

Modelo Autómata Celular Multicriterio: laboratorio experimental de la expansión del Área Metropolitana de Toluca

Carlos Garrocho
cfgarrocho@gmail.com



— OBJETIVO

Construir un **modelo centauro**, operativo como **laboratorio experimental**, que permita explorar escenarios de expansión urbana. Un modelo centauro combina la sensibilidad del analista (interfaz humana: desarrollador, funcionario, investigador) con métodos y tecnologías de frontera (e.g. estadísticos, inteligencia artificial) y la capacidad analítica de herramientas computacionales.

— PREMISAS

- Los modelos de autómatas celulares (AC) se han empleado ampliamente para simular la expansión urbana y el cambio en el uso del suelo.
- Una estrategia para examinar y entender la expansión urbana es modelar el proceso (Aljoufie et al., 2013).
- Los modelos, usualmente cuantitativos, se utilizan como laboratorios experimentales para simular escenarios espaciales de dinámicas plausibles, con el objetivo de entender procesos, explorar escenarios, anticipar impactos, apoyar la planeación de las ciudades (Verburg et al., 2004).

AUTOMATA CELULAR

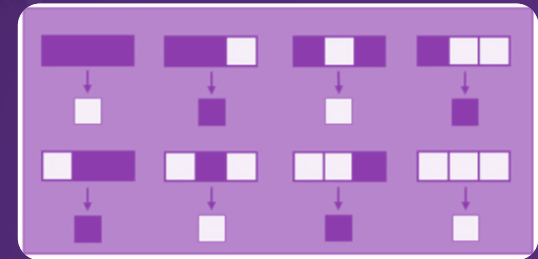
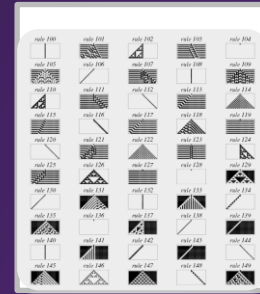
- Los AC modelan sistemas dinámicos y complejos que evolucionan en lapsos temporales discretos, en los que las interacciones locales entre sus componentes generan cambios globales en el espacio. Su aplicación para modelar dinámicas urbanas partió de modelos teóricos que simulaban estructuras urbanas simples.
- La utilidad de los modelos basados en autómatas celulares en la simulación prospectiva de la expansión urbana ha sido demostrada desde hace décadas. En Google Académico la búsqueda (21 de febrero, 2021): "Cellular automata" "urban expansion" arrojó 502 publicaciones solo en 2021.



— AUTOMATA CELULAR

Elementos de un Autómata Celular:

- ❑ Reja bidimensional.
- ❑ Estado de la Celda o Célula.
- ❑ Vecindad.
- ❑ Regla (tipos).
- ❑ Incluye un parámetro Estocástico.



_ METODOLOGÍA



— FASES

CALIBRACIÓN DEL MODELO

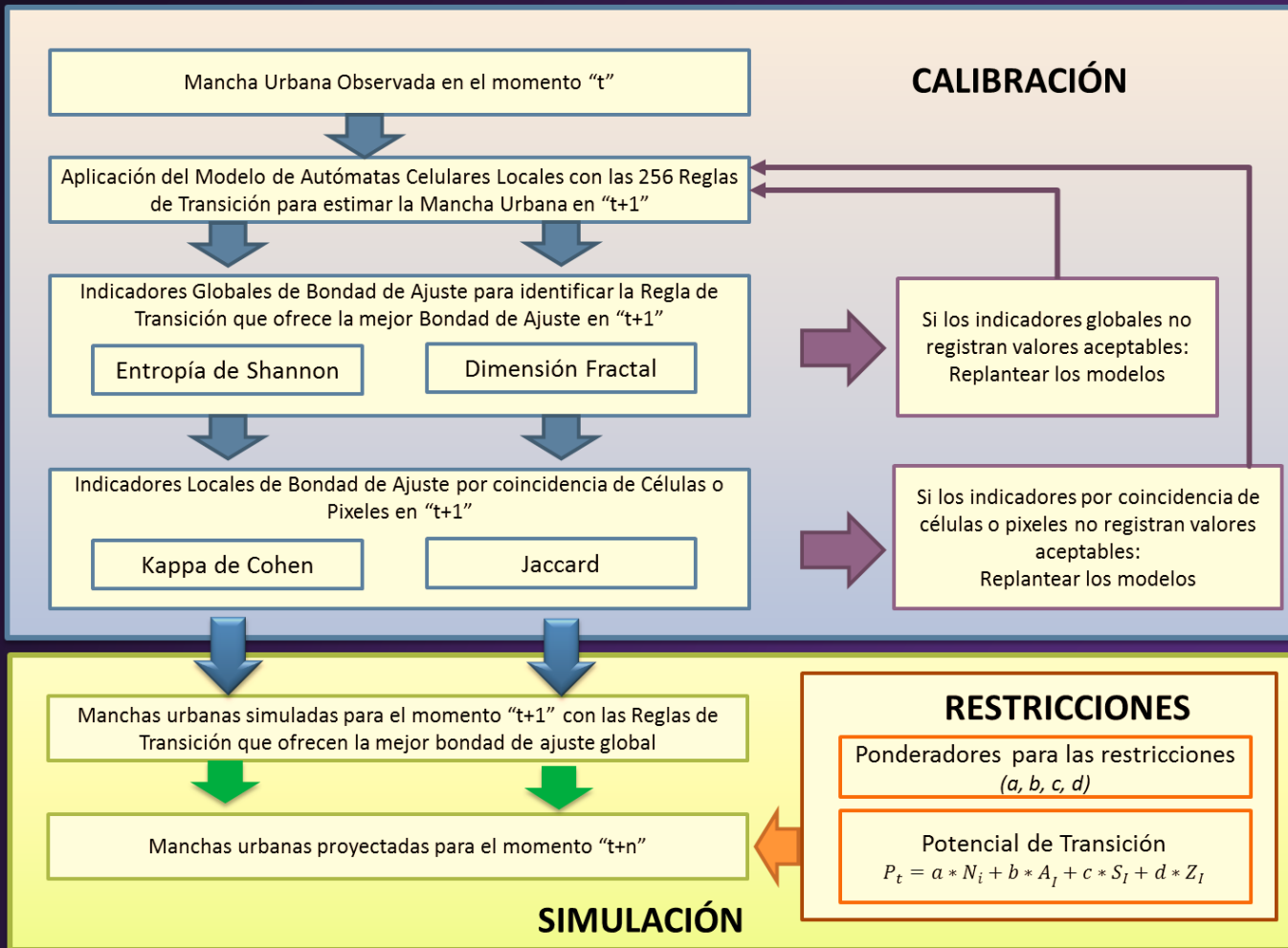
Los procesos de calibración y validación de los modelos son, en conjunto, los procesos que permiten evaluar la eficacia de las simulaciones (van Vliet et al., 2016).

RESTRICCIONES Y MULTICRITERIO

El modelo se basa en el esquema NASZ (Neighborhood, Accessibility, Suitability, Zoning Status) propuesto originalmente por White et al. (1997), que combina los factores de vecindad, accesibilidad, aptitud, zonificación y un componente de aleatoriedad que evita el sobredeterminismo.

SIMULACION

Se busca identificar distintas posibilidades de expansión de la ciudad en función de elementos proporcionados por distintos actores (agentes e instituciones claves) y posibles impactos de acciones y políticas públicas y privadas.



CALIBRACION DEL MODELO

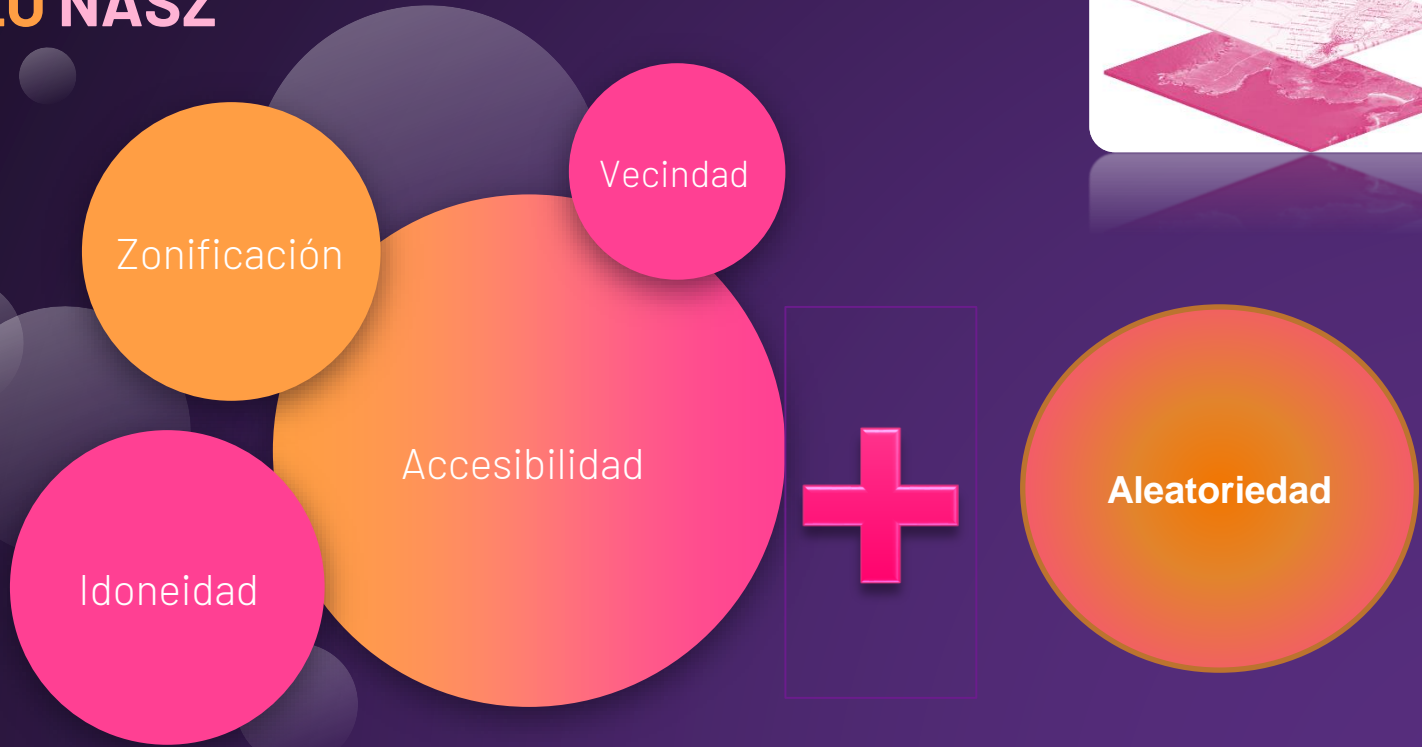
Aplicación del filtro en cascada

Identificar la mejor regla que replique la zona de estudio t a la $t+1$ (conocida).



Bondad de Ajuste Global	Bondad de Ajuste Local
Entropía de Shannon	Índice Jaccard
	0.00-0.40 Baja
	0.41-0.49 Regular
	0.50-0.70 Buena
	0.71-0.85 Muy buena
	>0.85 Excelente
Dimensión Fractal	Índice Kappa
$DF_{t+1} > DF_t$ Aumento de tamaño	0.00-0.20 Baja
$DF_{t+1} = DF_t$ Permanece igual	0.21 - 0.40 Regular
$DF_{t+1} < DF_t$ Disminución de tamaño	0.41 - 0.60 Buena
	0.61 a 0.80 Muy buena
	0.81 a 1.0 Excelente

MODELO NASZ



$$PT_t = N * A * S * Z + R$$

CAPAS EN EL MODELO NASZ

Idoneidad

Depende del uso de suelo, generalmente está relacionada con factores de ubicación, propiedades del sitio y pendiente del terreno.

Zonificación

Usos de suelo y áreas protegidas en las que se restringen los asentamientos humanos.



CAPAS EN EL MODELO NASZ

Vecindad

Proximidad entre los elementos en el espacio (píxeles que están en una vecindad próxima), que depende de su ubicación espacial y se relacionan funcionalmente (efectos que un píxel ejerce sobre los otros).

Accesibilidad

Facilidad con la que las personas pueden acceder a determinados servicios o ubicaciones a través de la red de transporte.



POTENCIAL DE TRANSICIÓN

- Se puede definir cómo la probabilidad de crecimiento de las celdas (e.g. píxeles) de la mancha urbana en un espacio ráster.
- Al hablar de espacio ráster nos referimos a los mapas del ATM que tiene información a nivel de píxeles o celdas.



— MULTICRITERIO



Metodologías ampliamente utilizadas para la simulación de diferentes procesos de planeación se fundamentan en técnicas de Evaluación Multicriterio (EMC).



Disponer de un modelo que incorpore técnicas EMC, ayuda a la toma de decisiones públicas y privadas cuando existen diversos criterios (factores y restricciones) que requieren satisfacer uno o múltiples objetivos.



— AREA DE ESTUDIO

- En las últimas décadas, el área urbana de Toluca se ha convertido en una de las más dinámicas áreas de crecimiento urbano en el centro de la República, como resultado del fuerte crecimiento residencial impulsado por la dinámica económica de la región (García-González et al., 2015).
- Este dinamismo también ha provocado cambios en los patrones de crecimiento urbano, con importantes consecuencias para la estructura urbana (Gutiérrez, 2018).
- El área de estudio abarca 151,018.8 hectáreas de la ciudad de Toluca, es un territorio rodeado de montañas, delimitado entre las coordenadas $99^{\circ} 51' 29.158''\text{O}$ y $19^{\circ} 27' 49.329''\text{N}$ / $99^{\circ} 26' 33.412''\text{O}$ y $19^{\circ} 9' 5.755''\text{N}$.
- La temporalidad en el estudio abarca de 2013-2020 y 2027.



PREPARACIÓN DE IMAGENES

Zona de estudio

Ciudad de Toluca

Extensión: 151,018.8 Ha.

Periodo de análisis

Calibración:

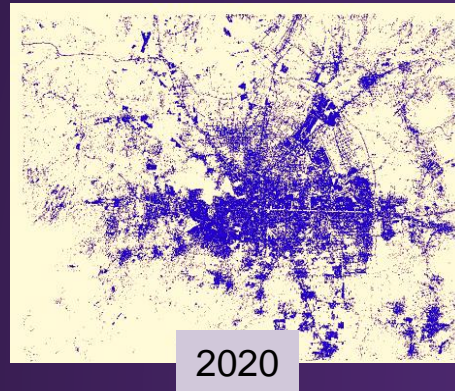
- 2013-2020

Simulación-Proyección

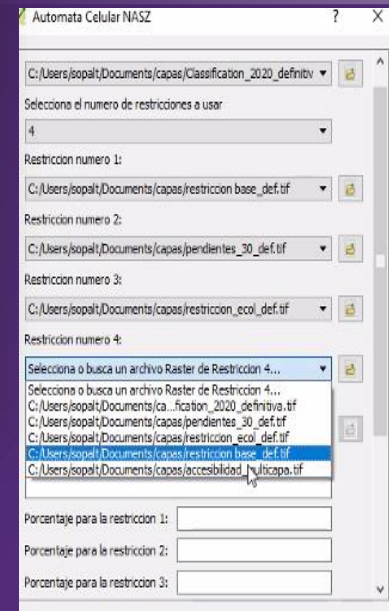
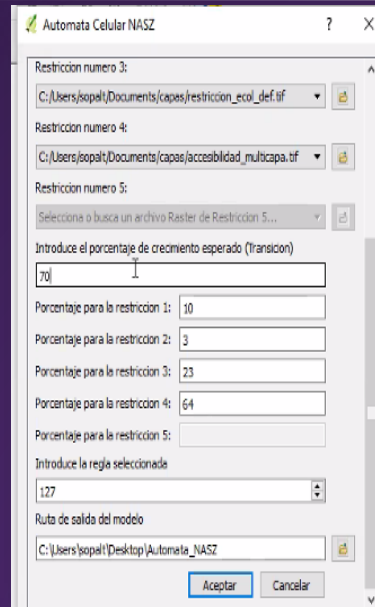
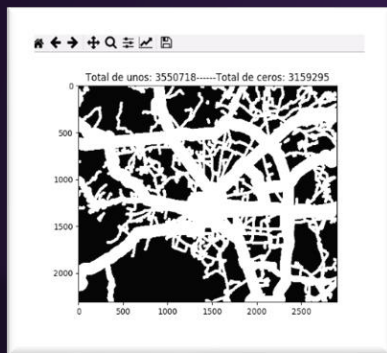
- 2020-2027

Capas de restricción

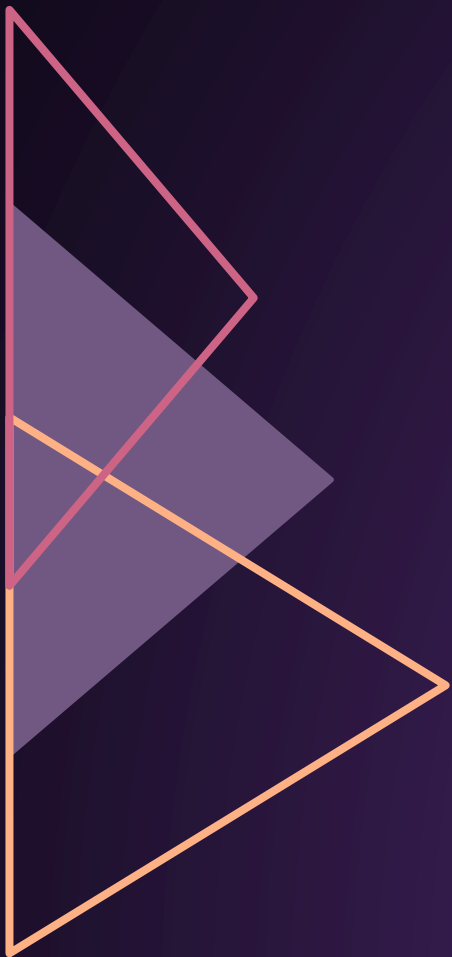
- Base
- Ecológica
- Topográfica
- Accesibilidad



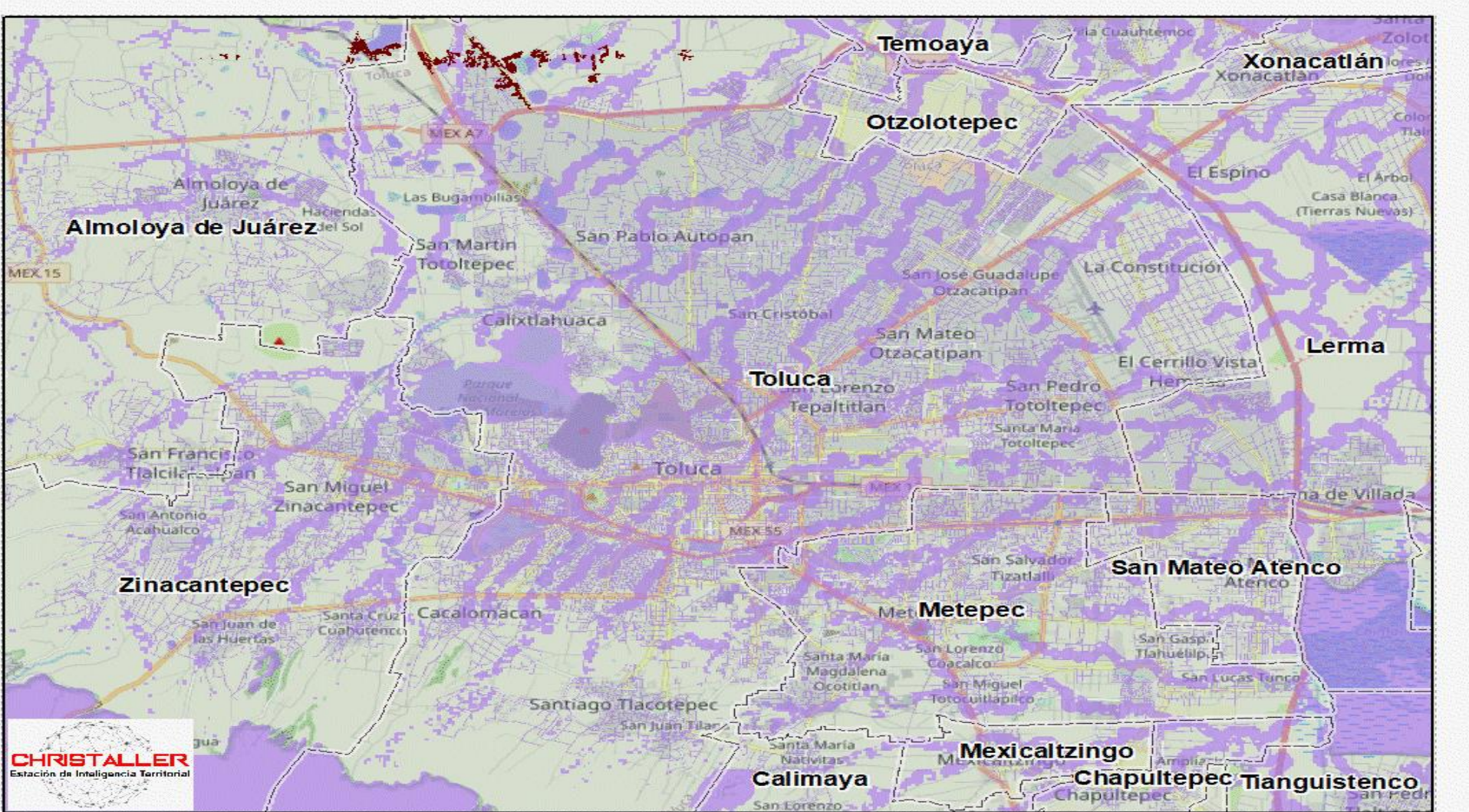
DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN



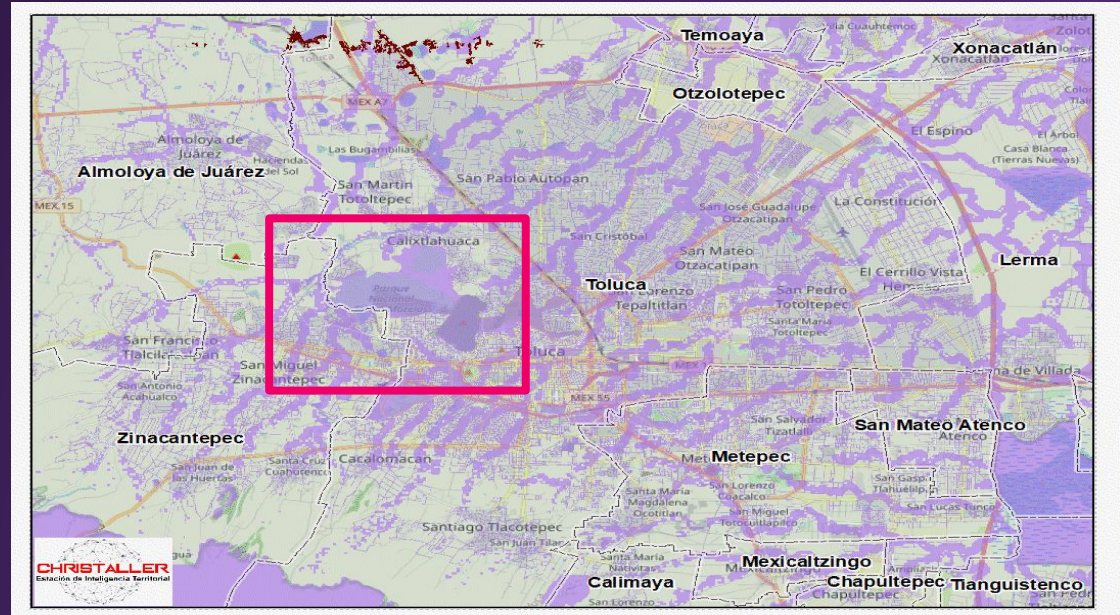
— SIMULACIÓN DEL MODELO



Área Metropolitana de Toluca



Zona: Parque Sierra Morelos



Almoloya de Juárez

Zinacantepec

Calixtlahuaca

Avenida Los Angeles

Calle Independencia

Calle Libertad

Toluca

Parque Nacional Sierra Morelos

parque los remedios

San Luis Zinacantepec

Piedra La Campana 4017 m

ro del
viento
300 m



Miguel Zinacantepec

MEX 15

Calle Morelos

Calle Texcoco

Calle Miguel Yudiego y Copina

MEX 15D

Calle Valentín Gómez Farías

Cerro del basaltos 2740 m

Colonia Morelos
Trayectoria

Trayectoria

— ALGUNAS CONSIDERACIONES

- A pesar de implementar un modelo que refleja distintos criterios que afectan la expansión de la ciudad, los resultados pueden estar sesgados en función de los valores de ponderación asignados a cada uno de los factores. No es un problema es una virtud: se recomienda la EMC para simular escenarios de tipo normativo o deseable, ya que se pueden obtener resultados diferentes en función de los objetivos planteados y de las percepciones de los agentes clave.
- Los resultados obtenidos por los modelos están condicionados por la cartografía de usos del suelo, obtenida mediante clasificación de las imágenes de satélite.
- El tratamiento de los factores del modelo deben seguir siendo investigados y mejorados.

— ¿QUÉ HEMOS LOGRADO Y HACIA DÓNDE VAMOS?

- Garrocho, Carlos; Jiménez, Eduardo; Chávez-Soto, Tania, Expansión de la ciudad: un instrumento de simulación de escenarios para los sectores público y privado, en: Conapo (Coord.), **La Situación demográfica de México 2020**, Conapo, México.
<https://www.gob.mx/conapo/documentos/la-situacion-demografica-de-mexico-2020>
- Jiménez-López, Eduardo; Garrocho, Carlos; Chávez-Soto, Tania, (2021), Autómatas Celulares en Cascada para modelar la expansión urbana con áreas restringidas, **Estudios Demográficos y Urbanos**, ACEPTADO.
- Chávez-Soto, Tania; Garrocho, Carlos, (2018), Estación de Inteligencia Territorial: CHRISTALLER®, **GeoSig**, Año 10, Número 10, 2018, pp. 29-50. ISSN: 1852-8031.
https://docs.wixstatic.com/ugd/79758e_06e66947b32a48369bf75f7c80a378c0.pdf

— ¿QUÉ HEMOS LOGRADO Y HACIA DÓNDE VAMOS?

- Diseño de algoritmos basados en múltiples herurísticas para la proyección de la mancha urbana, (2021) **Tesis de Maestría**. Facultad de Ingeniería. UAEMéx.
- Predicción del crecimiento de la mancha urbana en tres ciudades mexicanas a través de autómatas celulares e interfaz con sistemas de información geográfico, (2020), **Tesis de Licenciatura**, Facultad de Ingeniería, UAEMéx.
- 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.
- Jiménez-López, Eduardo; Garrocho, Carlos; Chávez-Soto, Tania, (2018), Modelando la expansión urbana con Autómatas Celulares: Aplicación de la Estación de Inteligencia Territorial: CHRISTALLER®, **GeoSig**, Año 10, No. 12, pp. 1-26.

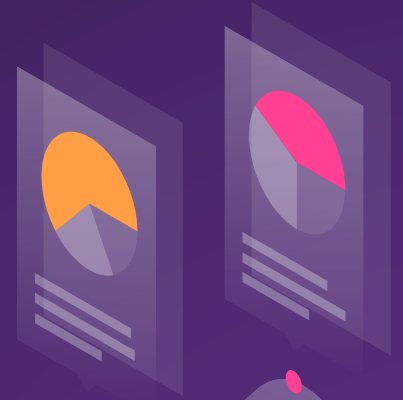
TRABAJO EN CURSO

- Construcción de un Autómata Celular multicriterio, involucrando distintas capas de restricción o potenciadoras del crecimiento de la ciudad. Permite incluir distintos factores o criterios que afectan el crecimiento de la ciudad, explorarlos y experimentar.
- Planteamos explorar la aplicación de Redes Neuronales en la expansión del área metropolitana combinando Autómatas Celulares.

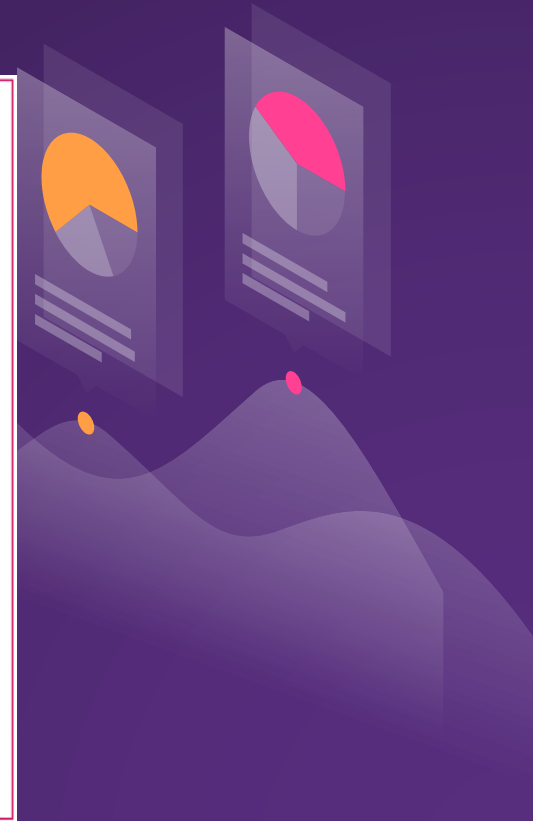
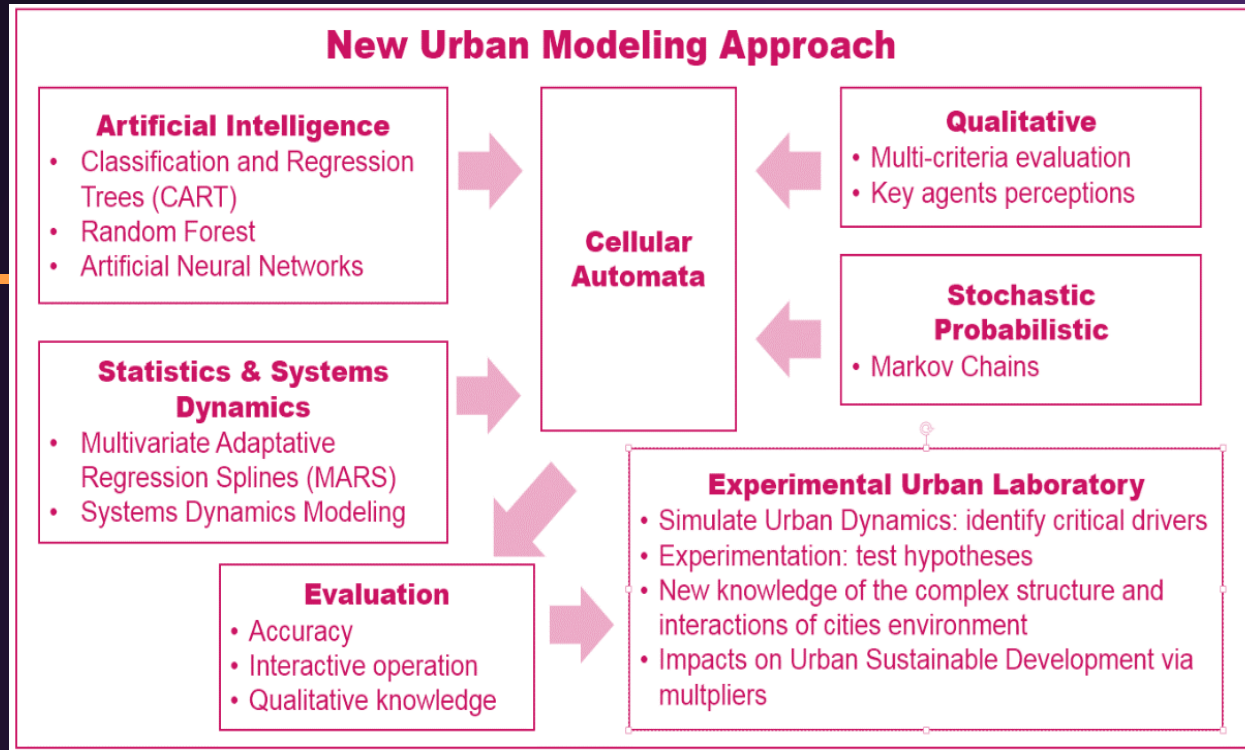


TRABAJO PARA DICIEMBRE 2021

- Contar con un prototipo que combine Inteligencia Artificial (Redes Neuronales) con Autómatas Celulares, para explorar la expansión del AMT.
- Consolidar el concepto de modelo-laboratorio experimental.



TRABAJO PARA EL LARGO PLAZO



Gracias por su atención...



**Eduardo
Jiménez**

**Tania
Chávez**

**Carlos
Garrocho**