

Gutiérrez Angonese, J., Gómez Delgado, M. y Bosque Sendra, J. (2010): Simulación de crecimiento urbano mediante evaluación multicriterio y TIG en el Gran San Miguel de Tucumán (Argentina). En: Ojeda, J., Pita, M.F. y Vallejo, I. (Eds.), *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos*. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla. Sevilla. Pp. 873-888. ISBN: 978-84-472-1294-1

SIMULACIÓN DE CRECIMIENTO URBANO MEDIANTE EVALUACIÓN MULTICRITERIO Y TIG EN EL GRAN SAN MIGUEL DE TUCUMAN (ARGENTINA)

Gutiérrez Angonese, Jorgelina¹; Montserrat Gómez Delgado² y Joaquín Bosque Sendra²

(1) Instituto de Ecología Regional (IER), Universidad Nacional de Tucumán, Casilla de Correo 34 CP4107, Tucumán (Argentina), jor_gutierrez@yahoo.com.ar

(2) Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá (UAH), Calle Colegios 2, Alcalá de Henares 28801 Madrid; montserrat.gomez@uah.es ; joaquin.bosque@uah.es

RESUMEN

En el presente trabajo se combinan técnicas de Evaluación Multicriterio (EMC) y Sistemas de Información Geográfica (SIG) para obtener un modelo de ocupación urbana deseable para el Gran San Miguel de Tucumán (GSMT), el mayor centro urbano del noroeste argentino, que sirva como apoyo en la evaluación y planificación urbano-territorial. Partiendo de mapas urbanos de 2001 y 2009 y de una serie de posibles factores explicativos del crecimiento urbano se realizó una EMC, aplicando el Método de Jerarquías Analíticas y Sumatoria Lineal Ponderada para obtener mapas de aptitud para uso urbano. Se plantearon escenarios alternativos de expansión urbana bajo criterios ambientales, económicos y de compromiso los cuales fueron comparados con el crecimiento real experimentado en el período en estudio. Los escenarios planteados presentaron valores de adecuación media mayores que los observados en el crecimiento real. En general, las áreas deseables para uso urbano según los diferentes escenarios se localizan al este del GSMT. En el crecimiento real se observa un crecimiento contiguo al núcleo central, siguiendo las principales vías de transporte, patrón semejante al escenario económico extremo, evidenciando la influencia del trazado vial en la localización de zonas residenciales y la carencia de criterios de preservación del medio natural en el establecimiento de zonas urbanas.

Palabras Clave: Simulación del crecimiento urbano, Evaluación Multicriterio, Sistemas de Información Geográfica, Gran San Miguel de Tucumán

ABSTRACT

The present work combines Multi-criteria Evaluation (MCE) techniques and Geographical Information Systems (GIS) to obtain a desirable model of urban settlement for the Great San Miguel de Tucuman, the largest urban center of NW Argentina, which serves as a support for urban planning and evaluation. We carried out a MCE using urban maps from 2001 and 2009 and a set of possible explanatory factors of urban growth, applying the Analytical Hierarchy Process and Weighted Linear Combination to obtain a suitability map for urban use. Additionally, we proposed alternative sceneries of urban growth considering environmental and

economic criteria, and an intermediate situation between both. These sceneries were then compared with the real growth that occurred during the study period. The proposed sceneries showed higher average suitability values than the values observed in the real growth. In general, urban desirable areas (according to the proposed sceneries) are located east of GSMT. When considering real growth we observed an expansion adjacent to central nucleus, along the road network. This shows a pattern similar to the extreme economic sceneries, and point out the influence of the road network on the location of residential areas and the lack of criteria for environmental conservation in developing urban areas.

Key Words: Urban growth simulation, Multi-criteria Evaluation; Geographcial Information Systems, Great San Miguel de Tucumán

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente la urbanización es considerada el componente principal del cambio de uso de la tierra y fuerza motriz principal del cambio ambiental (Catalán et al, 2008; Grimm et al, 2008). Si bien solo el 2% de la superficie terrestre está ocupada por áreas urbanas, éstas son muy complejas y dinámicas, cuya velocidad y magnitud de cambio se ha incrementado notablemente en las últimas décadas, especialmente en los países en desarrollo (Al-Shalabi et al, 2006; Antrop, 2004). Comúnmente, el proceso de urbanización es impulsado por el crecimiento económico, la industrialización, el desarrollo agrícola y el aumento de la población urbana. A medida que aumenta la proporción de habitantes en las ciudades, se incrementa el número y tamaño de áreas urbanizadas, extendiéndose sobre áreas naturales o con valor productivo, normalmente sin un patrón claro de crecimiento, condicionado por el medio físico (ej. topografía, siguiendo el trazado de un río) y factores socio-económicos y políticos (ej. precio del suelo, legislación, demografía) que interactúan entre sí (Antrop, 2004).

La urbanización posee numerosos efectos sobre la estructura y funcionamiento de los ecosistemas, modificando las coberturas naturales e impermeabilizando el suelo al reemplazarlas por cubiertas artificiales, alterando la configuración espacial, ocupando tierras productivas, produciendo gases de efecto invernadero y modificando las condiciones climáticas locales, alterando los ciclos hidrológicos, etc (EEA Report, 2006; Berling-Wolf y Wu, 2004; Alberti et al, 2003; Jenerette y Wu, 2001; Zipperer et al, 2000). A partir del conocimiento de estos efectos surge la necesidad de desarrollar e implementar estrategias sustentables de planificación urbana que partan de un mejor conocimiento de los patrones espaciales, las causas e impactos de la urbanización y de la identificación de los factores que dirigen el crecimiento urbano hacia determinadas zonas.

Las nuevas técnicas de análisis espacial, junto con el desarrollo de herramientas para el tratamiento de la información espacial y la mayor accesibilidad a las imágenes de satélite, facilitan la representación, análisis y modelado de sistemas dinámicos complejos, como son las áreas urbanas, permitiendo la explicación, predicción y la identificación de factores determinantes de la ocupación urbana; constituyendo, por tanto, herramientas de gran utilidad para el desarrollo de estrategias de planificación territorial amigables con el entorno (Aguilera Benavente, 2006; Herold et al, 2005).

La Evaluación Multicriterio (EMC), es una herramienta muy utilizada como ayuda para la toma de decisiones espaciales orientadas a la planificación del territorio, permitiendo optimizar la localización de los usos del suelo, asignando éstos a zonas que presenten la mayor aptitud y menor impacto posible, es decir, áreas con la mayor capacidad de acogida (Gómez Delgado y Barredo, 2005). Particularmente, ha sido muy utilizada en la evaluación de la aptitud del territorio para el establecimiento de nuevas urbanizaciones, con la finalidad de dirigir el futuro crecimiento urbano hacia las zonas más apropiadas (Plata Rocha et al, 2010; Molero-Melgarejo et al, 2007; Malczewski, 2006; Al-Shalabi et al, 2006).

El objetivo de este trabajo es construir un modelo de ocupación urbana deseable para el Gran San Miguel de Tucumán (GSMT) en el período 2001-2009 y comparar los resultados con el crecimiento real en dicho período, evaluando diferentes escenarios de crecimiento urbano deseable para el período en estudio, bajo criterios económicos, sociales y ambientales.

1.1. Área de estudio

El presente modelo se construye para el área pedemontana oriental de la Sierra de San Javier (SSJ), en la Provincia de Tucumán, al noroeste de la República Argentina (Figura 1). En dicha zona se asienta el Gran San Miguel de Tucumán (GSMT), un área metropolitana extensa que incluye el municipio de San Miguel de Tucumán (capital de provincia), los municipios Yerba Buena, Banda de Río Salí, Alderete, Las Talitas y las Comunas de El Manantial, San Pablo y Los Pocitos. Además, se localizan allí municipios intermedios como son Tafí Viejo, Lules y San Pablo, funcionalmente vinculados al GSMT. El GSMT constituye el núcleo urbano de mayor extensión y centro cultural, económico y financiero del noroeste argentino.

En los últimos años se ha observado un importante incremento de la superficie urbanizada en el pedemonte (Grau et al, 2008), promovido por el crecimiento natural de la población y su progresiva tendencia a concentrarse en las ciudades; actualmente, el GSMT junto con Tafí Viejo concentran el 70% de la población de la provincia de Tucumán, acercándose al millón de habitantes (INDEC 2001). En la última década el GSMT ha experimentado un crecimiento espacial importante, incrementando su superficie en casi un 60% con respecto al 2001, es decir que el GSMT duplicó su superficie en poco menos de 10 años. En general, el crecimiento ocurrió en el núcleo urbano de mayor extensión (el GSMT) con poco o nulo crecimiento de las urbanizaciones intermedias. Además, se observó un patrón de crecimiento compacto, extendiéndose de forma contigua a partir del área central y/o siguiendo un eje principal de crecimiento este-oeste. La expansión del GSMT y urbanizaciones aledañas se produce, en términos generales, guiados por decisiones personales e institucionales, con urbanizaciones con poca o ninguna planificación y carentes de servicios básicos, o de acuerdo al mercado inmobiliario.

Por su parte, la SSJ se encuentra en estrecha relación con el GSMT al proveerle diversos servicios ecológicos (conservación de cuencas y recursos hídricos, almacenamiento de carbono, protección de la biodiversidad) y ambientes muy valiosos para actividades recreativas y turísticas (Grau et al. 2007). El 65% de la superficie de la Sierra forma parte de un área natural, el Parque Biológico Sierra de San Javier (PSSJ) dependiente de la Universidad Nacional de Tucumán (UNT), con gran influencia antrópica. El uso del suelo en los alrededores del GSMT se basa ante todo en el cultivo de caña de azúcar, cultivos frutales (especialmente limones) y de especies herbáceas anuales (hortalizas), la ganadería extensiva (en zonas cumbrales y valles) y la explotación forestal selectiva (Gutiérrez Angonese, 2006).

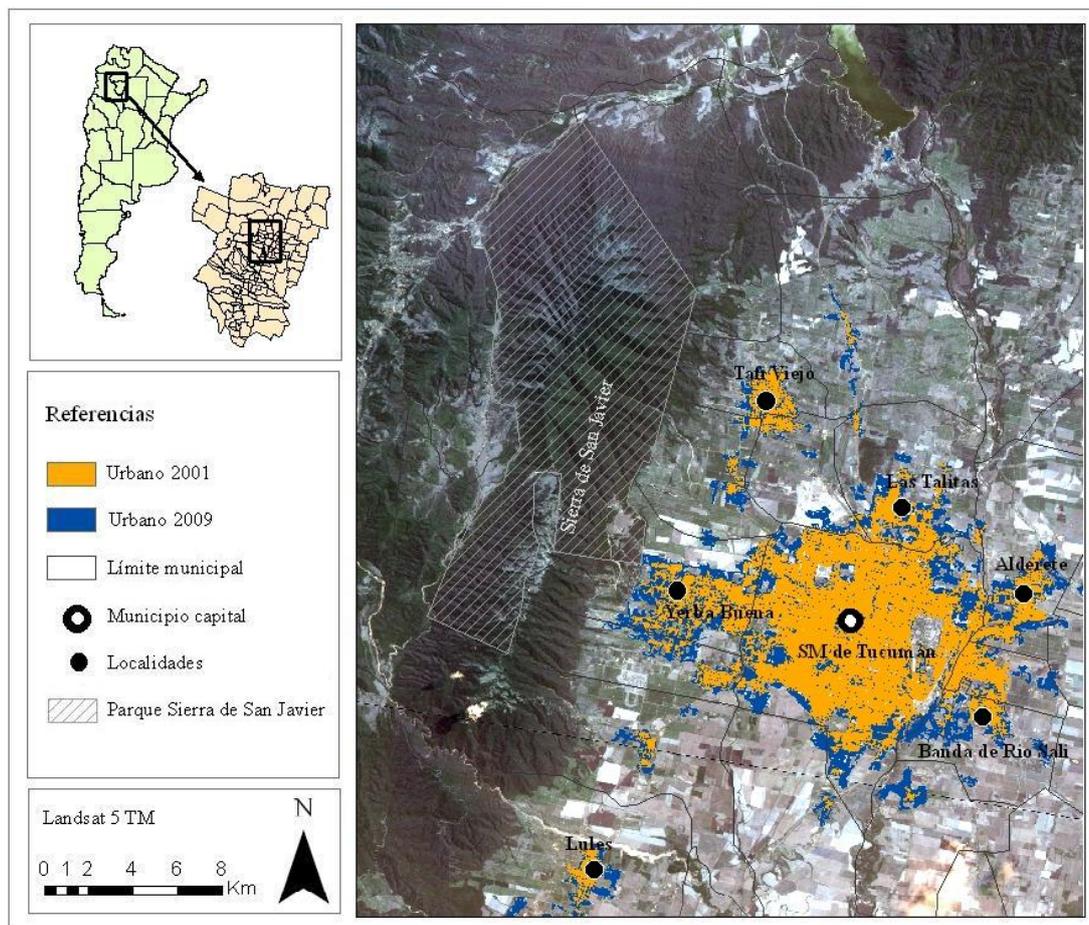


Figura 12. Área de estudio.

DATOS DE PARTIDA Y METODOLOGÍA

1.2. Mapas de suelo urbano y base de datos espaciales

Los mapas urbanos utilizados para la construcción del modelo fueron obtenidos por clasificación digital de imágenes satelitales Landsat TM de los años 2001 y 2009, valiéndose de las bandas espectrales de la imagen, información auxiliar derivada de ellas (Tasseled Cap, texturas) y un modelo digital de elevaciones. De esta manera, se obtuvo la cobertura urbana presente en el área de estudio, considerando como “urbano” la superficie con densidad media/alta de edificación, destinada a usos urbanos y sin distinción entre usos residencial, comercial, industrial u otros, quedando fuera de los análisis las urbanizaciones de baja densidad y barrios cerrados o “countries” debido a que éstas no son eficientemente captados por la clasificación digital (con la resolución espacial de Landsat), confundiendo fácilmente con otras cubiertas. La precisión de los mapas fue evaluada mediante su contraste con imágenes de mayor resolución espacial (Google Earth @ 2002 y CBERS-2B pancromática de 2008) arrojando una precisión global de 87,4% para 2001 y 92,4% para 2009. La determinación del crecimiento urbano se realizó mediante la superposición de mapas de 2001 y 2009, obteniendo así el número y localización de las celdas de cambio.

Por otra parte, se elaboraron mapas temáticos de los diferentes factores incluidos en el modelo mediante digitalización vectorial, y su posterior rasterización, utilizando para ello la información espacial disponible y relevante al problema analizado, como por ejemplo, la red de carreteras primarias y secundarias, la red hidrográfica, los límites del área protegida, centros comerciales, educacionales y de salud, instalaciones no deseables (ingenios azucareros, planta de tratamiento de residuos, cementerios), entre otros. La información relacionada a las características edáficas fue extraída del mapa de suelos confeccionado por el

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA, 2005) para el territorio nacional. Por último, la variable “uso del suelo” se obtuvo mediante clasificación digital de imágenes Landsat TM aplicando el clasificador *Random Forest* (Breiman, 2001), y la pendiente se obtuvo a partir de un modelo digital de elevación SRTM (<http://srtm.csi.cgiar.org/>).

1.3. Modelo de uso urbano deseable 2001-2009

Para la construcción del modelo de uso urbano deseable se utilizaron técnicas de *Evaluación Multicriterio (EMC)*, aplicando el *Método de análisis jerárquico (MAJ)* y *Sumatoria Lineal Ponderada (SLP)*. El MAJ permite mejorar el entendimiento de las decisiones complejas descomponiendo el problema en una estructura jerárquica, estableciendo pesos a un grupo de factores de acuerdo a su nivel de importancia o prioridad (Borouhaki y Malczewski, 2008; Saaty, 1980). Por su parte, la SLP permite integrar los criterios implicados en el proceso de decisión de modo que el nivel de adecuación de cada alternativa (cada celda en el formato raster) se obtiene a partir de la sumatoria de los factores, multiplicados cada uno por su respectivo peso (ver fórmula), de modo que se genera una capa final donde cada alternativa recibe un valor de acuerdo a su aptitud para el uso evaluado (Al-Shalabi et al, 2006; Gomez Delgado y Barredo, 2005).

$$r_i = \sum w_j * v_{ij} * b$$

donde, r_i es el nivel de aptitud de la celda i , w_j es el peso del factor j , v_{ij} es el valor normalizado (0-255) de la celda i en el factor j y b corresponde al mapa booleano (0-1) de restricciones.

En primer lugar, se realizó una selección de variables espaciales relacionadas con la dinámica de los núcleos urbanos en el área de estudio; en base a ello y a la información disponible se construyeron mapas temáticos de los diferentes factores, los cuales fueron agrupados según criterios ambientales, sociales y económicos, otorgando una estructura jerárquica al modelo. Se construyeron un total de 17 factores cuantitativos y se seleccionaron una serie de restricciones al crecimiento urbano donde se incluyen los elementos que quedan excluidos del análisis, es decir, zonas donde el establecimiento urbano no es posible bajo las condiciones actuales (áreas ya urbanizadas en el año 2001, la red de transporte, el Parque biológico Sierra de San Javier, los espacios verdes urbanos y la red hidrográfica con un área buffer de 100m). Un aspecto a tener en cuenta es la estandarización de los datos: dado que las variables originales se expresan en unidad de medida diferentes y/o con rango distintos, se procedió a la normalización de los factores, reescalando los valores originales entre unos límites mínimos y máximos determinados (valores 0-255) mediante operadores borrosos (fuzzy) lineales o sigmoidales (Gómez Delgado y Barredo, 2005; Jiang y Eastman, 2000).

Teniendo en cuenta que el resultado final del modelo depende de los factores seleccionados y la calidad de los mismos, la elección de los factores se realizó en base a los objetivos perseguidos, teniendo en cuenta las características del área de estudio, los antecedentes de trabajos en la zona (Gutiérrez Angonese, 2010) y aportes de expertos con conocimiento del área. Además, se tuvieron en cuenta otros trabajos en los que se aplican criterios y factores similares (Plata Rocha et al, 2010; Molero Melgarejo, 2007; Al-Shalabi et al, 2006). Se han definido los criterios a seguir en la localización de áreas deseables para uso urbano, considerando que dichas zonas deben localizarse próximas a zonas urbanas ya existentes, garantizando el acceso de la población a diferentes servicios urbanos (educación, salud) y comercios, y próximas a las vías de transporte, reduciendo los costes de desplazamiento de la población y de extensión de infraestructuras y servicios básicos urbanos (recolección de residuos, servicios de cloacas, etc); en zonas con baja pendiente (donde se minimizan los costos de infraestructura y hay menor impacto ambiental por escorrentías y deslizamientos) y fuera del lecho de inundación de ríos (reduciendo riesgo de inundación y conservando los bosques de ribera); en áreas transformadas (ej, agrícolas) conservando los bosques de Yungas, fuera del área natural protegida, en zonas donde exista menor riesgo ambiental (erosión, inundaciones) y presenten mejor calidad paisajística. Los factores considerados se listan en la tabla 1.

Tabla 1. Totalidad de factores inicialmente seleccionados para el modelo, por categoría.

CATEGORÍA	SUBFACTOR	DESCRIPCIÓN
AMBIENTALES	Distancia a la red hidrográfica	Áreas con mayor adecuación se encuentran alejadas de la red, para conservar los lechos de los ríos y bosques de ribera, evitando los riesgos de inundación y contaminación de los mismos.
	Distancia al Parque Sierra de San Javier (PSSJ)	Conservación del área natural protegida, considerando una mayor aptitud en áreas alejadas al parque.
	Usos del suelo	Mayor adecuación en áreas transformadas (agrícolas) y protección de las coberturas naturales y/o que se encuentran en retroceso o con menor representación en el área (bosques, pastizales y valles).
	Susceptibilidad a la erosión hídrica	Protección de suelos vulnerables a los procesos degradativos (con mayor susceptibilidad a la erosión hídrica).
	Permeabilidad del suelo	Se asignó menor aptitud a suelos con capacidad de drenaje alta (mayor permeabilidad, mayor riesgo de contaminación de los acuíferos) y baja (retención del agua en superficie, mayor riesgo de inundación) y mayor aptitud a zonas de drenaje medio (bajo riesgo de inundación y contaminación superficial).
	Protección de áreas de Yunga	Mayor aptitud para uso urbano en zonas de bosque ("Yungas") transformado como medida de protección de un ecosistema con características singulares, en situación vulnerable y retroceso.
ECONÓMICOS	Pendiente del terreno	Mayor aptitud en zonas de baja pendiente, donde se minimizan los costos de construcción de infraestructuras (viviendas, vías de transporte) y posee menor riesgo ambiental por deslizamientos o escorrentías.
	Proximidad a las vías de transporte	Mayor aptitud en zonas próximas a las vías de transporte permitiendo mayor accesibilidad de la población a las zonas urbanas y favoreciendo las conexiones entre urbanizaciones.
	Proximidad a zonas urbanas	La aptitud para uso urbano es mayor en proximidad a zonas urbanas existentes, garantizando la accesibilidad de la población a los mismos, menor costo de desplazamiento y reducción de los costes concernientes a la extensión de los servicios, vías de comunicación, líneas de transporte público, etc.
	Proximidad a municipios intermedios	Mayor aptitud en proximidad a núcleos urbanos con una población entre 5000 y 75000 habitantes, para promover el crecimiento de los núcleos urbanos intermedios, favoreciendo la descentralización del municipio capital y una distribución más homogénea de la población
	Proximidad a zonas	Una variante del caso anterior. Se clasificaron los núcleos

	urbanas ponderado por la población	urbanos según el nº de habitantes otorgando mayor peso a los núcleos intermedios (mayormente municipios) y menos peso a los núcleos pequeños (comunidades rurales) y el municipio capital.
	Proximidad a centros comerciales	Mayor adecuación en áreas próximas a zonas comerciales (centros comerciales e hipermercados), garantizando el acceso de la población a los mismos.
SOCIALES	Proximidad a las necesidades básicas urbanas	Mayor aptitud en zonas próximas a los servicios básicos de educación y salud, garantizando la accesibilidad de la población a los mismos.
	Distancia a instalaciones no deseables	Para minimizar el riesgo o las molestias que pueden ocasionar las instalaciones no deseables (cementeros, ingenios azucareros, áreas de vertidos cloacales, vertederos de basuras, etc) se asignó menor aptitud a zonas que se encuentren próximas a dichas instalaciones.
	Calidad visual/paisajística	Considera las características del paisaje que intervienen en la percepción visual del entorno, influyendo positivamente en la calidad de vida de los pobladores. A partir de la distancia a zonas de bosque y las cuencas visuales, se otorga mayor aptitud a zonas próximas a la Sierra de San Javier y con mayor visibilidad a la Sierra.
	Proximidad a los diferentes tipos residenciales	Se consideró la distancia existente a asentamientos marginales, barrios cerrados, planes oficiales de vivienda (con características distintivas y que influyen diferencialmente en las decisiones de localización de nuevas viviendas o barrios), con mayor aptitud en zonas próximas a los barrios cerrados y menor aptitud próxima a asentamientos marginales.
	Proximidad a espacios verdes urbanos	La disponibilidad y accesibilidad a áreas verdes son considerados indicadores de calidad de vida y de desarrollo urbano sostenible. Se consideró aquí una aptitud mayor en zonas próximas a plazas y parques urbanos.

Uno de los principios de la Evaluación Multicriterio establece que el conjunto de factores a ser incluido en el estudio debe ser completo (abarcar todas las dimensiones del fenómeno estudiado), relevante, mínimo y no redundante, es decir, que no resulta apropiado utilizar factores que estén aportando la misma información, ya que alguna dimensión del problema podría ser sobrevalorada, si es que hay más de un factor que está valorando su adecuación (Gómez Delgado y Barredo, 2005). Así, y para evitar el problema de la redundancia, todos los factores fueron sometidos a un análisis de correlación para encontrar cuáles se encuentran espacialmente correlacionados, midiendo el mismo fenómeno. En base a los resultados se simplificó el modelo a aquellos factores que realmente contribuyen o aportan información relevante a la explicación del crecimiento urbano en el área de estudio. El análisis de correlación entre pares de factores evalúa el grado de asociación entre los factores mediante el coeficiente de correlación de Pearson "r". Este coeficiente toma valores entre -1 y +1 (correlación negativa/positiva), donde r=0 indica total ausencia de correlación. Como resultado se realizó una reducción del número de factores, eliminando aquellos que presentan mayor correlación ($r > |0,5|$).

Los factores seleccionados fueron ponderados mediante la técnica de *comparación por pares de Saaty*, donde se compara la importancia de cada uno de los factores sobre los demás estableciendo la importancia relativa (peso) de cada uno de ellos, proporcionando una medida cuantitativa de los juicios de

valor entre pares de factores (Mena Frau et al, 2006). Se aplicó el *Método de Jerarquías Analíticas* (MJA), según el cual, en una primera etapa se ponderan los niveles superiores (categorías) y, posteriormente, los subfactores. El peso final de cada factor se obtuvo multiplicando el peso otorgado a cada subfactor por el peso de la jerarquía superior (Plata Rocha et al, 2010). Así, los factores con sus respectivos pesos fueron combinados mediante una *Sumatoria Lineal Ponderada*, para obtener un mapa de aptitud para uso urbano (variable continua). En dicho mapa se indica el grado de adecuación que presenta cada punto del espacio (celda) para el uso en cuestión, de acuerdo a los criterios establecidos y la ponderación de los diferentes niveles de factor. Posteriormente, se ordenaron las celdas en función del grado de adecuación y, considerando como meta de superficie el crecimiento urbano real experimentado en el período 2001-2009, se seleccionaron las celdas con mayor valor de adecuación hasta cumplir con dicha meta, lo cual representa las áreas donde deberían haber crecido las ciudades en 2009 para cumplir con los criterios fijados en el modelo (mapa de asignación de uso urbano deseable).

Finalmente, se excluyeron las parcelas que poseen una superficie menor a la superficie mínima requerida (10ha, valor obtenido según la superficie mínima de las parcelas urbanas en las fechas analizadas) y se realizó una comparación de las áreas óptimas de uso urbano arrojadas por el modelo con el crecimiento real experimentado entre 2001 y 2009, mediante el cálculo de la adecuación media, es decir, el valor de adecuación promedio de todas las celdas que conforman las parcelas urbanas en el mapa de asignación.

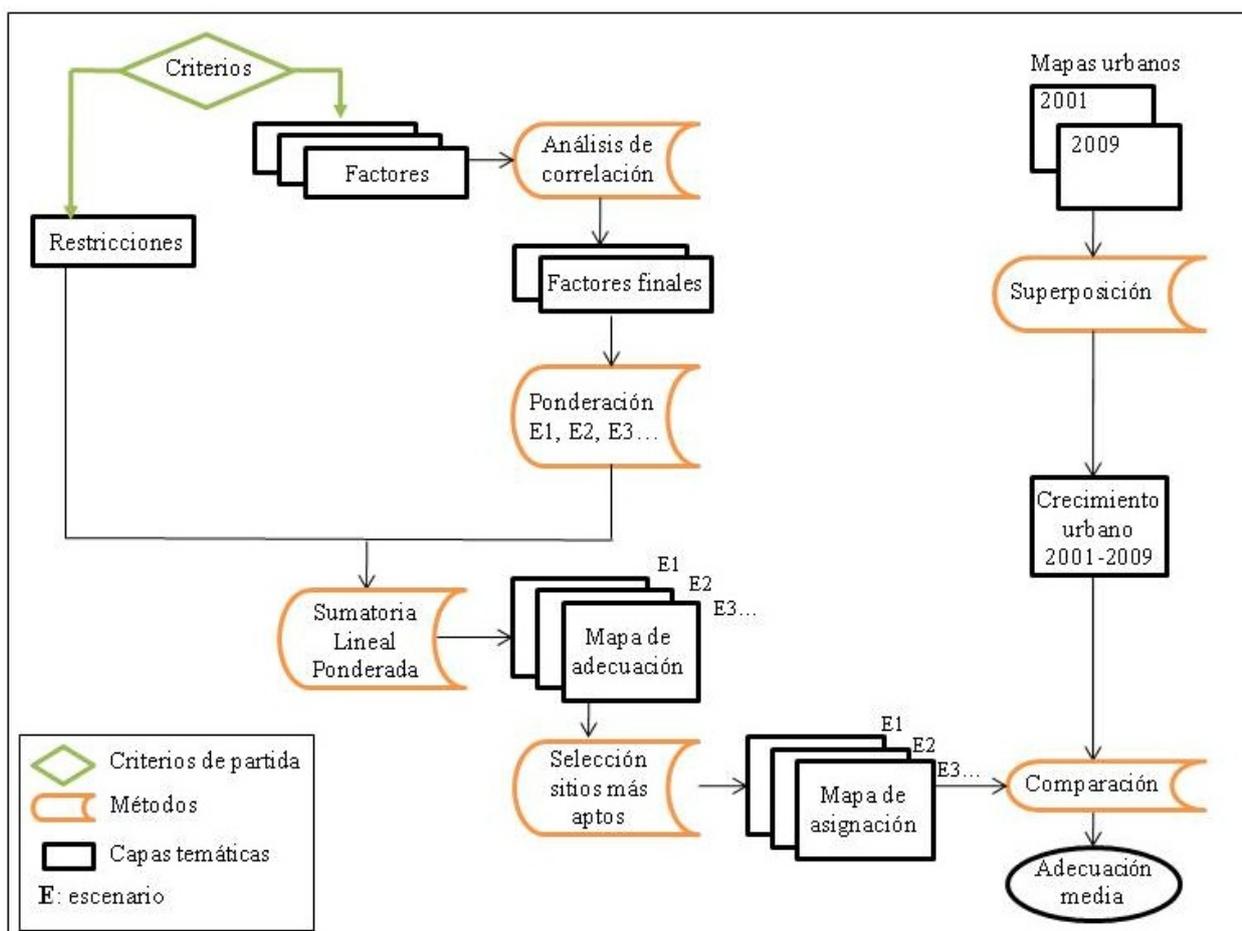


Figura 2. Esquema metodológico de las etapas seguidas en la Evaluación.

1.4. Escenarios de crecimiento urbano deseable

En el presente trabajo se construyeron diferentes mapas de adecuación urbana que responden a escenarios alternativos de ocupación deseable del suelo para uso urbano, los cuales fueron construidos modificando la ponderación de los factores en la EMC, bajo diferentes supuestos de preferencia en la selección de sitios urbanizables. Se plantearon 5 escenarios, formando una serie de decisiones desde una perspectiva ambientalista a una basada puramente en aspectos económicos. Es decir, se habla de un escenario de compromiso (donde el peso de los factores se distribuye equitativamente entre factores ambientales y económicos), un escenario ambiental y uno económico (donde se otorga mayor importancia a los factores ambientales y menor a los económicos, y viceversa) y escenarios extremos donde solo se incluyen los factores ambientales o económicos.

3. RESULTADOS

3.1. Análisis de correlación y selección final de factores

Como resultado del análisis de correlación se puede observar que los factores económicos (excepto “pendiente del terreno”) presentan una elevada correlación entre sí, por ejemplo, “Proximidad a las vías de transporte” está correlacionado con “Proximidad a los núcleos urbanos” ($r > 0.8$, en todos los casos) y esto se debe a que la red de transporte en el área de estudio está íntimamente ligada a las zonas urbanas. Esto mismo ocurre con los factores sociales. Por ejemplo, todos los factores sociales (excepto “calidad visual/paisajística”) están correlacionados entre sí, básicamente porque dichos elementos se encuentran dentro de los núcleos urbanos (o muy próximos a éstos). Además, se puede observar una gran correlación entre los factores de diferentes categorías, especialmente entre los económicos y sociales. Dicho grado de correlación entre los diferentes factores son esperables al considerar las características de las zonas urbanas analizadas, ya que se trata de una zona bastante homogénea, con un gran núcleo urbano dominante (espacial y funcionalmente), donde la mayoría de las instalaciones de servicios sociales o relacionados con las actividades urbanas se encuentran concentradas en dicho núcleo.

Los factores ambientales, en general, presentaron ninguna o poca correlación entre sí o con las categorías social y económica. Cabe destacar que “Usos del suelo” presenta una correlación leve con “Susceptibilidad a la erosión hídrica” ($r = 0,56$), “Protección de Yungas” ($r = 0,55$) y “Pendiente del terreno” ($r = 0,53$) y, en mayor medida, con “calidad visual/paisajística” ($r = 0,72$). “Susceptibilidad a la erosión hídrica”, a su vez, se correlaciona con los factores de “Proximidad a núcleos urbanos” y “Proximidad a municipios intermedios” ($r = 0,66$ y $r = 0,62$, respectivamente).

En base a dichas observaciones se procedió a reducir el número de factores a incluir en el modelo eliminando los factores que se encuentren correlacionados, con un valor de $r > |0,55|$. Los factores finalmente incorporados al modelo fueron los indicados en la tabla 2.

Tabla 2. Factores finales incluidos al modelo.

CATEGORÍA	SUBFACTOR
AMBIENTAL	Distancia a la red hidrográfica
	Distancia al PSSJ
	Usos del suelo
	Permeabilidad del suelo
ECONÓMICO	Pendiente del terreno

	Proximidad a las vías de transporte
--	-------------------------------------

3.2. Ponderación de los factores

Los factores finales se ponderaron según el *Método de Jerarquías Analíticas (MJA)*, ponderando primero las categorías y luego los subfactores, obteniendo el peso final como producto de los pesos en ambos niveles. Los diferentes escenarios se plantearon variando los pesos del primer nivel y segundo nivel, según se considere un escenario “ambiental”, “de compromiso” o “económico”, los pesos finales se muestran en la tabla 3. A su vez, dentro de la categoría ambiental, se varió la importancia relativa de los factores según se trate de un escenario ambiental o de compromiso/económico.

Tabla 3. Pesos asignados a los factores en los diferentes escenarios.

CATEGORIA	SUBFACTOR	ESCENARIOS				
		Ambiental extremo	Ambiental	Compromiso	Económico	Económico extremo
Ambiental	Uso del suelo	0.1588	0.1112	0.2900	0.1695	0.0000
	Dist. a la red Hidrografía	0.5137	0.3596	0.1539	0.0787	0.0000
	Permeabilidad del suelo	0.2777	0.1944	0.0769	0.0353	0.0000
	Dist. al PSSJ	0.0498	0.0349	0.0312	0.0166	0.0000
Económico	Prox. a las vías transporte	0.0000	0.1950	0.2912	0.4550	0.6500
	Pendiente del terreno	0.0000	0.1050	0.1568	0.2450	0.3500
total		1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

3.3. Obtención del mapa de adecuación para uso urbano

Los factores finales y sus respectivos pesos se combinaron mediante una *Sumatoria Lineal Ponderada (SLP)* obteniendo un mapa de adecuación para cada uno de los escenarios planteados, en los cuales se otorga a cada celda un valor de capacidad de acogida representando el grado en el que reúnen las condiciones adecuadas para el establecimiento de áreas urbanas, según los factores incluidos y los pesos asignados en cada escenario (figura 3).

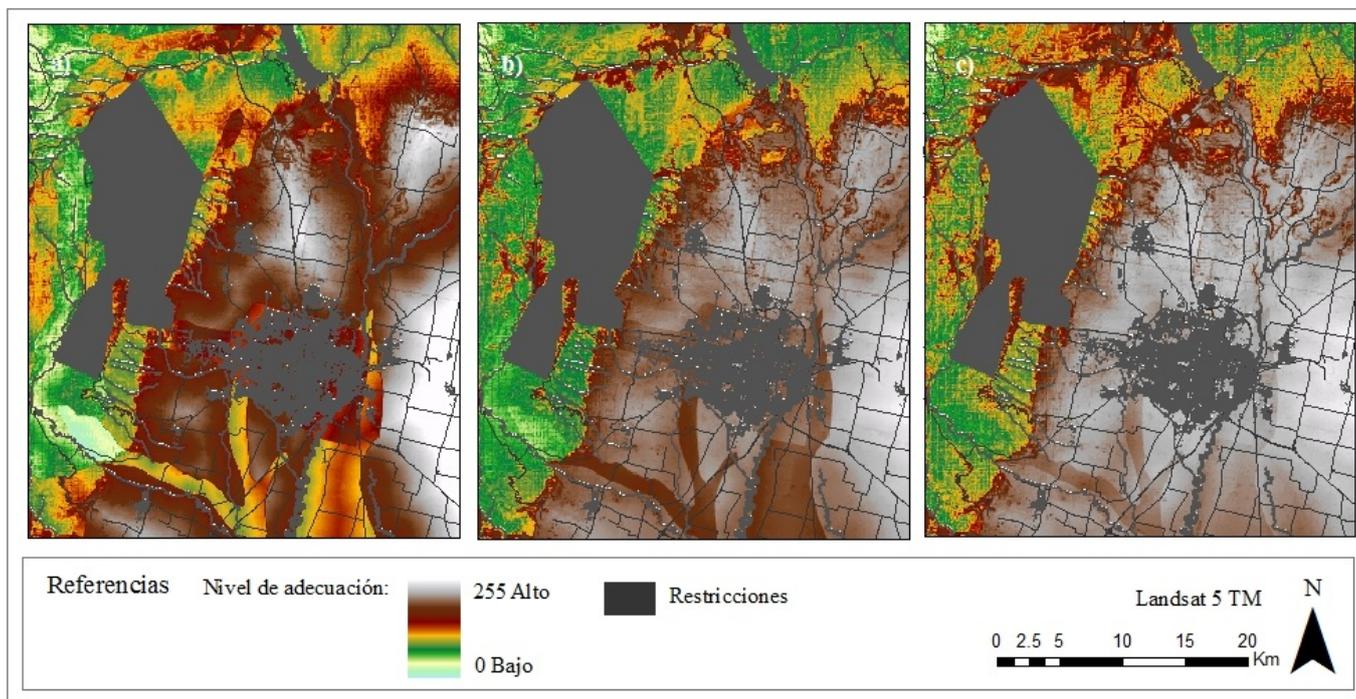


Figura 3. Mapa de adecuación obtenido por sumatoria lineal ponderada de los factores según el escenario a) ambiental, b) compromiso y c) económico.

A partir de dichos mapas se seleccionaron las celdas con mayor adecuación, hasta completar el valor correspondiente al crecimiento urbano real experimentado en el período 2001-2009, el cual fue de 5786 hectáreas. Las zonas resultantes representan las áreas donde deberían haber crecido las ciudades en 2009 para cumplir con los criterios fijados en el modelo. Posteriormente, se obtuvieron las parcelas de adecuación agrupando los píxeles contiguos y eliminando parcelas de menos de 10has. Como resultado se obtuvieron mapas de asignación deseable de suelo urbano para el año 2009 para cada uno de los diferentes escenarios, los cuales se muestran en la figura 4.

A partir de la comparación de los escenarios entre sí se puede observar una gran similitud entre ellos (excepto con el escenario económico extremo) en cuanto a la localización de las zonas deseables, las cuales se localizan casi en su totalidad al este del GSMT formando una zona compacta de gran extensión y en pequeñas zonas al norte o noreste del mismo. Esto se debe a que los factores seleccionados tienden, en general, a alejar las zonas urbanas de las áreas naturales y de bosque (situadas al oeste) y favorecen la localización de usos urbanos en la zona agrícola pedemontana, de menor pendiente, situada al este del área de estudio. Por su parte, el escenario económico extremo, muestra un patrón vinculado estrechamente con la distribución de la red vial, localizando las zonas urbanas deseables en las inmediaciones del GSMT y siguiendo el trazado de las carreteras hacia diferentes direcciones.

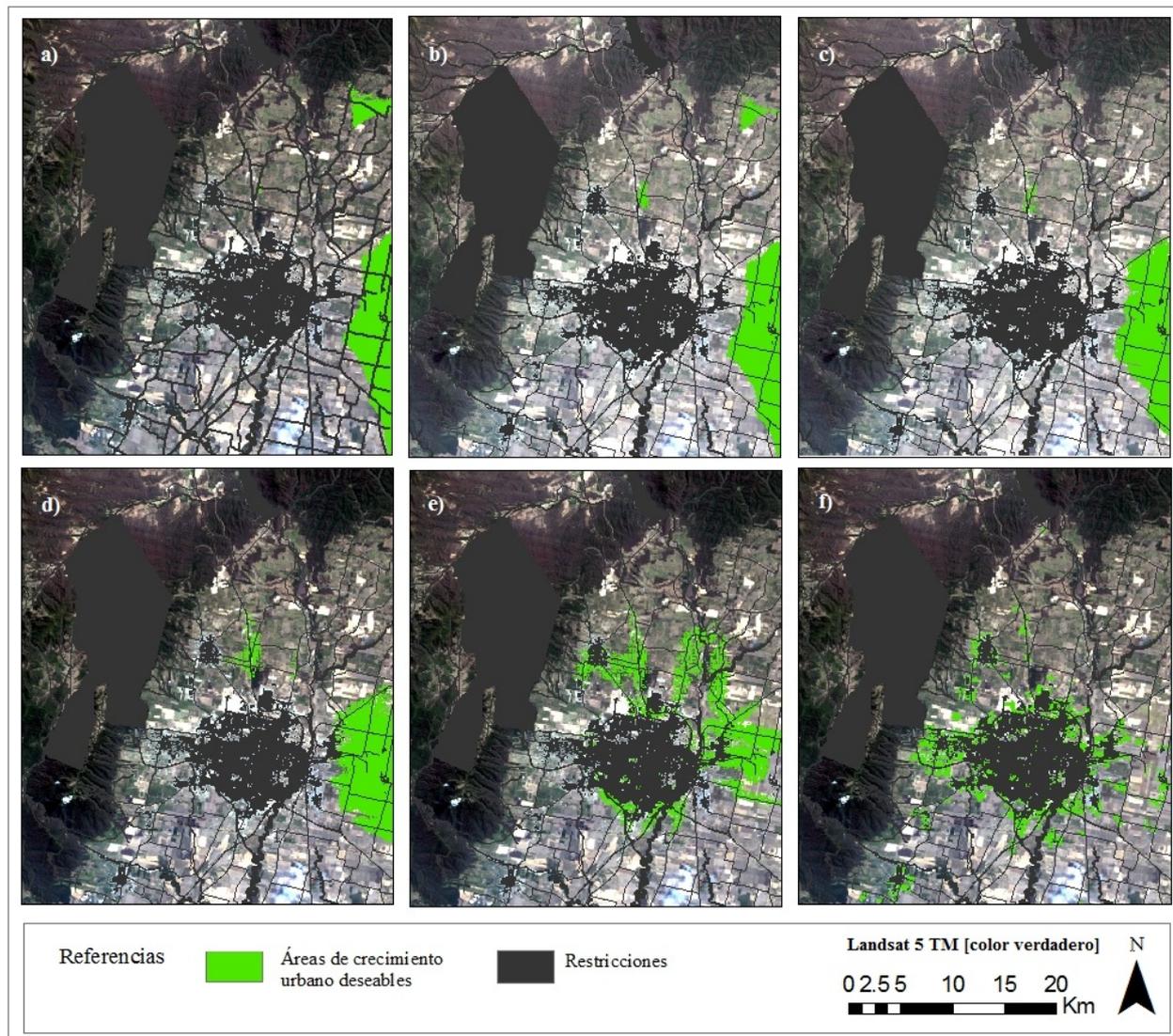


Figura 4. Mapas de asignación de uso urbano deseable correspondiente a los diferentes escenarios del modelo: a) ambiental extremo, b) ambiental, c) compromiso, d) económico y e) económico extremo, comparado con el crecimiento urbano real observado en 2001-2009 (f)

De la evaluación de la adecuación media de los diferentes escenarios se puede observar que todos ellos presentan valores de adecuación media mayores a los valores observados en el crecimiento real 2001-2009 (Tabla 4), con lo cual se evidencia que el crecimiento urbano en la zona de estudio tuvo lugar sin tener en cuenta factores relacionados con la preservación del medio natural. En cambio, este ocurrió siguiendo el trazado de las principales avenidas y carreteras, manteniendo la contigüidad con el núcleo urbano central y de mayor importancia, presentando un patrón de crecimiento semejante al escenario económico extremo, evidenciando la gran influencia del trazado vial en la localización de zonas residenciales.

Tabla 4. Valores de adecuación media obtenidos según los diferentes escenarios de crecimiento urbano deseables, comparados con los valores de adecuación media del crecimiento real.

ESCENARIOS	Ambiental extremo	Ambiental	Compromiso	Económico	Económico extremo
Crecimiento deseable	168,69	181,37	203,82	222,62	246,28
Crecimiento real	91,91	118,61	153,78	167,20	180,88

Una alternativa para evaluar el crecimiento urbano ocurrido y el crecimiento deseable resultado de los diferentes escenarios fue obtener el valor de aptitud promedio de cada factor incorporado en la EMC para cada uno de los escenarios y el crecimiento real. Así, según se observa en la tabla 5, el crecimiento urbano real ocurrió en áreas de baja aptitud para los factores ambientales “Distancia a la red hidrográfica”, “Distancia al PSSJ” y “Permeabilidad del suelo”, con valores aún menores que los obtenidos en el escenario “Económico extremo”, es decir, en zonas de mayor riesgo ambiental y muy próximas al área natural protegida. Por su parte, los escenarios ambientales y de compromiso presentan los valores de aptitud mayores para estos factores, respetando los criterios de conservación del medio ambiente. Para el resto de los factores, el crecimiento real presentó valores de aptitud elevada (valores >200), pero corresponden a valores aún menores que los arrojados por los distintos escenarios modelados. Como es de esperarse, los escenarios ambientales presentaron valores de aptitud mayor para los factores ambientales, excepto “Uso del suelo” en cuyo caso las zonas de mayor aptitud promedio fueron ocupadas en los escenarios “de compromiso” y “económico”; y los escenarios económicos ocuparon zonas de mayor aptitud para los factores económicos.

Tabla 5. Valores medios de aptitud para cada factor según las parcelas de adecuación obtenidas en cada escenario, comparadas con los valores correspondientes al crecimiento real 2001-2009

FACTOR	Ambiental extremo	Ambiental	Compromiso	Económico	Económico extremo	Crecimiento real 01-09
Uso del suelo	247,02	247,68	248,37	248,07	245,48	205,76
Dist. a la red hidrográfica	171,65	170,35	166,81	158,21	87,99	43,53
Permeabilidad del suelo	255,00	255,00	255,00	255,00	245,63	188,23
Prox. al PSSJ	189,75	187,07	186,35	176,06	137,99	95,49
Dist. a las vías de transporte	230,31	234,77	237,69	241,69	247,04	236,89
Pendiente del terreno	247,19	250,02	250,75	251,21	252,32	245,11

4. DISCUSIÓN

El GSMT es el centro geográfico y funcional de la Provincia de Tucumán, además de centro cultural, económico y financiero del noroeste argentino. Desde mediados del siglo XX se observa un constante incremento de la superficie urbanizada (proceso acentuado en las últimas décadas) debido al incremento de la población y su tendencia creciente a localizarse en las ciudades, principalmente en el GSMT resultado del

efecto atractivo que éste ejerce sobre la población en cuanto a la disponibilidad de empleo, lugares de residencia, servicios, entre otros, generando presión en sus límites, los cuales se van extendiendo hacia la periferia. En general, dicha expansión se produce siguiendo un patrón agregado, localizando las nuevas urbanizaciones en sus inmediaciones, de forma casi espontánea, guiada por decisiones personales, institucionales y del mercado inmobiliario, sin la presencia de una planificación urbana integral.

La velocidad, magnitud y complejidad de los cambios observados en las últimas décadas en el área metropolitana del GSMT requieren de un análisis detallado de los aspectos socio-económicos, políticos y ambientales que gobiernan el desarrollo urbanístico del GSMT, aportando las bases para el planteamiento de estrategias que conduzcan a una planificación urbana sustentable, dirigiendo el crecimiento de la ciudad hacia zonas donde se garantice el bienestar de la población y la protección del medio ambiente, minimizando los impactos sobre los ecosistemas en donde se asientan.

El actual desarrollo de las herramientas y métodos de análisis espacial, sumado a las nuevas técnicas de apoyo a la toma de decisiones constituyen un valioso aporte para el análisis de las dinámicas urbanas, permitiendo la descripción y análisis de los patrones espaciales del crecimiento urbano, así como la explicación de sus causas e impactos. La evaluación de escenarios “deseables” de desarrollo urbano, constituyen en sí una gran contribución al estudio de la sustentabilidad y evaluación de las actuales decisiones en materia urbanística. La Evaluación Multicriterio (EMC) fue aplicada en este trabajo para la obtención de un modelo de capacidad de acogida del territorio que facilite la localización de sitios adecuados para uso urbano, bajo un grupo de criterios previamente definidos y estrechamente vinculados al proceso en cuestión. Como resultado, se obtuvo una gran discordancia entre el crecimiento real observado y el arrojado por los diferentes escenarios modelados. Si bien este tipo de modelos significan una simplificación del proceso analizado, nos aporta un medio de análisis y discusión de las tendencias de desarrollo urbano local, e invitan a seguir avanzando en la generación de información y mejora del modelo propuesto, con miras a una planificación urbano-territorial sustentable.

La aplicación de técnicas de apoyo a la toma de decisiones, como es la EMC, integradas en los SIG adquiere gran importancia en estudios de análisis territorial generando información valiosa para la gestión territorial. Sin embargo, la disponibilidad y naturaleza de los datos requeridos para el estudio de las dinámicas urbanas puede convertirse muchas veces en un factor limitante. La precisión y aplicabilidad de los modelos de dinámica urbana depende profundamente del tipo y calidad de datos disponibles para su parametrización, calibración y validación, siendo en general datos complejos que van desde parámetros ambientales y ecológicos a información socio-económica. Por otro lado, la escala de análisis debe ser tenida seriamente en cuenta, acorde a las características del área de estudio y al tipo de proceso en estudio, ya que la elección de una escala inadecuada puede dejar escapar de nuestro conocimiento procesos clave del desarrollo urbano local o regional.

5. AGRADECIMIENTOS

Este proyecto fue financiado parcialmente por la Agencia Española de Cooperación Internacional para el desarrollo (PCI-Iberoamérica), bajo el proyecto A/018766/08 “Efectos de la dinámica urbana sobre la estructura de la vegetación y la temperatura de superficie del Gran San Miguel de Tucumán”.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilera Benavente F. (2006): Predicción del crecimiento urbano mediante sistemas de información geográfica y modelos basados en autómatas celulares. *GeoFocus*, 6: 81-112.
- Al-Shalabi M.A., Mansor S.B., Ahmed B.A. y Shiriff R. (2006): GIS-based multicriteria approaches to housing site suitability assessment. *Shapping the Change. XXIII FIG Congress*, Munich, Germany.
- Alberti M., Marzluf J.M., Shulenberger E., Bradley G., Ryan C. y Zumbrunnen C. (2003): Integrating Humans into Ecology: Opportunities and Challenges for Studying Urban Ecosystems. *BioScience*, 53:169-1179.
- Antrop M. (2004): Landscape change and the urbanization process in Europe. *Landscape and Urban Plannin*. 67: 9-26.

- Berling-Wolff S. y Wu J. (2004): Modelling Urban Landscape dynamics: A case study in Phoenix, USA. *Urban Ecosystems*, 7: 215-240.
- Borouhaki S. y Malczewski J. (2008): Implementing an extension of the analytical hierarchy process using ordered weighted averaging operators with fuzzy quantifiers in ArcGIS. *Computers & Geosciences*, 34:399-410.
- Breiman L. (2001): Random Forest. *Machine Learning*, 45:5-32
- Catalán B., Saurí D. y Serra P. (2008): Urban sprawl in the Mediterranean. Patterns of growth and change in the Barcelona Metropolitan Region 1993–2000. *Landscape and Urban Planning*, 85:174-184.
- European Environment Agency. (2006): *Urban Sprawl in Europe. The ignored Challenge*. Joint Research Center of the European Commission, EEA Report, 10: 56 pp.
- Gómez Delgado M, y Barredo J.I. (2005): *Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en la ordenación del territorio*. Editorial Ra-Ma, 2ª Edición, Madrid, 279 pp.
- Grau H.R., Gasparri N.I., Morales M., Grau A., Aráoz E., Carilla J. y Gutiérrez J. (2007): Regeneración ambiental en el Noroeste argentino: Oportunidades para la conservación y restauración de ecosistemas. *Ciencia Hoy*, 17: 42-56.
- Grau H.R., Hernández M.E., Gutiérrez J., Gasparri N.I., Flores E. y Paolini L. (2008): A peri-urban neotropical forest transition and its consequences for environmental services. *Ecology and Society*, 13 (1): 35. <http://www.ecologyandsociety.org/vol13/iss1/art35/>
- Grimm N.B., Faeth S.H., Golubiewski N.E., Redman C.E., Wu J., Bai X. y Briggs J.M. (2008): Global Change and the Ecology of Cities. Review. *Science*, 319: 756-760.
- Gutiérrez Angonese J. (2006): Historia de Uso de la Tierra y Transición forestal en la Sierra de San Javier, Tucumán. Tesis. Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Gutiérrez Angonese, J. (2010): Dinámica espacio-temporal de crecimiento urbano en el pedemonte oriental de la Sierra de San Javier (1986 - 2045). En: R. Grau (Ed.), *Ecología de una interfase natural-urbana. Bases para el estudio y la planificación territorial de las interacciones entre la Sierra de San Javier y el Gran San Miguel de Tucumán*. EDUNT (Editorial de la Universidad Nacional de Tucumán), Tucumán, en prensa.
- Herold M., Couclelis H. y Clarke K.C. (2005): The role of spatial metrics in the analysis and modeling of urban land use change. *Computers, Environment and Urban Systems*, 29: 369-399.
- INDEC. (2001): *Censo Nacional de Población*. <http://www.indec.mecon.ar/>
- INTA. (2005): *Atlas de suelos de la República Argentina*. Instituto de Suelos, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Buenos Aires. CD-Room.
- Jenerette G.D. y Wu J. (2001): Analysis and simulation of land-use change in the central Arizona- Phoenix region, USA. *Landscape Ecology*, 16: 611-626.
- Jiang H. y Eastman J.R. (2000): Application of fuzzy measures in Multi-criteria Evaluation in GIS. *International Journal of Information Science*, 14: 174-184.
- Malczewski J. (2006): GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. Review Article. *International Journal of Geographical Information Science*, 20: 703-726.
- Mena Frau C., Gajardo Valenzuela J. y Ormazábal Rojas Y. (2006): Modelación espacial mediante geomática y Evaluación Multicriterio para la ordenación territorial. *Revista de la Facultad de Ingeniería, Universidad de Tarapacá*, 14:81-89.
- Molero Melgarejo E., Grindlay Moreno A.L. y Asencio Rodríguez J.J. (2007): Escenarios de aptitud y modelización cartográfica del crecimiento urbano mediante técnicas de evaluación Multicriterio. *Geofocus*, 7:120-147.
- Plata Rocha W.; Gómez Delgado M. y Bosque Sendra J. (2010): Desarrollo de modelos de crecimiento urbano óptimo para la Comunidad de Madrid aplicando Métodos de Evaluación Multicriterio y Sistemas de Información Geográfica. *GeoFocus*, 10 (en prensa).
- Saaty, T.L. (1980): *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill, New York, pp. 20-25.

Zipperer W.C., Wu J., Pouyat R.V. y Pickett S.T.A. (2000): The application of ecological principles to urban and urbanizing landscapes. *Ecological Applications*, 10: 685-688.