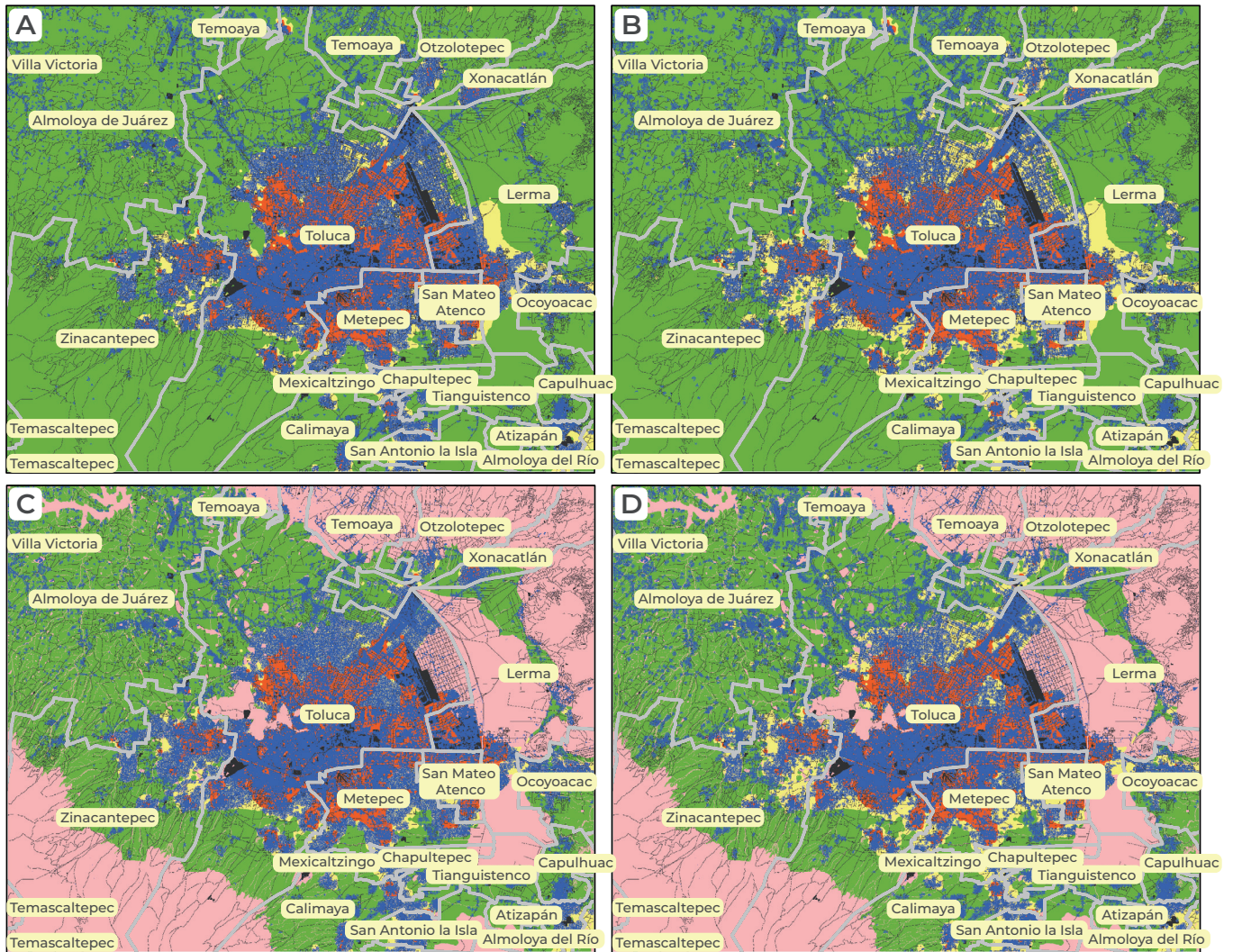


Figura 6.
 Área Metropolitana de Toluca. Expansión urbana del AMT, 2020 calculada por el modelo AC-RGP

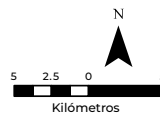


Simbología

Potencial de transición

- Periferia
- Pericentro
- Centro
- Restricción base
- Restricción ecológica
- Área de la ciudad ocupada

Límite municipal



Fuente: Elaboración propia.

En síntesis, se construyeron 1 024 modelos de expansión urbana del AMT (256 modelos en cada una de las cuatro pruebas de la etapa de calibración). La pregunta a resolver fue: ¿cuál de los 1 024 modelos es el que mejor simula el crecimiento de la mancha urbana del AMT de 2010 a 2020 y con qué regla de vecindad?

Comparar estadísticamente el parecido entre mapas no es sencillo. Aquí es donde se utiliza el Filtro en Cascada que incluye métricas de bondad de ajuste globales (v.g. a escala de ciudad) y micro territoriales (a escala de celda) (Jiménez-López *et al.*, 2021). El Filtro en Cascada permite identificar la regla de vecindad que genera el mejor ajuste entre la mancha urbana generada por el AC-RGP y la observada en la realidad. A esto se le llama *calibrar* el modelo.

Todos los índices del Filtro en Cascada son buenos o muy buenos (véase cuadro 2). La figura 6 muestra el crecimiento de la mancha urbana 2010-2020 en las cuatro pruebas, con su mejor regla de vecindad revelada por el Filtro en Cascada. Sin embargo, seleccionamos los de la prueba D, por nuestro interés en el crecimiento sostenible en la periferia, correspondiente al uso de la regla de vecindad 127. El valor de Kappa es igual a 0.59, Jaccard 0.76, Entropía de Shannon 0.76 y Dimensión fractal 1.73. El modelo AC-RGP es eficiente y genera muy buenos resultados. La figura 7 muestra la imagen real de la ciudad en 2020 y la producida por el modelo AC-RGP con insumos de 2010 y su mejor regla de vecindad.

Cuadro 2. Área Metropolitana de Toluca. Índices calculados en la etapa de calibración				
Índices (filtro en cascada)	Restricción base		Restricción ecológica	
	Pericentro	Periferia	Pericentro	Periferia
	A	B	C	D
Entropía de Shannon	0.76	0.76	0.76	0.76 (disperso)
Dimensión fractal	1.72	1.73	1.71	1.73 (permanece igual)
Desviación estándar	+/- 0.05	+/-0.05	+/-0.06	+/-0.05
Índice Jaccard	0.75	0.75	0.76	0.76 (muy buena)
Índice Kappa	0.59	0.56	0.59	0.59 (buena)

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados del AC.

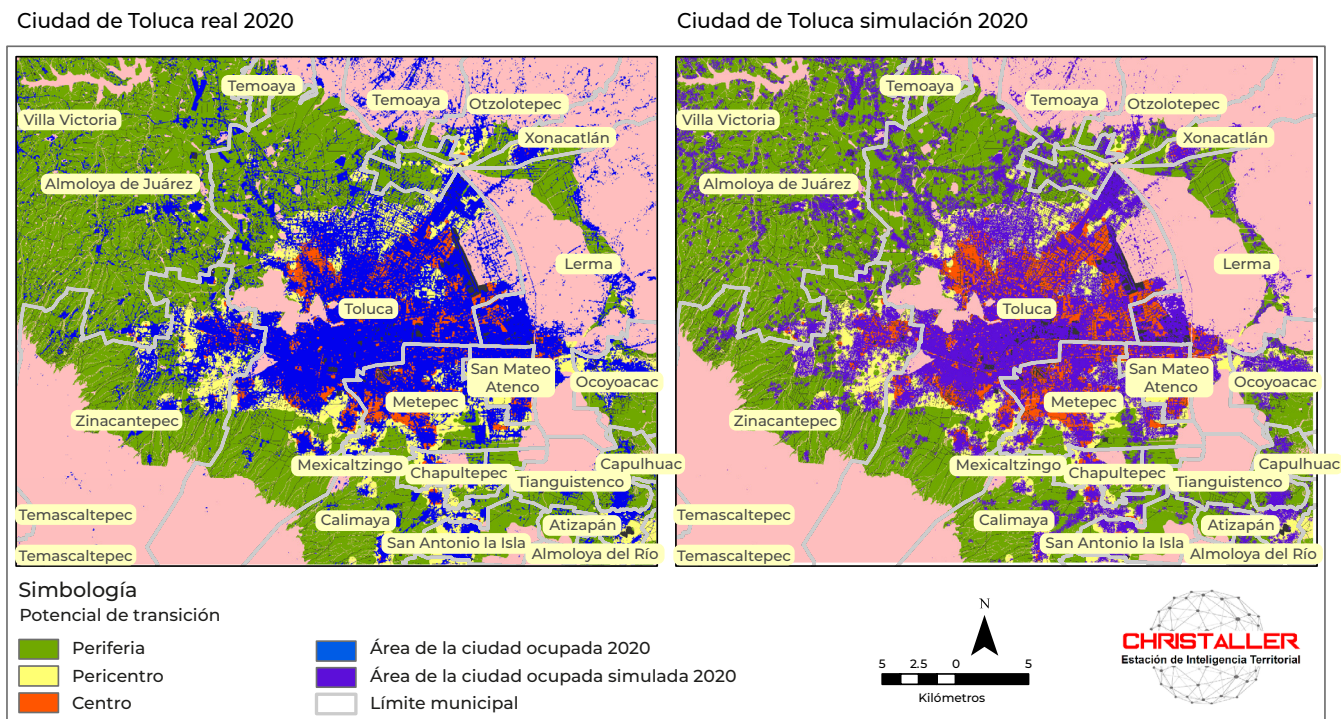
4. Escenarios de la expansión del AMT a 2030

Luego de la calibración, se aplicó el modelo AC-RGP para generar escenarios de expansión del AMT a 2030. No son predicciones, son escenarios exploratorios. Para 2030 suponemos que el área urbana ocupe un total de 54 262 hectáreas (equivalente a 2 411 644 de celdas), un aumento de 24 275 hectáreas. Esto significa que en

diez años la ciudad crecerá casi 81 por ciento respecto a 2020: un crecimiento proporcional similar al de los diez años previos (de 2010 a 2020).

A este tipo de supuesto de crecimiento y cambio se le llama *tendencial* y lo decide el analista, quien podría suponer escenarios de expansión más lenta o rápida, de acuerdo a su conocimiento de la evolución de la ciudad, de diversos proyectos (públicos y privados) y de otras circunstancias que podrían ocurrir en la ciudad.

Figura 7.
Área Metropolitana de Toluca. Ciudad de Toluca real 2020 y ciudad de Toluca simulada 2020



Fuente: Elaboración propia.

5. Escenarios

Hemos simulado cuatro escenarios de expansión urbana del AMT a 2030. Se describen a continuación de manera sucinta.

Escenario 1. *Se aplican restricciones básicas o base (RB) y se favorece el crecimiento en el pericentro del AMT.*

Este escenario es muy realista: no restringe el crecimiento en diversas zonas que los planes de desarrollo municipal definen como no aptas o no permitidas, solo limita la expansión en los lugares donde no es posible crecer, porque en ellos ya existe algún tipo de infraestructura urbana: carreteras y vialidades, áreas ya construidas, espacios públicos y áreas verdes, entre otros.

En esta simulación el norte de la ciudad se densifica, incluso en espacios empleados hasta ahora para la agricultura. Es notorio que la tendencia es ocupar los espacios disponibles en las cabeceras municipales

(las mejor equipadas), como se puede observar en los municipios de Almoloya de Juárez, al norponiente de la zona de estudio, y en Zinacantepec, al poniente (véase figura 8A).

El AMT se expande alrededor de la zona centro, prioritariamente en el municipio de Toluca, Almoloya de Juárez, Zinacantepec y Lerma. Se consolidan espacios colindantes con el municipio de Otzolotepec (Fraccionamiento Real de San Pablo y San Diego de los Padres Cuexcontitlán) y el norponiente del Aeropuerto Internacional de Toluca “Adolfo López Mateos”, a pesar de que esta zona se considera con alto riesgo de inundación, en el Plan de Desarrollo Municipal de Toluca. Se mantiene un crecimiento moderado en los municipios de Metepec, Otzolotepec y Xonacatlán.

Las vialidades periféricas de la ciudad fortalecen este escenario de expansión, sobre todo al norte y norponiente de Toluca, con la carretera Toluca-Naucalpan, consumiendo espacios dedicados a la agricultura (temporal y de humedad).

Escenario 2. *Se aplican restricciones básicas (RB) y se favorece el crecimiento en la periferia.*

Como regla general, el precio del suelo decrece conforme aumenta la distancia al centro de la ciudad. En consecuencia, la oferta de suelo de menor precio se localiza, básicamente, en la periferia urbana. Esto explica la dispersión de la mancha urbana en este escenario, que se fundamenta, sobre todo en cambios de uso de suelo de agrícola a habitacional y de servicios. El AMT también absorbe asentamientos que estaban distantes de la mancha urbana en 2020. Los retos en materia de dotación de servicios e infraestructura, serán desafiantes. Los municipios que presentan mayor expansión son Almoloya de Juárez, Toluca, Lerma y Temoaya (véase figura 8B). Se detectan importantes pérdidas de cobertura forestal e invasión de zonas de recarga hídrica.

Los resultados de este escenario se ajustan a lo que ha sucedido en la realidad. El AMT ha seguido un proceso de urbanización disperso: de 1980 a 2010, la superficie urbana aumentó casi ocho veces más rápido que su población (PDUEM, 2019).

Escenario 3. *Supone gobiernos que hacen respetar el medio ambiente y se favorece el crecimiento en el pericentro de la ciudad.*

A diferencia de los escenarios anteriores, el nivel restrictivo que se plantea en este escenario es mayor, ya que se supone el cumplimiento de las políticas de cuidado del medio ambiente establecidas por los tres niveles de gobierno, además del interés de inversionistas y la sociedad por el cuidado del medio ambiente. La capa de restricciones en este escenario se conforma por todas las zonas protegidas, áreas verdes, humedales, terrenos con pendientes mayores a 30°, además de las restricciones básicas consideradas en los dos escenarios anteriores, priorizando el crecimiento de la ciudad en el pericentro.

En esta simulación, se identifica una consolidación mayor del crecimiento al norte del municipio de Toluca y al poniente de la ciudad, hacia las cabeceras municipales de Zinacantepec y Almoloya de Juárez. En este escenario se prevé una ciudad más densa y se garantiza que los espacios naturales protegidos como es el parque Sierra Morelos, el Área de Protección de Flora y Fauna vado de Toluca y toda la zona de humedales en la cuenca del río Lerma, no sean urbanizados (véase figura 8C).

El libramiento norte de la ciudad es un referente para su crecimiento en este escenario. Una estructura urbana basada en la accesibilidad a servicios públicos, infraestructura, equipamientos y fuentes de empleo, debería promover que más población en la ciudad pueda alcanzar oportunidades de desarrollo y calidad de vida.

Escenario 4. *Se aplican restricciones ecológicas (RE) y se favorece el crecimiento en la periferia de la ciudad.*

Las restricciones para este escenario son las mismas que para el Escenario 3. La diferencia es que aquí se simula un crecimiento mayor en la periferia. En este escenario el crecimiento de la ciudad se dispersa sin invadir espacios restringidos, siendo muy notoria la expansión en el norponiente, particularmente en los municipios de Almoloya de Juárez y Zinacantepec (véase figura 8D).

En los escenarios tres y cuatro, la dispersión desordenada e irregular de los asentamientos humanos ya tiene efectos sistémicos sobre el medio ambiente y la calidad de vida de las personas. Destacan tres grandes impactos: la reducción de la recarga de aguas en el subsuelo, la pérdida de zonas agrícolas y forestales (que contribuyen a la alimentación, calidad del aire y mitigación del cambio climático) y una creciente dependencia de medios motorizados de transporte.