre sí. Con las subregiones así definidas, el modelo de crecimiento urbano se calibra para cada una. Posterior a la calibración, se pueden empezar a generar proyecciones a futuro en cada una de ellas y, finalmente, los resultados se unen en un mapa regional de urbanización.

Para subdividir la región de la Cuenca de México, se consultó a un experto en urbanismo que, con base en su conocimiento de la zona, su historia y sus procesos, determinó 13 subregiones (Figura 3.1). Además, como parte de los insumos necesarios se descargaron capas geográficas enlistadas la tabla A.1.

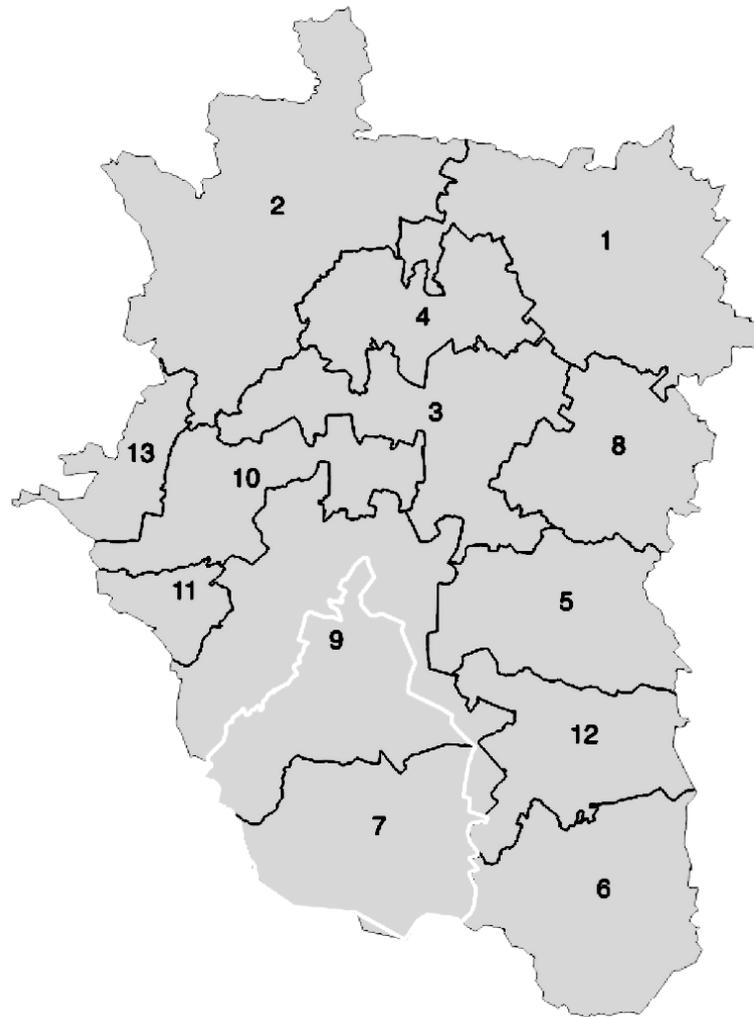


FIGURA 3.1: Trece subregiones definidas en la Cuenca de México para la calibración del modelo SLEUTH.

3.1.1. Calibración

El proceso de calibración consiste en tres etapas en las que se va refinando el ajuste del modelo a los patrones observados mediante la variación de sus cinco parámetros:

- **Coefficiente de dispersión (Diff):** Determina el crecimiento espontáneo e influye en el crecimiento influenciado por carreteras.
- **Coefficiente de reproducción (Brd):** Determina cuándo los píxeles adyacentes a un píxel de crecimiento espontáneo se urbanizarán e influye en el crecimiento influenciado por carreteras.
- **Coefficiente de propagación (Sprd):** Determina el crecimiento adyacente a la urbanización consolidada.

- **Coefficiente de pendiente (Slp):** Es factor determinante en los cuatro tipos de crecimiento
- **Coefficiente gravitatorio de caminos (RG):** Junto con el coeficiente de dispersión y el coeficiente de reproducción, determina el crecimiento influenciado por carreteras.

El nivel de ajuste del modelo a los datos observados se mide mediante una métrica multifactorial que se denomina *Optimum Sleuth Metric* (OSM) y es el resultado de un análisis exhaustivo de una diversidad de métricas (Dietzel y Clarke, 2007). La métrica OSM toma valores entre 0 y 1. Entre más cercana a 1, mejor es el ajuste.

En la tabla 3.1 se muestran los valores obtenidos para cada uno de los cinco parámetros, así como el OSM para la región entera y para cada subregión respectivamente. Al calibrar el modelo para toda la región, el nivel de ajuste obtuvo un valor muy bajo ($OSM = 0.2$). Este valor indica que el nivel de ajuste del modelo a los datos históricos es muy bajo. Una posible razón por la que el ajuste del modelo es tan pobre (a escala regional) es por la heterogeneidad espacial en la dinámica de crecimiento. En cambio, al calcular cada una de estas métricas para cada subregión, el nivel de ajuste del modelo mejoró con respecto a la calibración regional (a excepción de las subregiones 1, 10 y 12). Dos de las 13 subregiones no presentan urbanización en los años analizados por lo que se excluyeron del análisis.

Por lo tanto, se puede observar que al calibrar para toda la región, la predicción de crecimiento urbano es homogénea; mientras que al calibrar por subregiones, se manifiesta la heterogeneidad espacial del fenómeno en las predicciones.

TABLA 3.1: Parámetros del mejor ajuste y métrica de ajuste. Diff: Coeficiente de dispersión, Brd: Coeficiente de reproducción, Sprd: Coeficiente de propagación, Slp: Coeficiente de pendiente, RG: Coeficiente gravitatorio de caminos y OSM: *Optimum SLEUTH Metric*

Región	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG	OSM
Cuenca de México	1	4	99	54	36	0.20
Subregión1	1	62	74	18	1	0.15
Subregión 2	1	75	87	18	25	0.77
Subregión 3	59	25	25	62	25	0.44
Subregión 4	75	25	1	48	25	0.68
Subregión 5	1	75	75	24	95	0.65
Subregión 6	1	61	62	6	100	0.66
Subregión 7	6	43	71	50	100	0.58
Subregión 8	1	18	72	18	75	0.56
Subregión 9	64	25	58	40	16	0.62
Subregión 10	81	100	25	30	1	0.24
Subregión 12	2	81	75	18	99	0.34

3.1.2. Proyección de crecimiento urbano al año 2060

Dentro de 41 años exactamente estaremos viviendo en el 2060. Cuatro décadas al futuro pueden parecer mucho, pero en términos de políticas públicas, solo corresponde a cinco cambios de gobierno. La infraestructura que se construya en la actualidad, así como el lugar en donde se construya, seguramente perdurará hasta el 2060. De modo que, las decisiones que se tomen en la actualidad, influirán en el rumbo que el crecimiento urbano decida tomar.

En la Tabla 3.2 se describen cada una de las capas que se usaron para crear el escenario Sin Restricción. En la creación de un escenario, el usuario puede modificar la capa exclusión en función de lo que se está buscando proyectar, ya que dicha capa establece las condiciones respecto a la libertad que tiene la zona urbana de expandirse. Nuestro escenario establece que la zona urbana no tiene restricciones para expandirse; es decir que, no existen límites (ni físicos, ni legales) para que un suelo que actualmente no es de tipo urbano (como ANP, SC o cuerpos de agua), eventualmente se urbanice. Si quisiéramos, por ejemplo, establecer restricciones en cuerpos de agua, entonces la capa de exclusión tendría que modificarse agregando un valor de 100% de exclusión a los cuerpos de agua (o cualquier otro porcentaje con el que deseemos excluir al objeto del proceso de urbanización). La modificación de los porcentajes que reflejan el nivel de exclusión son muy importantes pues podrían reflejar las diversas políticas públicas que se apliquen, o bien, para medir la efectividad de las políticas

TABLA 3.2: Descripción de los datos que se utilizaron para cada una de las capas que necesita el modelo SLEUTH para realizar proyecciones.

Capas geográficas	Descripción
Capas de urbanización	Crecimiento histórico: Datos históricos de las décadas de 1980, 1990 y 2000.
Capa de exclusión	Suelo de Conservación, Áreas Naturales Protegidas y cuerpos de agua.
Capas de vías de comunicación	Crecimiento histórico (calles, carreteras): Datos históricos de las décadas de 1980, 1990 y 2000.
Capas de uso de suelo	Cambio histórico: Datos históricos de las décadas de 1980, 1990 y 2000.
Capa de pendiente	Derivado de un modelo de elevación digital. La pendiente debe de ser expresada en porcentaje.
Capa de sombras	Derivado de un modelo de elevación digital. Es una imagen en escala de grises.

públicas actuales.

3.2. El modelo WRF

La configuración, simulación y proyección se realizaron por investigadores del Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM. Los detalles de las simulaciones numéricas se describen a continuación.

Se utilizó la versión 3.9.1 del modelo WRF, mismo que fue inicializado con datos de presión y superficie del CSFR (*Climate Forecast System Reanalysis*) versión 2 cada 6 horas, con resoluciones de 0.5x0.5 y 0.205x0.204 grados respectivamente. La configuración consistió en 3 dominios (Figura 3.2). El dominio 1 (dominio exterior) tuvo una resolución de 15 km; el dominio 2 (dominio intermedio) de 5 km; y el dominio 3 (dominio interior) de 1km. Este último abarca tanto a la ZMCM como a varias metrópolis circundantes como Toluca (ZMVT), Tula-Tepeji y Pachuca, Puebla-Tlaxcala (ZMPT), Tlaxcala-Apizaco y la de Cuernavaca-Cuautla. Las simulaciones utilizaron 35 niveles verticales (Figura 3.3) que siguen el terreno, mientras que la presión superior se configuró a 50 hPa. El paso de tiempo fue configurado en 60 s. El *Análisis Nudging* (AN) es aplicado a la temperatura, a la proporción de mezcla de vapor de agua y a los componentes del viento horizontal con un coeficiente G de 3E-4 (Stauffer et al. 1991; Deng et al. 2007) para todas las variables. Este corresponde a una escala

de tiempo de aproximadamente una hora (Deng et al. 2007; Spero et al. 2014). El AN se restringe de la *Planetary Boundary Layer* (PBL) y de los 13 niveles más cercanos a la superficie (línea roja representa el nivel 13 del modelo), esto con el objetivo de que los procesos de mesoescala cercanos a la superficie no se vean afectados por el AN (Spero et al. 2014). Finalmente, el AN se realiza durante toda la simulación y en los tres dominios simulados.

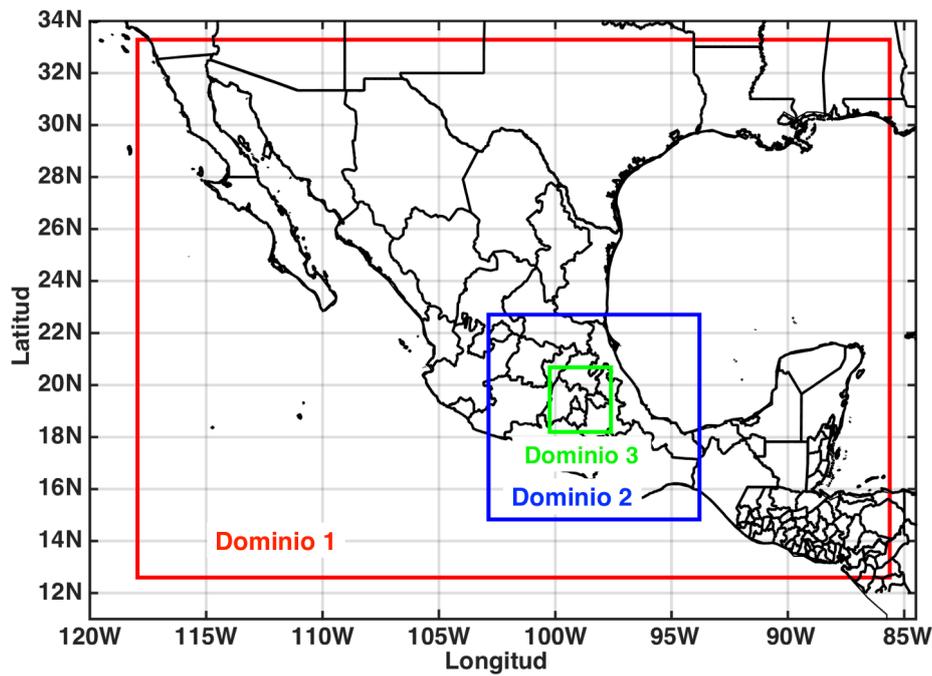


FIGURA 3.2: Dominios utilizados en WRF

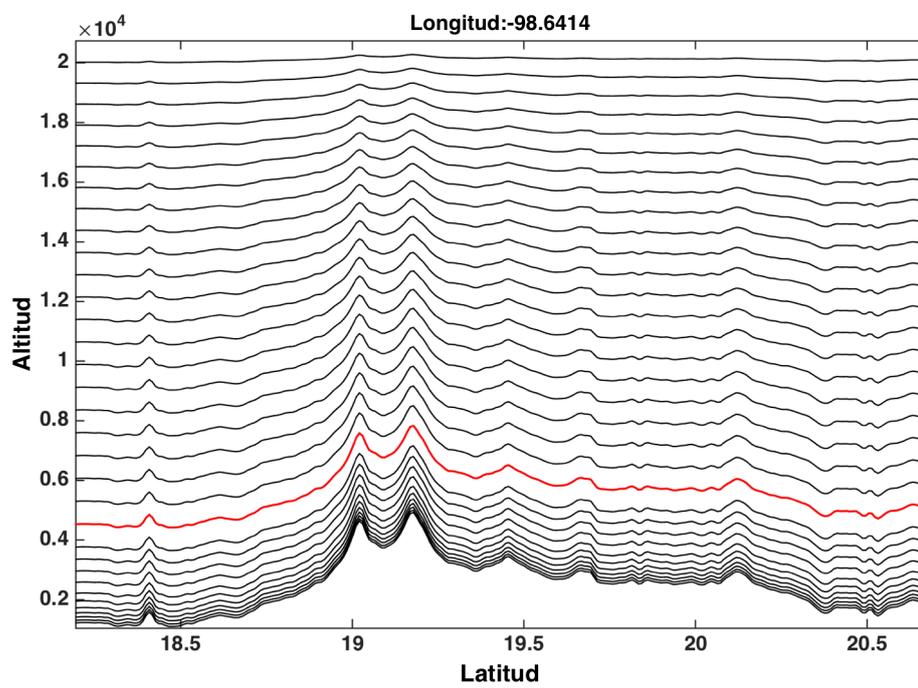


FIGURA 3.3: Niveles verticales para la simulación realizada por WRF del año control 2013 en la ZMCM.

TABLA 3.3: Configuración para la física del modelo WRF.

Atributo	
Periodo de simulación	Temporada de lluvias de una semana del mes de julio del 2013 y 2060.
Versión del modelo	3.9.1
Núcleo	ARW
Condiciones iniciales y de frontera	CFSRv2 cada 6 horas
Niveles verticales	35
Paso de tiempo	60 s y 90 s
Cúmulus	Kain-Fritsch para dominio 1 y 2
Microfísica	Thompson graupel scheme (2-moment scheme in V3.1)
Radiación de onda larga	Esquema RRTMG (Rapid Radiatve Transfer Model)
Radiación de onda corta	Esquema RRTMG (Rapid Radiatve Transfer Model)
Capa límite	YSU (Yonsei University)
Land Surface Model (LSM)	Unified Noah
Interacción	One-way
Proyección	Mercator
Land Use Land Cover (LULC)	MODIS (21 clases con lagos)
Dominio 1	15 km
Dominio 2	5 km
Dominio 3	1 km
Salidas	Dom1: cada 3 horas Dom 2 y 3: cada hora

3.2.1. Validación del modelo WRF

Se seleccionó el año 2013 como control para la simulación con el modelo WRF debido a la disponibilidad de datos históricos provenientes de las Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAS) del Servicio Meteorológico Nacional Mexicano (SMN). Posteriormente, se procedió a elegir un periodo dentro del mismo año. Con base en los datos de precipitación mensual de la región hidrológico-administrativa (RHA) a la que pertenece la ZMCM (Figura 3.4) se decidió simular el mes de julio por ser parte de la temporada de lluvias, así como por ser el segundo mes (después de septiembre) en el que mayor precipitación se registró. El periodo de simulación comenzó el 25 de junio del 2013 (contemplando seis días de *spin-up*) y concluyó a las 00:00 UTC del 8 de agosto de 2013. Los datos considerados para la validación corresponden a los del periodo que comienza a las 00:00 UTC del 1 de julio de 2013 hasta los de las 23:00 UTC del 31 de julio de 2013. Del total de las estaciones que estaban dentro de los límites del dominio 3, solamente se seleccionaron 21 por el porcentaje de datos, tanto de temperatura como de precipitación, con el que contaban para el periodo de simulación seleccionado (12 de las estaciones tuvieron el 100 % de los datos, mientras que el resto tuvieron entre el 98 % y 99 %) (Figura 3.5).

En el caso de la variable de temperatura observada, se extrajeron los valores correspondientes a cada hora. En el caso de la precipitación, debido a que la salida de WRF presenta la precipitación acumulada horaria y las estaciones reportan la precipitación acumulada cada 10 min, se hizo una agregación de la precipitación observada para obtener la acumulada cada hora. La cantidad de datos final para el mes de validación fue de 744 datos por variable, por estación.

Los diferentes tipos de datos ameritan el uso de diferentes esquemas de validación. Por un lado, La variable temperatura es de tipo continuo (grados centígrados), por lo que el esquema de validación que utilizamos para esta variable es el que corresponde a variables continuas. En contraste, la variable de precipitación puede ser considerada de tipo continuo cuando se trata de la cantidad (precipitación acumulada) y de tipo discreto o categórica cuando el pronóstico se delimita en dos categorías: 1) Sí hubo precipitación y 2) No hubo precipitación. En nuestro análisis hemos llevado a cabo la validación de esta variable desde estos dos esquemas: uno para cuando los datos son continuos y otro para cuando los datos son discretos. La validación de la precipitación como variable discreta nos permite excluir la calidad del modelo para calcular adecuadamente el volumen de precipitación acumulada y concentrarnos en la calidad del modelo

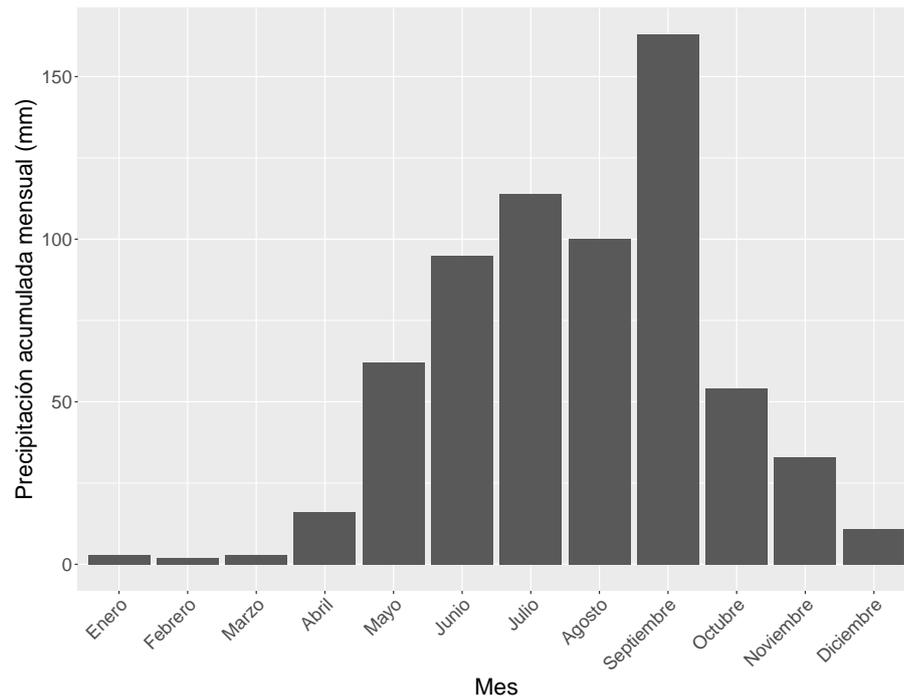


FIGURA 3.4: Precipitación mensual observada durante el año control 2013 en la región hidrológico-administrativa (RHA): Aguas del Valle de México. Fuente: Elaboración propia con datos de CONAGUA 2013.

para predecir los eventos y su distribución.

Las medidas de calidad que se aplicaron a cada variable en función del tipo de datos usados son las que se explicaron en el marco teórico (capítulo 2).

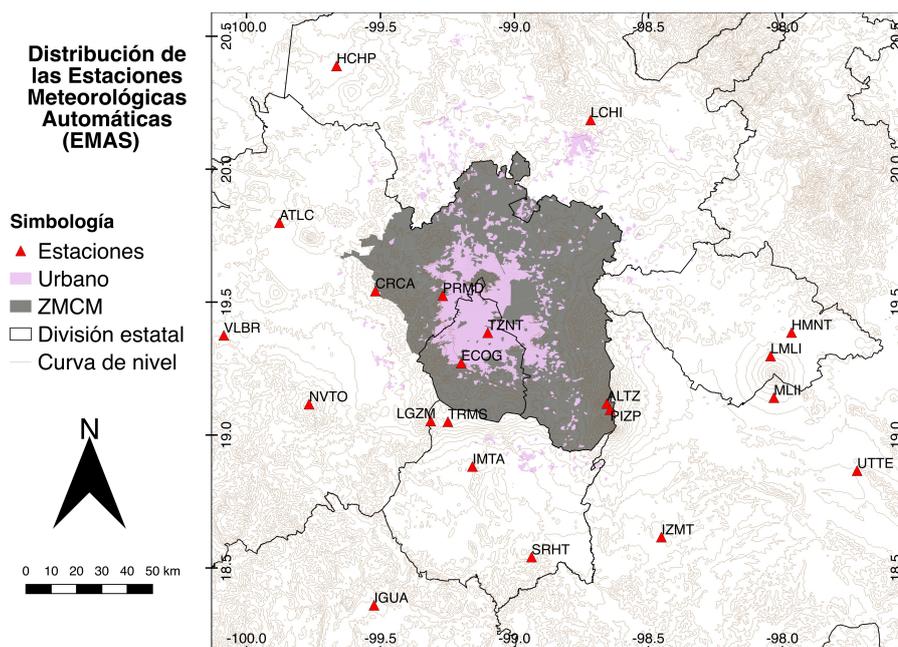


FIGURA 3.5: Distribución espacial de las Estaciones Meteorológicas Automáticas en la región del dominio 3 de WRF.

3.2.2. Simulación numérica con escenario urbano 2060:

La simulación para el año 2060 se realizó únicamente para la primer semana de julio (1ro a 7 de julio del 2060) por cuestiones de costos tanto temporales como computacionales. La calibración del modelo se llevó a cabo de la misma forma en la que se modeló el año 2013 utilizado para la validación (Tabla 3.3), pero con la variación del parámetro Land Use Land Change (LULC) para integrar el escenario Sin Restricción proyectado por SLEUTH.

3.3. Análisis de las salidas de WRF-SLEUTH:

Para analizar las salidas de ambos modelos se utilizaron los softwares de R, Matlab y QGIS. Los datos vectoriales para llevar a cabo el análisis geoespacial fueron obtenidos de herramientas de SIGs de instituciones gubernamentales. Los tablas A.1 y A.2 dentro del Apéndice (A) desglosan el origen de los datos así como una breve descripción de cada capa geográfica utilizada.

Capítulo 4

Resultados y Discusión

4.1. Validación del modelo WRF

4.1.1. Temperatura

En el Diagrama de Taylor (Figura 4.1), entre más cercanos estén los puntos de las estaciones al punto de referencia (color verde oscuro) con coeficiente de correlación y desviación estándar igual a 1, mejor será el pronóstico. En el caso de la temperatura, los resultados para la mayoría de las estaciones se concentran en una región donde el coeficiente de correlación es positivo, obteniendo en la mayoría de las estaciones valores de entre 0.8 y 0.9. Estos coeficientes de correlación nos hablan sobre el buen grado de asociación entre la temperatura simulada y la observada.

Para el caso de la desviación estándar, ninguno de los puntos de las estaciones sobrepasa, aparentemente, la desviación estándar del punto de referencia (igual a 1) de los datos observados normalizados. En su mayoría, la desviación estándar de las estaciones toma valores de entre 0.75 y 1. Solo en el caso de las estaciones LGZM, MLII y NVTO la desviación estándar es considerablemente menor. Por lo tanto, los valores del coeficiente de correlación nos hablan de una alta capacidad para capturar la variabilidad de la temperatura a lo largo del día. Por su lado, la desviación estándar obtenida de cada estación nos dice que el modelo puede estimar, en general, adecuadamente la magnitud de la temperatura.

Esta situación se ve validada por los resultados que se observan con el error cuadrático medio centrado constante (círculos verdes). El error dentro del cual caen la mayoría de las estaciones es de entre 0.3 y 0.6, a excepción de la estación CRCA y, nuevamente, la estación NVTO.

Los mapas de la Figura 4.3 muestran los errores (error medio, error medio absoluto y error cuadrático medio) de la temperatura entre los datos observados y simulados. Esta representación facilita observar la distribución espacial de los errores. El código de color va de amarillo claro, el cual corresponde a errores más pequeños o en algunos casos nulo; a rojo oscuro que corresponde a errores más altos).

El error medio (sesgo) de las estaciones va desde -3.77 a 2.62. Las estaciones con un sesgo más cercano a cero se localizan más lejos de la ZMCM, como HCHP, LCHI, IZMT, LMLI y ATLC. Las estaciones con un mayor sesgo están más cerca de la ZMCM (CRCA, PRMD, TZNT, PIZP, ALTZ), a excepción de HMNT y MLII (Figura 4.3).

Las estaciones con errores medios absolutos altos, respecto a las demás estaciones son NVTO, CRCA, PIZP, y PRMD. Nuevamente estas estaciones están concentradas en la ZMCM, a excepción de NVTO. Sin embargo, todas las estaciones presentaron errores.

El mapa del RMSE (raíz cuadrada del ECM) (Figura 4.3, al igual que el del error medio absoluto, muestra que NVTO, CRCA, PIZP, PRMD, MLII son las estaciones con los valores más altos. Al mostrar directamente los valores del RMSE, en lugar de los del ECM, podemos comparar de forma inmediata con los valores del EMA y hacer un diagnóstico sobre la variabilidad de los errores dentro del pronóstico. Entre mayor sea la diferencia entre el RMSE y el EMA, mayor será la varianza de los errores individuales. La diferencia del valor mínimo de cada error es de 0.39, mientras que la diferencia del valor máximo de los errores es de 0.28. De esta manera, concluimos que, la magnitud de los errores no varía demasiado a lo largo de cada estación y por lo tanto, la simulación tiene la habilidad de aproximar las magnitudes de las temperaturas y la de los valores extremos.

En general, la estación del Nevado de Toluca (NVTO) es la que presenta los mayores errores y el mayor desfase en la serie de tiempo. Dicha serie de tiempo también concuerda con lo que se observa en el Diagrama de Taylor, en el que NVTO obtuvo una desviación estándar menor a la referencia y un valor alto del error medio, lo que significa una subestimación del rango de las observaciones (Figura B.5).

Las estaciones que destacaron en el análisis por tener los mayores errores (4.3), se encuentran dentro de la misma latitud (entre los 19 y 19.7 grados), la cual corresponde también a la planicie central donde se localiza la ZMCM.

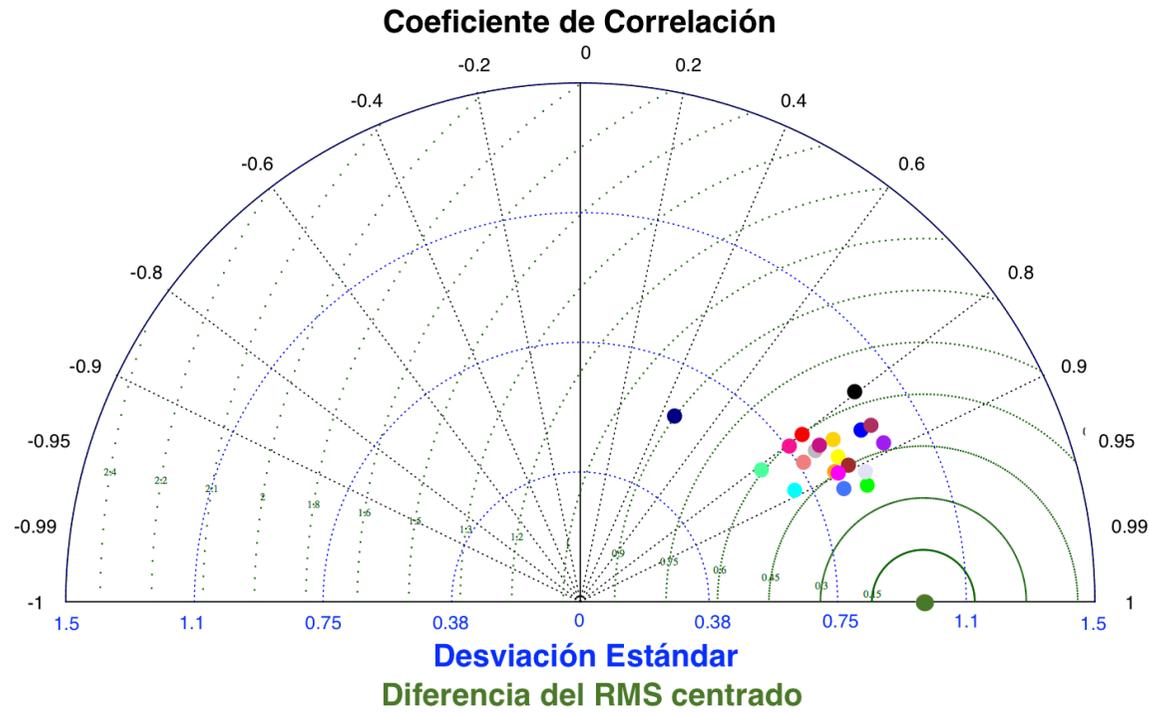


FIGURA 4.1: Diagrama que representa el Coeficiente de Correlación (negro), la Desviación Estándar (azul) y la diferencia del error cuadrático medio centrado (verde) de la temperatura simulada en cada estación meteorológica con respecto a las temperatura observada (punto de referencia (verde oscuro): con correlación y desviación igual a 1 diferencia y diferencia del RMS centrado igual a 0).

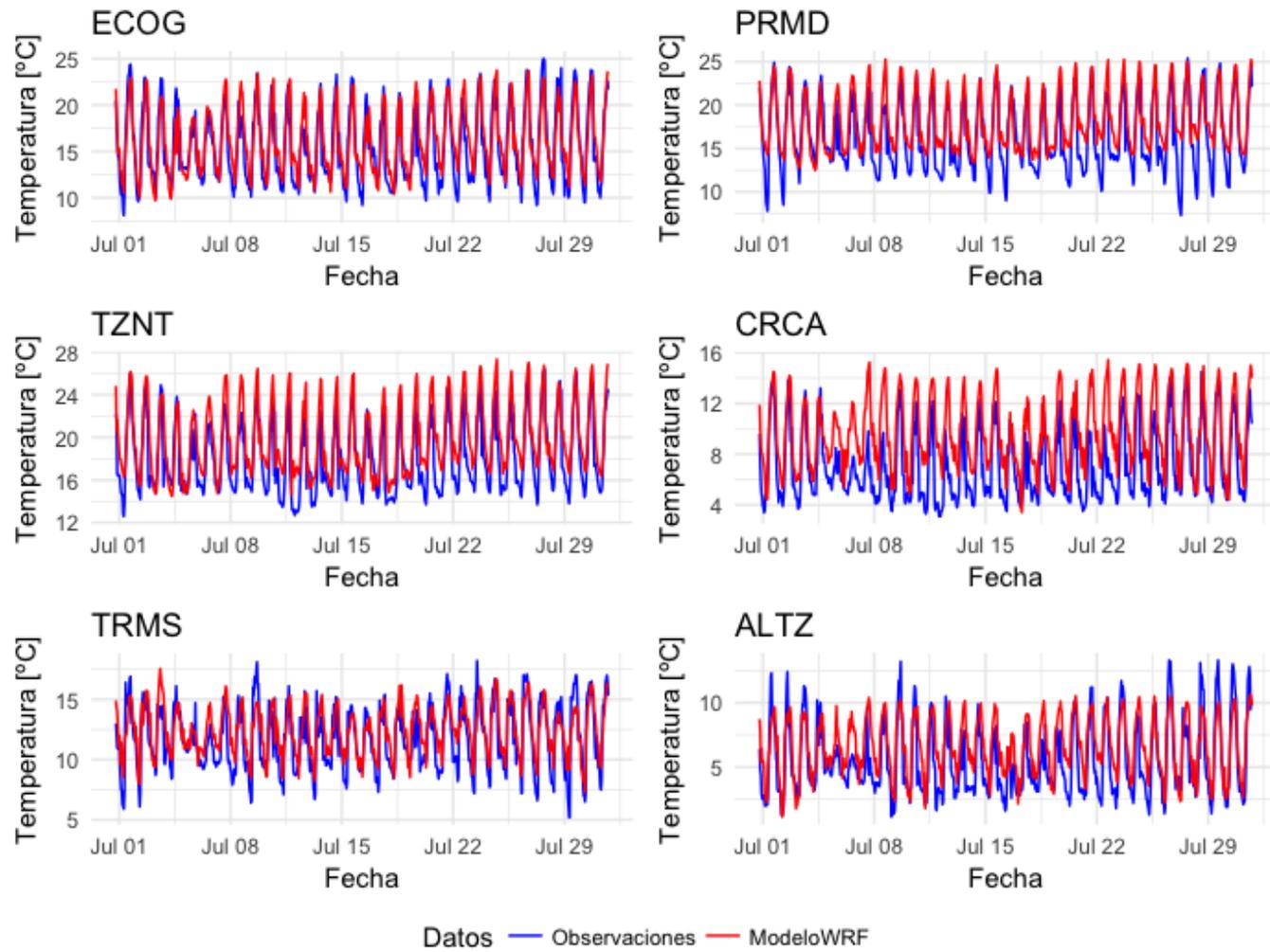


FIGURA 4.2: Series de tiempo de la temperatura para el mes de validación (1ro al 31 de julio de 2013) de la simulación del modelo WRF para la ZMCM.

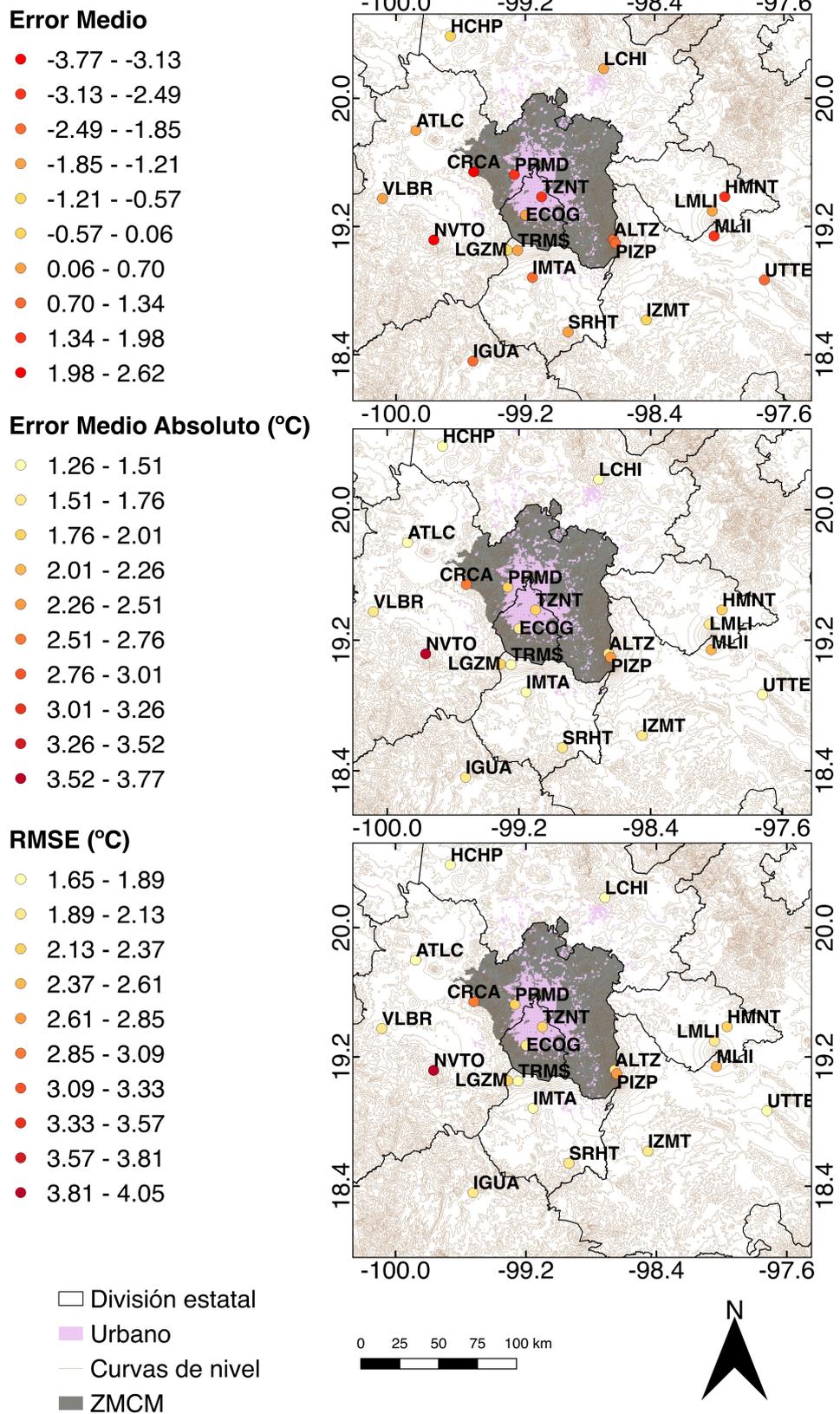


FIGURA 4.3: Error medio, error medio absoluto y RMSE calculados entre los datos observados y los simulados para cada estación de la variable temperatura obtenidos en cada estación de la ZMCM para el mes de validación (1ro al 31 dde julio de 2013).

4.1.2. Precipitación

Los resultados de la validación de la precipitación como variable categórica se muestran en las Tabla de Contingencia 4.2. El cálculo de las métricas de calidad se muestran en la Tabla 4.2. Los resultados demuestran que el modelo tiene una mayor capacidad prediciendo los eventos diariamente que por hora. Para todas las medidas, la precipitación por día obtuvo mejores resultados, a excepción de la PFD, lo cual nos habla de que el modelo emite una importante cantidad de falsas alarmas.

A continuación se hace un análisis desglosado de los puntajes obtenidos por métrica:

TABLA 4.1: Tablas de contingencia para validar las simulaciones de los eventos de precipitación.

(A) Eventos de precipitación por hora.				(B) Eventos de precipitación por día.			
		Observado				Observado	
		Sí	No			Sí	No
Pronóstico	Sí	1063	3175	Pronóstico	Sí	390	160
	No	705	10681		No	27	74

TABLA 4.2: Métricas de calidad obtenidas de las tablas de contingencia (4.1) para validar la cantidad de eventos de precipitación simulada por el modelo WRF del 1 al 31 de julio de 2013.

Métrica	Precipitación horaria	Precipitación diaria
Proporción Correcta	0.75	0.71
Puntaje de Amenaza	0.22	0.68
Sesgo	2.40	1.32
Probabilidad de Detección	0.60	0.94
Probabilidad de Falsa Detección	0.23	0.68
Razón de Falsa Alarma	0.75	0.30

Proporción Correcta: Ambos casos obtuvieron un valor alto (0.7), teniendo en cuenta que el mejor valor posible es 1. Dicho resultado muestra la capacidad de predecir eventos de precipitación.

Puntaje de Amenaza: El valor de la precipitación diaria es mejor que el de la horaria pues se acerca al mejor posible que es 1.

Sesgo: En ambos casos la precipitación ha sido sobrepronosticada ($S > 1$), sin embargo dicho sobrepronóstico es menor para la precipitación diaria. Este resultado también es validado con lo que se observa en las series de tiempo.

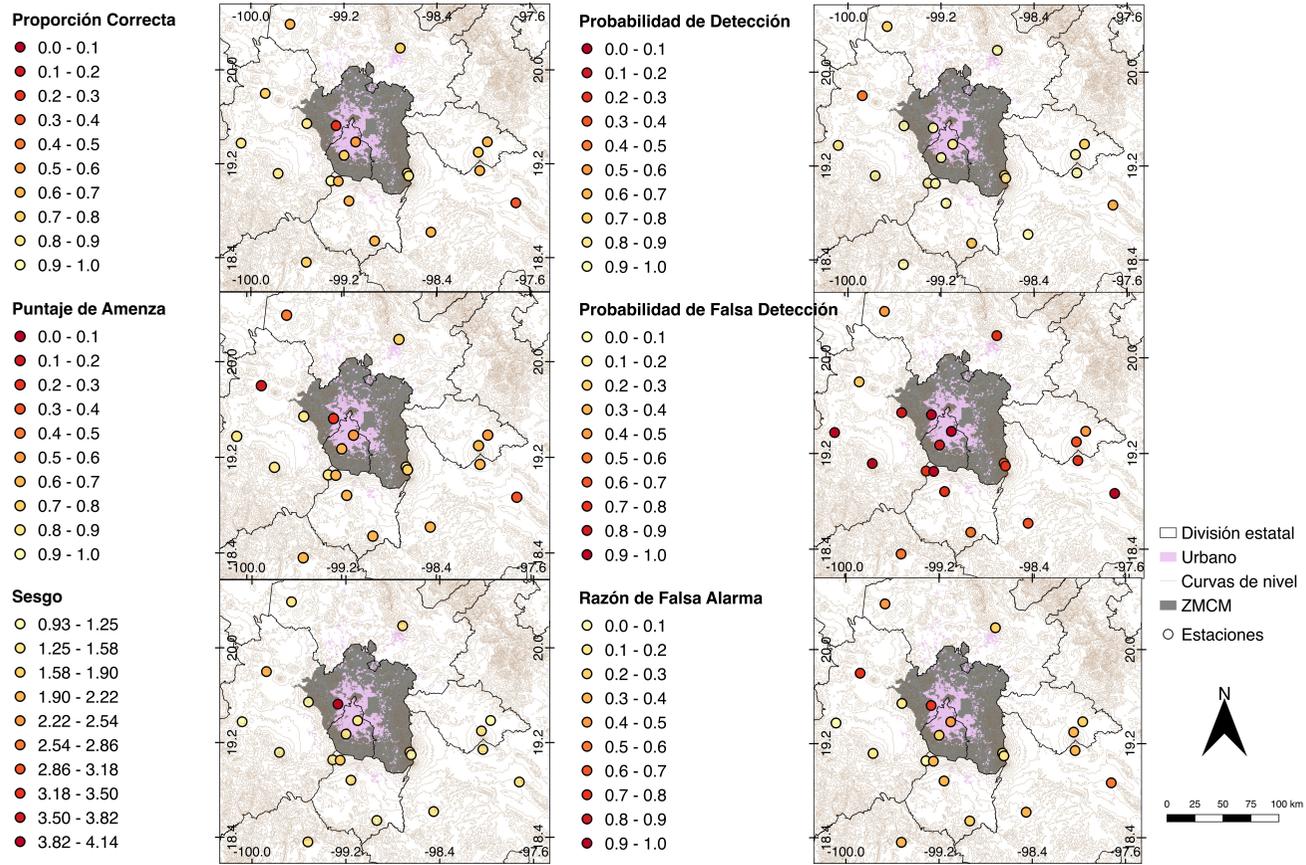


FIGURA 4.4: Métricas de calidad por estación dentro del dominio para la variable de precipitación.

Probabilidad de Detección: Cuando es cercano a 1 significa que casi todos los pronósticos de ocurrencia fueron adecuados, por lo que la precipitación acumulada diaria (0.9) fue un poco más adecuada que la horaria (0.6).

Sesgo: En ambos casos la precipitación ha sido sobrepronosticada ($S > 1$), sin embargo dicho sobrepronóstico es menor para la precipitación diaria.

Probabilidad de Falsa Detección: Esta es la única medida de calidad que resultó mejor para los valores de la precipitación horaria, ya que un valor cercano a cero significa que el pronóstico es perfecto y no hay falsas alarmas; mientras que para la diaria obtuvimos un valor ligeramente alto, lo cual se traduce en que el pronóstico emite una cantidad importante de falsas alarmas.

Razón de Falsa Alarma: Esta medida nos dice que el pronóstico de la precipitación diaria es confiable pues tiende a acercarse al cero (0.29); mientras que el pronóstico de la precipitación horaria tiende más hacia el 1, el cual es el peor valor posible.

Los resultados anteriores concuerdan con lo que esperaríamos de un modelo como WRF, ya que hacer predicciones a escala temporal de una hora es mucho más complicado que a nivel diario. Con base en estos resultados generales sobre la buena capacidad del modelo para predecir eventos y no eventos de precipitación diaria, decidimos basar el análisis de cada estación en esta escala temporal. Los resultados de las métricas obtenidas por estación se muestran en los mapas de la Figura 4.4.

Proporción Correcta: De las tres estaciones con los peores puntajes ($PC < 0.5$), dos se encuentran dentro de la zona urbana y una en el extremo este del dominio. Las estaciones con los mejores resultados ($PC > 0.8$), se localizan justo en la periferia de la ZMCM.

Puntaje de Amenaza: Los resultados para el PA son muy parecidos a los obtenidos de la PC. La única estación que se agrega a la lista de los que obtuvieron los peores resultados es ATLC, localizada al noroeste de la ZMCM.

Sesgo: En el caso del sesgo, la mayoría de las estaciones tienen valores que sobrepronostican los eventos de precipitación. Las estaciones que resaltan por tener un sesgo igual a 1, i.e. pronóstico sin sesgo, están concentradas hacia el sur de la zona urbana. Las estaciones con los valores más altos son PRMD y ATLC, ambas localizadas al noroeste, pero la primera en la periferia de la zona urbana y la segunda en la periferia de la ZMCM.

Probabilidad de Detección: El mapa de la PD muestra que las estaciones a los extremos este y oeste respectivamente presentan la PD más baja de todas las estaciones. En cambio, estaciones localizadas en su mayoría en el centro y periferia de la ZMCM tienen $PD = 1$, lo cual representa una calificación perfecta, o en otras palabras, que el modelo tiene una alta probabilidad de detectar eventos de precipitación.

Probabilidad de Falsa Detección: Por su lado, la PFD muestra una historia diferente. Al contrario de resultados anteriores, la estación ATLC es en donde se presentaron la menor cantidad de falsas alarmas, mientras que para estaciones como NVTO, VLBR y TZNT (que hasta ahorita habían obtenido buenos resultados) la PFD fue igual a 1; es decir, que siempre hubo falsas alarmas. Esta medida nos hace ver la importancia de tomar varias medidas en cuenta para poder hacer un análisis más integral.

Razón de Falsa Alarma: Finalmente, para la RFA obtuvimos valores que se asemejan a lo que obtuvimos en la tabla general (??). La mayoría de las estaciones tienen valores menores a 0.5, solo PRMD, ATLC y UTTE tiene valores más cercanos a 1.

En todo este análisis es claro que hay nombres de estaciones que destacan por tener o estar muy cerca de los peores valores posibles. En general, la estación PRMD, localizada al noroeste de la zona urbana, representa una zona donde el modelo no tiene buena capacidad de predecir los eventos de precipitación. En la serie de tiempo de la estación PRMD se puede apreciar la enorme diferencia entre las observaciones y el pronóstico. ATLC y UTTE fueron también dos estaciones que constantemente tuvieron malos puntajes. El resumen de los resultados de la precipitación acumulada como variable continua se muestran en el diagrama de Taylor (Figura 4.5). A diferencia de la temperatura, el modelo WRF no hace un buen trabajo prediciendo la cantidad de lluvia. Para este diagrama se utilizó la precipitación acumulada diaria. El coeficiente de correlación tiene valores que van desde -0.1 a 0.6, lo cual habla de una correlación bastante baja. La desviación estándar de la mayoría de los valores es mayor a la del punto de referencia ($SD = 1$); es decir, que el modelo sobrestima la cantidad de precipitación acumulada. Finalmente, la diferencia del error cuadrático medio centrado presenta valores bastante altos, que van desde 0.8 hasta 2. Por esta razón, no se prosiguió a hacer mapas que muestren la distribución de los errores.

Por último, cabe destacar que los resultados son muy diferentes para la precipitación que para la temperatura, ya que en cada esquema de validación las

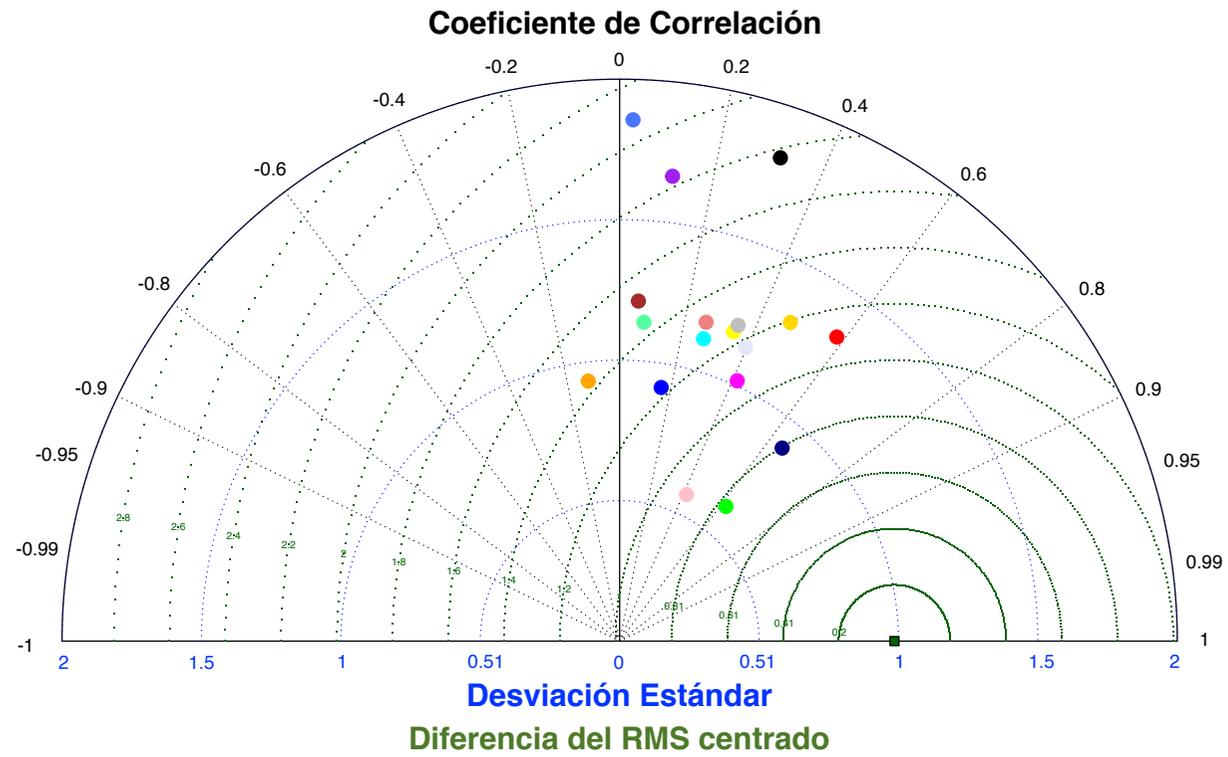


FIGURA 4.5: Diagrama que representa el Coeficiente de Correlación (negro), la Desviación Estándar (azul) y la diferencia del error cuadrático medio centrado (verde) de la precipitación acumulada simulada en cada estación meteorológica con respecto a las temperatura observada (punto de referencia (verde oscuro): con correlación y desviación igual a 1 diferencia y diferencia del RMS centrado igual a 0).

estaciones que presentan los peores o mejores resultados son diferentes para cada variable. Por ejemplo, NVTO tuvo los mayores errores en la validación de la temperatura, pero en la validación de la precipitación fue de las estaciones mejor calificadas¹.

4.2. Proyección de crecimiento urbano al 2060

4.2.1. SLEUTH: expansión de la urbanización y posibles cambios de uso de suelo.

El tamaño del área urbana al año 2014, según la serie VI del INEGI, era de 2,287 km². Para el escenario Sin Restricción, el modelo SLEUTH proyectó que para el año 2060, el área urbana podría alcanzar un tamaño de 6,459 km². Esto equivale a un porcentaje de cambio respecto al año 2014, del 282 % (Figura 4.7). Dicha expansión nos da una idea de la presión que la zona urbana está ejerciendo sobre la periferia, tal como se ha visto históricamente (Vieyra, Méndez-Lemus y Hernández, 2018).

El escenario que hemos utilizado para la simulación de nuestras variables meteorológicas es alarmante, no necesariamente por el crecimiento a casi el triple del tamaño actual, sino por el cambio de uso de suelo que esta expansión implicaría. En el pasado, la expansión de la zona urbana significó impactos negativos para la cuenca por la desecación de lagos y el consecuente cambio de uso de suelo (Jazcilevich *et al.*, 2000). Con la proyección al 2060, podríamos presenciar impactos igual de negativos pero por la destrucción de los bosques que el SC y las ANP albergan. En la Figura 2.3 observábamos que a pesar de que la cuenca alguna vez estuvo ocupada por un sistema de lagos, hoy en día la cantidad de cuerpos de agua es mínima. Tanto los árboles como los cuerpos de agua son esenciales en la regulación de la temperatura, por lo que la ausencia de agua en la ZMCM aumenta la presión en el Suelo de Conservación y en las ANP's como principales proveedores de servicios ambientales. Aunque la agricultura ya es un tipo de uso de suelo que no provee la misma calidad y cantidad de servicios ecosistémicos como lo hacen los ecosistemas naturales como los bosques, lo cierto es que es preferible el uso de suelo agrícola sobre el uso de suelo urbano. El suelo urbano al estar cubierto por concreto trae gran variedad de consecuencias, por ejemplo: no se filtra el agua al subsuelo, y por ende, el acuífero no se recarga;

¹Las series de tiempo para todas las estaciones se encuentran en el apéndice B

la escorrentía aumenta, causando inundaciones; la reducción de la vegetación y su reemplazo por suelo urbano incrementa el efecto de la isla de calor.

Haciendo un análisis geospacial hemos obtenido el porcentaje de cada tipo de uso de suelo que será reemplazado por el uso de suelo urbano en el escenario derivado del modelo (Figura 4.6). El suelo que actualmente está destinado a la agricultura es el que presenta el mayor cambio (73 % del total del suelo que se convertirá en urbano para el 2060 es agrícola). Esta proyección no es sorprendente pues como detallan Foley *et al.* (2005), el uso de suelo que le antecede al suelo urbano es la agricultura, y en especial la agricultura intensiva como la que predomina en el nororiente de la ciudad (hacia donde se expande la zona). Este cambio también se justifica con que la agricultura periurbana de nuestra región no es la más productiva, pues solo aporta 0.1 % al PIB nacional (INEGI, 2017b; Fernández y Vega, 2017), lo cual la hace más vulnerable no solo al abandono, sino también a la transformación del suelo, pues los pobladores se ven forzados a buscar otra actividad económica que sea mejor remunerada. Con respecto a las ANP, la zona urbana podría expandirse sobre el 4.53 % de su territorio en el caso de las estatales, y sobre el 3.53 % del territorio de las ANP federales (Figura 4.7).

De acuerdo con nuestro modelo de crecimiento urbano, la expansión de la zona urbana se dirigiría principalmente hacia el norte de la metrópoli; pero hacia el sur también se expandiría lo suficiente como para traslaparse con el SC.

Actualmente el SC representa 59 % del total del territorio de la Ciudad de México, la cual tiene una extensión de 1,493 km². A pesar de haber restricciones legales para no ocupar los 872 km² del SC, la zona urbana ya se ha expandido y en el 2014 abarcaba cerca del 9 % del SC. Suponiendo que el SC mantiene la misma extensión con la que cuenta actualmente, SLEUTH ha estimado que la zona urbana podría llegar a invadir hasta 50 % del total para el 2060.

Con cifras del último censo realizado en el 2010 por el INEGI, en el SC viven 2.2 millones de personas; esto representa 27 % de la población total de la Ciudad de México (CDMX). Esta gran cantidad de personas viven en una zona principalmente rural, lo cual significa que aunque en el futuro la población no aumente dentro de la CDMX (Figura 1.1), eventualmente las personas que ya habitan en el SC, comenzarán a demandar servicios e infraestructura que implicaría un cambio de uso de suelo como el que se ha proyectado con SLEUTH.

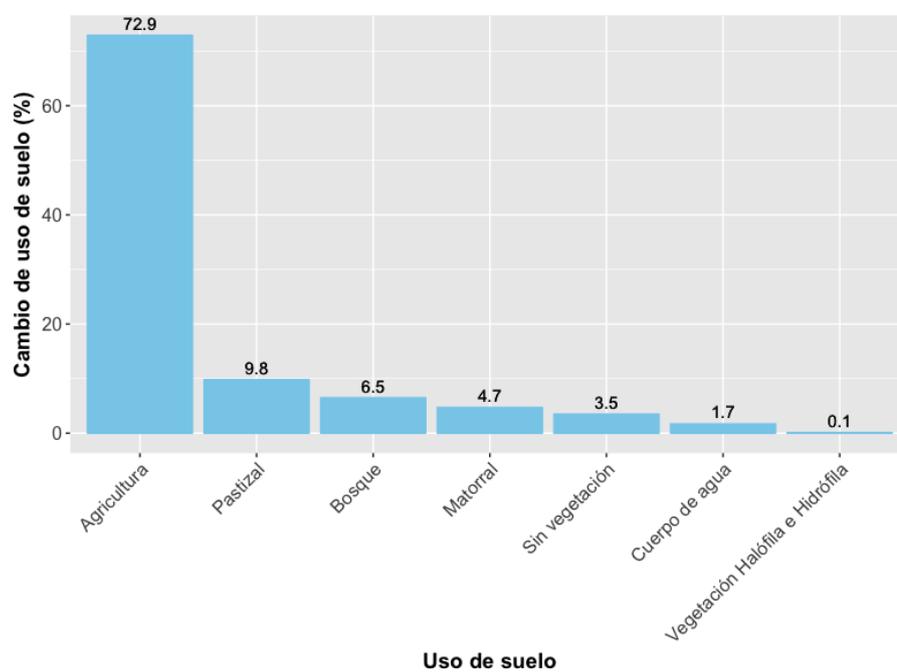


FIGURA 4.6: Porcentaje del tipo de uso de suelo que cambiará a uso de suelo urbano por la expansión de la zona urbana en el 2060 de acuerdo con la estimación de SLEUTH en la ZMCM.

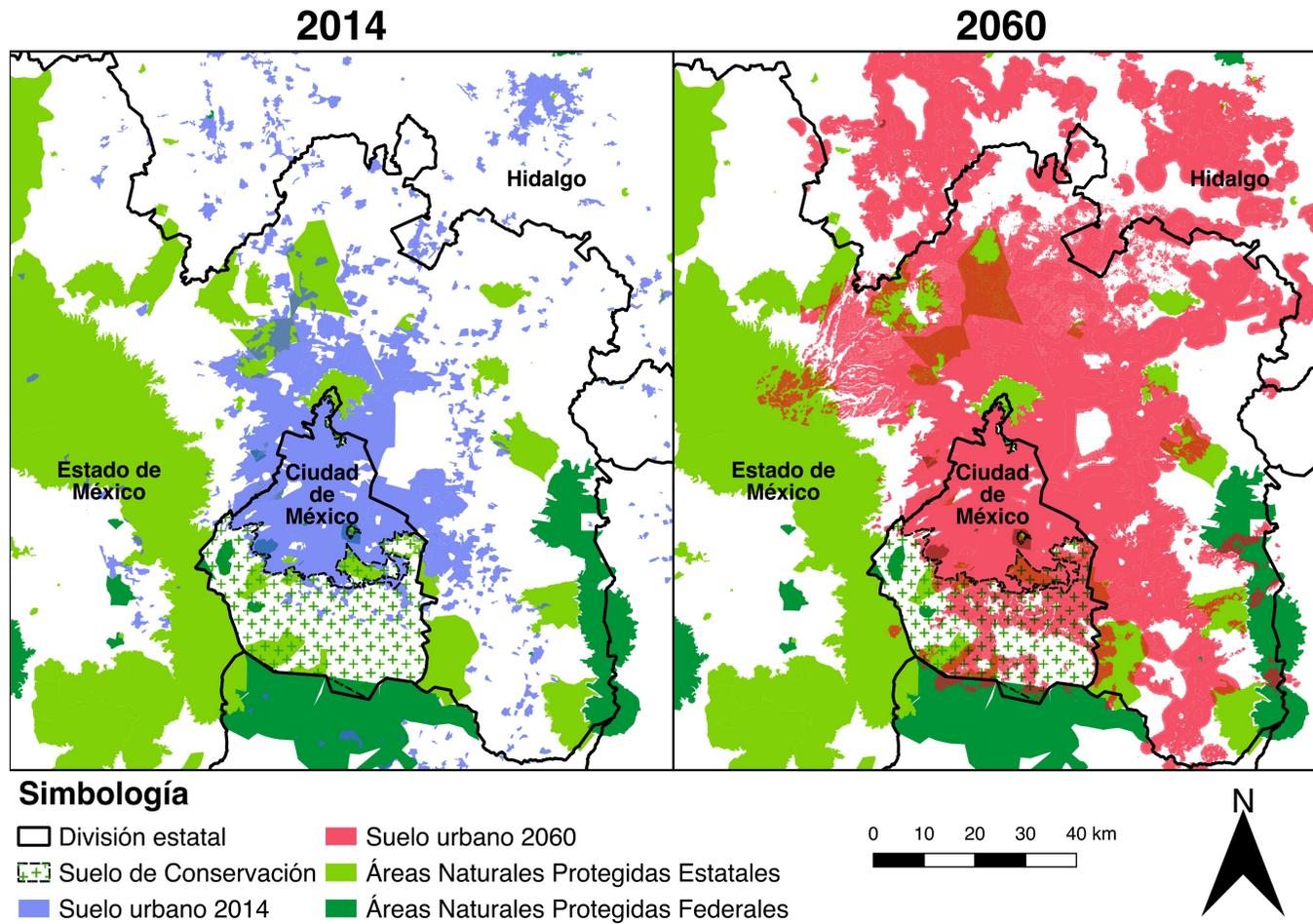


FIGURA 4.7: Expansión del área urbana sobre el Suelo de Conservación y las Áreas Naturales Protegidas

4.2.2. WRF: posibles cambios en la magnitud y distribución temporal y espacial de la temperatura y la precipitación

Con la proyección de SLEUTH sobre el área urbana a 2060, se realizó una simulación numérica y se comparó con los resultados obtenidos de la simulación de control (año 2013), que considera las condiciones actuales de urbanización. El periodo de la simulación control y la del 2060 corresponde a la primer semana de julio (de las 00 UTC del 1ro de julio, hasta las 23 UTC del 7 de julio).

Temperatura

Las series de tiempo (Figura 4.8) muestran que el ciclo diurno se mantendrá constante, alcanzando el valor mínimo entre las 7 y 8 de la mañana y el máximo entre las 3 y 4 de la tarde. Para las tres estaciones, el modelo pronostica un aumento en la temperatura media, principalmente en la estación 'Ecoguardas' (ECOG), localizada en el Ajusco, en el límite del SC y la zona urbana. Con respecto a las temperaturas máximas y mínimas, la Tabla 4.3 muestra los resultados de la magnitud de la variable para cada estación dentro de la zona urbana, donde nuevamente se aprecia que el mayor cambio sucede en la estación que su suelo se transformaría a urbano en 2060 (ECOG).

Respecto a la distribución espacial, la Figura 4.9 muestra la temperatura media para cada año respectivamente (control 2013 y pronosticado 2060). Al comparar ambos paneles (4.9a y 4.9b), concluimos que el gradiente seguirá creciendo de suroeste a noreste, independientemente de que la temperatura aumente en ciertos lugares.

La Figura 4.10 muestra que el cambio de temperatura solo sucede en donde actualmente ya es suelo urbano, pero principalmente donde se proyectó el crecimiento, con incrementos importantes en la magnitud. Al centro de la ciudad, la temperatura media superficial presenta el menor cambio con una magnitud de menos de 1°C sobre la temperatura media simulada para el 2013. El mínimo de la temperatura media en todo el dominio fue 0.2°C. En contraste, en las zonas periféricas a la ciudad central (en lo que corresponde al Suelo de Conservación y a los municipios del Estado de México e Hidalgo), la magnitud de la temperatura podría alcanzar más de dos grados centígrados. El impacto que tendría el cambio de uso de suelo agrícola a urbano se demuestra particularmente sobre lo que hoy en día es la ANP "Santurario del Agua Laguna de Zumpango", al norte de la ciudad, el cual es un parque estatal en el Estado de México en potencial

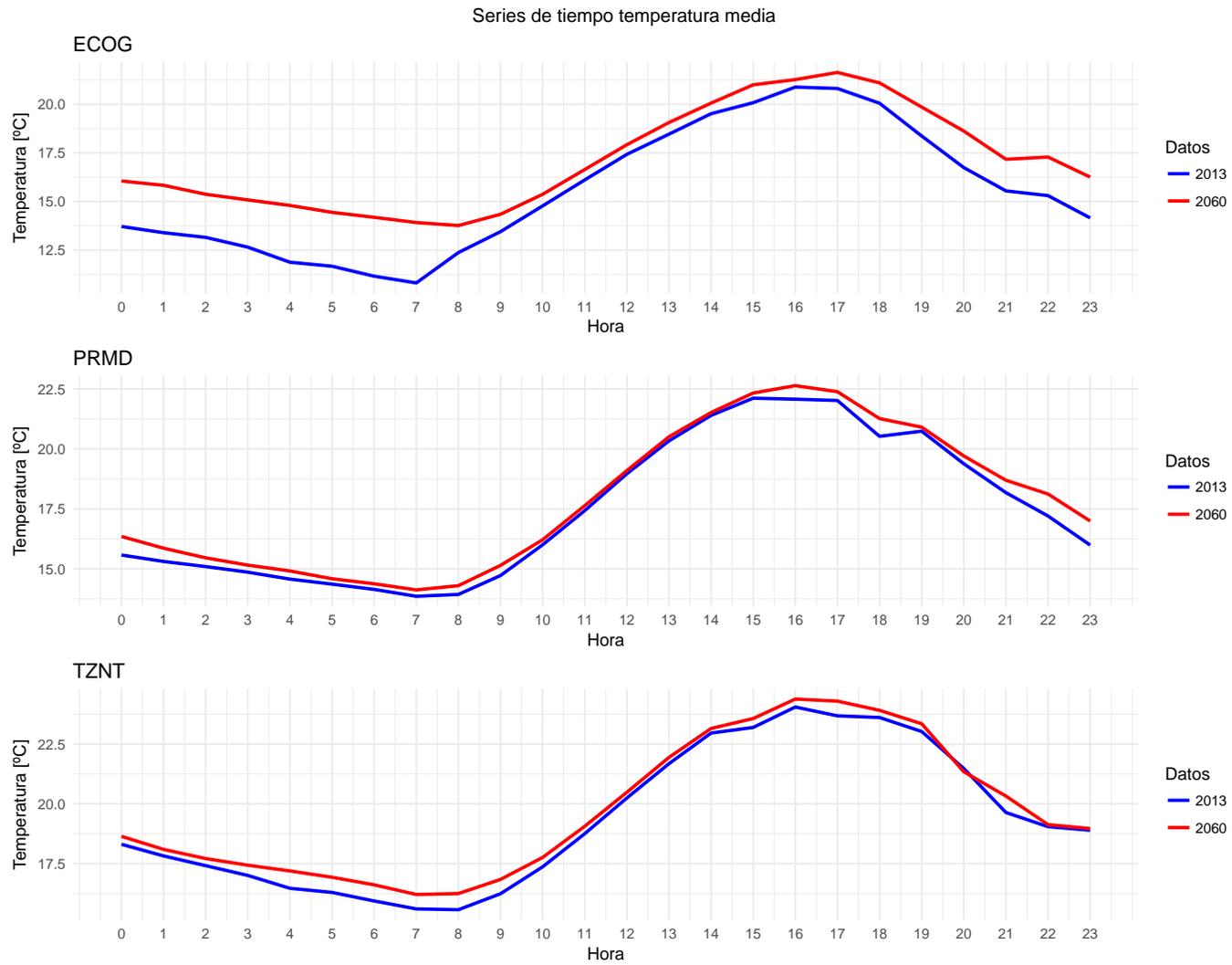


FIGURA 4.8: Series de tiempo de la temperatura media horaria en las estaciones localizadas dentro de la zona urbana. Los datos corresponden a la primer semana de julio del 2013 y 2060 respectivamente.

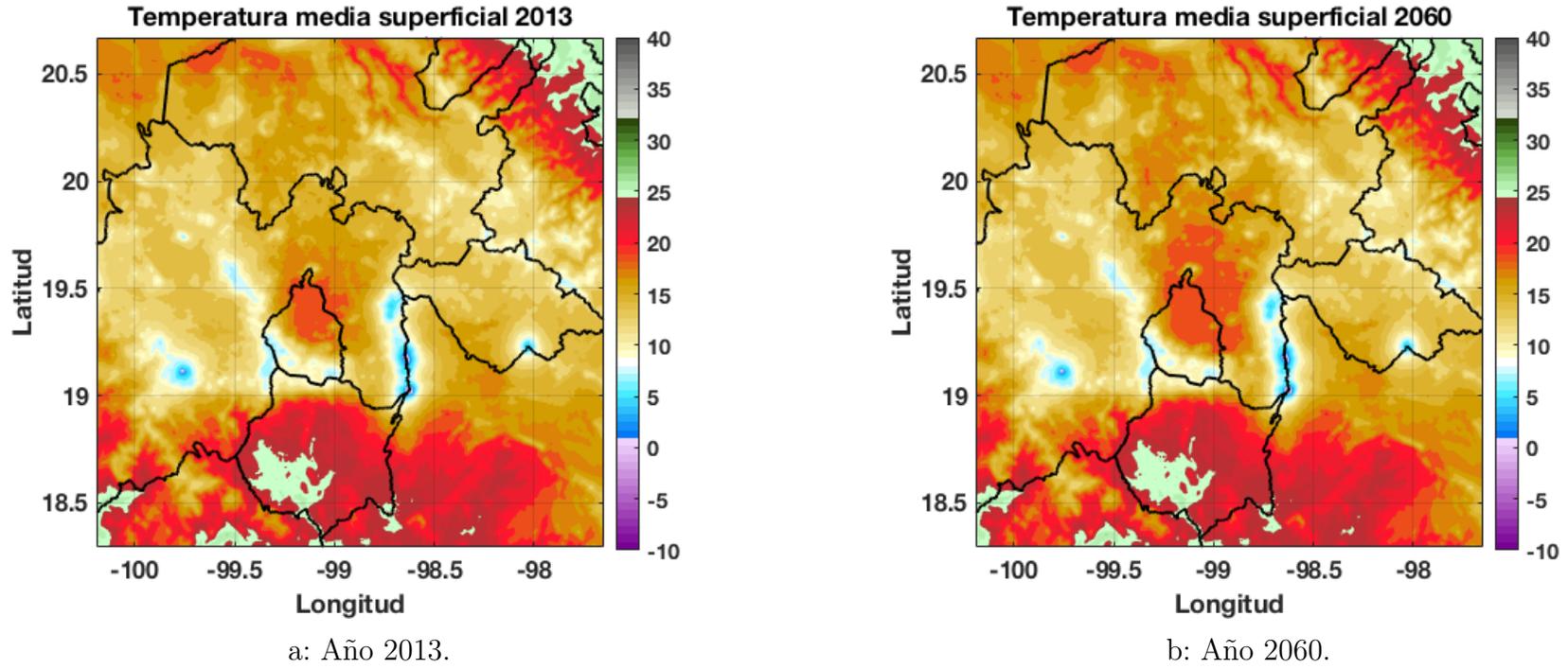


FIGURA 4.9: Temperatura media a 2m sobre la superficie. Los datos corresponden a la primer semana de julio del 2013 y 2060 respectivamente.

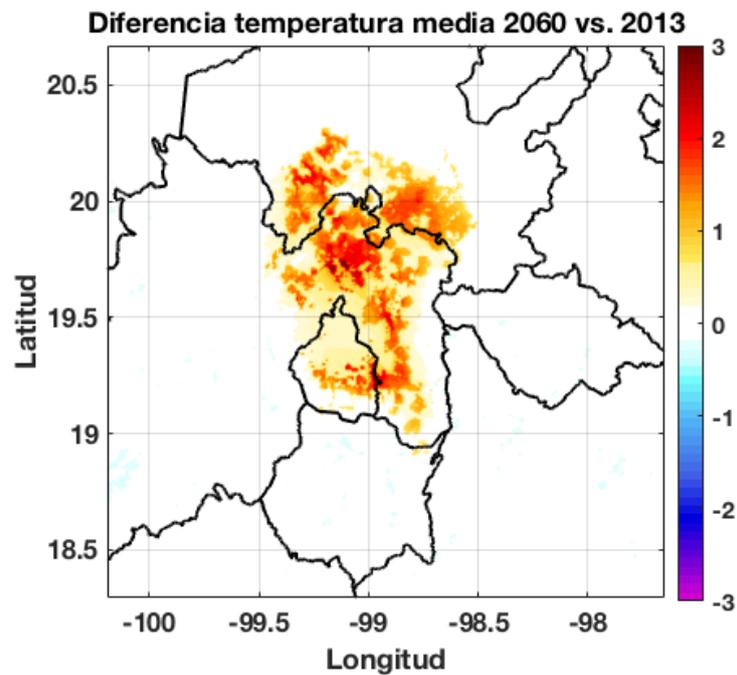


FIGURA 4.10: Diferencia de la temperatura media a 2m sobre la superficie en la región del dominio 3 de WRF entre la primera semana de julio del año control (2013) y el proyectado (2060).

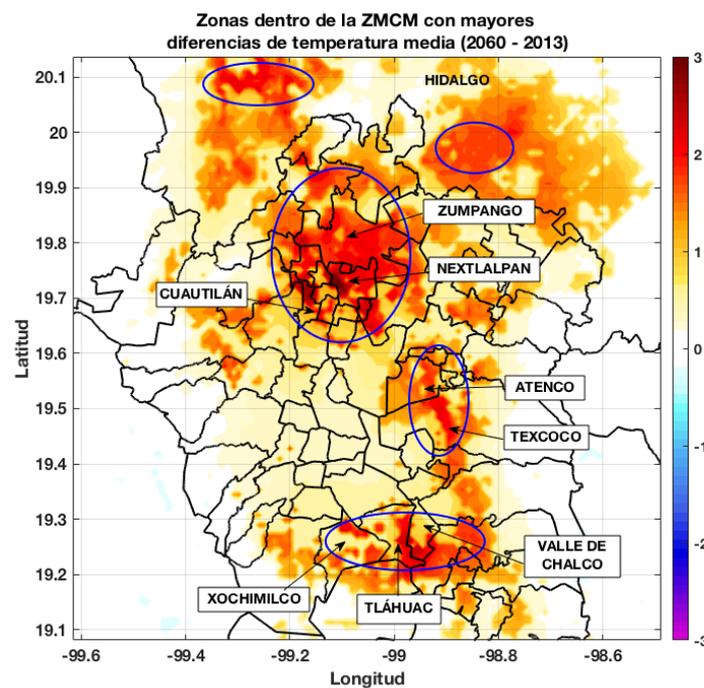


FIGURA 4.11: Diferencia de la temperatura media a 2m sobre la superficie entre la primera semana de julio del año control (2013) y del proyectado (2060) dentro de la ZMCM. Los círculos azules enmarcan las municipios donde el aumento de temperatura es de entre 2 y 3 grados centígrados.

TABLA 4.3: Comparación de la temperatura máxima a nivel estación.

	Temperatura máxima (°C)			Temperatura mínima (°C)		
	Año 2013	Año 2060	Diferencia	Año 2013	Año 2060	Diferencia
EMAS	22.03	23.28	1.25	9.07	12.96	3.86
ECOG	23.85	24.10	0.25	12.62	12.97	0.34
PRMD	25.38	25.86	0.48	14.82	15.44	0.61

peligro, no solo de ser incorporado a la zona urbana, que podría modificar su temperatura superficial hasta en 3.11°C. Este pronóstico podría ser altamente factible por el megaproyecto que se planea construir a poco menos de 10 km de la reserva natural. El Nuevo Aeropuerto de la Ciudad de México será construido muy cerca de la Laguna de Zumpango, en lo que actualmente es la base aérea de Santa Lucía. Este desarrollo de infraestructura podría tener un importante impacto sobre la reserva. Que el impacto sea positivo o negativo dependerá de los programas y acciones que se lleven a cabo. El aeropuerto podría ser una oportunidad para reforzar los planes de manejo y conservación de la laguna y los bosques que la rodean; o bien, podría representar una gran presión al ecosistema.

El SC es actualmente la región más fría de la ciudad de acuerdo tanto al mapa de la distribución de temperatura del INEGI (Figura C.1) como a los mapas realizados con base en las salidas del modelo (Figura 4.9). El aumento de más de un grado centígrado podría significar grandes retos para los ecosistemas naturales y las especies que ahí habitan, lo que afectaría la calidad de los servicios ambientales que estos ecosistemas proveen, como regular la temperatura y los contaminantes que se producen diariamente. Además, esta zona cubierta por cultivos agrícolas y pastizales (Figura 2.3) podría ser más propensa a incendios con estas altas temperaturas, creando entonces un ciclo en el que los ecosistemas no solo son menos capaces de capturar contaminantes, sino que también los produciría a través de la quema de biomasa (Cram *et al.*, 2008). Lo mismo sucede en el caso de la zona de Texcoco, donde el aumento de temperatura podría significar un factor de riesgo para las especies migratorias por las que se caracteriza.

En términos territoriales-administrativos, de los tres estados que conforman actualmente la ZMCM, la CDMX sería la entidad menos afectada (precisamente porque el uso de suelo ya es en su mayoría urbano); sin embargo, tendría que enfocar algunas acciones de políticas públicas hacia el SC para poder así prevenir el cambio de uso de suelo.

El Estado de México es, de los tres estados, el que podría ser más afectado, tanto por el aumento poblacional como por el cambio de uso de suelo ². Por lo tanto, los planes de ordenamiento del territorio o de desarrollo urbano para mitigar esta situación de la dinámica metropolitana, si bien tienen que ser trabajados en conjunto entre las entidades, el Estado de México tendría que promover sus propias políticas que permitieran tanto mitigar como adaptarse a estos cambios.

En el caso de Hidalgo, aunque hoy en día la ZMCM incluye a solo uno de sus municipios, el patrón de expansión de la urbe hacia el norte implicaría una redefinición de los límites de la ZMCM y los municipios que la conforman. Para el 2060, Hidalgo probablemente tendrá más municipios pertenecientes a la ZMCM e incluso, el crecimiento urbano podría implicar también una superposición de la ZMCM con la Zona Metropolitana de Pachuca.

El impacto de la expansión de la zona urbana hacia las zonas conurbadas podría ser muy diferenciado espacialmente y, por lo tanto en términos de la población afectada. Los mayores aumentos de temperatura se presentan más hacia el norte, oriente (municipios del Estado de México) y sur de la ciudad (en la zona de transición entre la zona urbana y el SC), donde la población tiene no solo menor poder adquisitivo, sino también altos niveles de vulnerabilidad que derivan de un conjunto de factores históricos respecto a cómo sucedió la ocupación de la región. Las figuras mostradas en el apartado sobre las características demográficas de la ZMCM en el capítulo 1 muestran que estos municipios, principalmente los localizados al oriente del Estado de México, presentan actualmente los más altos niveles de vulnerabilidad y marginación.

El cambio en la temperatura afectaría a municipios categorizados actualmente con un grado de marginación que va desde muy bajo a medio. En cuanto al grado de vulnerabilidad, los municipios afectados por el aumento de la temperatura media superficial, están en las categorías de bajo a alto, siendo la mayoría grado medio.

La Figura 4.11 es una ampliación de la Figura 4.10 (además de la agregación de una capa geográfica con la división política municipal de la ZMCM). Esta figura nos muestra que los municipios al sur de la ciudad (principalmente en el Suelo de Conservación) y los localizados al norte y oriente del Estado de México, podrían resultar los más afectados por este aumento en la temperatura media.

²Recordemos que el Estado de México, según las proyecciones poblacionales, es el estado en donde la cantidad de habitantes seguirá en aumento al contrario de la Ciudad de México (Figura 1.1)

Los municipios del Estado de México, donde se han pronosticado los mayores aumentos de temperatura k son los localizados dentro y alrededor de la región conocida como '*Región de Zumpango*' y los localizados al oriente, como Texcoco y Atenco. Dentro de la Ciudad de México, los municipios más afectados son Tláhuac, Xochimilco, Milpa Alta y Tlalpan, todos ellos con algún porcentaje de su territorio correspondiente al Suelo de Conservación. En el Estado de Hidalgo, los municipios afectados son Tizayuca, Pachuca, Atotonilco y Tula. Cabe destacar que tres de estos cuatro municipios no se encuentran dentro de los límites políticos actuales de la ZMCM pero eso, obviamente, no impide a la zona urbana expandirse. De hecho, estos cambios en los municipios hidalguenses podrían verse aún más agravados por la sinergia de la ZMCM con la Zona Metropolitana de Tula y la Zona Metropolitana de Pachuca.

A pesar de que el modelo acoplado SLEUTH-WRF lleva a cabo las simulaciones basado principalmente en las características físicas y atmosféricas de la ZMCM, una metrópoli en realidad, está compuesta no solo por estos aspectos, sino también por dinámicas socioeconómicas complejas. La proyección del modelo de crecimiento urbano SLEUTH delimita claramente el perímetro del área urbana y no urbana, pero la realidad es que la transición entre dicha área urbana y sus alrededores rurales comprende múltiples formas de territorio que van más allá de solo rural o solo urbano. Estos territorios que quedan fuera de la zona urbana en la actualidad están muchas veces asociados con la conservación de recursos naturales y servicios ambientales. Dichas localidades a las que la urbanización en teoría todavía no llega, son zonas que proveen de servicios ambientales a toda la metrópoli, y de ahí la importancia de conservarlas. Como por ejemplo, Xochimilco, donde según esta proyección, toda su área se convertiría en suelo urbano. Esta área aunque pequeña en proporción al área de la zona urbana actual, ha jugado un papel muy importante en la sustentabilidad de la ciudad al proveer de diversos y muy conocidos servicios ambientales.

Al igual que los procesos naturales que no respetan fronteras políticas y territoriales, la zona periurbana tiene sobre sí la carga de enfrentar mayor grado de marginación a la vez que se enfrenta a un cambio en la meteorología local.

Precipitación

Con base en el análisis de validación sabemos que WRF no predice con mucha precisión la cantidad de precipitación, por lo cual, en esta sección no nos enfocaremos en la magnitud, sino en la proporción y en la distribución que WRF ha proyectado para esta variable. La Figura 4.12 muestra las series de tiempo correspondientes a las estaciones localizadas dentro de la zona urbana y las más

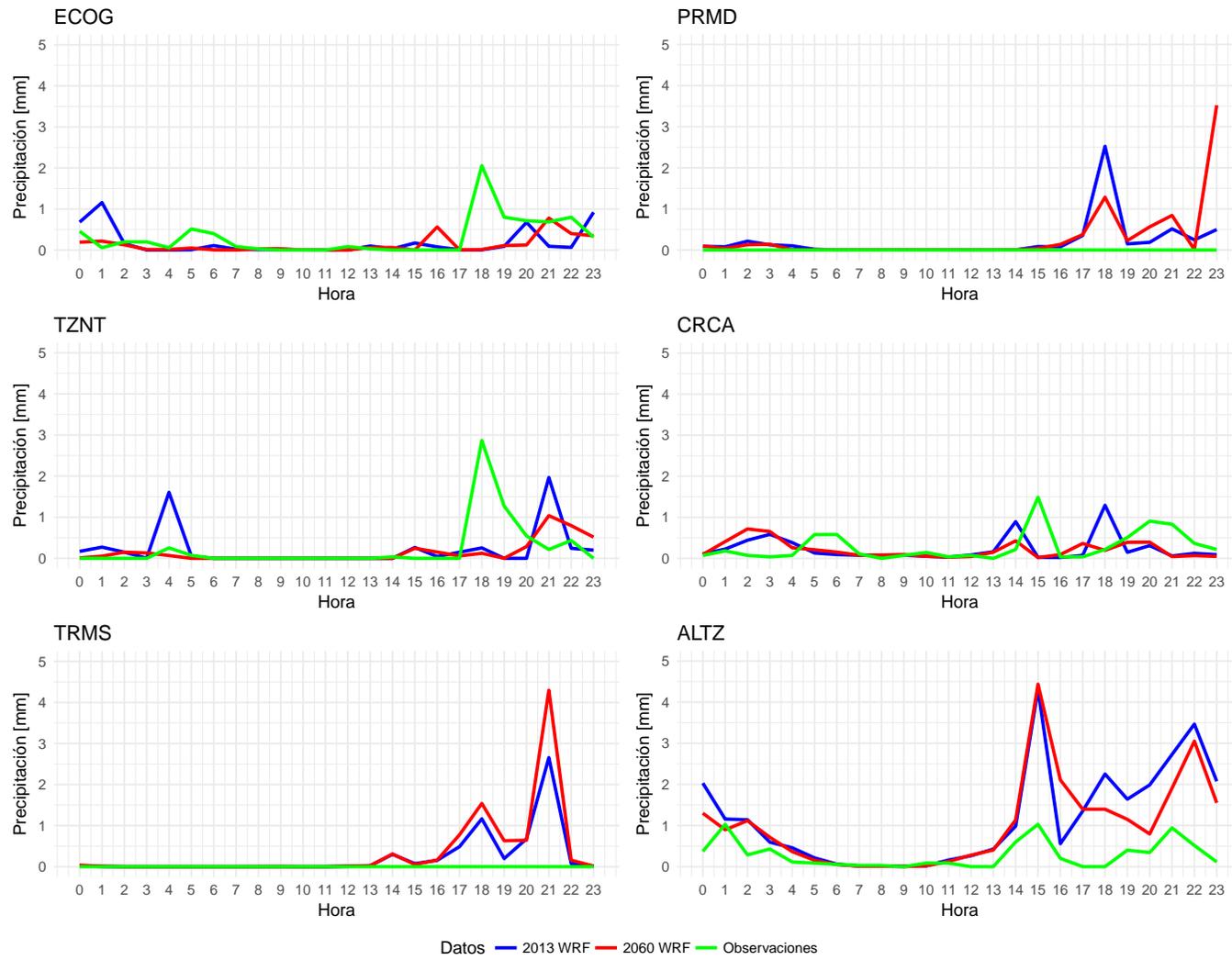


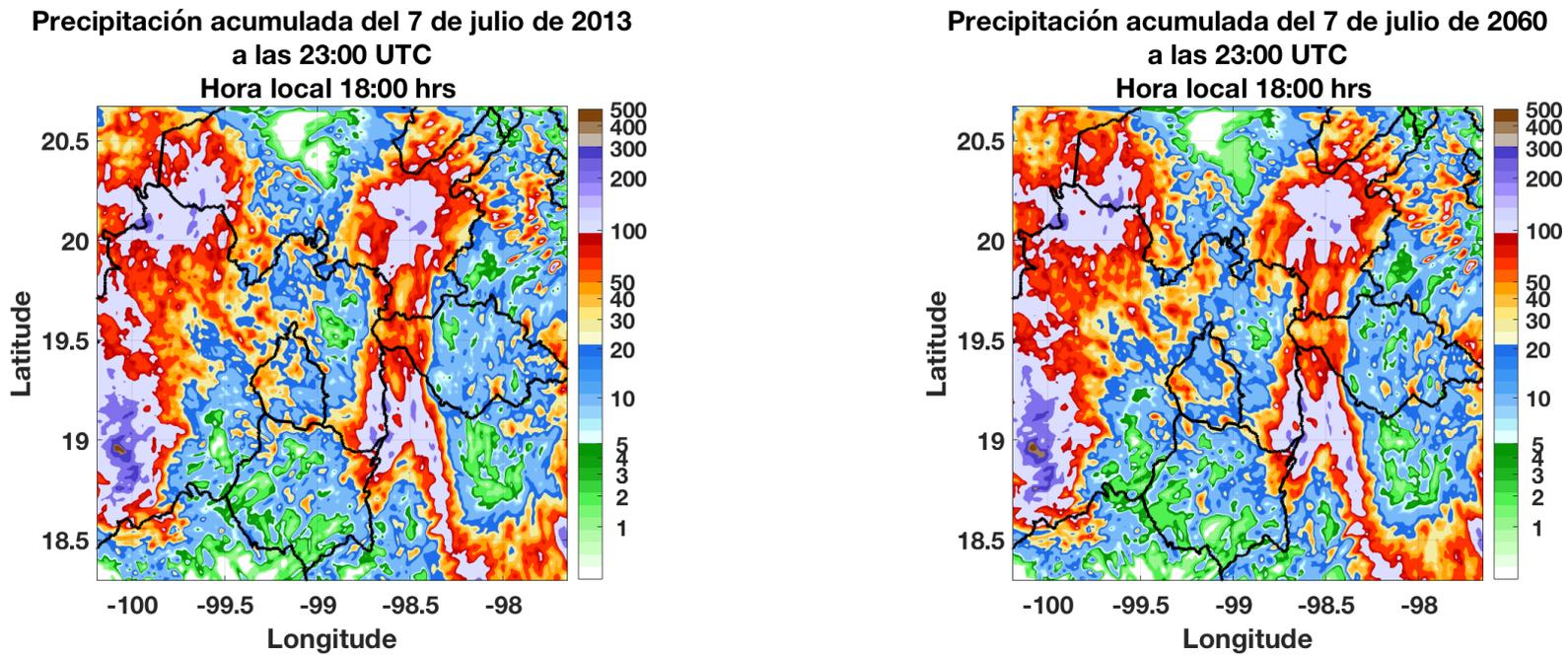
FIGURA 4.12: Series de tiempo de la precipitación media horaria en las estaciones localizadas dentro o cerca de la zona urbana.

cercanas a ella. Con lo que respecta a la distribución temporal de la precipitación, podemos observar que el ciclo se mantendría igual, siendo más común las lluvias durante la tarde.

Por otro lado, con respecto a la distribución espacial, la Figura 4.13 muestra los cambios entre nuestro año control y el año modelado. Como principal observación podemos decir que el patrón de cambio de la precipitación no tiene una relación tan directa con la expansión de la zona urbana como lo tuvo la temperatura. Los cambios tanto de disminución como de aumento se observan a lo largo y ancho del dominio independientemente del patrón de urbanización (Figura 4.14). Sin embargo, si observamos la ampliación de la figura anterior (Figura 4.15) para encontrar puntos específicos de aumento o disminución en la proporción de la precipitación, vemos que hay características que podrían estar asociadas a la expansión de la zona urbana.

Hacia el oriente de la Ciudad de México, en el Estado de México, se observa que la precipitación podría mantener la misma proporción e incluso disminuir. En contraste, en la zona sur-oriental y sur-poniente de la CDMX, se espera un aumento en la precipitación (alcanzando niveles de hasta 50 mm en una semana) sobre las delegaciones de Iztapalapa, Xochimilco y en la frontera de la Magdalena Contreras con Tlalpan. Esta zona en particular pertenece actualmente al SC y para el 2060 se enfrentaría a un cambio de uso de suelo de bosque a urbano. Hemos realizado un mapa extra (Figura 4.16) donde se pueden apreciar los AHI dentro del SC junto con los cambios en la precipitación acumulada. En dicho mapa se aprecia que los AHI localizados al este, son los más expuestos a mayor proporción de precipitación, mientras que los ubicados al oeste enfrentarían una disminución en dicha proporción. Actualmente, esta zona al sur de la ciudad es la menos propensa a inundaciones, tanto por el servicio ambiental que provee el Suelo de Conservación como por la topografía. (Figura C.7). A pesar de ello, un cambio en el uso de suelo y el consecuente aumento en la cantidad de precipitación, podría atentar contra este balance y pasar a ser una zona con mayor escorrentía que inundaría las zonas aledañas que cuentan con una importante cantidad de localidades marginadas (Figura C.5).

Volviendo a la Figura 4.15, observamos que al centro y poniente de la ciudad, el pronóstico indica una disminución de precipitación acumulada. En general, tras un análisis geoespacial con la superposición de capas, podemos observar que al interior de la zona urbana proyectada al 2060 los aumentos en la precipitación acumulada se dan por los cambios de uso de suelo a suelo urbano, mientras que los lugares donde hay una disminución de la precipitación acumulada (como el



a: Precipitación acumulada 2013.

b: Precipitación acumulada 2060.

FIGURA 4.13: Precipitación acumulada modelada por WRF de la semana del 1ro al 7 de julio a) del año 2013 y b) del año 2060

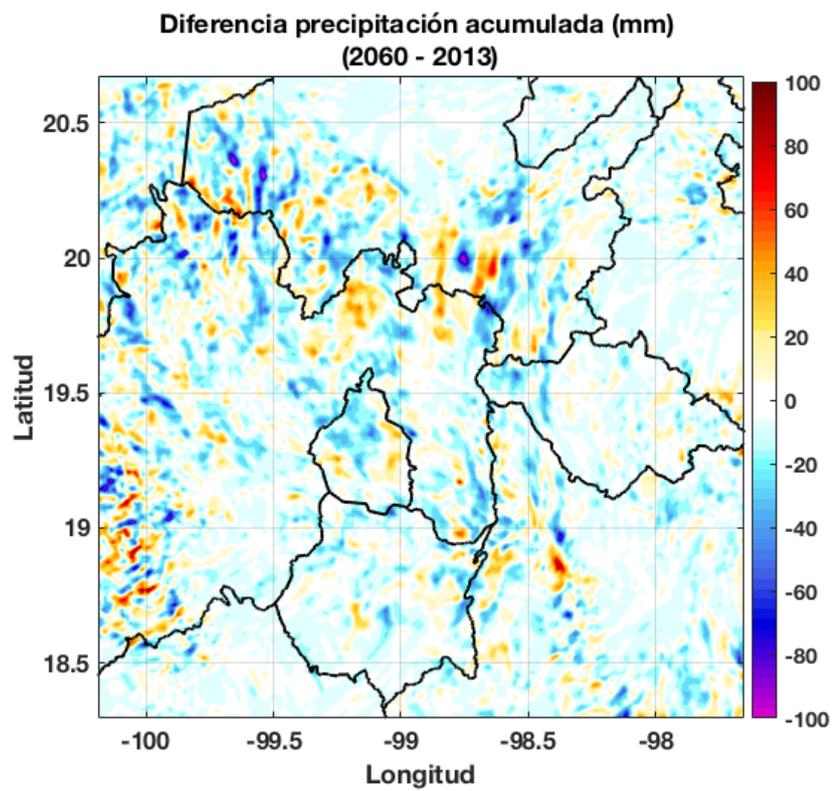


FIGURA 4.14: Diferencia de la precipitación acumulada entre la primer semana de julio de los años 2013 y 2060. Región mostrada corresponde al dominio 3 del modelo WRF.

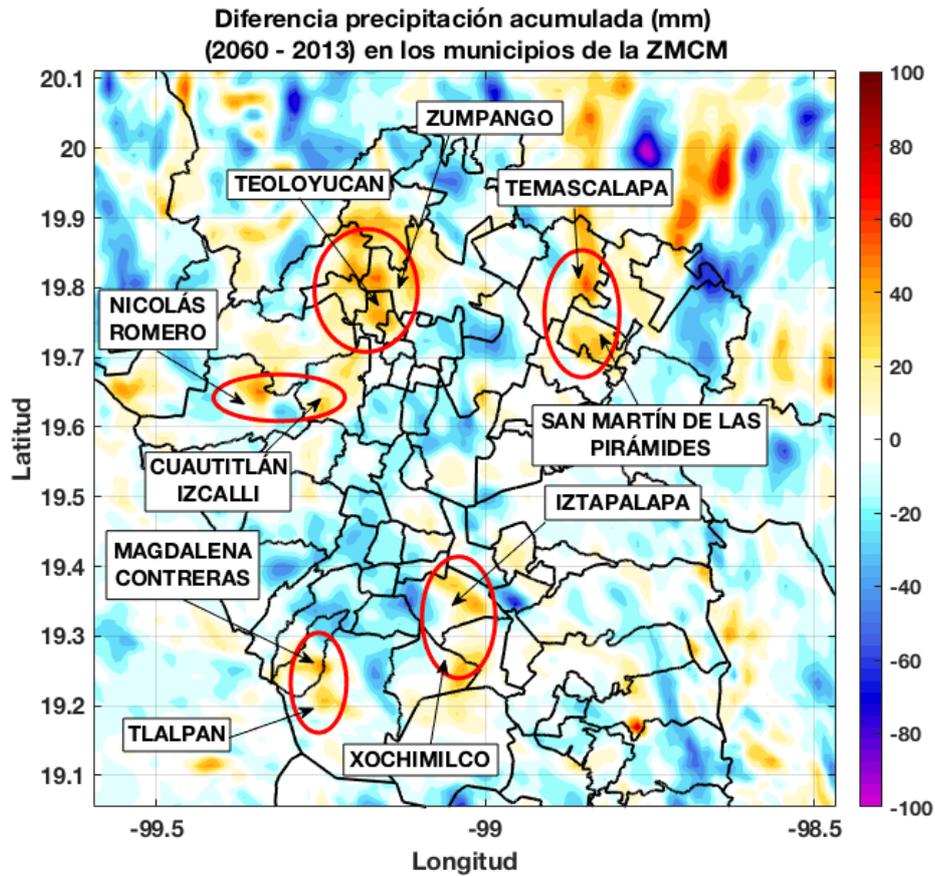


FIGURA 4.15: Diferencia de la precipitación acumulada (mm) entre la primera semana de julio del año controlado (2013) y el proyectado (2060) dentro de la ZMCM. Los círculos rojos enmarcan municipios donde la precipitación aumenta.

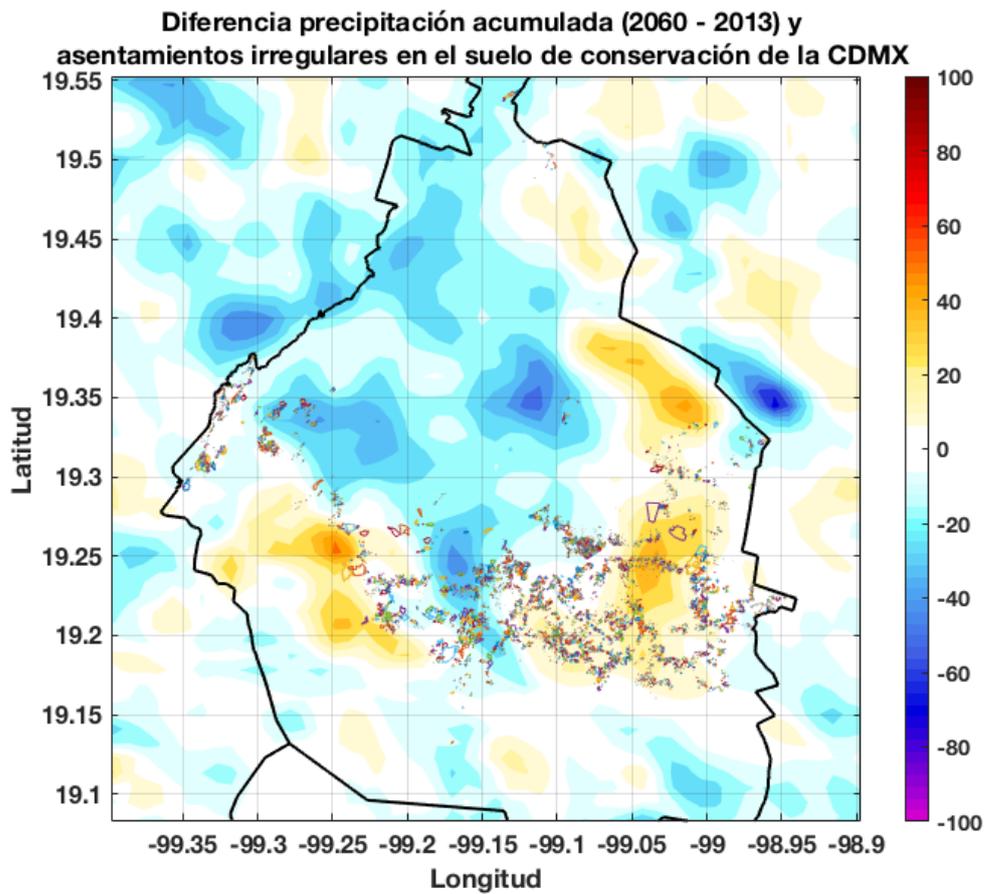


FIGURA 4.16: Diferencia de precipitación acumulada (mm) sobre los Asentamientos Humanos Irregulares (AHI) dentro del Suelo de Conservación. Las zonas de colores que se aprecian entre las latitudes 19.15 y 19.35 representan los asentamientos irregulares.

centro de la ciudad) son lugares ya urbanizados desde el 2014. Esta disminución podría marcar como vulnerables a los municipios del centro de la ciudad.

Con respecto a las actuales Áreas Naturales Protegidas, el cambio de uso de suelo se hace visible nuevamente en el parque estatal "Santuario del Agua de las Lagunas de Zumpango" (y en general en toda la Región de Zumpango), donde WRF pronosticó un aumento de la precipitación acumulada hasta llegar a aproximadamente los 100 mmm en solo una semana; mientras que para el año 2013 lo máximo que se acumuló en una semana fue de aproximadamente 10 mm, es decir que proporcionalmente el pronóstico indica un aumento de precipitación acumulada de 1000 %.

Al contrario de la temperatura, para la cual los impactos del aumento en su magnitud media son principalmente negativos, el incremento de la precipitación podría traer impactos positivos a algunas localidades como Iztapalapa, la cual enfrenta actualmente grandes problemas de escasez de agua. Mayor precipitación acumulada en la zona podría traducirse en acciones como captura de agua de lluvia para el autoconsumo. Por otro lado, la disminución de la precipitación acumulada al centro de la ciudad podría también significar grandes retos para la población, pues aunque esta no se clasifique como población marginada, las inundaciones que se han sucedido en los últimos años a causa de lluvias torrenciales nos hablan de que la infraestructura de drenaje simplemente no es suficiente. Además, la zona central, al ser la más plana de toda la ZMCM, es también la más vulnerable actualmente a inundaciones. Una disminución de la precipitación en la ciudad central tal vez podría verse como buenas noticias en el tema de inundaciones; no obstante, no lo es para muchos otros factores. Al final, la lluvia ayuda a limpiar los contaminantes y su ausencia o disminución podría resultar en una temporada más seca y calurosa, dando lugar a olas de calor más fuertes.

En el caso de las localidades al oriente del Estado de México, la disminución de la precipitación en uno de los meses más lluviosos del año, podría resultar también en un impacto negativo a la población. El uso de suelo en la zona además de urbano es también uso de suelo agrícola, principalmente de riego. Una disminución en la precipitación podría significar una mayor demanda de agua de la que hay actualmente para poder regar la zona; o bien, la sinergia entre el aumento de temperatura y menos lluvia podría significar que la zona terminaría siendo muy árida para la agricultura y entonces la región podría ser más propensa a transformarse en suelo urbano.

4.3. Discusión sobre la sinergia de los cambios proyectados con la vulnerabilidad actual de la población

Los municipios que este estudio ha develado como los más vulnerables a cambio de uso de suelo y sus consecuentes efectos en la meteorología, son principalmente municipios históricamente marginados y vulnerables. En particular, la región de Texcoco, Zumpango y los municipios dentro del actual Suelo de Conservación de la Ciudad de México.

Las tres regiones se caracterizan por un uso de suelo dedicado principalmente a la agricultura y son regiones de gran valor ambiental. Tanto Texcoco como Zumpango albergan los cuerpos de agua más importantes de la Cuenca de México, pues no solo son fundamentales para el funcionamiento hidrológico de la cuenca, sino que funcionan como santuarios de aves migratorias (Carabias *et al.*, 2010). Esta situación llevó a las autoridades a proclamar ambas regiones como áreas de conservación prioritarias. Por su lado, el Suelo de Conservación también tiene y ha tenido históricamente un gran valor ecológico para los habitantes de la Ciudad de México. No obstante, la degradación a la que se enfrenta tanto en el presente como en el futuro nos hace pensar sobre el verdadero peso que tiene la palabra “conservación” no solo para los tomadores de decisiones sino para la misma población.

Es importante resaltar que esta vulnerabilidad al impacto derivado del cambio en las variables meteorológicas, no es mera mala suerte, al contrario. Los municipios hacia donde se expande la zona urbana son los mismos que históricamente han crecido sin regulaciones, razón por la cual carecen de los servicios básicos de infraestructura. La proyección del crecimiento poblacional de la ZMCM en las próximas décadas se estima se suscitará justo en estas zonas de bajo poder adquisitivo; bajos niveles educativos; acceso pobre a salud; y ahora, vulnerabilidad a temperaturas altas y cambios en la cantidad de precipitación³.

La vulnerabilidad de la población está entonces pautada por la gobernanza y organismos socio-institucionales que han normalizado el crecimiento desordenado y desmedido de la zona; acabando no solo con los recursos naturales como el Suelo de Conservación, sino también con la calidad de vida de los mismos habitantes.

³Ver apéndice C para más figuras sobre la distribución y localización de localidades actualmente marginadas así como grados de vulnerabilidad social, económica y ambiental.

Se ha reforzado también la idea del trabajo colaborativo e intergubernamental entre las tres entidades federativas que componen a la ZMCM; no solo por ser administrativamente más eficiente, sino por la presión que la ciudad central (la Ciudad de México) está ejerciendo sobre sus alrededores. El Estado de México, por su situación geográfica (rodea a la CDMX), parece estar destinado a albergar los futuros procesos de urbanización: aumento de la población, cambio de uso de suelo y cambio en las variables meteorológicas; por lo que los esfuerzos deberían estar principalmente dirigidos a contener el crecimiento en dicha entidad. O bien, la implementación de programas colaborativos entre instituciones y sociedad civil para que las localidades del estado puedan mitigar y adaptarse.

Uno de los principales retos de la creación e implementación de políticas públicas es la incertidumbre. El escenario con el que trabajamos en este trabajo, a pesar de ser uno de muchos escenarios que pueden ocurrir si cambiamos algunos parámetros, contribuye a disminuir la incertidumbre de cuáles son las regiones en potencial riesgo y la magnitud de este (por temperatura más altas y cambios en la precipitación). Es importante resaltar que si hubiéramos encontrado estos cambios en zonas donde sabemos que la infraestructura es adecuada, tal vez no sería tan preocupante; pero ese no es el caso. Los cambios los hemos encontrado en zonas que sabemos no tienen la infraestructura ni muchas otras cosas necesarias para mitigar y/o adaptarse a estos aumentos en la temperatura y cambios en los patrones de precipitación.

Capítulo 5

Conclusiones

Tras la proyección del clima en un escenario de condiciones extremas, se ha reforzado la idea de la importancia de conservar el Suelo de Conservación en el caso de la Ciudad de México y el suelo no urbano del Estado de México e Hidalgo. Los cambios en la temperatura y la precipitación en una urbe de constante crecimiento son esperados por la cantidad de estudios que existen al respecto. Pero identificar las zonas que recibirán estos cambios, así como la magnitud, es de lo que se ha encargado este estudio.

De la misma manera, se lograron consolidar los objetivos propuestos:

- Los resultados estadísticos de la validación brindaron confianza para analizar los resultados que se obtuvieron para la proyección del año 2060. Solo se tuvo que tener precaución al analizar los datos correspondientes a la magnitud de la precipitación acumulada ya que la validación develó que el modelo tiene una capacidad pobre para modelar este aspecto.
- El análisis de los resultados fue guiado hacia encontrar la distribución espacial de los cambios en las variables meteorológicas.
- Se discutió acerca de las posibles afectaciones a la población, principalmente la sinergia que estos cambios en la meteorología pueden tener con las características geográficas y socio-económicas de las localidades.

Con base en estos objetivos se enumeran las principales conclusiones:

- En este trabajo se ha demostrado que más allá del crecimiento exponencial de la zona urbana, el cambio de uso de suelo de Áreas Naturales Protegidas, suelo no urbanos y de conservación podrían traer impactos a sectores de la población marginados.
- Se identificó como la zona más vulnerable a estos cambios meteorológicos a la Región de Zumpango localizada al norte del Estado de México; la

Región de Texcoco localizada al oriente; y la región de transición entre el Suelo de Conservación y el suelo urbano de la Ciudad de México.

- Con respecto a la variable de temperatura, los cambios significativos solo se presentan dentro de la zona urbana.
- En todo el dominio, la diferencia de la temperatura media superficial a 2m sobre el suelo tuvo valores de entre 0.2°C hasta 3.11°C.
- La estación donde se presentó la mayor diferencia de temperatura media, máxima y mínima, fue Ecoguardas (ECOG), la cual a su vez está localizada en donde el suelo cambia en el 2060 de agrícola a urbano.
- Con respecto a la variable de precipitación, la acumulación incrementa principalmente dentro y cerca de la Región de Zumpango y al oriente de la Ciudad de México. La acumulación disminuye al centro de la ciudad (donde se mantiene urbano entre 2013 y 2060) y al poniente de la ciudad.

5.1. Limitaciones del estudio y sugerencias para futuras investigaciones:

Por cuestiones de tiempo, la proyección al 2060 solo se pudo realizar para una semana, por lo que correr el modelo para un periodo de tiempo más amplio podría resultar en un mejor análisis, sobre todo si se hace para una temporada completa como verano, o época de lluvias, o incluso un año para contrastar diferencias entre estaciones del año.

Una limitación más es que la zona urbana que definimos en nuestro estudio corresponde únicamente a la que deriva de los límites políticos de la ZMCM, por lo que la proyección e inclusión de las zonas urbanas aledañas (provenientes de todas las zonas metropolitanas con las que la ZMCM colinda) podría también influir sobre la temperatura y precipitación. No solo la zona, sino la Cuenca de México como región geográfica podría ser analizada más detalladamente con base en la inclusión de las otras zonas urbanas en el modelo SLEUTH, pues en teoría el dominio 3 del modelo WRF ya abarca dicha región.

Apéndice A

Insumos: capas geográficas

TABLA A.1: Datos de capas geográficas utilizadas para la calibración del modelo SLEUTH con su respectivo origen y descripción.

Capa	Origen	Descripción
General.urban.1980	INEGI, serie de uso de suelo y vegetación	Capa binaria de urbanización (0 = no urbanizado, 1 = urbanizado)
General.urban.1990	INEGI, serie de uso de suelo y vegetación	Capa binaria de urbanización (0 = no urbanizado, 1 = urbanizado)
General.urban.2000	INEGI, serie de uso de suelo y vegetación	Capa binaria de urbanización (0 = no urbanizado, 1 = urbanizado)
General.urban.2014	INEGI, serie de uso de suelo y vegetación	Capa binaria de urbanización (0 = no urbanizado, 1 = urbanizado)
General.roads.1980	SCINCE, INEGI	Capa de vías de comunicación terrestre rasterizada.
General.roads.1990	SCINCE, INEGI	Capa de vías de comunicación terrestre rasterizada.
General.roads.2000	SCINCE, INEGI	Capa de vías de comunicación terrestre rasterizada.
General.roads.2014	SCINCE, INEGI	Capa de vías de comunicación terrestre rasterizada.
General.slope	Obtenida a partir del modelo digital de elevación 30 m, INEGI	Pendiente media en porcentaje.
General.excluded	Obtenida de INEGI y CONABIO	Representa un gradiente de restricción para incluir las zonas que regulan la urbanización.
General.hillshade	Obtenida a partir del modelo digital de elevación 30 m, INEGI	Capa de sombras (solo sirve para visualizar).

TABLA A.2: Datos de capas geográficas utilizadas para el análisis geoespacial de los resultados de los modelos SLEUTH y WRF.

Capa	Origen	Descripción
division_politica	CONABIO	Capa división política estatal de la República Mexicana.
zonas_metropolitanas	CONAPO	Capa división política municipal de zonas metropolitanas de la República Mexicana.
uso_suelo	INEGI, serie de uso de suelo y vegetación	Territorio dividido en categorías de uso de suelo
estaciones	SMN	Localización de las EMAs.
anp_estatales	CONABIO	Áreas Naturales Protegidas estatales.
anp_federales	CONABIO	Áreas Naturales Protegidas federales.
suelo_conservación	SEDEMA	Límites territoriales del suelo de conservación de la Ciudad de México.
curvas_nivel	CONABIO	Curvas de nivel para la República Mexicana.
servicios_ambientales	PAOT	Servicios ambientales del suelo de conservación por categorías: habitat, hídrico, captura de carbono.
ahi	PAOT	Asentamientos humanos irregulares dentro del suelo de conservación de la Ciudad de México.
urbano_s6	INEGI, serie de uso de suelo y vegetación.	Mancha urbana de la ZMCM del 2014.

Apéndice B

Gráficas

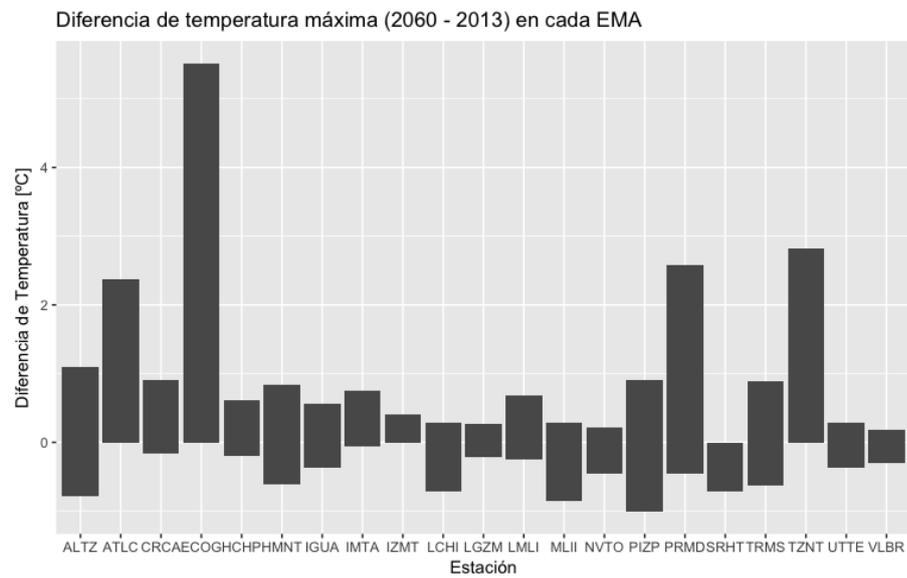


FIGURA B.1: Diferencia de la temperatura máxima modelada en cada estación entre el año 2013 (año control) y el año 2060.

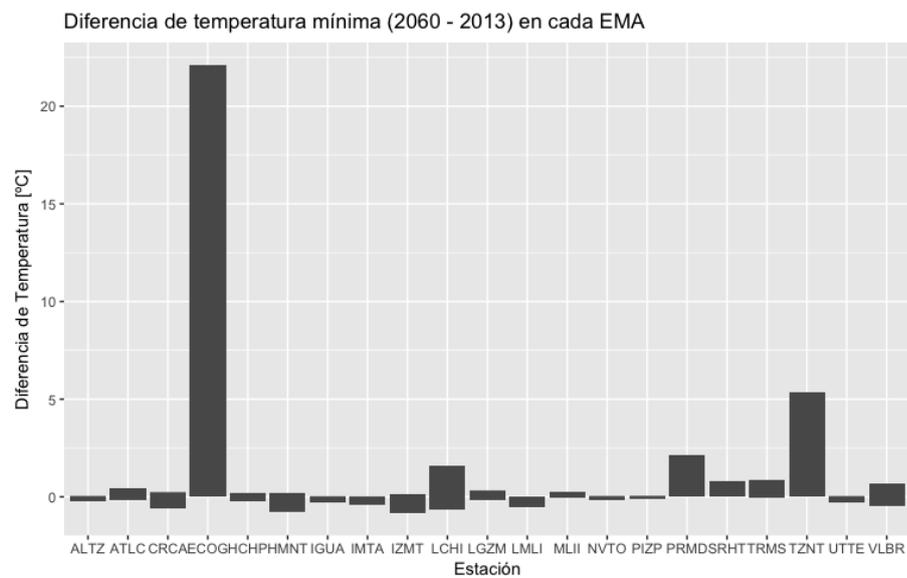


FIGURA B.2: Diferencia de la temperatura mínima modelada en cada estación entre el año 2013 (año control) y el año 2060.

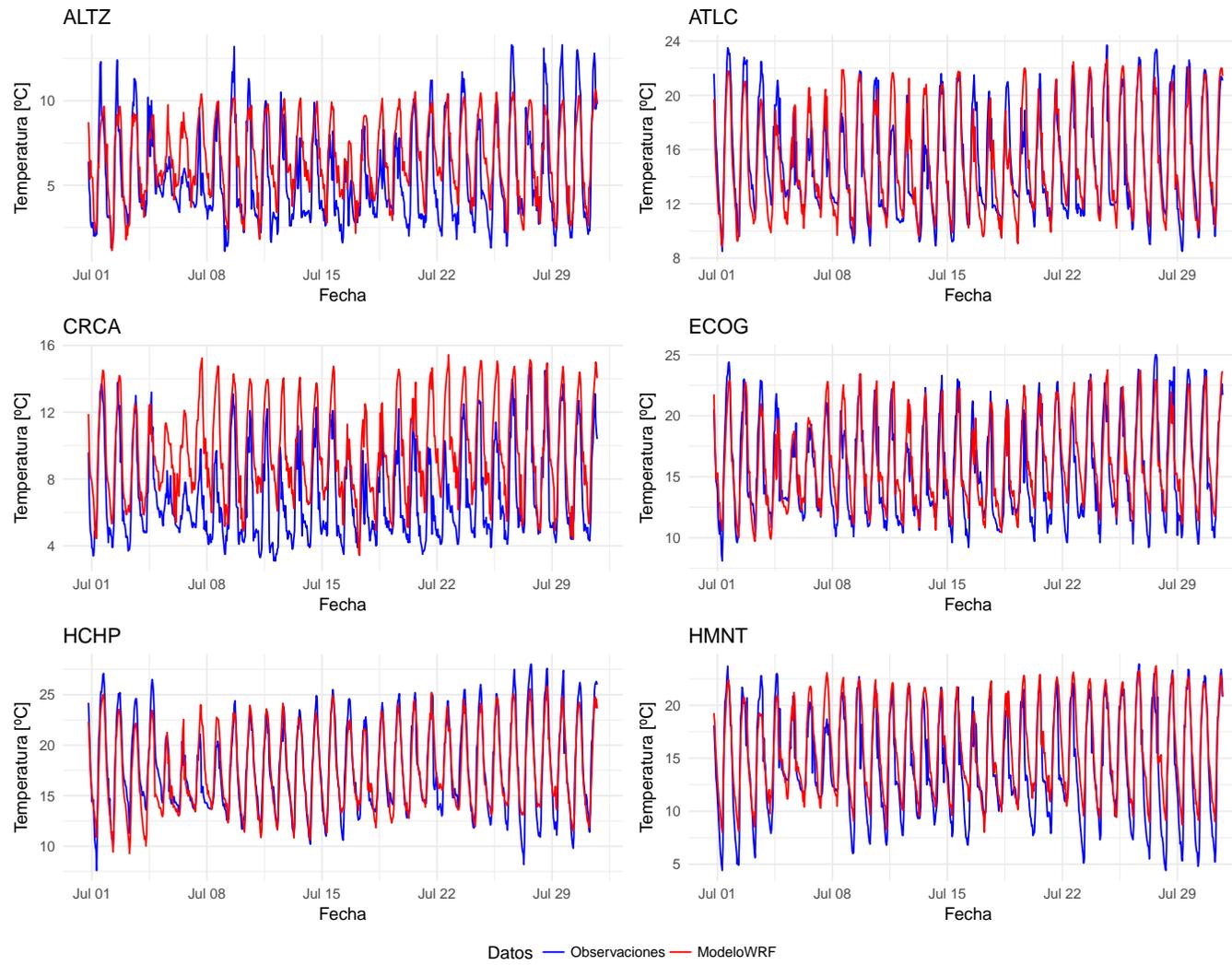


FIGURA B.3: Series de tiempo de la temperatura observada y modelada del año 2013.

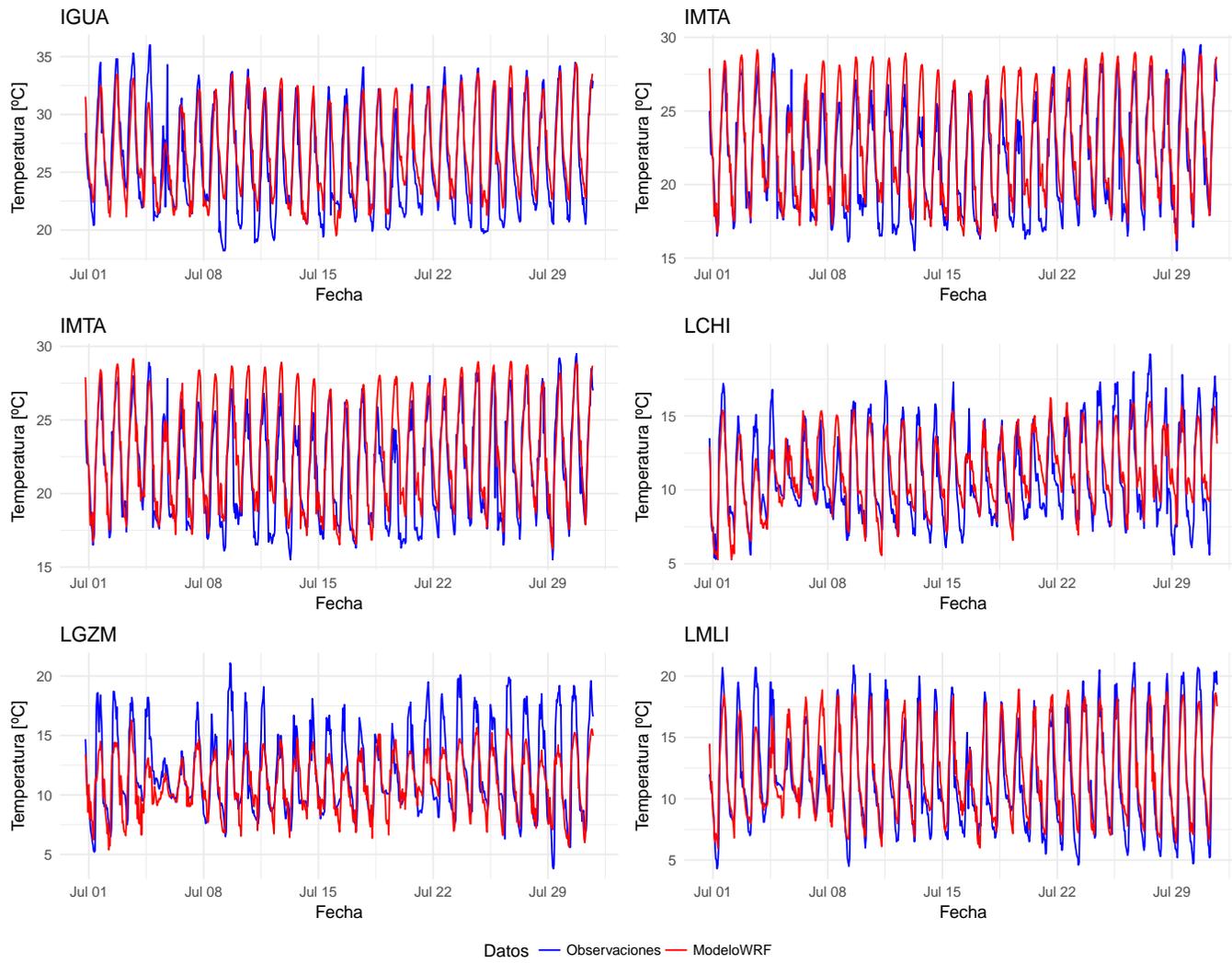


FIGURA B.4: Series de tiempo de la temperatura observada y modelada del año 2013.

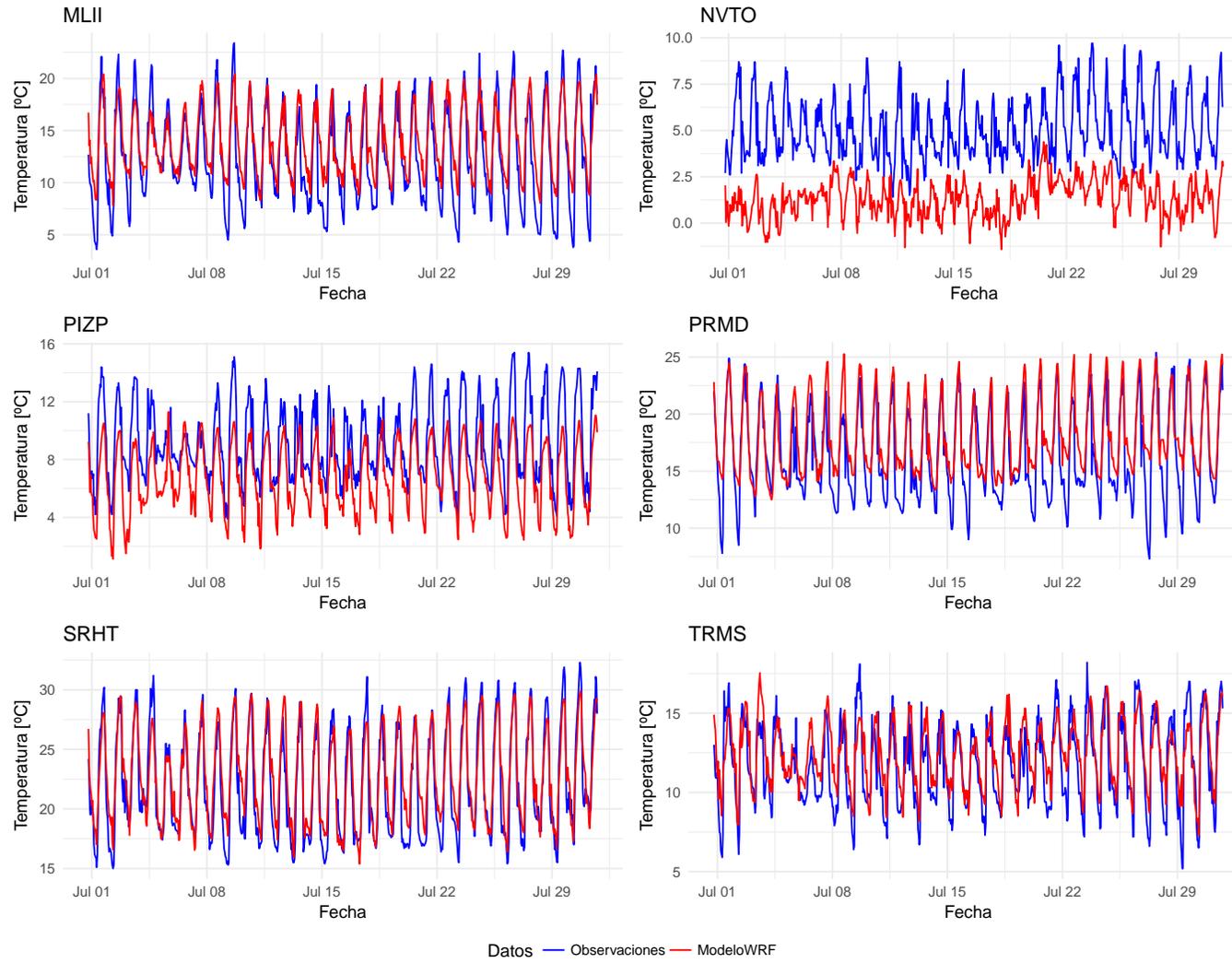


FIGURA B.5: Series de tiempo de la temperatura observada y modelada del año 2013.

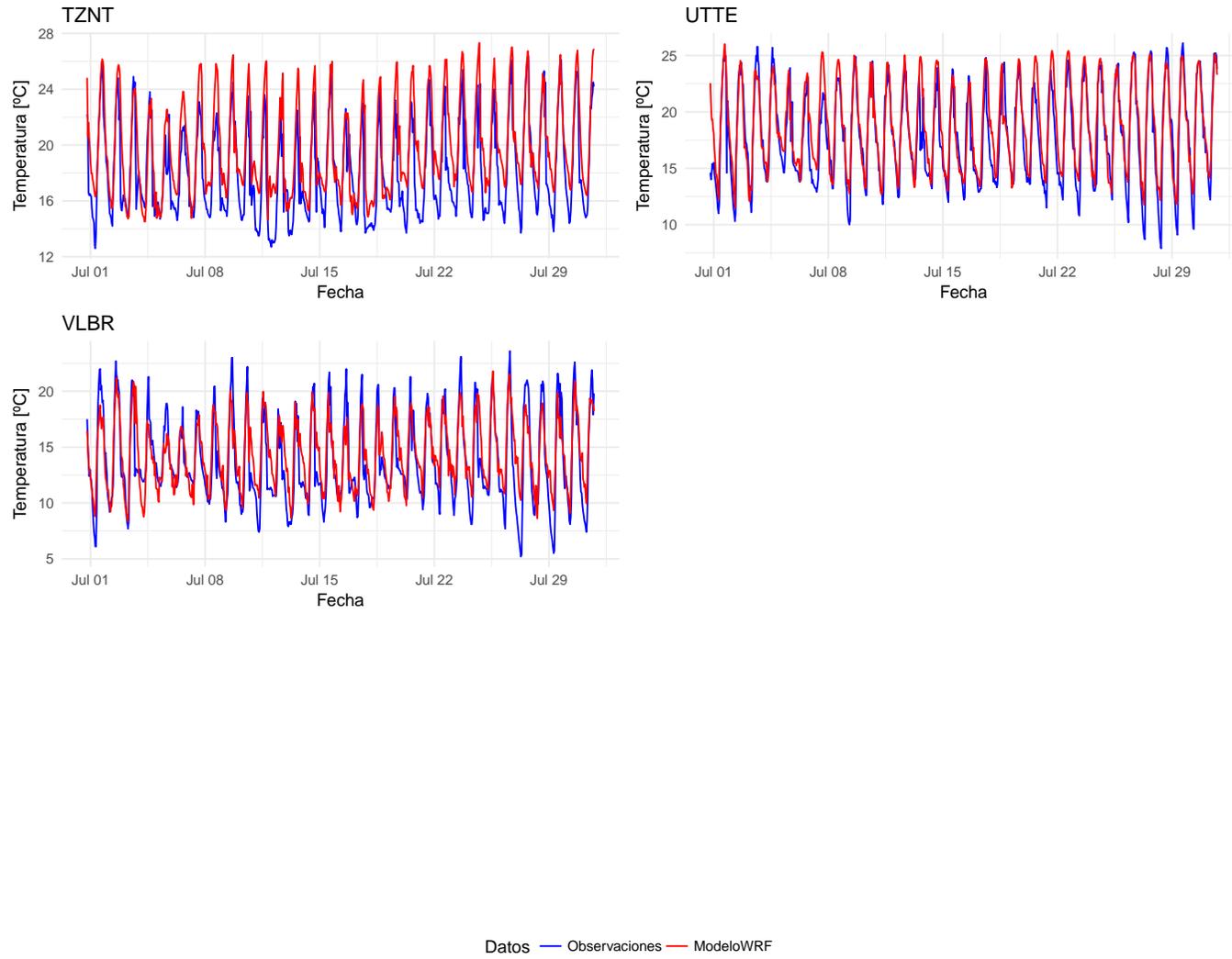


FIGURA B.6: Series de tiempo de la temperatura observada y modelada del año 2013.

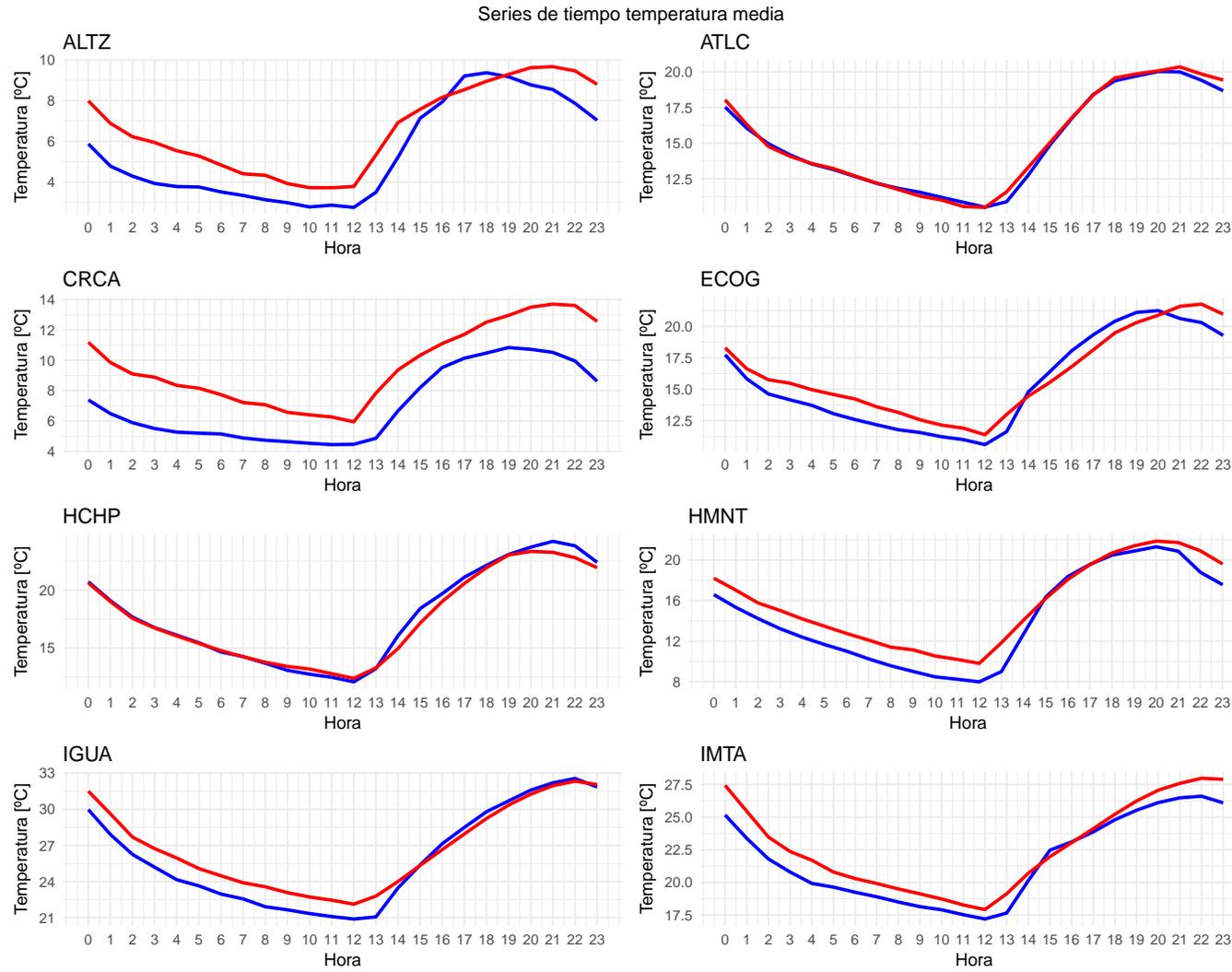


FIGURA B.7: Series de tiempo de la temperatura media.

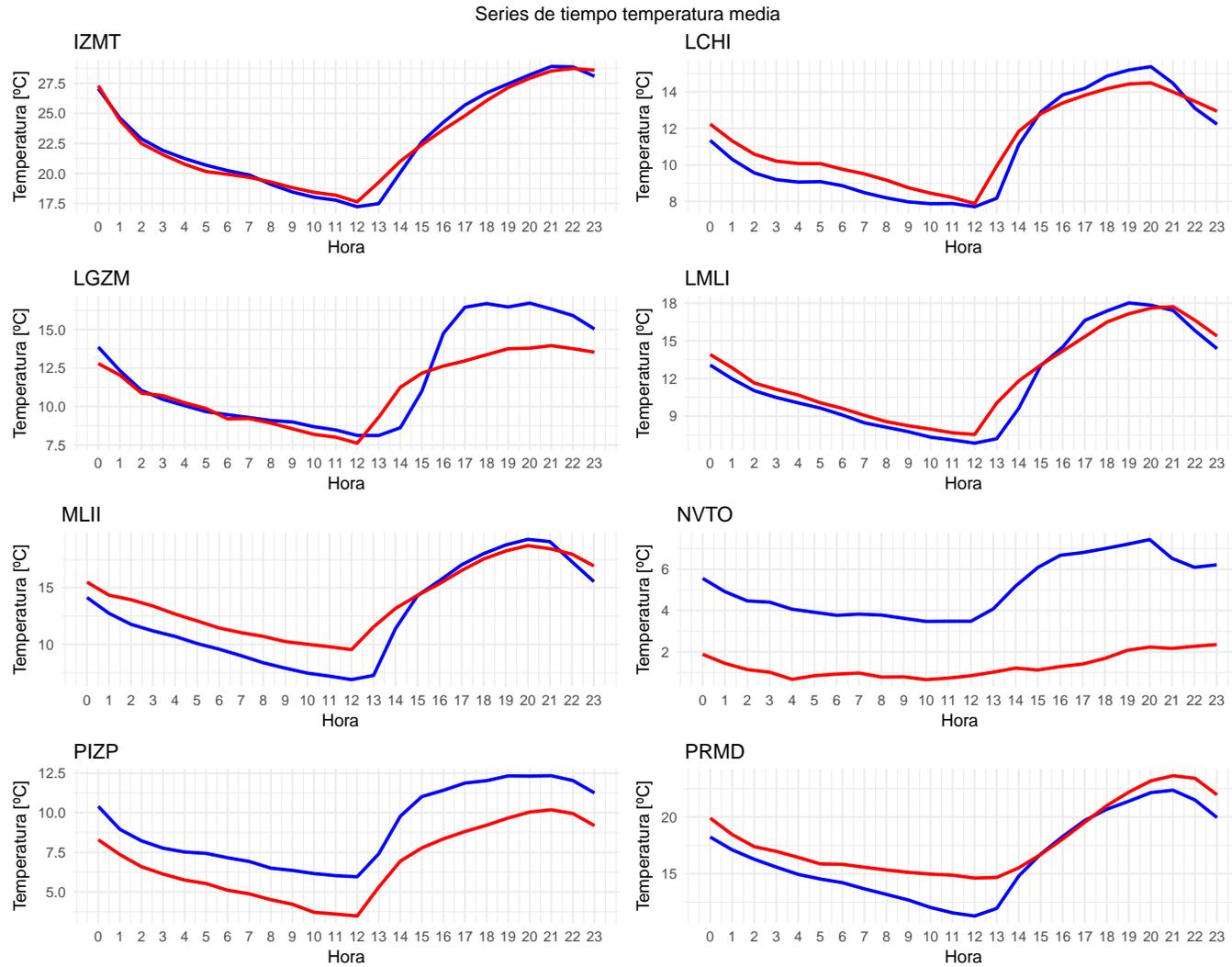


FIGURA B.8: Series de tiempo de la temperatura media.

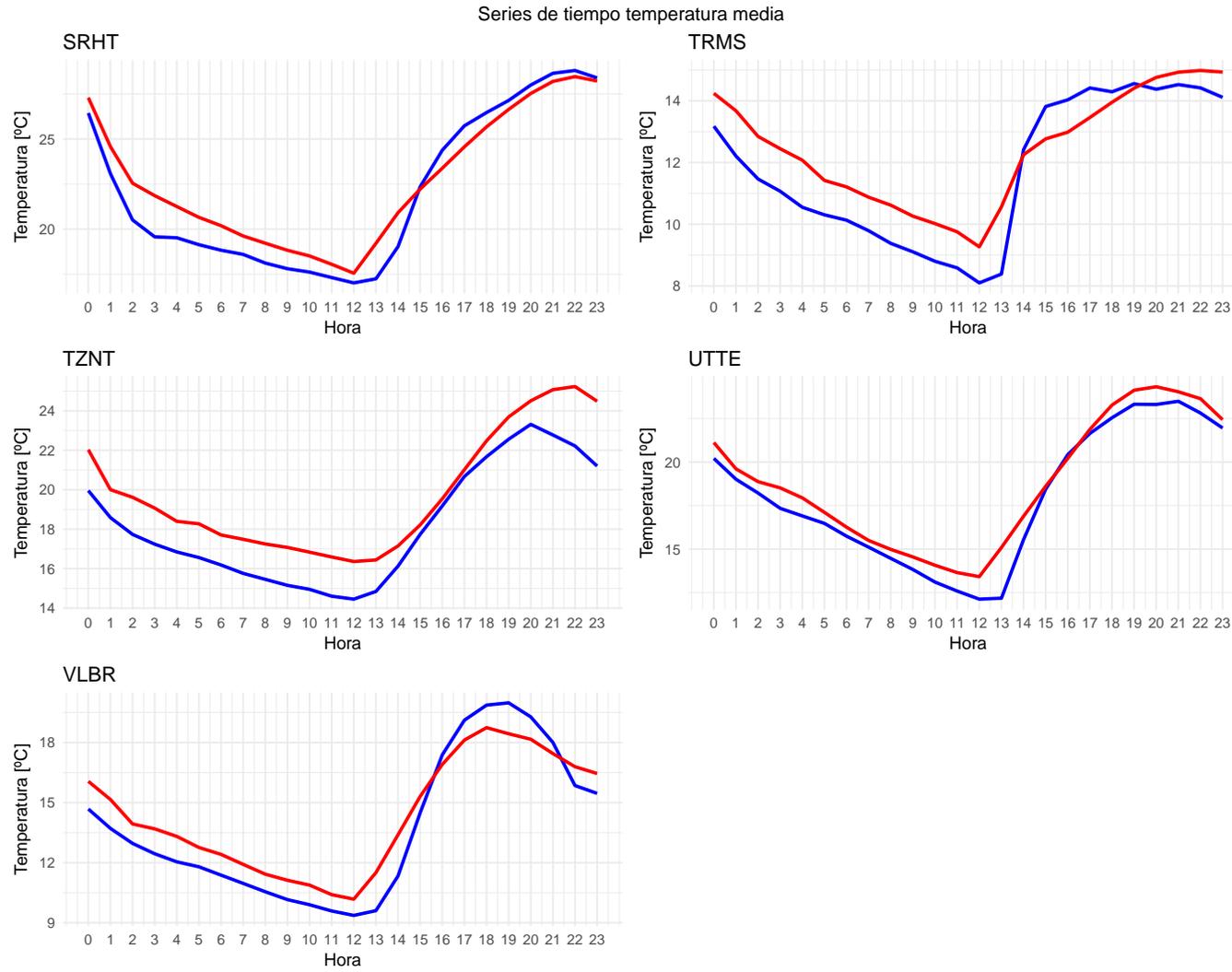


FIGURA B.9: Series de tiempo de la temperatura media.

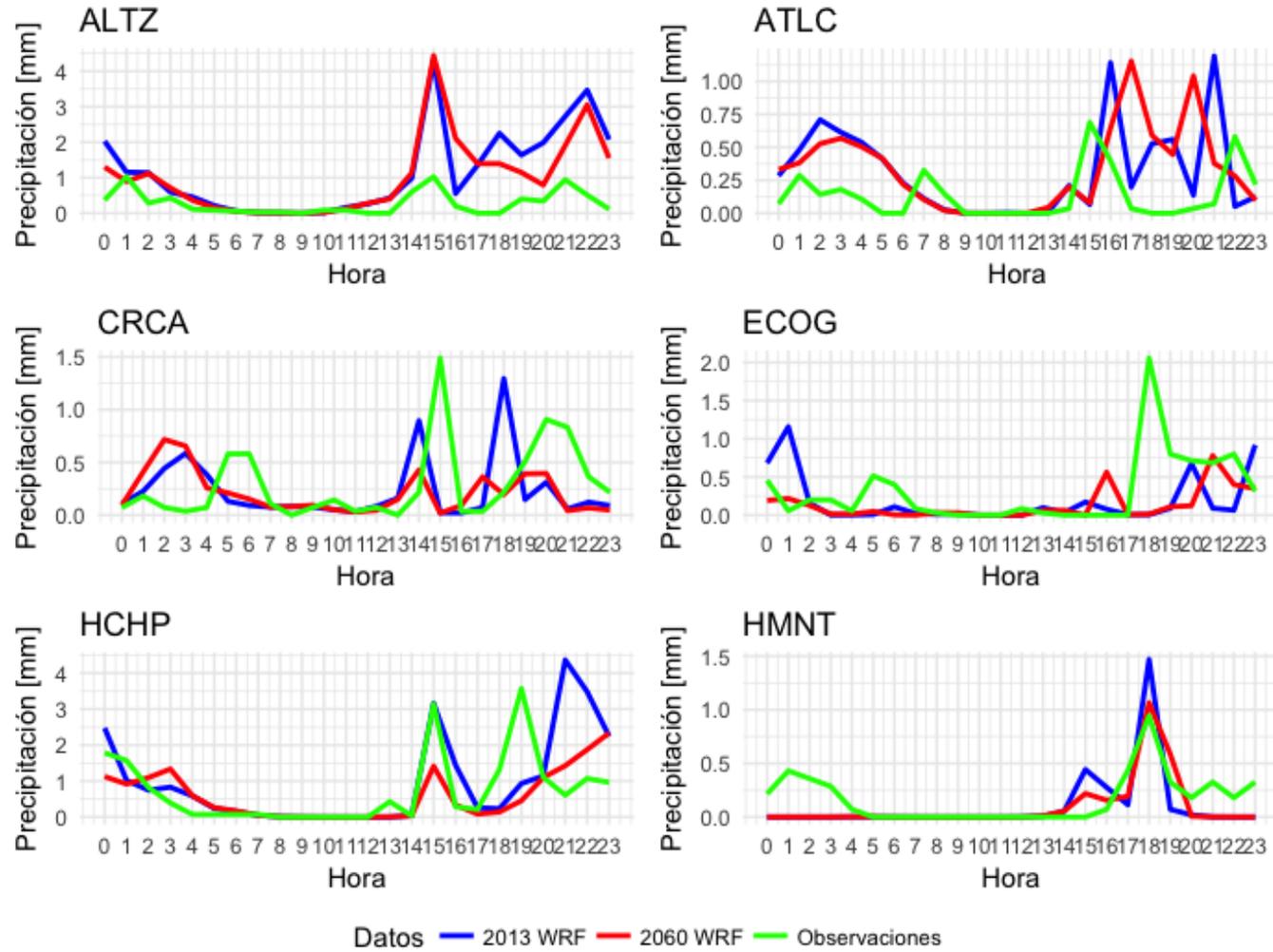


FIGURA B.10: Series de tiempo de la precipitación media horaria.

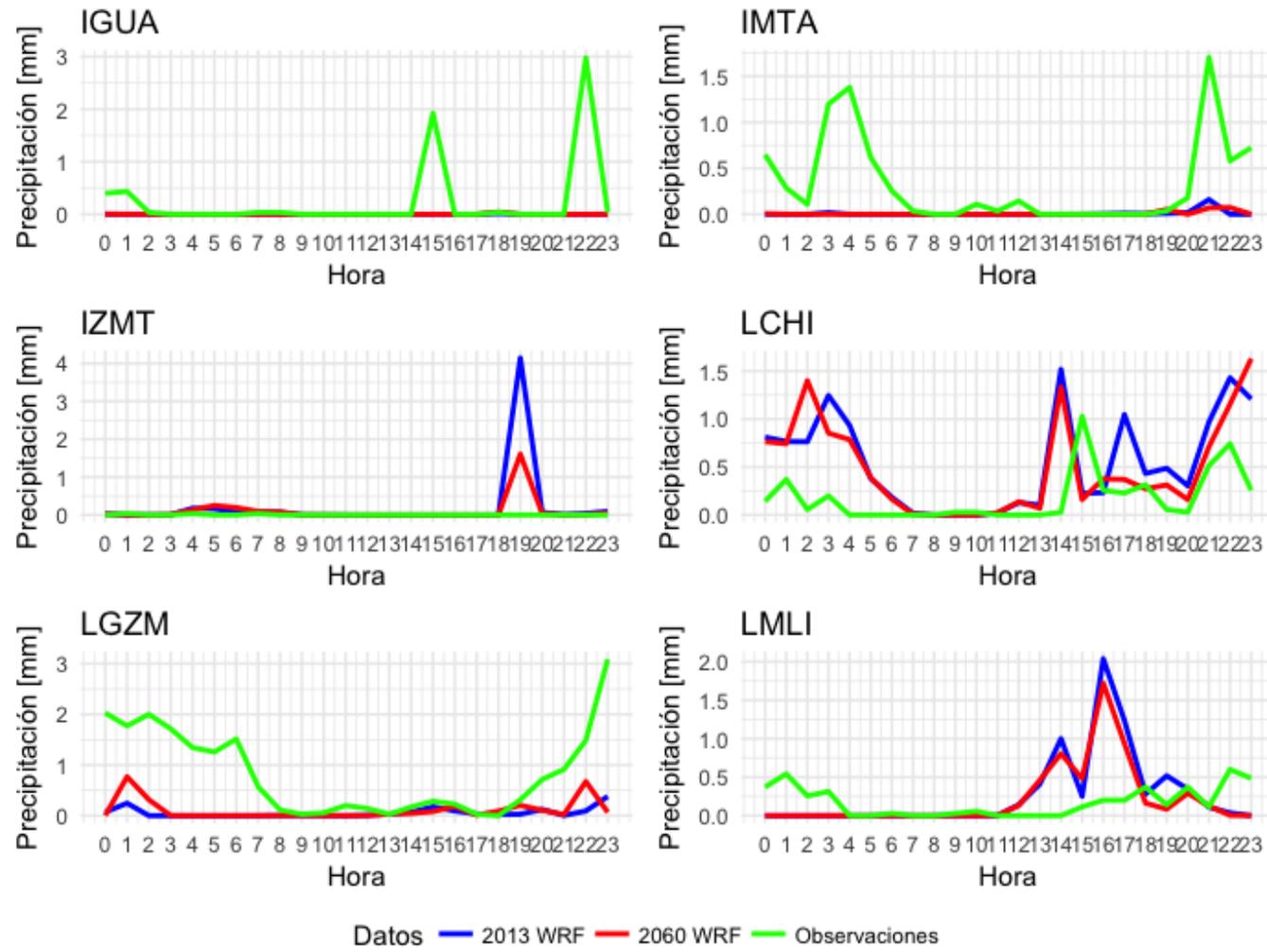


FIGURA B.11: Series de tiempo de la precipitación media horaria.

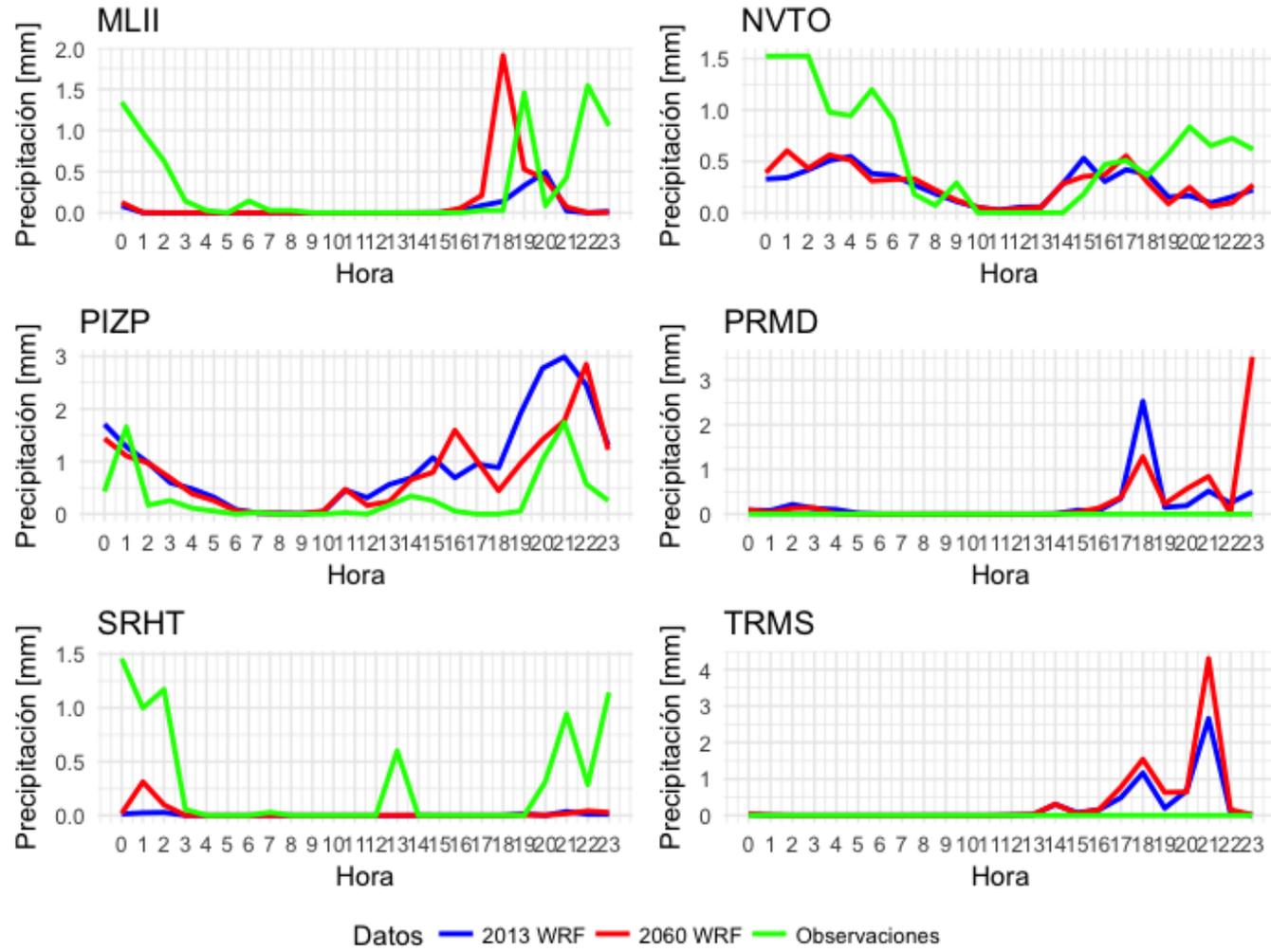


FIGURA B.12: Series de tiempo de la precipitación media horaria.

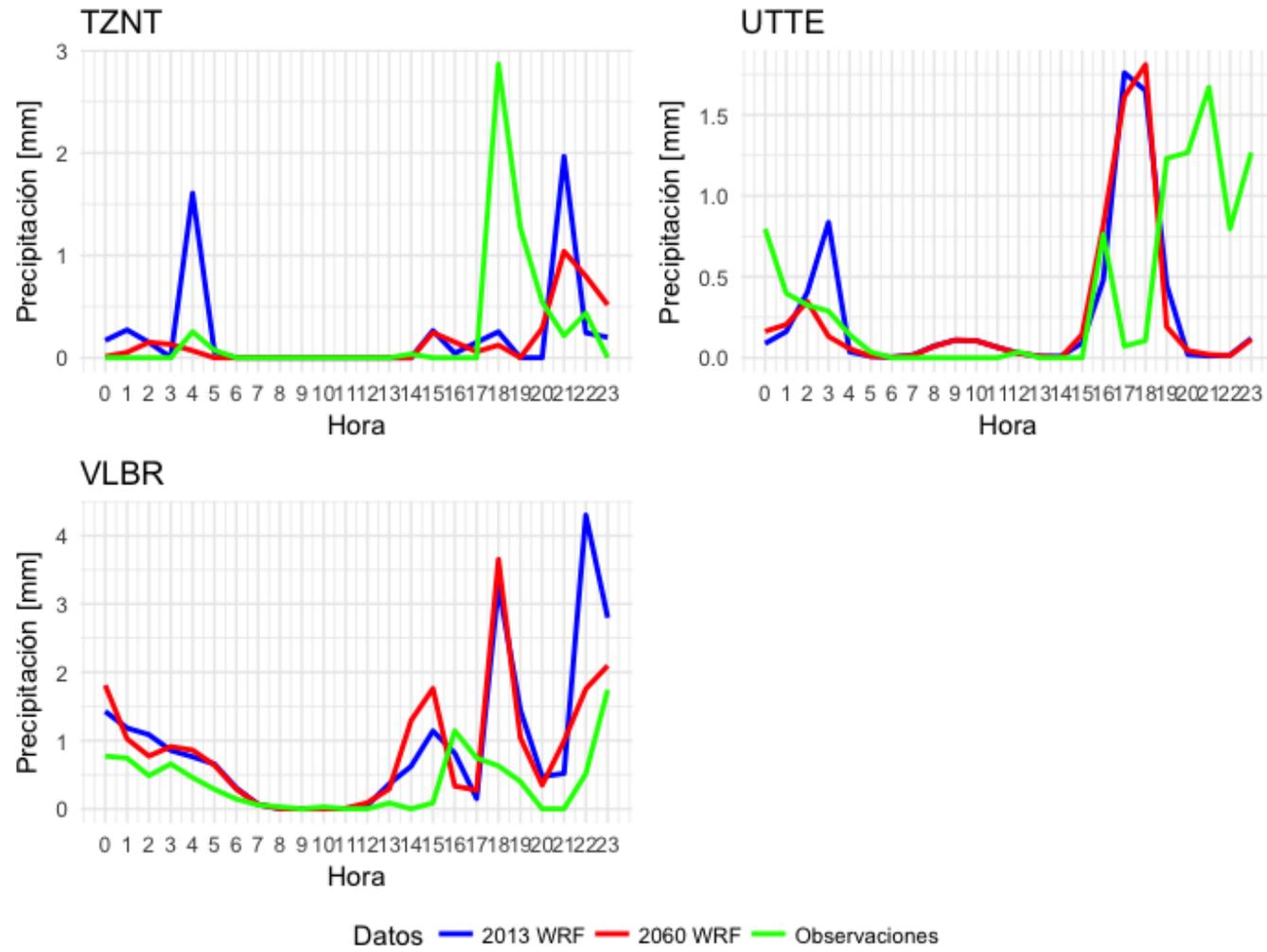


FIGURA B.13: Series de tiempo de la precipitación media horaria.

Apéndice C

Mapas

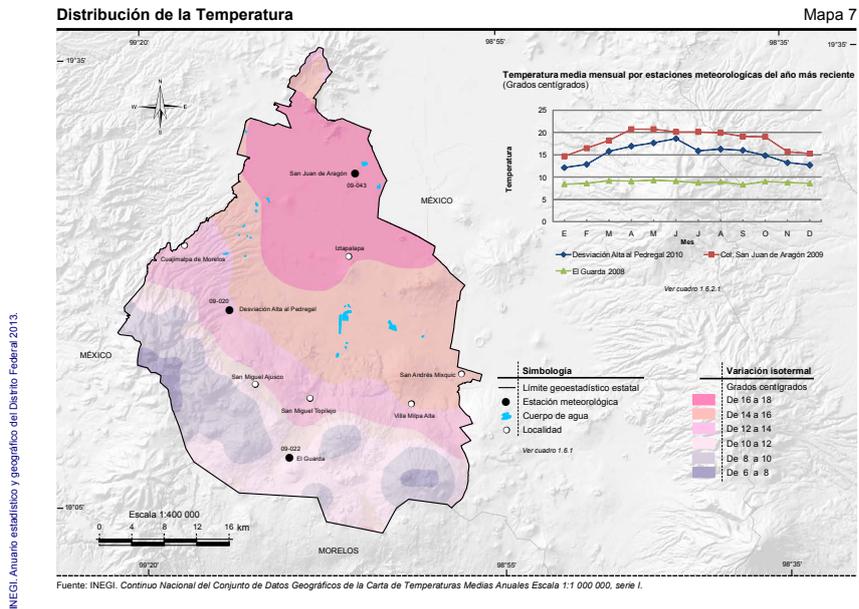


FIGURA C.1: Distribución de la temperatura observada en el año 2013 en la Ciudad de México. Fuente: INEGI

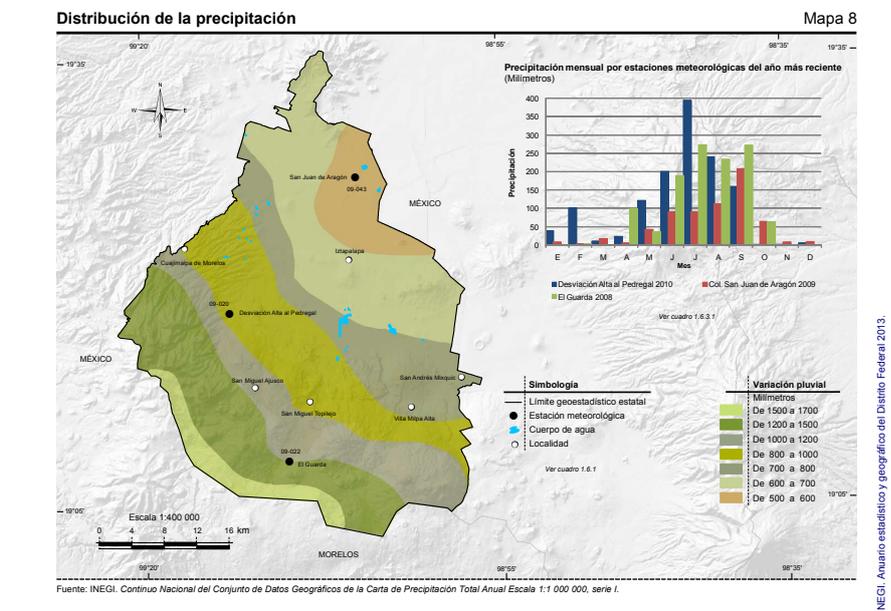


FIGURA C.2: Distribución de la temperatura observada en el año 2013 en la Ciudad de México. Fuente: INEGI

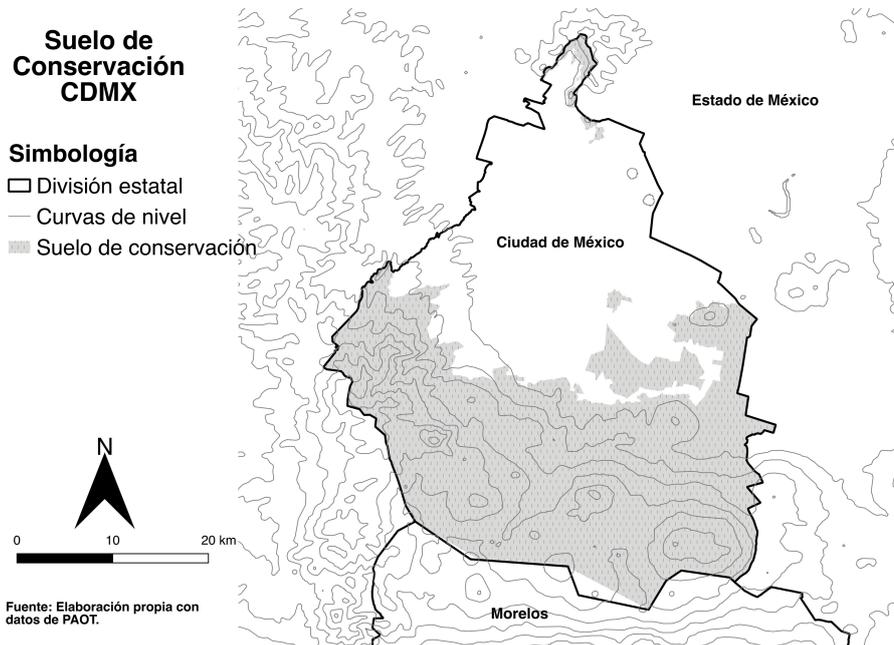


FIGURA C.3: Cobertura del Suelo de Conservación de la Ciudad de México.

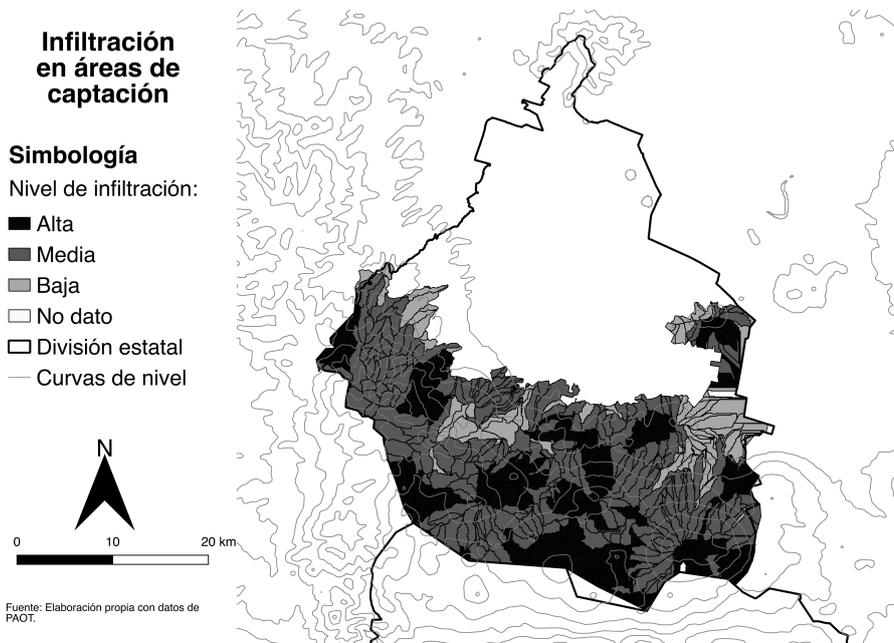


FIGURA C.4: Niveles de infiltración dentro del Suelo de Conservación de la Ciudad de México.

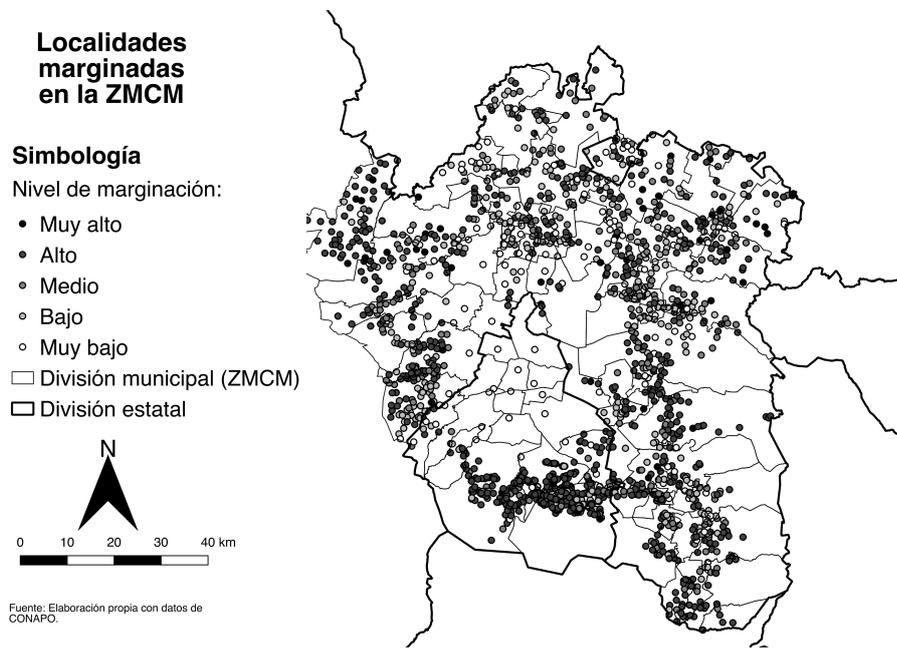


FIGURA C.5: Localidades marginadas en la ZMCM y su nivel de marginación.

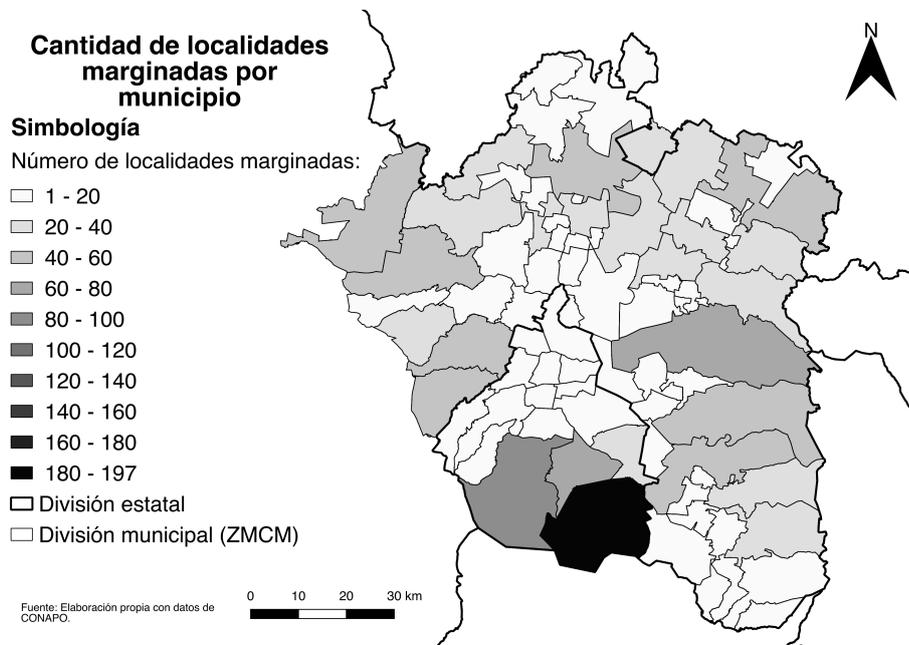


FIGURA C.6: Cantidad de localidades marginadas por municipio en la ZMCM.

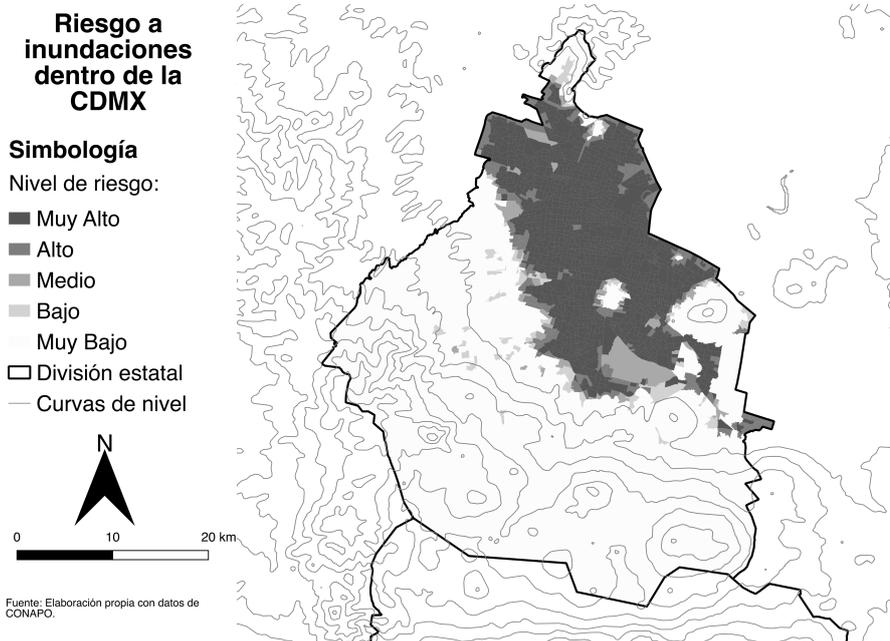


FIGURA C.7: Nivel de riesgo a inundaciones dentro de la CDMX.

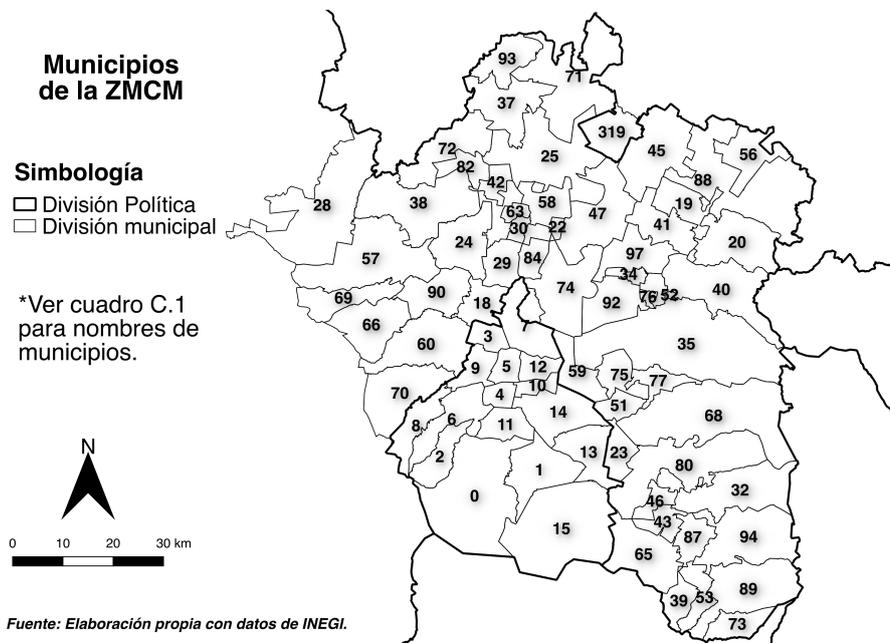


FIGURA C.8: Municipios de la ZMCM. Ver cuadro ?? para nombres.

TABLA C.1: Indicadores utilizados para desarrollar el Índice de Vulnerabilidad Sociodemográfica 2010 de CONAPO.

Indicador	Descripción
Porcentaje de viviendas con hacinamiento	Tres o más ocupantes por cuarto.
Porcentaje de viviendas sin servicios públicos	Sin drenaje conectado a la red pública, sin agua entubada dentro de la vivienda.
Porcentaje de viviendas con materiales precarios	
Porcentaje de viviendas sin medios de comunicación	Sin radio, televisor, teléfono.
Porcentaje de población que vive en localidades rurales	En localidades menores a 2500 habitantes.
Porcentaje de población mayor a quince años analfabeta	
Razón de dependencia demográfica	
Porcentaje de población ocupada en el sector primario de la economía	
Porcentaje de la población indígena que no habla español	
Porcentaje de población discapacitada	
Porcentaje de población ocupada que gana tres o menos salarios mínimos	
Porcentaje de población sin servicios de salud	

TABLA C.2: Nombres de los municipios de la ZMCM. Ver C.8 para su localización.

No.	Municipio	No.	Municipio
0	Tlalpan	46	Temamatla
1	Xochimilco	47	Tecmac
2	La Magdalena Contreras	51	La Paz
3	Azcapotzalco	52	Papalotla
4	Benito Jurez	53	Ozumba
5	Cuauhtemoc	56	Nopaltepec
6	Álvaro Obregón	57	Nicolás Romero
7	Gustavo A. Madero	58	Nextlalpan
8	Cuajimalpa de Morelos	59	Nezahualcóyotl
9	Miguel Hidalgo	60	Naucalpan de Juárez
10	Iztacalco	63	Melchor Ocampo
11	Coyoacán	65	Juchitepec
12	Venustiano Carranza	66	Jilotzingo
13	Tláhuac	68	Ixtapaluca
14	Iztapalapa	69	Isidro Fabela
15	Milpa Alta	70	Huixquilucan
18	Tlalnepantla de Baz	71	Hueyoxotla
19	San Martín de las Pirámides	72	Huehuetoca
20	Otumba	73	Ecatzingo
21	Jaltenco	74	Ecatepec de Morelos
22	Tonanitla	75	Chimalhuacán
23	Valle de Chalco Solidaridad	76	Chiconcuac
24	Cuautitlán Izcalli	77	Chicoloapan
25	Zumpango	78	Chiautla
28	Villa del Carbón	80	Chalco
29	Tultitlán	81	Cuautitlán
30	Tultepec	82	Coyotepec
32	Tlalmanalco	83	Cocotitlán
34	Tezoyuca	84	Coacalco de Berriozbal
35	Texcoco	87	Ayapango
37	Tequixquiac	88	Axapusco
38	Tepotzotlán	89	Atlautla
39	Tepetlixpa	90	Atizapán de Zaragoza
40	Tepetlaotoc	92	Atenco
41	Teotihuacán	93	Apaxco
42	Teoloyucan	94	Amecameca
43	Tenango del Aire	97	Acolman
45	Temascalapa	319	Tizayuca

Bibliografía

- Adger, W. Neil (2006). «Vulnerability». En: *Global Environmental Change* 16.3, págs. 268-281. ISSN: 09593780. DOI: [10.1016/j.gloenvcha.2006.02.006](https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.02.006).
- Agenda de Sustentabilidad Ambiental para la ZMVM* (2010). Inf. téc. Tlaneantla de Baz: Comisión Ambiental Metropolitana, pág. 236.
- Arango, C y José Franklin Ruiz (2011). «Implementación del modelo WRF para la sabana de Bogotá». En: *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales*, pág. 16. URL: http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21132/Modelo_WRF_Bogota.pdf/f1d34638-e9f8-4689-b5f4-31957c231c46.
- Atlas Geográfico del Suelo de Conservación del Distrito Federal* (2012). Inf. téc. PAOT, pág. 96.
- Atlas of Urban Expansion* (2016). URL: http://www.atlasofurbanexpansion.org/cities/view/Mexico_City.
- Ávila-Sánchez, Héctor (2011). «Socio-territorial changes in peri-urban food production spaces in Central Mexico». En: *Norois* 221, págs. 39-51. ISSN: 0029-182X. DOI: [10.4000/norois.3738](https://doi.org/10.4000/norois.3738).
- Baeza, Andrés *et al.* (2018). «Biophysical, infrastructural and social heterogeneities explain spatial distribution of waterborne gastrointestinal disease burden in Mexico City». En: *Environmental Research Letters* 13.6.
- Baklanov, Alexander, Luisa T Molina y Michael Gauss (2016). «Megacities, air quality and climate». En: DOI: [10.1016/j.atmosenv.2015.11.059](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.11.059). URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.11.059>.
- Benson-Lira, V. *et al.* (2016). «Loss of a lake system in a megacity: The impact of urban expansion on seasonal meteorology in Mexico City». En: *Journal of Geophysical Research* 121.7, págs. 3079-3099. ISSN: 21562202. DOI: [10.1002/2015JD024102](https://doi.org/10.1002/2015JD024102).
- Carabias, Julia *et al.* (2010). *Patrimonio natural de México. Cien casos de éxito*. México: Comisión nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. ISBN: 978-607-7607-40-3. URL: https://www.biodiversidad.gob.mx/pais/cien_casos/pdf/Ciencasos.pdf.

- Clarke, K C, S Hoppen y L Gaydos (1997). «A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay area». En: *Environment and Planning B: Planning and Design* 24.2, págs. 247-261. ISSN: 0265-8135. DOI: [10.1068/b240247](https://doi.org/10.1068/b240247). URL: <http://epb.sagepub.com/lookup/doi/10.1068/b240247>.
- CONAPO (2010). *Delimitación de Zonas Metropolitanas | Consejo Nacional de Población CONAPO*. URL: http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Datos_Abiertos_Delimitacion_de_Zonas_Metropolitanas.
- (2018). *Datos Abiertos de México - Proyecciones de la Población de México y de las Entidades Federativas, 2016-2050 - Tasa Específica de Fecundidad y Nacimientos, 1950-2050*. URL: <https://datos.gob.mx/busca/dataset/proyecciones-de-la-poblacion-de-mexico-y-de-las-entidades-federativas-2016-2050/resource/85eebb21-6730-4895-92e2-d539e7e8c721>.
- Cram, Silke *et al.* (2008). «Identification of the potential soil environmental services in the urban landscape of Mexico City». En: *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM* 66.5000, págs. 81-104. ISSN: 0188-4611.
- Defries, Ruth S, Jonathan A Foley y Gregory P Asner (2004). «Land-Use Choices: Balancing Human Needs and Ecosystem Function». En: *Frontiers in Ecology and the Environment* 2.5, págs. 249-257. URL: <https://www.jstor.org/stable/pdf/3868265.pdf?refreqid=excelsior%3Aa5d7c750d770f60f4ce5e92d5da42b46>.
- Devkota, Laxmi Prasad y Dhiraj Raj Gyawali (2015). «Journal of Hydrology : Regional Studies Impacts of climate change on hydrological regime and water resources management of the Koshi River Basin , Nepal». En: 4, págs. 502-515. ISSN: 2214-5818. DOI: [10.1016/j.ejrh.2015.06.023](https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.06.023).
- Dietzel, Charles y Keith C Clarke (2007). «Toward Optimal Calibration of the SLEUTH Land Use Change Model». En: *Transactions in GIS* 11.1, págs. 29-45. ISSN: 1365-8816. DOI: <https://escholarship.org/uc/item/0r75311t>. URL: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1467-9671.2007.01031.x/full%5Cnhttp://www.escholarship.org/uc/item/0r75311t%5Cngeomaticsksa.com/GTC2011/S4/PDF/2.pdf?%5Cnhttp://dx.doi.org/10.1080/13658810210157769%5Cnhttp://www.int-arch-photogramm-remote-sens>.
- Dirven, Martine *et al.* (2011). *Hacia una nueva definición de rural con fines estadísticos en América Latina*. Inf. téc. Santiago de Chile: CEPAL. URL: https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/3858/1/S2011960_es.pdf.

- Eakin, Hallie y Amy Lynd Luers (2006). «Assessing the Vulnerability of Social-Environmental Systems [Online]». En: *Annual Review of Environment and Resources* 31, págs. 365-394. DOI: [10.1146/annurev.energy.30.050504.144352](https://doi.org/10.1146/annurev.energy.30.050504.144352). URL: <https://www.researchgate.net/publication/228285384>.
- Escamilla-Herrera, Irma y Clemencia Santos-Cerguera (2012). «La Zona Metropolitana del Valle de México: Transformación urbano-rural en la región centro de México». En: *XII Coloquio Internacional de Geocrítica*. Bogotá, págs. 1-15. ISBN: 1525-0016 (Print)\r1525-0016 (Linking). DOI: [10.1016/j.ymthe.2004.05.018](https://doi.org/10.1016/j.ymthe.2004.05.018).
- Ezcurra, Exequiel *et al.* (2016). «La ciudad de México: entre la vulnerabilidad ambiental y la sustentabilidad». En: *Economía Sociedad y Territorio* VIII.28, págs. 1067-1078. ISSN: 14058421. DOI: [10.22136/est002008228](https://doi.org/10.22136/est002008228).
- Fernández, D. S. y M. A. Lutz (2010). «Urban flood hazard zoning in Tucumán Province, Argentina, using GIS and multicriteria decision analysis». En: *Engineering Geology* 111.1-4, págs. 90-98. ISSN: 00137952. DOI: [10.1016/j.enggeo.2009.12.006](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.12.006). URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.12.006>.
- Fernández, Perla y Sergio de la Vega (2017). «¿Lo rural en lo urbano? Localidades periurbanas en la Zona Metropolitana del Valle de México». En: *EURE* 43.130, págs. 185-206. DOI: [0717-6236](https://doi.org/0717-6236). URL: <http://dle.rae.es/?id=ZcqJYVW..>
- Fernández-Álvarez, Rafael (2017). «Inequitable distribution of green public space in the Mexico City: an environmental injustice case Distribución inequitativa del espacio público verde en la Ciudad de México: un caso de injusticia ambiental». En: *Economía, Sociedad y Territorio* xvii, págs. 399-428. DOI: [10.22136/est002017697](https://doi.org/10.22136/est002017697). URL: <http://dx.doi.org/10.22136/est002017697>.
- Foley, Jonathan A. *et al.* (2005). «Global consequences of land use». En: *Science* 309.5734, págs. 570-574. ISSN: 00368075. DOI: [10.1126/science.1111772](https://doi.org/10.1126/science.1111772).
- Huong, H. T L y A. Pathirana (2013). «Urbanization and climate change impacts on future urban flooding in Can Tho city, Vietnam». En: *Hydrology and Earth System Sciences* 17.1, págs. 379-394. ISSN: 16077938. DOI: [10.5194/hess-17-379-2013](https://doi.org/10.5194/hess-17-379-2013).
- Jáuregui, Ernesto (1997). «Heat Island Development in Mexico City». En: *Atmospheric Environment* 31.22, págs. 3821-3831. URL: https://ac-els-cdn-com.pbidi.unam.mx:2443/S1352231097001362/1-s2.0-S1352231097001362-main.pdf?_tid=57f155eb-d155-4252-9814-d9d6c133fefd&acdnat=1542060474_89a3a30e9c4d254a0c73930080c7ced9.

- Jáuregui, Ernesto (2004). «Impact of land-use changes on the climate of the Mexico City Region». En: *Investigaciones Geográficas* 55, págs. 46-60. ISSN: 01884611.
- Jazcilevich, Arón *et al.* (2000). *Simulated urban climate response to historical land use modification in the basin of Mexico*. Inf. téc. URL: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1023%2FA%3A1005588919627.pdf>.
- Leao, Simone, Ian Bishop y David Evans (2004). «Spatial-temporal model for demand and allocation of waste landfills in growing urban regions». En: *Computers, Environment and Urban Systems* 28.4, págs. 353-385. ISSN: 01989715. DOI: [10.1016/S0198-9715\(03\)00043-7](https://doi.org/10.1016/S0198-9715(03)00043-7).
- López-Espinoza, E.D. y J. Zavala-Hidalgo (2012). «Weather forecast sensitivity to changes in urban land covers using the WRF model for central México». En: *Atmósfera* 25.2, págs. 127-154.
- López Vázquez, Víctor Hugo y Wenseslao Plata Rocha (2009). «Análisis de los cambios de cobertura de suelo derivados de la expansión urbana de la Zona Metropolitana de la Ciudad de». En: *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM* 68, págs. 85-101. ISSN: 0188-4611. URL: <http://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n68/n68a7.pdf>.
- Mills, Gerald (2007). «Cities as agents of global change». En: *International Journal of Climatology* 27, págs. 1849-1857. DOI: [10.1002/joc.1604](https://doi.org/10.1002/joc.1604). URL: <http://dx.doi.org/10.1002/joc.1861>.
- Oke, T. R. (1973). «City size and the urban heat island». En: *Atmospheric Environment (1967)* 7.8, págs. 769-779. ISSN: 00046981. DOI: [10.1016/0004-6981\(73\)90140-6](https://doi.org/10.1016/0004-6981(73)90140-6).
- Oke, T. R. *et al.* (1999). «The energy balance of central Mexico City during the dry season». En: *Atmospheric Environment* 33, págs. 3919-3930. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.581.4778&rep=rep1&type=pdf>.
- Osman, Taher, Prasanna Divigalpitiya y Takafumi Arima (2016). «Using the SLEUTH urban growth model to simulate the impacts of future policy scenarios on land use in the Giza Governorate, Greater Cairo Metropolitan region». En: *International Journal of Urban Sciences* 20.3, págs. 407-426. ISSN: 1226-5934. DOI: [10.1080/12265934.2016.1216327](https://doi.org/10.1080/12265934.2016.1216327). URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/12265934.2016.1216327>.
- Pathirana, Assela *et al.* (2014). «Impact of urban growth-driven landuse change on microclimate and extreme precipitation - A sensitivity study». En: *Atmospheric Research* 138.2006, págs. 59-72. ISSN: 01698095. DOI: [10.1016/j.atmosres.2013.10.005](https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.10.005).

- Programa de Ordenación de la Zona Metropolitana del Valle de México 2011* (2011). Inf. téc. Distrito Federal: Comisión Metropolitana de Asentamientos Humanos, págs. 1-206.
- Shem, Willis y Marshall Shepherd (2009). «On the impact of urbanization on summertime thunderstorms in Atlanta: Two numerical model case studies». En: *Atmospheric Research* 92.2, págs. 172-189. ISSN: 01698095. DOI: [10.1016/j.atmosres.2008.09.013](https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2008.09.013). URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2008.09.013>.
- Silva, E. A. y K. C. Clarke (2002). «Calibration of the SLEUTH urban growth model for Lisbon and Porto, Portugal». En: *Computers, Environment and Urban Systems* 26.6, págs. 525-552. ISSN: 01989715. DOI: [10.1016/S0198-9715\(01\)00014-X](https://doi.org/10.1016/S0198-9715(01)00014-X).
- Sobrinho, Jaime *et al.* (2015). «Ciudades sostenibles en México: una propuesta conceptual y operativa». En: *Atmospheric Research* 92.2, pág. 178.
- Taylor, Karl E (2001). «Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram». En: *Journal of Geophysical Research* 106.D7, págs. 7183-7192. DOI: [10.1029/2000JD900719](https://doi.org/10.1029/2000JD900719). URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2000JD900719>.
- Tellman, Beth *et al.* (2018). «Adaptive pathways and coupled infrastructure: seven centuries of adaptation to water risk and the production of vulnerability in Mexico City». En: *Ecology and Society* 23.1. ISSN: 1708-3087. DOI: [10.5751/es-09712-230101](https://doi.org/10.5751/es-09712-230101).
- Vieyra, Antonio, Yadira Méndez-Lemus y Juan Alfredo Hernández (2018). *PROCESOS PERIURBANOS: desequilibrios territoriales, desigualdades sociales, ambientales y pobreza*. Primera Ed. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México. ISBN: 9786073008877. URL: http://www.ciga.unam.mx/publicaciones/images/abook_file/978-607-30-0888-4_Procesos_periurbanos.pdf.
- Vliet, Jasper van *et al.* (2016). «A review of current calibration and validation practices in land-change modeling». En: *Environmental Modelling and Software* 82.May, págs. 174-182. ISSN: 13648152. DOI: [10.1016/j.envsoft.2016.04.017](https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.04.017). URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.04.017>.
- Vojnovic, Igor (2014). «Urban sustainability: Research, politics, policy and practice». En: *Cities* 41, S30-S44. ISSN: 0264-2751. DOI: [10.1016/J.CITIES.2014.06.002](https://doi.org/10.1016/J.CITIES.2014.06.002). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264275114000900>.

- World Meteorological Organization (2000). *Guidelines on Performance Assessment of Public Weather Services*. Inf. téc. Geneva. URL: <https://www.wmo.int/pages/prog/amp/pwsp/pdf/TD-1023.pdf>.
- World Urbanization Prospects: The 2018 Revision* (2018). Inf. téc. United Nations. URL: <https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-KeyFacts.pdf>.
- Yang, Xiaojun y C. P. Lo (2003). «Modelling urban growth and landscape changes in the Atlanta metropolitan area». En: *International Journal of Geographical Information Science* 17.5, págs. 463-488. ISSN: 13658816. DOI: [10.1080/1365881031000086965](https://doi.org/10.1080/1365881031000086965).