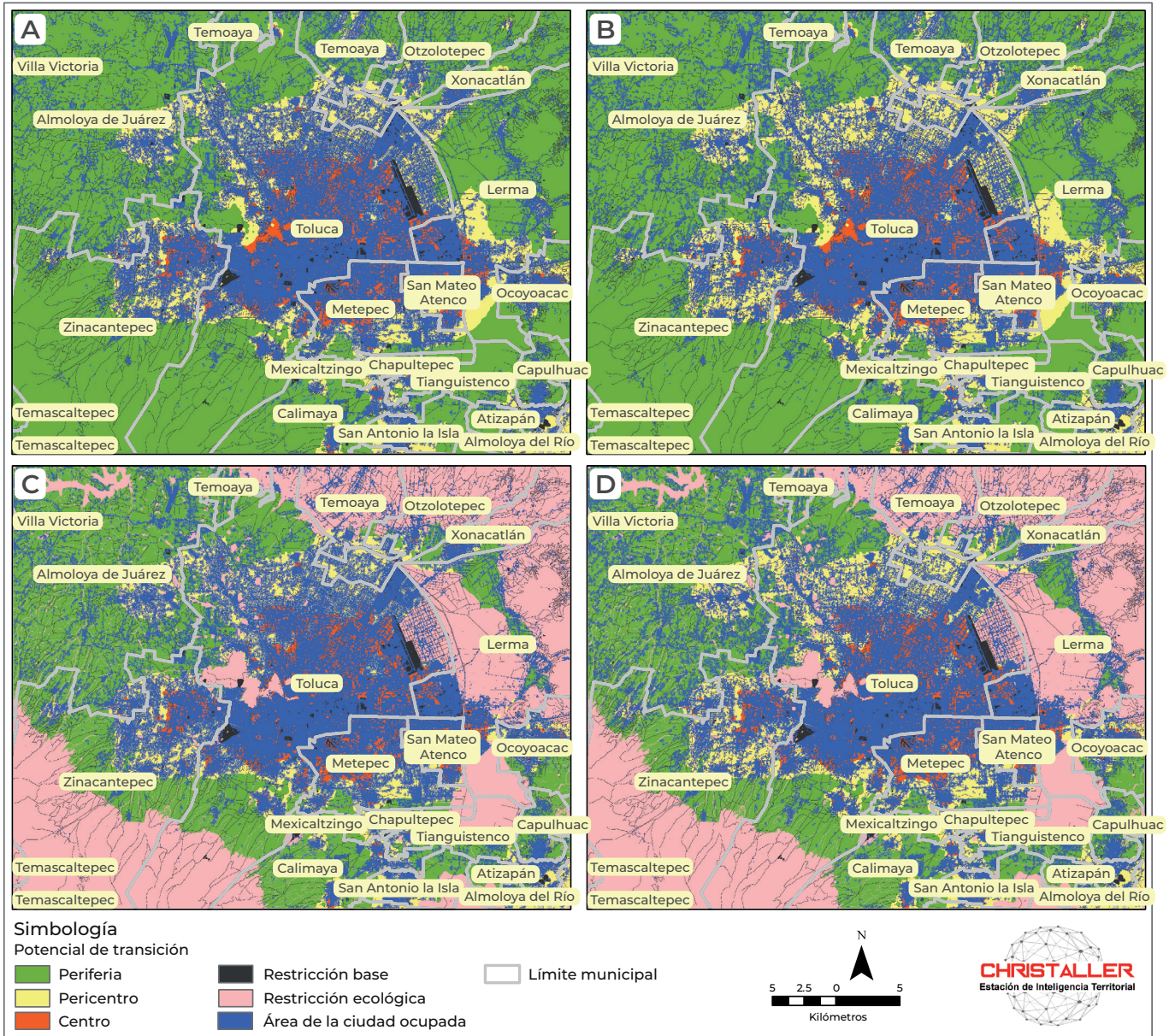


Figura 8.
Área Metropolitana de Toluca. Escenarios de crecimiento, 2030



Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones y aportaciones

En este trabajo se incorporó la RGP a un modelo AC para explorar la expansión de la mancha urbana en el AMT a 2030. Hasta donde sabemos, no se han combinado estos métodos para analizar ninguna otra ciudad de México, ni de Latinoamérica.

La RGP ayudó a producir reglas de transición y escenarios más realistas, ya que: *i.* Devela los factores (variables independientes o explicativas) que más influyen en la expansión urbana; y, *ii.* Estima, estadísticamente sus pesos o influencia sobre la expansión de la ciudad, a escala micro territorial: celda (pixel) del espacio intraurbano.

En otras palabras, la RGP considera que la influencia de las variables es espacialmente *heterogénea*. En la gran mayoría de los modelos AC, los pesos de los factores claves de la expansión urbana son los mismos en toda el área de estudio, es decir, son espacialmente estacionarios, lo cual es un supuesto poco sólido (Moliner-Parejo *et al.*, 2021).

Identificados los factores explicativos claves de la expansión y estimada su importancia al interior de la zona de estudio, el modelo AC-RGP calculó los potenciales de transición del suelo a escala de celda (pixel) y apoyó el diseño de las reglas de transición. Las reglas de transición reflejan la evolución espaciotemporal de la expansión urbana reciente. Juntos, factores y reglas, conforman el ADN de la expansión de la ciudad.

El modelo AC-RGP facilita entender y simular tendencias de crecimiento de la mancha urbana, y tomar decisiones más oportunas. A los planificadores les ayuda a conducir la expansión de la ciudad, en lugar de perseguirla; a los empresarios les sirve para aprovechar y crear oportunidades de inversión; a los académicos a entender mejor el proceso de expansión de la ciudad; a la sociedad en su conjunto, le informa de manera transparente, cuál podría ser la expansión de su ciudad y a quiénes benefician o perjudican las políticas urbanas.

Las ciudades son demasiado importantes para dejarlas en manos de unos pocos. Su planeación debe sustentarse en procesos colectivos de consulta y codiseño (Wagner y De Vries, 2019). Sin embargo, para que los ciudadanos participen informadamente se requieren desarrollos científicos automatizados (Unsworth *et al.*, 2014). El modelo AC-RGP es un aporte en esta dirección.

Bibliografía

- Batty, M. (2021). Multiple models. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 48 (8), 2129-2132.
- Bezaury-Creel, J. E., Torres, F., Ochoa-Ochoa, L. M., Castro-Campos, M. y Moreno, N. (2009). Base de Datos Geográfica de Áreas Naturales Protegidas Estatales, del Distrito Federal y Municipales de México - Versión 2.0, Julio 31, 2009. The Nature Conservancy, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. Recuperado de: www.conabio.gob.mx
- Cao, Y., Zhang, X., Fu, Y., Lu, Z. y Shen, X. (2020). Urban spatial growth modeling using logistic regression and cellular automata: A case study of Hangzhou. *Ecological Indicators*, 113, 106200.
- Chávez-Soto, T., Cervera-Gómez, L., Vilchis-Mata, I. y Garrocho-Rangel, C. (2021). Explicación socioespacial de la brecha digital en el espacio intrametropolitano de Toluca, *Papeles de Población*, 27 (110), 189-229.
- Chen, S., Feng, Y., Tong, X., Liu, S., Xie, H., Gao, C. y Lei, Z. (2020). Modeling ESV losses caused by urban expansion using cellular automata and geographically weighted regression. *Science of the Total Environment*, 712, 136509.
- CONANP [Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas]. (2021). Áreas Naturales Protegidas Federales de México. Ciudad de México.
- Du, S., Wang, Q. y Guo, L. (2014). Spatially varying relationships between land-cover change and driving factors at multiple sampling scales. *Journal of Environmental Management*, 137, 101-110.
- Feng, Y. y Tong, X. (2018). Dynamic land use change simulation using cellular automata with spatially nonstationary transition rules. *GIScience & Remote Sensing*, 55 (5), 678-698.
- _____. (2019). Incorporation of spatial heterogeneity-weighted neighborhood into cellular automata for dynamic urban growth simulation. *GIScience & Remote Sensing*, 56 (7), 1024-1045.
- _____. (2020). A new cellular automata framework of urban growth modeling by incorporating statistical and heuristic methods. *International*

- Journal of Geographical Information Science*, 34 (1), 74-97.
- Fotheringham, A. S., Brunsdon, C. y Charlton, M. (2003). *Geographically weighted regression: the analysis of spatially varying relationships*. John Wiley & Sons.
- Gao, C., Feng, Y., Tong, X., Lei, Z., Chen, S. y Zhai, S. (2020). Modeling urban growth using spatially heterogeneous cellular automata models: Comparison of spatial lag, spatial error and GWR. *Computers, Environment and Urban Systems*, 81, 101459.
- Garrocho, C. y Campos-Alanís, J. (2013). Réquiem por los indicadores no espaciales de segregación residencial. *Papeles de Población*, 19 (77), 269-300.
- _____. (2016). *Segregación socioespacial de la población mayor: la dimensión desconocida del envejecimiento*. El Colegio Mexiquense.
- Garrocho, C., Jiménez-López, E. y Chávez-Soto, T. (2020). Expansión de la ciudad: un instrumento de simulación de escenarios para los sectores público y privado. *La situación demográfica de México 2020*, 2 (2). Consejo Nacional de Población. Recuperado de: <https://www.gob.mx/conapo/documentos/la-situacion-demografica-de-mexico-2020>
- _____. (2021). Autómata Celular Metro-NASZ: laboratorio experimental de expansión urbana. *La situación demográfica de México 2021*, 3 (3), pp. 149-175. Consejo Nacional de Población. Recuperado de: <https://www.gob.mx/conapo/documentos/la-situacion-demografica-de-mexico-2021>
- Gobierno del Estado de México. (2019). Plan Estatal de Desarrollo Urbano (PDUEM). Recuperado de: <https://seduo.edomex.gob.mx/sites/seduo.edomex.gob.mx/files/files/PDUEM%20Final.pdf>
- González-Madrugal, J., Solano-Lamphar, H. y Ramírez, M. (2020). La contaminación lumínica como aproximación a la planeación urbana de ciudades mexicanas. *EURE*, 46 (138), 155-174.
- Gounaridis, D., Chorianopoulos, I., Symeonakis, E. y Koukoulas, S. (2019). A Random Forest-Cellular Automata modelling approach to explore future land use/cover change in Attica (Greece), under different socio-economic realities and scales. *Science of the Total Environment*, 646, 320-335.
- Grün, D. (2020). Revealing dynamics of gene expression variability in cell state space. *Nature methods*, 17 (1), 45-49.
- Guanglong, D., Erqi, X. y Hongqi, Z. (2017). Urban expansion and spatiotemporal relationships with driving factors revealed by geographically weighted logistic regression. *Journal of Resources and Ecology*, 8 (3), 277-286.
- Gutiérrez-Puebla, J., García-Palomares, J. C. y Daniel-Cardozo, O. (2012). Regresión Geográficamente Ponderada (GWR) y estimación de la demanda de las estaciones del Metro de Madrid. XV Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica, 1-13.
- Harris, P., Fotheringham, A. S., Crespo, R. y Charlton, M. (2010). The use of geographically weighted regression for spatial prediction: an evaluation of models using simulated data sets. *Mathematical Geosciences*, 42 (6), 657-680.
- INEGI [Instituto Nacional de Estadística y Geografía]. (2018). Entre semana se realizan 34.56 millones de viajes en la zona metropolitana del Valle de México (ZMVM); el 58.1% es para ir al trabajo y duran entre media y dos horas: encuesta de origen destino en hogares de la ZMVM. Comunicado de prensa. 104/18, 19 de febrero de 2018. Recuperado de: https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2018/EstSocio-demo/OrgenDest2018_02.pdf (consultado 15 de enero de 2022).
- _____. (2020). Censo de Población y Vivienda, 2020. Recuperado de: https://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/rur_urb.aspx?tema_P#:~:text=En%201950%2C%20en%20M%C3%A9xico%2043,es%20de%2079%20por%20ciento (consultado 10 de junio de 2021).
- _____. (2021). Comunicado de Prensa 55/21, 26 de enero de 2021. Dirección Regional Centro Sur / Coordinación Estatal México. Toluca, Estado de México.
- Jafari, M., Majedi, H., Monavari, S. M., Alesheikh, A. A. y Kheirkhah Zarkesh, M. (2016). Dynamic simulation of urban expansion based on cellular automata and logistic regression model: Case study of the Hyrcanian Region of Iran. *Sustainability*, 8 (8), 810.



- Jiménez-López, E. (2019). Cadenas de Markov espaciales para simular el crecimiento del Área Metropolitana de Toluca, 2017-2031. *Economía, sociedad y territorio*, 19 (60), 109-140.
- _____, Garrocho, C. y Chávez, T. (2021). Autómatas Celulares en Cascada para modelar la expansión urbana con áreas restringidas. *Estudios demográficos y urbanos*, 36 (108), 779-824.
- Jing, S., Yan, Y., Niu, F. y Song, W. (2022). Urban Expansion in China: Spatiotemporal Dynamics and Determinants. *Land*, 11 (3), 356.
- Lara, J. (2019). Contradicciones y paradojas del modelo de gestión urbana en el área metropolitana de Guadalajara Jalisco, México. *Cadernos Metrópole*, 22, 41-60.
- Li, G., Sun, S. y Fang, C. (2018). The varying driving forces of urban expansion in China: Insights from a spatial-temporal analysis. *Landscape and Urban Planning*, 174, 63-77. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.03.004>
- Li, Q., Feng, Y., Tong, X., Zhou, Y., Wu, P., Xie, H. y Wang, C. (2022). Firefly algorithm-based cellular automata for reproducing urban growth and predicting future scenarios. *Sustainable Cities and Society*, 76, 103444.
- Liang, X., Liu, X., Li, D., Zhao, H. y Chen, G. (2018). Urban growth simulation by incorporating planning policies into a CA-based future land-use simulation model. *International Journal of Geographical Information Science*, 32 (11), 2294-2316.
- Liu, D., Clarke, K. C. y Chen, N. (2020). Integrating spatial nonstationarity into SLEUTH for urban growth modeling: A case study in the Wuhan metropolitan area. *Computers, Environment and Urban Systems*, 84, 101545.
- Liu, J., Zhan, J. y Deng, X. (2005). Spatio-temporal patterns and driving forces of urban land expansion in China during the economic reform era. *AMBIO: a journal of the human environment*, 34 (6), 450-455.
- Liu, Y., Batty, M., Wang, S. y Corcoran, J. (2021). Modelling urban change with cellular automata: Contemporary issues and future research directions. *Progress in Human Geography*, 45 (1), 3-24.
- Luiselli Fernández, C. (2019). Los desafíos del México urbano. *Economía*, 16 (46). Ciudad de México. Epub 17-Jun-2020. Recuperado de: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-952X2019000100183
- Mahiny, A. S. y Clarke, K. C. (2012). Guiding SLEUTH land-use/land-cover change modeling using multi-criteria evaluation: towards dynamic sustainable land-use planning. *Environment and Planning B: planning and design*, 39 (5), 925-944.
- Martellozzo, F., Amato, F., Murgante, B. y Clarke, K. C. (2018). Modelling the impact of urban growth on agriculture and natural land in Italy to 2030. *Applied Geography*, 91, 156-167.
- Mayfield, H. J., Lowry, J. H., Watson, C. H., Kama, M., Nilles, E. J. y Lau, C. L. (2018). Use of geographically weighted logistic regression to quantify spatial variation in the environmental and sociodemographic drivers of leptospirosis in Fiji: A modelling study. *The Lancet Planetary Health*, 2 (5), e223-e232.
- Mitchell A. (2012). *ESRI Guide to GIS Analysis, Volume 2: Spatial Measurements and Statistics*. New York: ESRI Press.
- Molinero-Parejo, R., Aguilera-Benavente, F. y Gómez-Delgado, M. (2021). Regresión Logística Geográficamente Ponderada para identificar los factores explicativos de la distribución de usos de suelo en escenarios futuros de crecimiento urbano. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 88.
- Mustafa, A., Heppenstall, A., Omrani, H., Saadi, I., Cools, M. y Teller, J. (2018). Modelling built-up expansion and densification with multinomial logistic regression, cellular automata and genetic algorithm. *Computers, Environment and Urban Systems*, 67, 147-156.
- Newland, C. P., Maier, H. R., Zecchin, A. C., Newman, J. P. y van Delden, H. (2018). Multi-objective optimisation framework for calibration of Cellular Automata land-use models. *Environmental modelling & software*, 100, 175-200.
- Ntinias, V. G., Moutafis, B. E., Trunfio, G. A. y Sirakoulis, G. C. (2017). Parallel fuzzy cellular automata for data-driven simulation of wildfire spreading. *Journal of computational science*, 21, 469-485.
- Padilla, O., Pérez, P., Cruz, M., Huilcamaigua, S. y Asudillo, S. (2015). Utilización de autómatas

- celulares como técnica de modelamiento espacial para determinación el cambio de uso de suelo y cobertura vegetal. *Ciencias Espaciales*, 1 (8), 310-326.
- Prigogine, Ilya, (1999). *Las leyes del caos*. Barcelona: Crítica.
- Ramírez-Sánchez, L. G., Chávez-Soto, T. y Garrocho-Rangel, C. (2021). Dinámica del empleo en el centro tradicional de negocios de Toluca (México), 2010-2018: cambio y participación espacial. *Región y Sociedad*, 33 (e1395), 1-31.
- Rojo, J. (2007). Regresión lineal múltiple. Madrid: Instituto de Economía y Geografía, 31 p.
- RealEstate (2021). Aumenta 22% abandono de vivienda en 10 años. Market and Lifestyle. Recuperado de: <https://realestatemarket.com.mx/noticias/mercado-inmobiliario/32075-aumenta-22-abandono-de-vivienda-en-10-anos#:~:text=M%C3%A9xico%20tiene%206.1%20millones%20de,acuerdo%20con%20datos%20del%20INEGI> (consultado: 18 de enero de 2022).
- RNC [Red Nacional de Caminos]. (2018). Red Vial, escala: 1:50000. INEGI. Recuperado de: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463674641>
- Sági, G. (2019). Almost Injective Mappings of Totally Bounded Metric Spaces into Finite Dimensional Euclidean Spaces. *Advances in Pure Mathematics*, 9 (6), 555.
- Shu, B., Bakker, M. M., Zhang, H., Li, Y., Qin, W. y Carsjens, G. J. (2017). Modeling urban expansion by using variable weights logistic cellular automata: a case study of Nanjing, China. *International Journal of Geographical Information Science*, 31 (7), 1314-1333.
- Sobrino, J. y Ugalde, V. (ed.). (2019). *Desarrollo urbano y metropolitano en México*. El Colegio de México, 2019.
- UN-DESA [United Nations-Department of Economic and Social Affairs]. (2018). *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision*. New York, NY: Technical report. Recuperado de: <https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-Report.pdf> (consultado 14 de febrero de 2022).
- Unsworth, K., Forte, A. y Dilworth, R. (2014). Urban informatics: The role of citizen participation in policy making. *Journal of Urban Technology*, 21 (4), 1-5.
- Wagner, M. y De Vries, Walter T. (2019). Comparative review of methods supporting decision-making in urban development and land management. *Land*, 8 (8), 123.
- Wang, H. y Stephenson, S. R. (2018). Quantifying the impacts of climate change and land use/cover change on runoff in the lower Connecticut River Basin. *Hydrological Processes*, 32 (9), 1301-1312.
- Wang, Y., Kockelman, K. M. y Wang, X. (2011). Anticipation of land use change through use of geographically weighted regression models for discrete response. *Transportation Research Record*, 2245 (1), 111-123.
- Wolfram, S. (2018). *Cellular automata and complexity: collected papers*. CRC Press.
- Wu, D., Liu, J., Wang, S. y Wang, R. (2010). Simulating urban expansion by coupling a stochastic cellular automata model and socioeconomic indicators. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 24 (2), 235-245.
- Zhang, W., Li, W., Zhang, C., Hanink, D. M., Liu, Y. y Zhai, R. (2018). Analyzing horizontal and vertical urban expansions in three East Asian megacities with the ss-coMCRF model. *Landscape and urban planning*, 177, 114-127.
- Zhang, Z., Liu, F., Zhao, X., Wang, X., Shi, L., Xu, J. y Liu, B. (2018). Urban expansion in China based on remote sensing technology: a review. *Chinese Geographical Science*, 28 (5), 727-743.
- Zhang, J., Ling, Y., Zhu, A. X., Zeng, H., Song, J., Zhu, Y. y Qian, L. (2022). Incorporation of spatial anisotropy in urban expansion modelling with cellular automata. *International Journal of Geographical Information Science*, 36 (1), 86-113.
- Zhang, L., Liu, Y., Jing, Y. y Zhang, Y. (2022). How Does Quota-Oriented Land Use Planning Affect Urban Expansion? A Spatial Analysis of 280 Chinese Cities. *Land*, 11 (4), 528.

