

Geografía y Sistemas de Información Geográfica (GEOSIG). Revista digital del Programa de Docencia e Investigación en Sistemas de Información Geográfica (PRODISIG). Universidad Nacional de Luján, Argentina.

<http://www.revistageosig.wixsite.com/geosig> (ISSN 1852-8031)

Luján, Año 13, Número 19, 2021, Sección I: Artículos. pp. 1-17

ANÁLISIS TERRITORIAL Y DE EXPANSIÓN URBANA APLICANDO ÍNDICES DE CONSTRUCCIÓN

Fabio A. Montealegre Medina¹ – Fernanda J. Gaspari² – Santiago Perdomo³

¹ Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires

² Universidad Nacional de La Plata

³ Centro de Investigación y Transferencia del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires

fgaspari@agro.unlp.edu.ar

RESUMEN

El crecimiento urbano, el mal manejo del suelo de cultivo y los recursos hídricos son temas de interés para la comunidad social y científica. Por ello, se utilizan los índices de diferencia normalizada (NDI) en la teledetección que analizan y clasifican los tipos de cobertura y uso del suelo. El objetivo de este trabajo fue aplicar estos índices para zonificar espacial y temporalmente la expansión urbana de la ciudad de Pergamino, Argentina. El procesamiento de datos satelitales multiespectrales de Landsat 5, 7 y 8 con un sistema de información geográfica, permitió abordar y evaluar los Índices de diferenciación normalizada de construcciones (NDBI) y el de vegetación (NDVI) en diferentes escenas temporales entre 1990 y 2020. Con ellos, se definió el índice de construcciones (BU) que permitió zonificar el territorio para establecer la expansión urbana en el tiempo y en el espacio. Aplicando legislación vigente de Ordenamiento territorial y uso del suelo, se delimitaron zonas de uso, las cuales fueron procesadas en forma conjunta con los índices mencionados, para definir el avance de cada uso sobre el límite urbano proyectado por la ley. Se definió satisfactoriamente, la magnitud y forma de la expansión urbana de la ciudad durante los últimos 40 años.

Palabras clave: Expansión urbana, Índices espectrales, Teledetección.

ABSTRACT

Urban growth, poor management of cultivated soil and water resources are topics of interest to the social and scientific community. Therefore, the normalized difference indices (NDI) are used in remote sensing, which analyze and classify the types of land cover and use. The objective of this work was to apply these indices to spatially and

temporarily zonify the urban expansion of the city of Pergamino, Argentina. The processing of multispectral satellite data from Landsat 5, 7 and 8 with a geographic information system, allowed to approach and evaluate the Normalization Differentiation Indices of buildings (NDBI) and the vegetation indices (NDVI) in different temporal scenes between 1990 and 2020. Then, the construction index (BU) was defined to zone the territory and establish urban expansion in time and space. Applying current legislation on land use different areas were delimited, which were processed together with the aforementioned indices, to define the progress of each use over the urban limit projected by law. The magnitude and form of the urban expansion of the city during the last 40 years was satisfactorily defined.

Keywords: Urban expansion, Spectral indices, Remote sensing.

INTRODUCCION

Los cambios de uso y cobertura del suelo presentan una compleja relación con la dinámica hídrica en una cuenca hidrográfica, ya que influye en la intercepción de la lluvia, retardo de la escorrentía y aumento de la infiltración, regulando de este modo el rendimiento hídrico de la cuenca y evitando crecientes e inundaciones (Mármol, 2006), causando impactos tanto en el comportamiento hidráulico como hidrológico (Díaz Gómez y Gaspari, 2017). Estos cambios son reconocidos como una de las principales causas de deterioro ambiental, con una influencia muy importante en la dinámica hídrica superficial y en el uso de los recursos. En este contexto, la cuenca hidrográfica es la unidad territorial natural de tratamiento integrado y ámbito para la planificación y gestión del desarrollo sustentable, pues abarca todo el complejo biogeomórfico económico y de relaciones sociales como unidad de planificación y gestión (Gaspari *et al.*, 2009; Senisterra *et al.*, 2014).

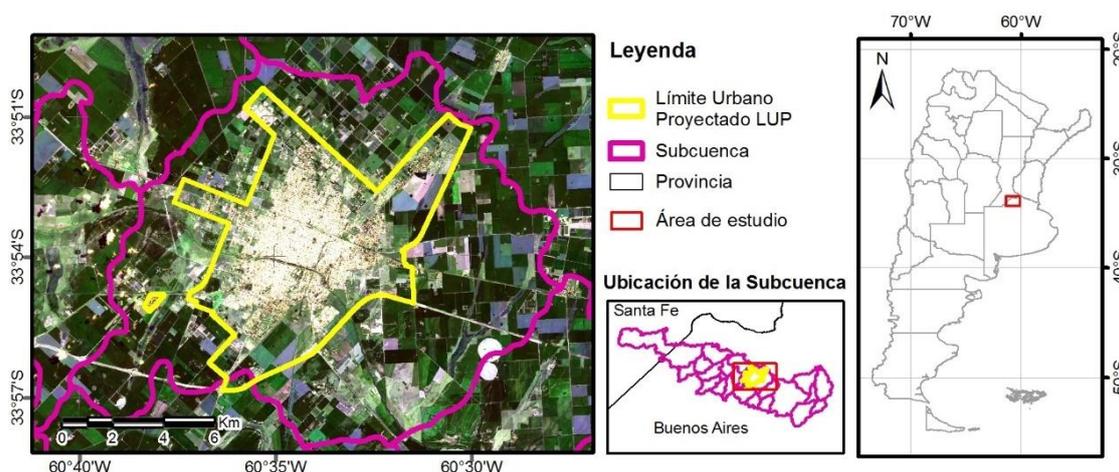
El uso de modelos de proyección cartográfica del cambio en el uso del suelo es relativamente confiable, debido a la eficacia y exactitud espacial que le otorga el uso de bases de datos geográficos, integrados a un sistema de información geográfica (SIG) (Sandoval y Oyarzun, 2004; Senisterra *et al.*, 2014), ya que proporcionan una perspectiva dinámica de la información que permite tomar decisiones tendientes al ordenamiento territorial. Estos modelos se han transformado en una poderosa herramienta de análisis espacial que permite: explorar los mecanismos que fuerzan los cambios de uso del suelo y las variables sociales, económicas y espaciales que los ocasionan; proyectar los potenciales impactos ambientales y socioeconómicos derivados de los cambios en el uso del suelo, y evaluar la influencia de alternativas políticas y regímenes de manejo sobre los patrones de desarrollo y uso del suelo (Aguayo *et al.*, 2009; Senisterra *et al.*, 2014). Utilizan parámetros simples, que incluyen, por ejemplo, la extensión y desarrollo de áreas urbanas, expansión de la frontera agrícola, vías de transporte, las condiciones topográficas, existencia de áreas protegidas, zonas de recarga de acuíferos y de drenaje. Esta información se puede incorporar en un mismo mapa, el cual permite visualizar patrones, relaciones y tendencias de los cambios espacio - temporales (Senisterra *et al.*, 2014) del territorio.

En el norte de la Provincia de Buenos Aires, Argentina, se encuentra la subcuenca Arroyo Pergamino, objeto del presente estudio, que integra la cuenca del Río Arrecifes.

Esta última abarca 973.088 hectáreas de las tierras más fértiles del país. El 90% de la superficie está ocupada por suelos de aptitud agrícola, en los que se producen entre el 6 y 10% de la producción nacional de trigo, maíz, soja y girasol. Los rendimientos promedios de estos cultivos superan sistemáticamente a los promedios nacionales (Díaz y Irurtia, 1992). Desde principios de la década de 1980 se ha producido una expansión del proceso de agriculturización de la cuenca. La implementación del cultivo de soja y su difusión, la disponibilidad de nuevas tecnologías de producción agrícola y un régimen de lluvias y calidad de sitio más favorable, impulsó dicho proceso. Esta aparición de sistemas de producción basados en la agricultura permanente comienza a acelerar los procesos de degradación y de erosión hídrica superficial de los suelos (Díaz y Irurtia, 1992; Vicente y Gaspari, 2004). Los procesos degradativos también inciden en la sociedad que integra la cuenca, debido a que los pequeños productores inician la migración hacia centros urbanos.

Como epicentro de la subcuenca del Arroyo Pergamino, se encuentra la microcuenca 16 que abarca 19.214 ha (Figura 1), que ubica a la ciudad principal del Partido de Pergamino ($33^{\circ} 54'S$, $60^{\circ} 35'W$), con una población de 69.000 hab en 1980, 79.240 hab. en 1990, 85.490 hab. en 2000, 94.200 habitantes en el año 2015, con una tasa de crecimiento en el periodo 2011-2015 de 0,46% anual, siendo la población calculada en 2020 de 96.369, según datos de censos del Instituto Nacional de Estadística y Censos de la República Argentina¹. Este crecimiento demográfico generó un avance urbano, acompañado con un gran desarrollo de infraestructura (edilicio, sanitaria y vial) en los últimos 30 años, ocupando áreas sub-urbanas, tendiendo a una alta densidad de pequeñas explotaciones agropecuarias, conformando un cordón que rodea la ciudad. Esta situación de superposición de usos que refleja un cambio de dinámica territorial conformando el disparador del presente trabajo: realizar un análisis del desarrollo urbanístico-rural.

Figura 1. Ubicación del área de estudio.



Fuente: Imagen pancromática de Landsat 8 con fecha 26/02/2020.

¹ <https://www.indec.gob.ar/>

El objetivo de este trabajo fue aplicar índices normalizados de construcción para zonificar espacial y temporalmente la expansión urbana de la ciudad de Pergamino, mediante el análisis territorial de la dispersión y distribución de construcciones/edificaciones con un Sistema de Información Geográfica (SIG).

MATERIALES Y METODOS

Para este estudio se realizó un análisis espacio temporal de uso de suelo con SIG, que abarcó una ventana de 30 años, desde 1990 y la actualidad (año 2020), considerando a los decenios como escenarios de estudio.

El criterio técnico para la preselección de la fecha óptima de coincidencia espacio-temporal de las imágenes satelitales utilizadas, fue el análisis de los datos de cobertura vegetal a través del índice de vegetación normalizado (NDVI), aplicando la herramienta web SATVeg, que produce el Sistema de Análisis de Vegetación Temporal desarrollada por Embrapa Informática Agropecuária² (Brasil), cuyo objetivo fue observar los perfiles temporales de los índices vegetativos, que expresan las variaciones de la biomasa vegetal en la superficie terrestre a lo largo del tiempo, ofreciendo apoyo a las actividades de monitoreo agrícola y ambiental.

Se consideraron cuatro zonas de uso del suelo: urbana, de esparcimiento/recreación, complementaria (suburbana) y rural, que fueron los controles de campo para definir el NDVI. En cada zona se tomaron 30 puntos de muestreo y control de cobertura. Posteriormente, por la aplicación del filtro Savitzky-Golay se realizó el suavizado de datos, ajustando un polinomio con al menos $k+1$ puntos equidistantes para determinar el nuevo valor de cada punto. Este filtro de suavizado en SATVeg, está basado en una ventana en movimiento, que utiliza el ajuste lineal de mínimos cuadrados mediante ecuaciones de regresión polinómicas sucesivas (Savitzky & Golay, 1964)³. Este filtro se aplica en teledetección cuando se trabaja con firmas espectrales y se suele utilizar para conservar las características de la distribución inicial, los máximos y mínimos relativos y el ancho entre picos, que normalmente desaparecen con otras técnicas de promediado (como la media desplazada).

En la microcuenca 16 en estudio, la aplicación de este filtro permitió definir las fechas óptimas para la descarga de las imágenes satelitales y con ellas implementar el método de zonificación espacio-temporal de los cambios de cobertura y uso del suelo y avance de la zona con construcciones. Una vez definidas las fechas, se descargaron las imágenes satelitales de la web del Servicio Geológico de Estados Unidos (U.S. Geological Survey) (<http://earthexplorer.usgs.gov>), por medio del sistema de información geográfica del programa QGIS 3.4. La resolución espacial de las imágenes Landsat 5 TM fue de 30 metros x 30 metros por píxel, utilizada para el análisis en los años 1990 y 2010; la Landsat 7 para 2000, y en 2020 una Landsat 8, todas con el Path/Row 226/084, sin nubes y limpias.

² <https://www.satveg.cnptia.embrapa.br/satveg/login.html>

³ <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ac60214a047>

La evaluación y modelización de la tendencia de cambio espacio – temporal del avance de la urbanización y cambio del uso del suelo en la ciudad de Pergamino se realizó en una segunda etapa de procesamiento, por medio de corrección atmosférica TOA con QGis 3.4 de las imágenes satelitales descargadas, para las cuatro fechas definidas como escenas temporales, en proyección con coordenadas planas Posgar 2007, Zona 5.

A partir de éstas imágenes se definió una miniescena flotante, escena buffer, que contempló como límite a un polígono del área urbana de la ciudad de Pergamino según el IDE Pergamino⁴ (*Infraestructura de Datos Espaciales del Municipio de Pergamino, gestionado por la Dirección de Sistemas de Información Georreferenciada*), disponible en la capa temática denominada límite urbano proyectado (LUP) sobre el catastro, y de áreas de uso del suelo de urBASig⁵ (*Visualizador web desarrollado por el Departamento urBASig, dependiente de la Dirección Provincial de Ordenamiento Urbano y Territorial de la Provincia de Buenos Aires, Argentina*) que clasifica el uso del suelo según Ley 8912/77, Artículos 5, 6 y 7.

El mapeo automatizado de áreas urbanas construidas se realizó aplicando la metodología de Zha, Gao y Ni (2003) (Bhatti & Tripathi, 2014; Goñi *et al.*, 2016) quienes propusieron el índice NDBI (*Normalized Difference Built-up Index*) y el BU (*Build-up Index*), a través del análisis de la respuesta espectral de áreas acumuladas en diferentes bandas de imágenes satelitales Landsat.

La metodología consta de tres cálculos aritméticos (Zha, Gao y Ni, 2003), aplicando rangos de las bandas R roja (banda 4), IR infrarroja (banda 3) y IRC infrarroja cercano (banda 5). Las etapas fueron:

Índice de vegetación de diferencia normalizada continua (NDVI) (*Normalized Difference Vegetation Index*). También denominado índice verde, permite visualizar las áreas con mayor cobertura vegetal (Ecuación 1) (Chuvieco, 2007; Bhatti *et al.*, 2014).

$$NDVI = \frac{(Banda\ IR) - (Banda\ R)}{(Banda\ IR) + (Banda\ R)} \quad \text{Ecuación 1}$$

Índice de área construida estandarizado (NDBI) (*Normalized Difference Built-up Index*). Basándose en la alta reflectancia de las áreas acumuladas en el rango de longitud de onda de 1,55 - 1,75 μm (banda TM 5) y su baja reflectancia en el rango de longitud de onda de 0,76 - 0,90 μm (banda TM 4), se calculó el NDBI, que muestra la proporción de construcción de cada píxel (Zha *et al.*, 2003; Bhatti *et al.*, 2014) (Ecuación 2).

$$NDBI = \frac{(Banda\ IRC) - (Banda\ IR)}{(Banda\ IRC) + (Banda\ IR)} \quad \text{Ecuación 2}$$

⁴ <https://ide.pergamino.gob.ar/sig/>

⁵ <http://www.urbasig.gob.gba.gob.ar/urbasisg/>

Índice de construcción (BU) (*Build-up Index*). Finalmente, las áreas urbanizadas se extrajeron aplicando el BU según la ecuación de He *et al.* (2010) (Ecuación 3) que representa el área construida que surge de la diferencia de los dos anteriores y muestra que a mayor índice de construcción menor índice de área verde (He *et al.*, 2010; Bhatti *et al.*, 2014). La imagen BU demuestra DN continuos desde áreas urbanas hasta rurales / desnudas.

$$BU = NDBI - NDVI$$

Ecuación 3

Esta metodología fue modificada y mejorada por He *et al.* (2010) que genera la secuencia de BU continuo. En la técnica original propuesta por Zha, Gao y Ni (2003) (Bhatti *et al.*, 2014), se produjo una imagen continua, BU, a través de este enfoque modificado en el que un valor más alto de un píxel indicaba una mayor posibilidad de que indicara una construcción. Un enfoque sistemático basado en la idea de la técnica DFPS de Chen *et al.* (2003) se implementó para determinar el valor umbral óptimo (He *et al.*, 2010). Posteriormente, la imagen BU de salida se segmentó en una imagen binaria (1 que muestra áreas construidas y 0 que muestra áreas no construidas) utilizando un valor umbral óptimo, definido para cada uno de los escenarios.

Tasa de cambio (P). El análisis final entre los escenarios temporales se basó en la aplicación de una tasa de cambio (Ecuación 4) que permitió definir las zonas de expansión según el uso del suelo, identificando su crecimiento y distribución espacial.

$$P = (100 / t2-t1) * \ln (S2 / S1)$$

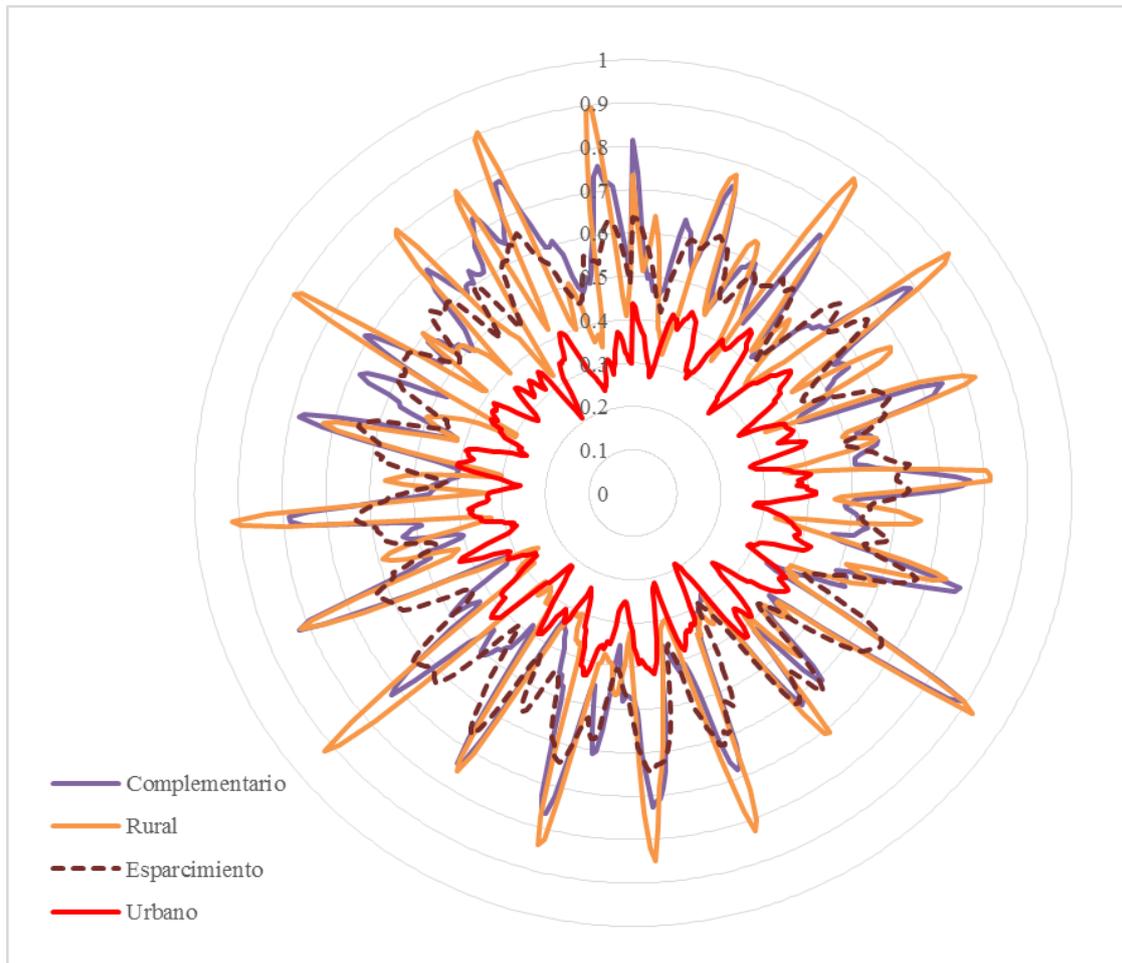
Ecuación 4

Donde S1 y S2 (ha) corresponden a la superficie en el tiempo t1 y t2, expresado en años, respectivamente, y P es la tasa de cambio anual (% / año) (Echeverría *et al.*, 2006). Esta matriz se construyó a partir de la superposición y álgebra de mapas (Senisterra *et al.*, 2014).

RESULTADOS

La identificación de fecha óptima fue definida por la interpretación de la Figura 2, que expresa la secuencia quincenal del NDVI entre 18/02/2000 y 24/05/2020, para cuatro las zonas de uso del suelo: urbana, de esparcimiento/recreación, complementaria y rural, que fueron los controles de campo.

Figura 1. Dinámica espacio-temporal del NDVI por uso del suelo, con aplicación del Filtro Savitzky-Golay.



Fuente: Elaboración propia.

La Figura 2 expresa el rango de valores, la amplitud y la tendencia temporal del NDVI en los cuatro usos del suelo, con 467 datos. La amplitud del NDVI en el período por uso del suelo se presenta en la Tabla 1. El análisis integrado con la Figura 2 permitió definir las fechas óptimas representativas de expresión del NDVI, para la adquisición de las imágenes satelitales por escenario.

Se estableció que, en todos los casos de uso del suelo, durante el trimestre diciembre / febrero, es un momento óptimo de diferenciación de valores de NDVI/uso, debido a que en estas fechas coincidió que el tipo de estacionalidad climática (estación seca) y donde la presencia de cobertura vegetal en crecimiento activo diferencia el nivel de radiación respecto a la zona edificada / construida.

Tabla 1. Amplitud del NDVI en el período estudiado.

	Urbano	Complementaria	Rural	Esparcimiento/recreación
Máximo	0,462	0,895	0,927	0,677
Mínimo	0,190	0,278	0,252	0,290

Fuente: Elaboración propia.

El NDVI de la Figura 2 para la urbanización ha disminuido en el período en 0,272 unidades su valor, indicando una tendencia negativa, que es expresada en la densificación de la construcción en esta zona en los últimos 30 años, en todo período y además se identificó que es la que posee la menor amplitud específica durante un ciclo anual (0,278) como se visualiza en el anillo rojo en el centro de la Figura 2.

En los usos rural y complementario se identificaron los mayores NDVI estacional, que también presentan la mayor amplitud, entre 0,674 y 0,616 respectivamente indicado con los anillos verde y amarillo. La tendencia se mantuvo durante todo el período, con picos altos en el verano y bajos en invierno (Figura 2).

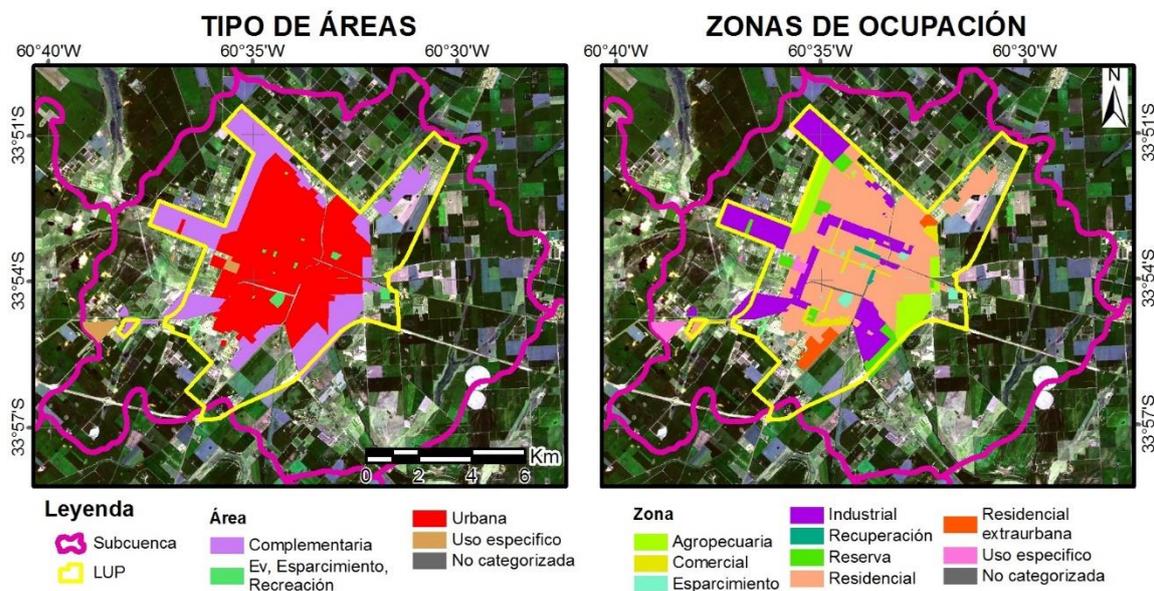
La zona de esparcimiento con uso recreativo presentó valores intermedios con una amplitud intraanual de 0,387, que se conservó durante todo el ciclo en estudio, como se muestra en el anillo marrón de la Figura 2.

Considerando que el área urbanizada se planteó dentro del límite urbano proyectado (LUP) de la IDE de Pergamino, el análisis de avance de las áreas construidas se aplicó sobre las Áreas Urbanas, Complementarias, de Esparcimiento y Rurales. El LUP según IDE Pergamino, rodea la ciudad y ocupa 6347,2 ha, y se extiende en un 33% de la microcuenca 16 del A° Pergamino. Con relación a la clasificación de los usos del suelo de urBASig se distribuyen dentro del LUP.

También, se aplicó la zonificación del uso del suelo de la web de urBASig, basado en la Ocupación, según usos del suelo de Pergamino.

En la Figura 3 se presenta la distribución de las cinco áreas en el LUP de Pergamino y las diez zonas de uso del suelo, que completan el límite urbano proyectado. Es importante mencionar que las zonas rurales externas al LUP, no cubren por completo las zonas construidas según urBASig.

Figura 3. LUP de Pergamino con áreas del LUP y zonas de ocupación por uso del suelo según Ley 8912/77.



Fuente: Elaboración propia.

La aplicación del índice BU que definió la zona construida y la no construida, estableció un crecimiento de la urbanización sobre el área rural, del 21%, 21,9%, 24,6% y 27,6% respectivamente por década desde 1990 hasta la actualidad.

La caracterización de cada zona uso urBASig se describe según:

1. Rural: áreas destinadas a emplazamientos de usos relacionados con la producción agropecuaria extensiva, forestal y otros.
2. Urbana: comprende dos subáreas, la urbanizada y la semi-urbanizada.
3. Complementaria: son zonas circundantes o adyacentes al área urbana, relacionadas funcionalmente.

Las áreas urbanas y las complementarias conforman los centros poblados y son partes integrantes de una unidad territorial LUP, y son las áreas objeto de estudio. En las distintas áreas se localizaron las zonas de usos específicos de acuerdo con la modalidad, tipo y características locales, y se definieron los usos: residencial urbana y extraurbana, comercial y administrativa, de producción agropecuaria, industrial, de esparcimiento ocioso y activo, de reserva, de recuperación y demás usos específicos, cuya descripción se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2. Descripción de zonas de uso del suelo según Ley 8912/77 para la localidad de Pergamino.

AREAS LUP	ZONAS	Descripción
COMPLEMENTARIA Sectores circundantes o adyacentes al área urbana, destinadas a reserva para ensanche de esta o de sus partes constitutiva, y a otros usos específicos.	AGROPECUARIA	Emplazamientos de usos relacionados con la producción agropecuaria extensiva, forestal y otros.
	COMERCIAL	Usos relacionados con la actividad gubernamental y terciaria, emplazada en el área urbana.
	INDUSTRIAL	Destinada a la localización de Industrias agrupadas. Al decidir su localización se considerarán sus efectos sobre el medio ambiente, sus conexiones con la red vial principal, provisión de electricidad, desagües industriales y agua potable.
	RESERVA	Sector delimitado debido a un interés especial orientado al bien común.
	RESIDENCIAL	Asentamientos humanos intensivos, de usos relacionados con la residencia permanente y sus compatibles, emplazadas en el área urbana.
	RESIDENCIAL EXTRAURBANA	Asentamientos no Intensivos de usos relacionados con la residencia no permanente, emplazada en pleno contacto con la naturaleza, en el área complementaria o en el área rural. Se incluyen los clubes de campo.
AV	ESPARCIMIENTO Y RECREACION	Destinada principalmente a la actividad recreativa ociosa o activa, con el equipamiento adecuado.
URBANA Destinada a asentamientos humanos intensivos, en la que se desarrollen usos vinculados con la residencia, las actividades terciarias y producción compatibles.	COMERCIAL	Usos relacionados con la actividad gubernamental y terciaria, emplazada en el área urbana.
	INDUSTRIAL	Destinada a la localización de Industrias agrupadas, considerando sus efectos sobre el medio ambiente, sus conexiones con la red vial principal, provisión de energía eléctrica, desagües industriales y agua potable.
	RECUPERACION	Zona en su estado actual, no es apta para usos urbanos, pero resulta recuperable mediante obras adecuadas,
	RESERVA	Sector delimitado debido a un interés especial orientado al bien común.
	RESIDENCIAL	Asentamientos humanos intensivos, de usos relacionados con la residencia permanente y sus compatibles, emplazadas en el área urbana.
UE	USO ESPECIFICO	Delimitada para usos del transporte (terrestre, fluvial y aéreo), de las comunicaciones, la producción o transmisión de energía, la defensa, la seguridad y otros usos específicos.

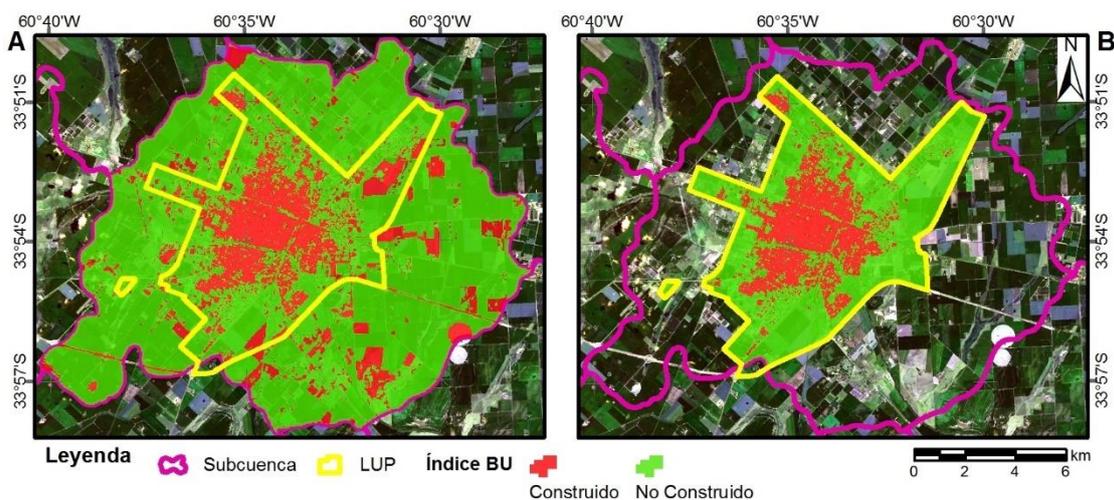
Fuente: urBASig. Adaptación propia.

Dentro del polígono LUP se aplicó el BU para cada área considerando un umbral para cada escenario de uso del suelo según el tipo de imagen utilizada. Este umbral fue homogéneo para imágenes de Landsat 5, en los años 1990 y 2010, y para Landsat 8, en 2020, con un valor negativo de -0,6; en cambio para el año 2000 (Landsat 7), el umbral fue de un valor negativo de -0,35.

Los resultados alcanzados en la zonificación del BU para los cuatro escenarios en la microcuenca 16, fueron procesados nuevamente por medio de una revisión y depuración visual detallada, debido a que la reflexión en la imagen satelital sobre el suelo rural desnudo interfería con la reflexión de las construcciones, particularmente sobre el NDVI, alterando los resultados del BU, como se muestra en la Figura 4 A (situación integrada). Posteriormente, al trabajar solo en el área LUP se ha descartado la zona entre el límite de la microcuenca 16 y este, como se indica en la Figura 4 B (situación exclusiva). Estos mapas indican la distribución del BU construido y no construido dentro del LUP, donde el suelo desnudo que incluye por error el área construida ha sido removido por identificación visual utilizando un índice que incluye áreas desnudas y tierras de cultivo descubiertas estacionalmente.

Los resultados de la evaluación de precisión muestran que los mapas generados permiten diferenciar las áreas con suelo desnudo, que se mezclan con áreas construidas debido a que su reflectancia se asemeja a los principales materiales de construcción, por aplicación del umbral de BU particular para cada escenario y cada tipo de satélite utilizado. Esto indica que los índices propuestos pueden utilizarse de manera confiable para diferenciar las tierras desnudas de otras clases de uso de la tierra.

Figura 4. Índice BU en la microcuenca 16 con el LUP de Pergamino. A) Situación integrada. B) Situación exclusiva.



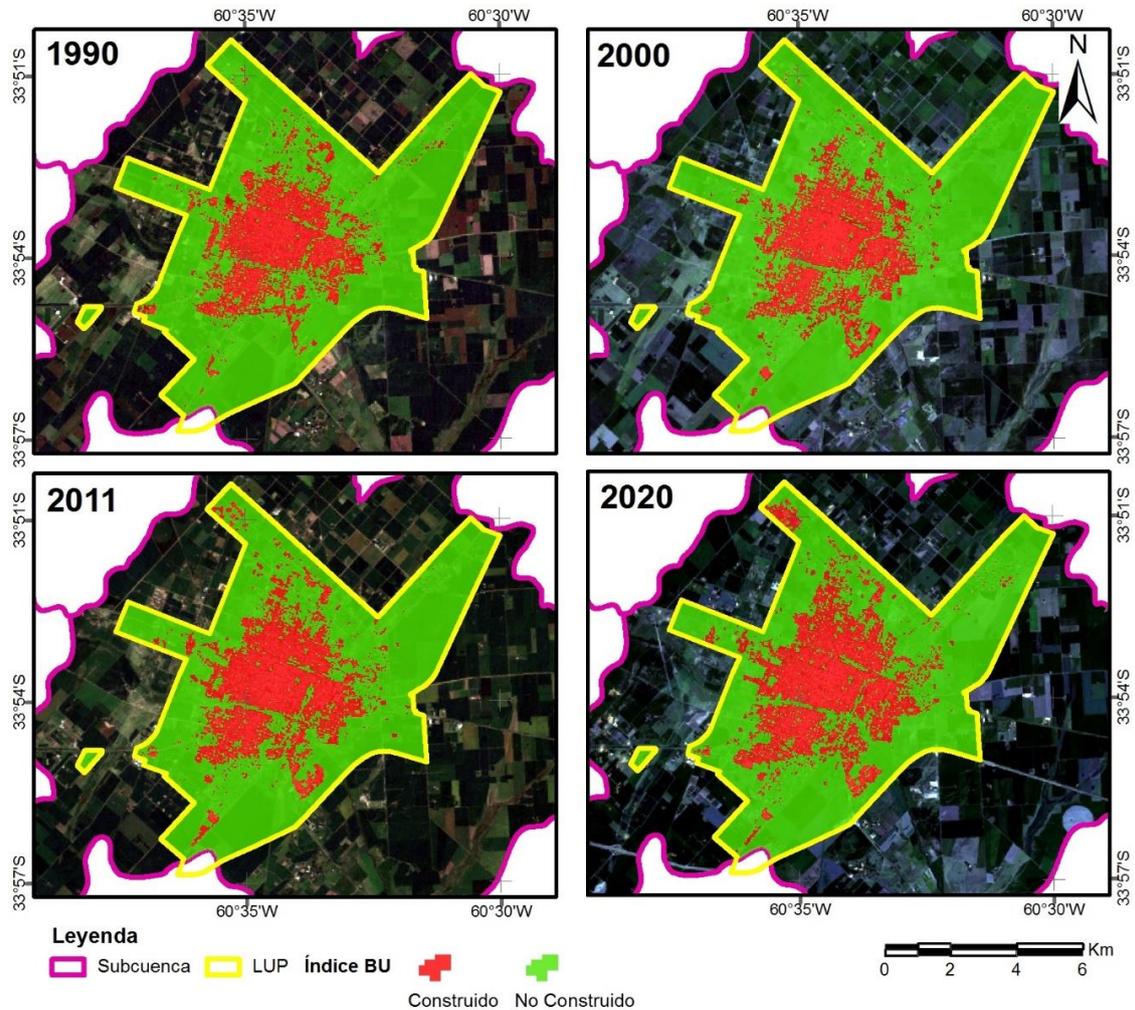
Fuente: Elaboración propia.

A partir de la definición de BU en los cuatro escenarios temporales en la situación exclusiva del LUP, se analizaron las 6347,20 ha.

Posteriormente, al aplicar la zonificación según Ley 8912/77 de urBASig, se definió que el área ocupada total en este caso es de 4355,13 ha, y está incluida dentro del LUP. En ésta se cuantificó la superficie de ocupación de áreas construidas y no construidas, para cada escenario, definiendo un avance sobre el área rural que disponía de 3064,35 ha en 1990 y un área urbana construida de 1290,78 ha es decir 29,64% de ocupación. Esta última creció a 31,28% al 2000; a 34,79% en 2010 y a 38,55 % en la actualidad, como se muestra en la Figura 5.

La zona más densamente edificada se encuentra en la ciudad de Pergamino y sus alrededores, zonas que se distribuyen en forma más aislada generando el contraste del BU. Este resultado confirma que el índice propuesto es capaz de delinear el suelo desnudo con un mayor valor de BU en comparación con otras clases, como las áreas urbanizadas.

Figura 5. Índice BU por escenario temporal en el LUP de Pergamino.

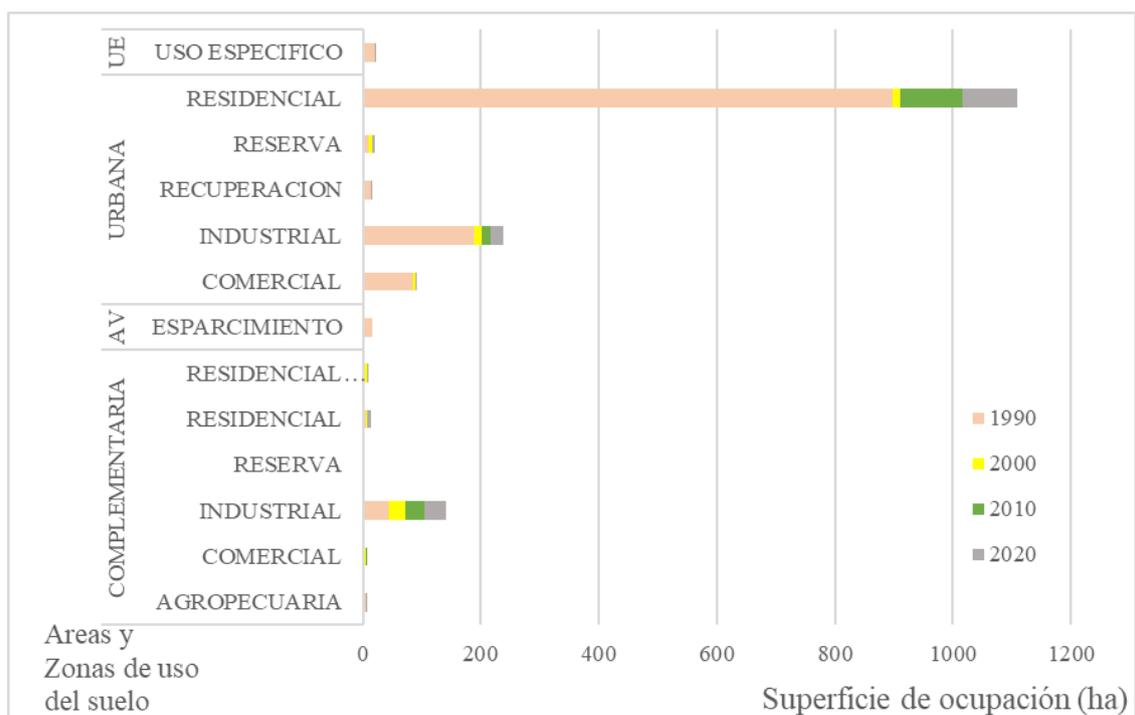


Fuente: Elaboración propia.

El detalle de la zonificación por clases de áreas y zonas de urBASig permitió establecer el avance particular de cada una y definir su distribución espacio temporal, como se presenta en la Figura 6. Esta nueva zonificación de BU se basó en que las imágenes resultantes de la aplicación del índice verde (NDVI) muestran mayor cobertura verde en áreas alejadas del centro de la ciudad, correspondiéndose a las zonas de uso complementario y esparcimiento/recreativas, que representan loteos con amplios espacios verdes y plantaciones de árboles y zonas con desarrollo agropecuario (hortícola). Esta situación fue un factor de confusión en la década pasada. El resultado de la obtención del índice NDBI muestra valores más altos en la zona céntrica de la ciudad y en el área circundante, pero manteniendo la zona urbana. El índice BU

muestra, al igual que el índice NDBI, valores más altos en la zona céntrica de la ciudad y en la de usos complementarios y de esparcimiento/recreativas resaltan las áreas en tonos claros (valores bajos) representando menor edificación en forma de zona buffer a la ciudad. El avance desde 1990 hasta la actualidad de la zona urbana propiamente dicha es el mayor registrado, por sobre todas las otras zonas de uso del suelo.

Figura 6. Superficie de ocupación del Índice BU construido por escenario temporal según la zonificación urBASig de Pergamino. Período 1990 - 2020.

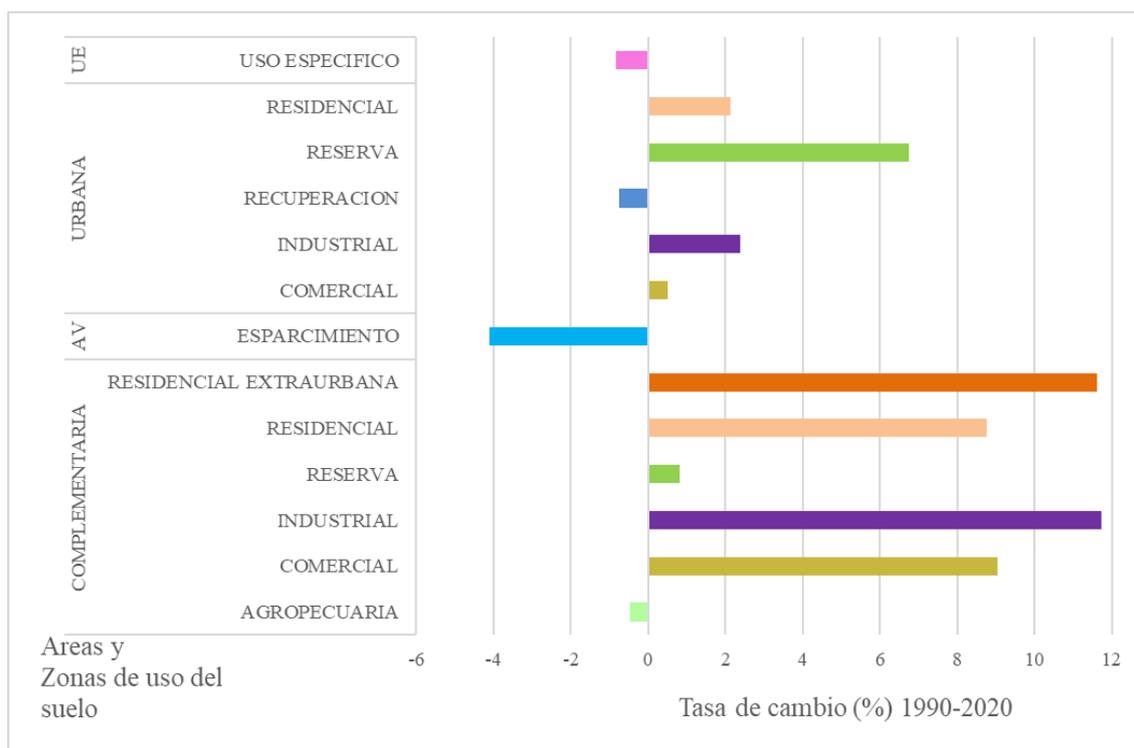


Fuente: Elaboración propia.

Las tasas de cambio por uso del suelo para todo el período se presentan en la Figura 7, en concordancia con los colores expresados por la zonificación de la Figura 3. En el área complementaria, las zonas que mayor tasa de cambio presentaron fueron la zona industrial con un valor del 11,72% (+96,64 ha) y residencial extraurbana con un 11,62% (+6,36 ha), siendo un 9,04% en el área comercial (+4,17 ha) y el 8,78% en el área residencial (+8,43ha). Las zonas agropecuarias y de reserva no han tenido grandes cambios. El área de esparcimiento se ha reducido un 4% (-5,28 ha) y la de uso específico un 0,8% (-1,64 ha). El área urbana de reserva se ha construido un 6,76%, y las zonas industrial y residencia han crecido un 2,37 (+50,53 ha) y 2,21% respectivamente, creciendo en 211,98 ha esta última. La zona comercial urbana se desarrolló en un 0,5% (+4,53 ha) y por último la zona urbana de recuperación ha disminuido un 0,74% en el período, indicado que hubo cambios mínimos en esta zona (-0,92 ha).

Si se analiza en forma particular cada decenio, los grandes cambios en el área complementaria se sucedieron en la década del 2000, con el incremento de áreas construidas en las zonas comercial e industrial. Las zonas urbanas se han desarrollado y estabilizado en el último decenio.

Figura 7. Tasa de cambio del Índice BU construido según la zonificación urBASig de Pergamino. Período 1990-2020.



Fuente: Elaboración propia.

Es importante mencionar que debido a la resolución espacial de las imágenes Landsat (30 metros), la zonificación del BU no presenta una alta precisión, generando error en áreas alrededor de construcciones o suelo desnudo que no están edificadas. Como menciona Lwin y Murayama (2013) la resolución espacial es otro factor importante en la extracción y mapeo de áreas urbanizadas.

En zonas poco edificadas o cercanas a zonas agropecuarias o de esparcimiento, especialmente en áreas con configuración rural, se gana más área de índice de construcción, gracias a la mayor cantidad de reflectancia que origina.

El caso contrario, son zonas construidas con configuración urbana, como es el caso de las construcciones localizadas al noroeste de la zona de estudio, cercanas a la ruta 188, donde poseen una gran cobertura arbórea a los alrededores de las construcciones o áreas denominados barrios cerrados, country o clubes de campo, genera una reflectancia promedio del pixel de la imagen Landsat que no es suficiente para ser catalogado como una área de construcción pura de BU, reduciendo el área total de zonas construida, en contraste con lo encontrado en la realidad.

Particularmente, el BU no permite separar completamente, en forma automática, a la tierra descubierta de las áreas urbanizadas debido a la semejanza entre las características espectrales de estos dos tipos de cobertura terrestre (Lwin & Murayama, 2013; Bhatti *et al.*, 2014). Sin embargo, debido al uso de umbrales para cada escenario permitió la segregación objetiva.

No obstante, los resultados obtenidos con el índice son bastante acertados en LUP y/o ámbito urbano de la ciudad de Pergamino donde se localiza una mayor aglomeración de construcciones, lo cual contribuye a analizar con mayor proximidad el límite urbano real y su expansión periférica alrededor en las décadas analizadas.

En coincidencia con Sedevich *et al.* (2019), las inconsistencias entre lo que se quiere en el desarrollo de un espacio y las intervenciones territoriales que surgen en las gestiones de gobiernos son impactos que no se advierte a corto plazo, sino que son consecuencias que se sienten en el mediano y largo plazo, es por eso que tanto se insiste desde lo técnico y científico de la necesidad de planificar para organizar el territorio. Estos planes deben contemplar la integralidad que requiere la complejidad de las interacciones que se producen en el espacio geográfico para que la ocupación tienda a un desarrollo sustentable.

CONSIDERACIONES FINALES

Las imágenes satelitales Landsat brindan una amplia variedad de información, en diversos rangos del espectro (resolución radiométrica), las cuales permiten identificar áreas o coberturas y usos del suelo. La combinación de dichas bandas radiométricas genera índices específicos resaltando las características espaciales de los objetos terrestres según su reflectancia. Un caso conocido es el índice de construcción (NDBI) para la identificación de edificaciones o zonas utilizando la banda de infrarrojo y el infrarrojo cercano. No obstante, este índice también realza los suelos desnudos, poseen una reflectancia similar a las construcciones. Este índice se aplicó en la ciudad de Pergamino, el cual fue integrado con el índice de vegetación normalizado NDVI para separar áreas verdes de vegetación rural de las zonas construidas, para descartar posibles zonas que suelo desnudo que generen ruido al índice de construcción. Este último, además permitió definir la fecha óptima para la toma de información satelital, por medio de la implementación y análisis del visor *on line* SATVEG (Sistema de Análisis de Vegetación Temporal), desarrollada por Embrapa Informática Agropecuária (Brasil), definiendo el mes de febrero como ventana temporal para cada escenario.

A partir de estos índices se logra el índice mejorado de construcción BU, que con la integración con patrones de zonificación según la Ley 8912/77 de ordenamiento territorial, sobre un límite urbano proyectado, se definieron las zonas construidas en 4 escenarios temporales entre los decenios de 1990 a 2020. Esta zonificación permitió enfocarse principalmente en áreas de expansión urbana, mejorando los límites de áreas construidas definidas correctamente por el índice.

Debido a la resolución espacial de las imágenes Landsat (30 metros), las áreas obtenidas con el BU expresan baja precisión espacial, abarcando áreas alrededor de construcciones o suelo desnudo que no están edificadas. En zonas donde hay pocas edificaciones o cercanas a zonas agropecuarias, se genera un error de identificación BU debido a la mayor reflectancia que origina suelo desnudo o con poca cobertura vegetal (como parcelas o campos de cultivados en proceso de inicio de sembrado o finalización ciclo). El caso contrario, son zonas construidas con configuración urbana, como es el caso de las construcciones localizadas al noroeste de la zona de estudio donde se

distribuyen los barrios cerrados o clubes de campo, donde poseen una gran cobertura arbórea a los alrededores de las construcciones que genera que la reflectancia promedio del pixel de la imagen Landsat no sea suficiente para ser catalogado como una área de construcción pura, reduciendo así el área total de zonas construida en contraste con lo encontrado en la realidad. No obstante, los resultados obtenidos con el BU son bastante acertados en los límites o periferias de la ciudad de Pergamino donde se localiza una mayor aglomeración de construcciones, lo cual contribuye a analizar con mayor proximidad el límite urbano real y su expansión periférica alrededor en las décadas analizadas.

BIBLIOGRAFÍA

Aguayo, M.; Pauchard, A.; Azócar, G. & O. Parra. (2009). Cambio del uso del suelo en el centro sur de Chile a fines del siglo XX. Entendiendo la dinámica espacial y temporal del paisaje. *Revista Chilena de Historia Natural* 82: 361-374 p.

Bhatti, S.S. & Tripathi, N.K. (2014). Built-up area extraction using Landsat 8 OLI imagery. *GIScience & Remote Sensing*. 51(4) Pages 445-467. <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15481603.2014.939539>

Chuvieco, E. (2007). *Teledetección ambiental. La observación de la tierra desde el espacio*. Editorial Ariel Ciencia. España.

Díaz Gómez, A.R. & Gaspari, F.J. (2017). Modelización geoespacial del escurrimiento superficial en cuencas vulnerables al cambio de uso del suelo. *Revista CINEA*. Volumen 5 N° 1: 29-47. ISSN: 2347-0941. Con referato. <http://ojs.fch.unicen.edu.ar/index.php/estudios-ambientales/article/view/143/122>

Gaspari, F.J.; Senisterra, G.E.; Delgado, M.I.; Rodríguez Vagaría, A.; S. Besteiro. (2009). *Manual de Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas*. Primera Edición. La Plata. 321 pp.

Goñi, L; Gregorini, G.; & Aldalur, B. (2016). Análisis del crecimiento edilicio mediante imágenes Landsat en la localidad de Monte Hermoso, Argentina. *Actas del 2º Encuentro Nacional de investigadores de Agrimensura*. Santa Fe. Argentina. 10 p

He, C.; Shi, P.; Xie, D. & Zhao, Y. (2010). Improving the normalized difference built-up index to map urban built-up areas using a semiautomatic segmentation approach. *Remote Sensing Letters*, v.1, Issue 4, pp. 213-221.

Irurtia, C.B. & Maccarini, G.D. (1992). *La erosión del suelo en la República Argentina. In: Taller sobre la Utilización de un Sistema de Información Geográfica (SIG) en la Evaluación de la Erosión Actual de Suelos y la Predicción del Riesgo de Erosión Potencial*. Santiago, Chile. pág. 65-77.

- Lwin, K.K. & Murayama, Y. (2013). Evaluation of land cover classification based on multispectral versus pansharpened landsat ETM+ imagery. *GIScience & Remote Sensing* 50, no. 4: 458-472.
- Mármol, L. A. (2006). *Introducción al Manejo de Cuencas Hidrográficas y Corrección de Torrentes*. Universidad Nacional de Salta. Facultad de Ciencias Naturales. Ingeniería en Recursos Naturales y Medio Ambiente. 287 p.
- Sandoval, V & Oyarzun, V. (2004). Modelamiento y prognosis espacial del cambio en el uso del suelo. *Revista Quebracho* 11: 9-21.
- Savitzky, A. & Golay, M.J.E. (1964). Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Analytical Chemistry*. 36. p. 1627-1639.
- Sedevich, A.; Langer, K.; Becerra, C.; Femenia, F.; Mustosi, N. (2019). Avance urbano en el cinturón verde de Guaymallén. *Geografía y Sistemas de Información Geográfica (GeoSIG)*. 11(13) Sección I: 138-166
- Senisterra, G.E.; Gaspari, F.J. & Mazzucchelli, M.G. (2014). Análisis espacio temporal del cambio de uso del suelo en una cuenca serrana de la provincia de Buenos Aires, Argentina. *Séptimo Congreso de la Ciencia Cartográfica "Logros y desafíos de la Cartografía"*. 19 y el 21 de Noviembre de 2014, Buenos Aires. Argentina.
- Vicente R.A. & Gaspari, F.J. (2004). *USLE*: Estimación de pérdida de suelo por erosión hídrica en la Subcuenca del Arroyo Pergamino. *Revista UNLAR Ciencia de la Universidad Nacional de La Rioja*. Argentina. N° 2 Año 5. Pág. 2 - 7. ISSN 1515-5005.
- Zha, Y.; Gao, J. & Ni, S. (2003). Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. *International Journal of Remote Sensing* 24, no. 3: 583-594.

© Fabio A. Montealegre Medina, Fernanda J. Gaspari y Santiago Perdomo.

Montealegre Medina, F. A.; Gaspari, F. J.; Perdomo, S. (2021). Análisis Territorial y de Expansión Urbana Aplicando Índices de Construcción. ***Geografía y Sistemas de Información Geográfica (GeoSIG)***. 13(19) Sección I:1-17

On-line: www.revistageosig.wixsite.com/geosig

Recibido: 29 de julio de 2020

Aceptado: 20 de diciembre de 2020