

4. Simulación de la expansión urbana mediante Tecnologías de Información Geográfica

camilamagalimujica@gmail.com (*)

(*) Camila Magalí
Mujica

Lic. en Diagnóstico y Gestión Ambiental.
Doctoranda en Ciencias Aplicadas, Mención Ambiente y Salud.
Becaria doctoral del CONICET, IHAM, FAUD UNMdP.

El presente capítulo propone simular el proceso expansión urbana de la ciudad de Mar del Plata y predecir su evolución en un futuro cercano, a partir del uso de Tecnologías de Información Geográfica. Se utilizó principalmente una herramienta denominada SACcity, desarrollada por un grupo de docentes-investigadores de la UNICEN.

La principal capacidad de esta herramienta es que permite la construcción de un modelo que exhibe de manera orientativa y sobre la base de ponderaciones predefinidas por el usuario, cómo, hacia dónde y cuánto crecería físicamente el área urbana de una ciudad.

Este indicador cuantitativo, está relacionado al desarrollo urbano territorial, vinculándose principalmente mediante el ODS11. Dentro de sus metas a nivel

nacional (Martino, 2018), el ODS apunta a disminuir el crecimiento urbano incontrolado, desintegrado y desconectado, revalorizando el espacio físico tanto peatonal como de infraestructuras verdes y azules. Comprender las tendencias actuales de expansión, podría contribuir a explicar las consecuencias de las acciones y políticas que se desarrollan en la actualidad y de este modo, fortalecer el diseño de herramientas e instrumentos que permitan una planificación sostenible de las ciudades.

ÁREA DE ESTUDIO

Trabajos antecedentes de escala local, han analizado a través de distintos indicadores, las transformaciones territoriales en el área urbana (*Lanfranchi et al.*, 2018) y periurbana de la ciudad de Mar del Plata (Zulaica 2013; Ferraro *et al.*, 2016). Sin embargo, la simulación de escenarios futuros es un tema aún poco explorado en la escala local. Siguiendo esos lineamientos, la presente investigación ha tomado como ámbito de aplicación, la ciudad de Mar del Plata, partido de General Pueyrredon.

Este enfoque, permite realizar un análisis diacrónico, es decir, que evalúa los cambios temporales en el proceso de expansión urbana pasada; y luego, considerando su tendencia, simula una posible evolución futura. En este caso, el modelo fue calibrado basándose en los cambios en el uso urbano entre los años 2001 y 2020. Se seleccionó este período dado que coincide con años censales, y permitirá en futuros análisis, relacionar la expansión espacial con las tendencias de crecimiento demográfico y sus proyecciones. Para la simulación futura, se tomó como referencia el año 2040 siendo el horizonte cercano en las proyecciones a nivel departamental desarrolladas por el Sistema de Mapas de Riesgo del Cambio Climático (SIMARCC). Este horizonte se eligió debido a que, como se mencionó anteriormente, la herramienta podría ser un aporte al ODS 11, el cual incluye entre sus metas, la adaptación de las ciudades al cambio climático.

¿PARA QUÉ SE REALIZA LA INVESTIGACIÓN?

Esta proyección de cambio climático, trae asociada riesgos que podrían entrar en sinergia con los cambios inducidos por la expansión urbana futura. Muchos de los cambios en la mancha urbana pasada, han sido reflejados en distintas publicaciones del ámbito local (Garzonio *et al.*, 2013; Gareis y Ferraro, 2015; Lanfranchi *et al.*, 2018; Sabuda, 2018). Estos antecedentes resultaron de gran utilidad al momento de definir en la simulación las variables que han afectado históricamente la expansión de la ciudad y la forma en que se podrían ponderar entre ellas.

A pesar de contar con esta información, la incertidumbre implícita en instancias de planificación del suelo urbano aún es alta. En este sentido, los resultados que se obtienen luego de modelar escenarios futuros podrían contribuir a aumentar la información disponible para la toma de decisiones y mejorar así, posibles planes de desarrollo urbano.

El análisis que se presentará a continuación, se realizó basado en un modelo de autómatas celulares, utilizando una herramienta computacional compatible con Sistemas de Información Geográfica (SIG) conocida como SACcity⁵. Los antecedentes existentes respecto a abordajes basados en esta herramienta refieren principalmente a aplicaciones realizadas sobre la ciudad de Tandil (Linares *et al.*, 2014; Linares, 2015). No se han encontrado antecedentes publicados aplicados a la ciudad bajo estudio, realizados con éste, u otros modelos similares, cómo podría ser MOLUSCE⁶ u otros.

Aproximarse al conocimiento respecto de cómo se expandiría una ciudad, permite dar cuenta de los complejos problemas ambientales a lo que debería

⁵ SACcity v.2.7.6 un software gratuito de uso libre, desarrollado desde la UNICEN por Linares, S.; del Fresno, M.; y Miranda del Fresno, M.C. La herramienta y la guía de usuario se encuentra disponible en: <http://saccity.fch.unicen.edu.ar/>.

⁶ MOLUSCE (*Modules for Land Use Change Simulations*) es una herramienta compatible con QGIS 2.14 que permite realizar análisis de los cambios en la cobertura terrestre.

enfrentarse una ciudad en un escenario próximo. A menudo, ocurre que los actores involucrados en la generación de suelo urbano, poseen visiones distintas sobre un territorio, por lo que contar con información de base facilitaría la toma de decisiones. Esto permitiría, no sólo prevenir impactos ambientales derivados de la escasa contemplación del medio físico y de las infraestructuras urbanas disponibles, sino también planificar con antelación las demandas en la capacidad de otros servicios urbanos como el transporte, la gestión de los residuos y el acceso a los espacios públicos. En ese sentido, los datos de expansión urbana obtenidos constituyen indicadores de sustentabilidad.

PERSPECTIVA CONCEPTUAL

Este tipo de simulaciones son realizadas desde la perspectiva de la geografía aplicada a la solución de problemas prácticos (López Trigal, 2015), que permite una vinculación más eficiente y consecuente entre ciencia y acción. Dentro de este marco, ha crecido el interés por la modelización de fenómenos complejos basados en autómatas celulares (White and Engelen 1997; White *et al.* 1997).

Este modelo, implica el fraccionamiento del continuo urbano en partes discretas, adoptando un abordaje matricial donde cada polígono representa un pixel determinado de la superficie terrestre. De esta manera, en el análisis realizado, cada celda tiene dos estados posibles (i. urbano; ii. no urbano) que varían a lo largo del tiempo. La simulación entiende que el estado de cada celda depende de los estados previos de las celdas vecinas, de acuerdo con un conjunto de reglas de transición.

El modelo aplicado, parte de la hipótesis de que existe una correlación entre determinadas variables espaciales y la expansión urbana. De esta manera, es posible estimar el crecimiento físico de una ciudad en base a información espacial.

¿CUÁLES FUERON LAS CONCLUSIONES?

Una vez realizada la primera aproximación a la herramienta, se logró una simulación que permitió aclarar y mostró idoneidad para explicar en términos generales la extensión, y la evolución del área construida en una ciudad. De esta manera, el modelo fue capaz de generar una representación sostenida en un modelo probado de la expansión urbana de la ciudad de Mar del Plata, por lo que podría ser factible de ser utilizada para la generación de escenarios futuros a escala local.

Respecto de la interpretación de los resultados obtenidos con esta simulación, se puede establecer que Mar del Plata no estaría creciendo de manera sustentable, dado que se utilizan considerables proporciones de suelo en relación con sus incrementos poblacionales. De continuar esta tendencia, la ciudad seguiría repitiendo un patrón común en Argentina que se caracteriza por una alta tasa de crecimiento de suelo urbano con una baja tasa en el crecimiento poblacional, en el cual las ciudades crecen de forma difusa, desconectada y extensa. Considerando esas tendencias, es de esperar entonces, que continúen los contrastes de los usos del suelo, mayores niveles de segregación social, aumento viajes motorizados y la pérdida de valor de los espacios públicos.

¿QUÉ RESULTADOS SE OBTUVIERON?

A continuación, se muestran los resultados obtenidos con el simulador SACcity. El modelo se ha ejecutado para el período comprendido entre 2001 y 2020 y luego, se ha realizado una simulación para un escenario futuro a 2040 a partir de la cartografía de 2020.

Los resultados obtenidos incluyen una escena por año simulado, en donde cada celda puede pertenecer a la categoría urbano o no urbano. Los datos obtenidos están realizados sobre una malla ráster de 60 x 60 metros de tamaño por píxel. La Figura 1 corresponde a las escenas obtenidas para los años 2030 y 2040. Las

imágenes arrojadas muestran, en términos generales, una similitud morfológica con el emplazamiento actual en 2020 de la ciudad de Mar del Plata. Es decir, el resultado es conforme desde un análisis visual, lo que significa que mantiene en términos generales, las formas proporcionales de la mancha urbana.

También se puede ver que la principal tendencia de crecimiento se da sobre los núcleos ubicados en la Ruta Nacional 226 (Zona de Sierra de los Padres) y la Ruta Provincial 88 (Zona de Batán). La simulación realizada bajo las variables propuestas, mostró un fuerte crecimiento en torno a los polígonos industriales de Batán y sobre sectores de agricultura intensiva en Sierra de los Padres. En líneas generales, se observa una fuerte tendencia a la urbanización sobre estas áreas, y no tanto así sobre aquellas ubicadas en las inmediaciones a la Ruta Nacional 2 ó la Ruta Provincial 11, tanto en el sentido Norte, como Sur de la ciudad.

¿CÓMO SE OBTUVIERON LOS RESULTADOS?

Para poder ejecutar la herramienta SACcity y simular escenarios de expansión urbana cuyos valores pueden interpretarse como indicadores de sustentabilidad, se requiere de datos respecto de las condiciones físicas del área de estudio y de su infraestructura urbana. Estos datos deberán ser analizados y preparados mediante la utilización de Sistemas de Información Geográfica (SIG). Uno de los objetivos planteado al momento de buscar herramientas de simulación fue que estas sean softwares libres y de código abierto.

A continuación, se explicarán detalladamente los pasos básicos para lograr la simulación que se mostró anteriormente. Estos han sido divididos en dos etapas principales: i. Preparación de insumos y; ii. Calibración y simulación en SACcity.

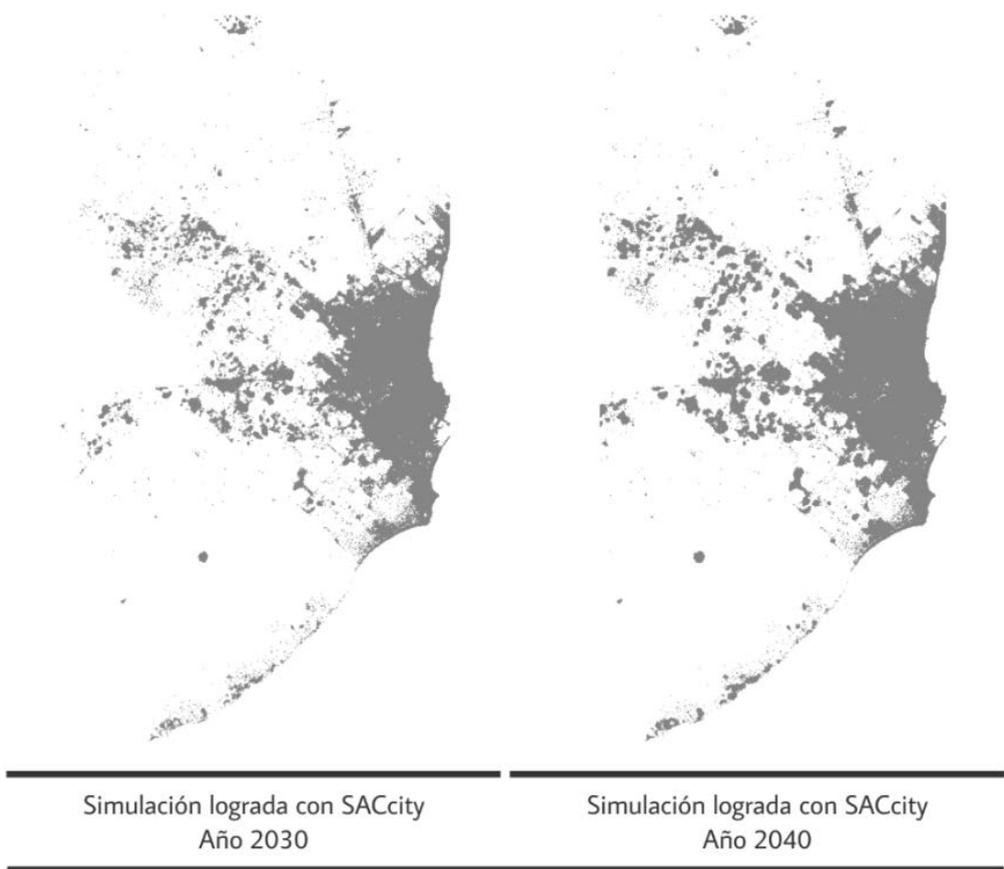


Figura 1. Simulaciones generadas para el área urbana de Mar del Plata para los años 2030 y 2040.

Fuente: Elaboración propia.

i. Preparación de insumos

Al momento de preparar los insumos necesarios para la simulación es importante tener en cuenta que todas deben estar en formato raster, alineados en una matriz de idénticas dimensiones, con la misma extensión, resolución espacial y sistema de proyección. Tomando como área de estudio el área urbana de la ciudad de Mar del Plata (Partido de General Pueyrredon), los datos de entrada que se cargaron fueron los siguientes:

Zonas urbanizadas (Origen/Destino)

Son utilizadas para calibrar el modelo. En este caso, se obtuvieron mediante un procesamiento de clasificación no supervisada de dos imágenes satelitales correspondientes al año 2001 y 2020.

Las imágenes satelitales fueron obtenidas desde el Servicio Geológico de los Estados Unidos o USGS por sus siglas en inglés (United States Geological Survey). Para la descarga de las mismas se utilizó la herramienta Semi-Automatic Classification Plugin del software libre QGIS versión 3.4.10. Al momento de la descarga se pre-procesaron aplicando la corrección atmosférica DOS1 y ajustando la temperatura de brillo a grados Celsius, a pesar de que la banda térmica no ha sido utilizada. Una vez descargadas las imágenes, se recortaron empleando como máscara de corte los límites del partido de General Pueyrredon. Dado que SACcity diferencia dos clases de información, se clasificó la imagen en “Urbano” y “No urbano”. Para esta tarea, se utilizó el software libre SNAP (Sentinels Application Platform) de la Agencia Espacial Europea. SNAP tiene la ventaja de ser de código abierto, sin embargo, puede resultar lento si se lo compara con otros softwares de análisis de imágenes como ENVI. Por este motivo, se recomienda recortar previamente la imagen al área de estudio.

Una vez cargadas las imágenes en la interfaz del software, se deben apilar las bandas en orden, editar sus propiedades y finalmente, se deben re proyectar, ya

que las proyecciones por defecto a menudo no suelen ser las adecuadas. Una vez preparados los insumos, se aplicó un método de clasificación no supervisada. Este tipo de clasificación, se caracteriza porque los píxeles de una imagen se asignan a un clúster, sin que el usuario tenga conocimiento previo de la existencia o las características de cada clase espectral. El software utiliza métodos estadísticos de agrupamiento de clúster que luego el usuario identifica a partir de datos de referencia disponibles como mapas, fotografías aéreas e interpretación visual. En este trabajo, se realizó un análisis por k-means tomando como base 50 clústeres y 75 iteraciones. El producto obtenido en este paso representa las 50 clases encontradas, por lo que, para generar las dos clases objetivos, fue necesario reclasificarla asignando el nombre de “Urbano” a las clases edificadas y “No urbano” al resto (Figura 2).

Restricciones

Este dato es utilizado por el modelo como capa donde no se permite urbanizar. Para su elaboración se deben unir capas vectoriales que contengan las máscaras que se desean marcar como restricciones y luego de unir las, convertirlas en formato Ráster. En este caso, se elaboró incluyendo espacios verdes públicos, cuerpos de agua, playas y barrios del tipo “Reserva Forestal” (Figura 3). Se decidió agregar en este paso, los barrios del tipo “Reserva Forestal” dado que muchos de estos barrios, regulados bajo ordenanza municipal, ya no conceden permisos de construcción o los mismos están muy limitados. Es decir que la simulación surgida, contempló que no se densifiquen los barrios de este tipo.

VARIABLES explicativas

Son definidas y utilizadas para explicar cómo influyen en el crecimiento urbano. En este caso se seleccionaron cuatro variables, dos para el factor de Accesibilidad -distancia a las vías de comunicación y al centro de la ciudad- y dos para el factor topografía -pendiente y altitud- (Figura 4).

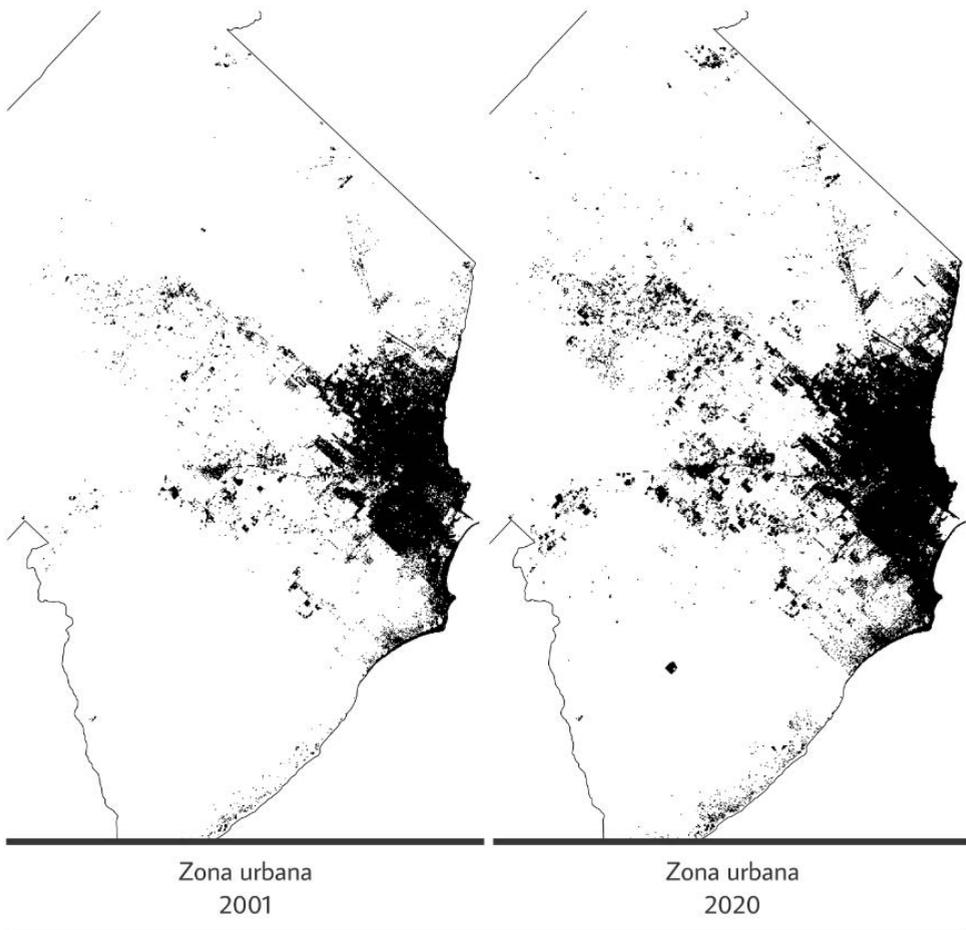


Figura 2. Zonas urbanizadas (Origen/Destino).

Fuente: Elaboración propia.



Figura 3. Restricciones.

Fuente: Elaboración propia.

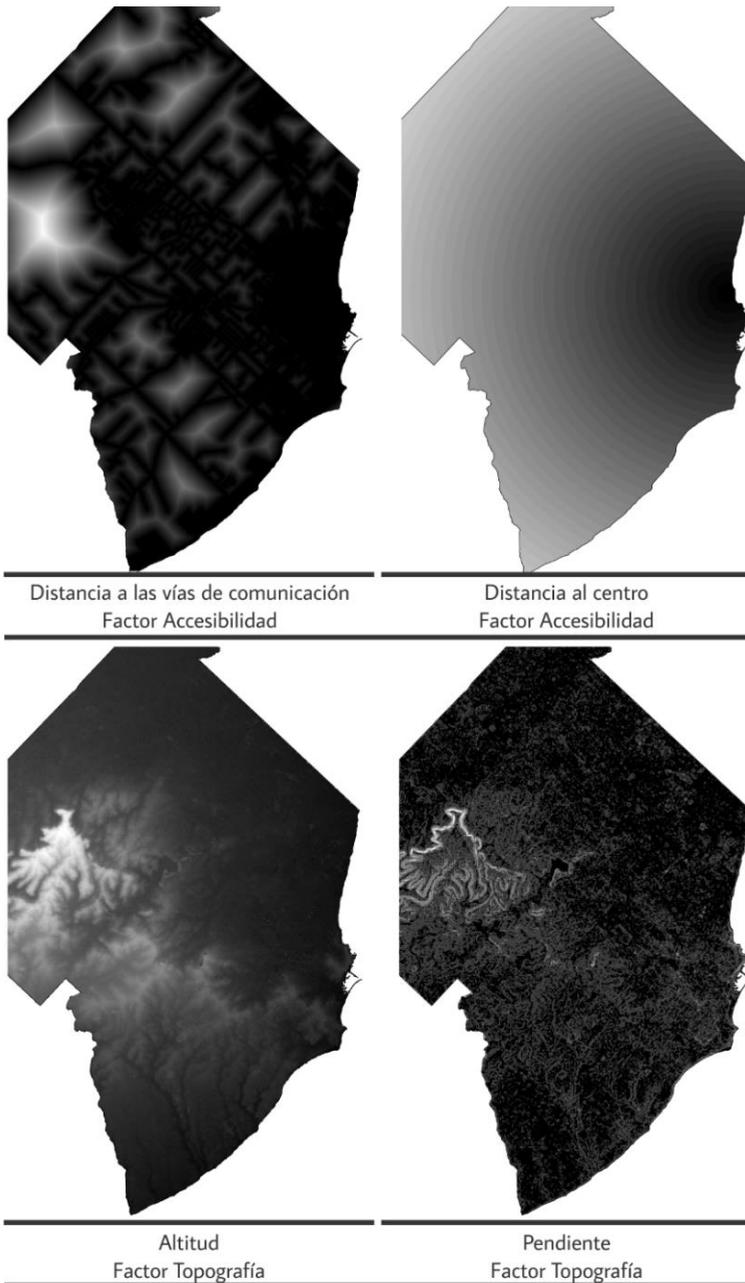


Figura 4. Variables explicativas.

Fuente: Elaboración propia.

Tanto los datos de restricciones como de las variables han sido elaborados en el software QGIS 3.4.10 donde luego fueron llevados a formato TIFF 32 float y finalmente alineados mediante el método del vecino más cercano.

ii. Calibración y simulación en SACcity

Una vez preparados todos los insumos, se procedió a ejecutar SACcity siguiendo el procedimiento explicado en la guía de usuario. En primer lugar, se cargaron todas las variables mostradas anteriormente agrupadas en dos factores: Topografía y Accesibilidad. Se las ponderó respetando el siguiente orden de importancia (ordenado del más al menos importante): 1° Distancia a las vías de comunicación, 2° Distancia al centro, 3° Pendiente y 4° Altitud, de modo tal que al momento de ponderar entre factores el orden de importancia fue: 1° Vecindario, 2° Accesibilidad y 3° Topografía.

El siguiente paso fue ejecutar el modelo combinado, mediante el cual se obtiene la imagen comparativa (2001/2020). Este paso se repitió nueve veces, hasta obtener una combinación con índices de validación adecuados para modelar. Se decidió por una combinación que resultó ser levemente mejor que las demás combinaciones, con un Índice Kappa de 0,77 y exactitud general de 95,93%. En la Tabla 1 se muestran los parámetros que fueron considerados como los óptimos para esta simulación.

Tabla 1. Parámetros elegidos en la configuración del modelo combinado para la ejecución de SACcity.

GRADO DE ALEATORIEDAD	ALTO	TÉRMINO DE PERTURBACIÓN ALEATORIA
Factor de difusión	4	Indica el radio de las celdas vecinas en el que se identificará si ya hay una celda convertida, si ya la hay, la celda no será transformada
Factor de propagación	2	Regula el porcentaje de celdas que son pasadas al estado "urbano" dentro de la cercanía o lejanía a las celdas urbanas existentes. Los valores pueden ir de 0 a 10.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez elegida la combinación de parámetros, se procede a simular finalmente la expansión urbana. Para esto, se ejecuta nuevamente la herramienta, repitiendo los pasos anteriores, pero en esta oportunidad no se utiliza como origen la imagen 2001, sino la 2020 y se ejecuta el modelo con los parámetros elegidos. La simulación genera una capa de información para cada año. En este caso se disponen como resultado 20 escenas, una por cada año simulado, hasta alcanzar la mancha urbana proyectada para 2040 que ha sido mostrada en la Figura 1. Un último paso que permite analizar la distribución espacial del crecimiento urbano requiere un toolbox que SACcity sólo dispone compatible con ArcGIS, no así con QGIS. Utilizando esta herramienta es posible reclasificar las imágenes obtenidas en SACcity y cuantificar la variación absoluta de las celdas.

REFLEXIONES METODOLÓGICAS

Al llevar adelante estos pasos, fue posible ejecutar la herramienta y obtener un posible escenario futuro que marca tendencias en la sustentabilidad del crecimiento de la ciudad. De este modo se corroboró que el modelo de predicción utilizado resultó una técnica de gran utilidad para identificar el modo de expansión del suelo urbano. Técnicamente, uno de los pasos de mayor dificultad está en la elaboración de los archivos *shape* con los datos de entrada para la simulación en SACcity. Una vez logrado, se pueden generar distintos escenarios modificando las restricciones y las ponderaciones entre variables, según las características de cada escenario.

Con el propósito de mejorar el modelo utilizado, y que este responda más adecuadamente al proceso real, se podrían agregar variables tales como el valor del suelo urbano, la distancia a la red de servicios públicos (principalmente agua y saneamiento) y a los espacios verdes públicos. Esto permitiría aumentar la complejidad del modelo, establecer nuevas ponderaciones entre las variables, y mejorar así la simulación.

En la simulación realizada, existen zonas industriales y de agricultura intensiva que en la clasificación de las imágenes satelitales han quedado incluidas dentro de la categoría urbano, por lo que, debido al efecto de vecindad, aumentan la probabilidad de transición a lo urbano de las celdas ubicadas a su alrededor, sobreestimando la expansión urbana en esta área. Este punto podría ajustarse, por ejemplo, agregando estos polígonos en la capa de restricciones.

Por otro lado, las capas de información generadas podrían ser de utilidad como insumos en el modelado y simulación de escenarios futuros de expansión urbana con otras herramientas y comparar resultado entre ellas. De hecho, se podría distinguir sub-categorías dentro de la clase “Urbano”, según la densidad de edificación, dado que SACcity, solo admite dos estados posibles para calcular las transiciones.

A modo de cierre, es importante destacar la oportunidad que representa contar con herramientas y datos municipales de código abierto en instancias de planificación urbana. Si bien las ciudades están insertas en un proceso de gran revolución tecnológica y digital, a menudo no es posible generar, difundir y tomar decisiones con el apoyo de este tipo de información. Muchas veces las herramientas tecnológicas son demasiado costosas, difíciles de utilizar o no están diseñadas para las condiciones específicas del contexto local. Es por este motivo que consideramos que herramientas como SACcity podrían contribuir a atender esta realidad y profundizar el análisis urbano, en pos de su sostenibilidad. En este sentido, la estimación de la expansión urbana permite obtener valores que constituyen indicadores de sustentabilidad factibles de aplicar a otros contextos locales, otorgándole un lugar central en las instancias de planificación. Al respecto, Sería clave promover ciudades que se expandan físicamente, considerando los impactos que tendría el proceso sobre otros indicadores de sustentabilidad. Esto permitiría reducir los riesgos ambientales y mejorar la regulación (haciéndola más estricta), principalmente sobre las áreas productivas y de vacancia, que a menudo resultan conflictivas, pero tienen un

rol clave ya que cumplen funciones ecosistémicas esenciales para la sustentabilidad urbana.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ferraro, R., Zulaica, L. y Echechuri, H. (2016). EXURBIA: Los límites móviles de Mar del Plata. Mar del Plata: Universidad Nacional de Mar del Plata.
- Gareis, M. C. y Ferraro, R. (2015). Estimación de la subhuella de ambiente construido del partido General Pueyrredon, Argentina. *Cuaderno Urbano*, 19(19): 57-72.
- Garzonio O., Terraza, H., Adler, V., Suárez, V., Soulier Faure, M., Scodelaro, F., Cotado, M., Dell' Olio, M., Bonifatti, S. y Vittar Marteau, P. (2013). *Plan de acción. Mar del Plata Sostenible*. Mar del Plata: Iniciativa Ciudades Emergentes y Sostenibles (ICES).
- Lanfranchi, G., Cordara, C., Duarte, J., Gimenez Hutton, T., Rodriguez, S. y Ferlicca, F. (2018) *¿Cómo crecen las ciudades argentinas? Estudio de la expansión urbana de los 33 grandes aglomerados*. Ciudad Autónoma de Buenos Aires: CIPPEC.
- Linares, S. (2015). Aplicación de Modelos de Simulación de Crecimiento Urbano. Buzai GD, Cacace G, Humacata L, Lanzelotti, S. (Eds.), *Teoría y métodos de la Geografía Cuantitativa*, pp 231-249. Mercedes: MCA Libros.
- Linares, S., del Fresno, M., Meliendrez, M. y Milia, S. (2014). Modelización de la expansión urbana mediante la aplicación SACcity. En *2das Jornadas de Tecnologías de Información Geográfica del Sur Argentino*. Bahía Blanca: Universidad Nacional del Sur.
- López Trigal, L. (2015). Diccionario de Geografía aplicada y profesional: Terminología de análisis y gestión del territorio. León: Universidad de León.
- Martino, H. (2018). Hacia un modelo de desarrollo urbano territorial sostenible e integrado. Quilodrán G (Ed.), *Las ciudades que queremos: el valor de planificar para vivir mejor*, pp 149-183. Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Konrad Adenauer Stiftung.
- Sabuda, F. (2018). Capítulo 1. Aspectos territoriales. Red Mar del Plata Entre Todos (Ed.), *Segundo Informe de Mar del Plata Entre Todos: monitoreo ciudadano. Para saber qué ciudad queremos, necesitamos saber qué ciudad tenemos*, pp 22-51. Mar del Plata: Mar del Plata entre Todos. Monitoreo Ciudadano.

- White, R. & Engelen, G. (1997). Cellular automata as the basis of integrated dynamic regional modelling. *Environment and Planning B: Planning and Design* 24 (2):235–246.
- White, R., Engelen, G. & Ujue, I. (1997). The use of constrained cellular automata for high-resolution modelling of urban land-use dynamics. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 24 (3):323–343.
- Zulaica, L. (2013). Crecimiento urbano y sustentabilidad en el periurbano costero e interior de la ciudad de Mar del Plata. *EntreVistas* 1–19.

