

ARTÍCULO

IDENTIFICACIÓN DE PROCESOS DE EROSIÓN HÍDRICA POR MEDIO DE ANÁLISIS DE CAMBIOS DE USOS Y COBERTURA DEL SUELO EN UNA CUENCA SERRANA

Identification of water erosion processes through analysis of land use and land cover changes in a mountain watershed

Beron de la Puente, F.J. * ¹ , Gil, V. ¹  & Revollo, N. ² 

RESUMEN: Los cambios de uso y cobertura del suelo (LULC) afecta en gran medida a los ecosistemas implicando una modificación de la cobertura natural y provocando consecuencias sobre las características de un suelo, los procesos hídricos y geomorfológicos. Debido a esto, el objetivo consiste en determinar el cambio LULC de la cuenca del arroyo El Negro para los años 1985 y 2023 a partir la clasificación supervisada por medio de imágenes satelitales, analizar los cambios e identificar sectores que evidencian procesos de erosión hídrica. De esta forma, el mayor cambio LULC lo presenta la clase vegetación que se redujo su superficie de 55 km² (1985) a 13 km² (2023) y mientras que la cobertura agrícola se incrementó, pasando de 65 Km² (1985) a casi los 100 km² (2023) representando casi el 50% de la superficie total. Sumado a este cambio, se pudo identificar sectores donde se desarrollan diferentes procesos de erosión hídrica dentro de campos de producción agrícola (principalmente en zonas de piedemonte) y propias de la evolución de la red de drenaje.

1 Depto. de Geografía y Turismo, Universidad Nacional del Sur, Argentina. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

2 Departamento de Ingeniería Eléctrica y de Computadoras, Universidad Nacional del Sur, Argentina. Instituto de Ciencias e Ingeniería de la Computación - ICIC (CONICET/UNS), Argentina. E-mail: nrevollo@criba.edu.ar

* Autor de correspondencia. Beron de la Puente, F.J. Correo electrónico: fjberon@criba.edu.ar

Como citar este artículo: Beron de la Puente, F.J., Gil, V. & Revollo, N. (2024). Identificación de procesos de erosión hídrica por medio de análisis de cambios de usos y cobertura del suelo en una cuenca serrana. Revista FACENA 34(2), 65-81. Doi: <https://doi.org/10.30972/fac.3427733>

Recibido/Received: 17/03/2024. Revisión: 20/03/2024. Aceptado/Accepted: 30/08/2024.

Editor asociado: Félix Ignacio Contreras.

Publicado en línea: 15/11/2024. ISSN 1851-507X en línea.

PALABRAS CLAVE: Cambios de cobertura, Erosión hídrica, Geotecnologías, Google earth engine, Random forest.

ABSTRACT: Land use and land cover change (LULC) has a significant impact on ecosystems by modifying the natural cover, which has consequences on soil characteristics, hydrological and geomorphological processes. Therefore, the objective is to determine the LULC change of the El Negro River basin for the years 1985 and 2023 through classification supervised with the use of satellite images, analysing the changes and identifying sectors that show evidence of water erosion processes. Thus, the greatest change in LULC is in the vegetation class, which reduced its area from 55 km² (1985) to 13 km² (2023), while the agricultural cover increased from 65 km² (1985) to almost 100 km² (2023), representing almost 50% of the total area. In addition to this change, it has been possible to identify sectors where different processes of water erosion are developing within the agricultural production fields (mainly in the Piedmont areas) and in the development of the drainage network.

KEYWORDS: Land cover change, Water erosion, Geotechnologies, Google earth engine, Random forest.

INTRODUCCIÓN

Los cambios de uso y cobertura del suelo (LULC) son causados principalmente por la acción antropogénica y esto ocurre a nivel mundial. Así, afecta en gran medida a los ecosistemas implicando una modificación de la cobertura natural y provocando consecuencias sobre las características de un suelo, los procesos hídricos y geomorfológicos, la biodiversidad, entre otros (Van Lynden y Oldeman, 1997; Gallegos Reina y Perles Roselló, 2019). En el caso de la Argentina y en particular en el área de estudio durante las últimas décadas, los pastizales pampeanos han sido reemplazados por agroecosistemas debido a la capacidad productiva de los suelos. Este cambio de la cobertura natural tiene un impacto negativo en la biodiversidad de los sistemas naturales y en la actualidad muestran un alto grado de degradación y un bajo grado de conservación (Vázquez y Zulaica, 2011; Sequeira *et al.*, 2015; Sacido *et al.*, 2020).

Por consiguiente, el análisis de estos cambios de suelos tiene cada vez más relevancia en investigaciones ambientales debido a que la pérdida de la cobertura vegetal puede degradar un ecosistema y/o perder el suelo productivo por erosión hídrica (Bocco *et al.*, 2001; Najera González *et al.*, 2016; Abbondanza, 2019; Milazzo *et al.*, 2022). En este contexto, la disminución de cobertura vegetal y su conversión a otros usos como por ejemplo el uso agrícola, pueden facilitar la degradación o compactación del suelo, provocando una reducción de la capacidad de infiltración y una disminución de la recarga de las masas de agua (Ellison *et al.*, 2017).

En esta línea de investigación, podemos encontrar también estudios que analizan la erosión del suelo debido al cambio LULC y modificaciones de la red de drenaje de una cuenca hídrica (Nyssen *et al.*, 2002) entre otros. Por ello, poder realizar evaluaciones de los cambios es una herramienta indispensable, que permite determinar y distinguir espacialmente como se dieron las transiciones del paisaje y cuantificar como cada una de las coberturas del suelo se expandieron o redujeron en su superficie (Santana y Pineda, 2011). Por este motivo, el presente trabajo consiste en determinar el cambio LULC de la cuenca del arroyo El Negro para los años 1985 y 2023 a partir la clasificación supervisada por medio de imágenes satelitales y analizar los cambios e identificar sectores que evidencian procesos de erosión hídrica.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio elegida es la cuenca del arroyo El Negro (CaEL) que forma parte de la cuenca alta del río Sauce Grande. La CaEL se desarrolla sobre los faldeos occidentales del cordón Las Tunas y Pillahuincó pertenecientes al Sistema de Ventania provincia de Buenos Aires, Argentina (Figura 1). Tiene una superficie de 200 km² aproximadamente, posee una elevación máxima de 756 y su punto más bajo es de 250 m s.n.m. teniendo así un desnivel de 499 m y una pendiente media de 10,73°. Históricamente, la agricultura ha sido la principal actividad económica de la región, esta se

desarrolla en el sector de la llanura interserrana y sobre el piedemonte serrano donde no existen afloramientos rocosos. En los últimos años, en la cuenca baja de la CaEL donde se encuentra la localidad de Villa la Arcadia (Figura 1- A), se han realizado nuevos loteos para la construcción de diferentes complejos turísticos y zonas residenciales que generó un aumento de la superficie construida ocupando parte de la llanura de inundación del cauce principal (Gil, 2011). En este contexto, se han realizado intervenciones sobre el cauce como la creación de terraplenes, extracción de áridos, desvío de canales (Campo *et al.*, 2016). Además, en zonas adyacentes a ambas vertientes del cordón del sistema de Ventania las cuales están ubicadas en cercanías al piedemonte, con la intensificación del uso del suelo para la producción agropecuaria generó la activación de procesos de erosión hídrica derivan en formaciones de surcos y cárcavas (Beron de la Puente *et al.*, 2022).

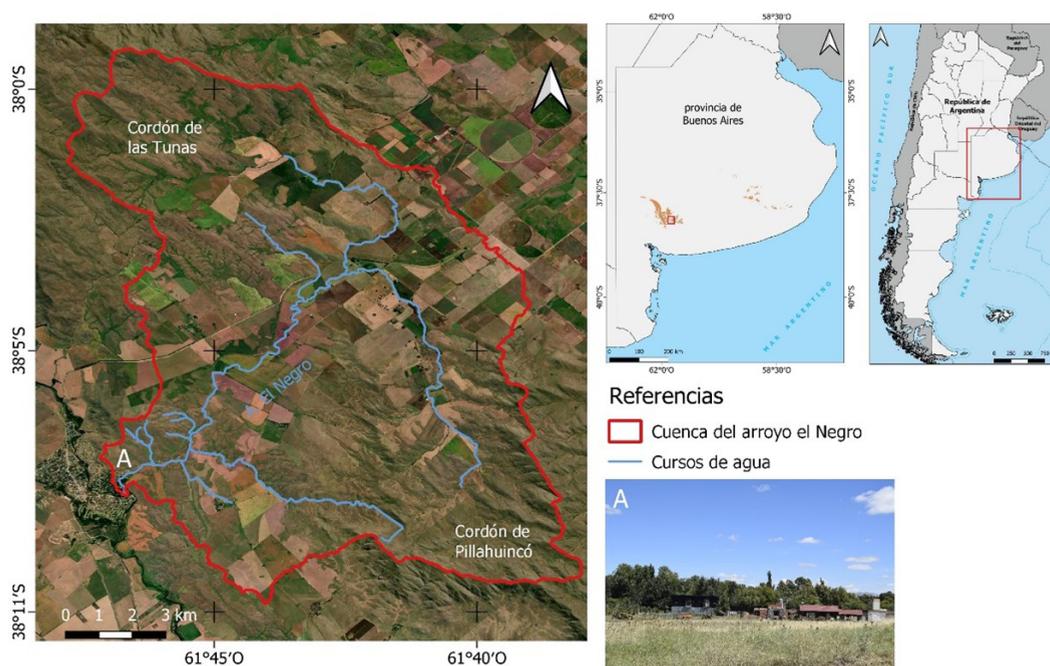


Fig 1. Cuenca arroyo El Negro

MATERIALES Y MÉTODOS

Para la obtención del mapa de LULC se utilizaron imágenes Landsat 5 TM y Landsat 8 OLI ya que ofrece una ventana temporal superior a los 30

años. El primer paso fue el procesamiento se realizó mediante los servicios de cloud computing provistos por la plataforma de Google Earth Engine (GEE). En donde, se eligieron dos catálogos de colección de imágenes. Para el año 1985 se utilizó Landsat 5 Level 2, Collection 2, de 30 m de resolución espacial con la reflectancia de la superficie corregida atmosféricamente. Mientras que para el año 2023 se utilizó Landsat 8, Collection 2, Tier 1 TOA Reflectance (parte superior de la atmósfera), de 30 m de resolución. Ambas colecciones fueron acotadas según el porcentaje de nubosidad del 5 % y se aplicó un recorte de la cuenca de estudio. Seguido, para las imágenes que se encontraron, se obtuvieron los valores medios de reflectancia en las imágenes debido a que no son afectados por valores atípicos (Flood, 2013). A partir de estas imágenes, se priorizan algunas bandas (Green y Red) e índices espectrales (Tabla 1) que se consideran importantes en la obtención de coberturas de suelo (Trujillo *et al.*, 2021; Beron de la Puente *et al.*, 2023). Estos índices se detallan en la Tabla 1 y fueron calculados para cada año.

Tabla 1. Índices espectrales obtenidos para la clasificación supervisada

Índice	Formula	Fuente
Índice de Suelo Desnudo (BSI)	$((\text{Red} + \text{SWIR}) - (\text{NIR} + \text{Blue})) / ((\text{Red} + \text{SWIR}) + (\text{NIR} + \text{Blue}))$ (1)	Nguyen, <i>et al.</i> , 2021
Índice de áreas construídas de diferencia normalizada (NDBI)	$(\text{SWIR} - \text{NIR}) / (\text{SWIR} + \text{NIR})$ (2)	Zha <i>et al.</i> , 2003
Relación de vigor fotosintético (PVR)	$(\text{Green} - \text{Red}) / (\text{Green} + \text{Red})$ (3)	Metternicht, 2003
Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)	$(\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{Red})$ (4)	Rouse <i>et al.</i> , 1973
Índice de diferencia Normalizada agua (NDWI)	$(\text{Green} - \text{NIR}) / (\text{Green} + \text{NIR})$ (5)	Gao, 1996
Índice de Vegetación Mejorado (EVI)	$(\text{NIR} - \text{R}) / (\text{NIR} + 6 * \text{Red} - 7.5 * \text{Blue} + 1)$ (6)	Huete <i>et al.</i> , 2002

En una segunda instancia consistió en la creación de dos bases de datos de coberturas para los años elegidos. Por ello, mediante la creación de mosaicos de imagen RGB y Falso Color para los años 1985 y 2023 se hizo fotointerpretación de las coberturas. Esto permitió la generación de dos datasets de 50 puntos para cada una de las clases para los años seleccionadas, las cuales son: urbano (U), vegetación (V), agrícola (A) y afloramiento (Af). Cabe mencionar que, para el entrenamiento y validación del modelo, para ambos años por separado se obtuvieron los índices espectrales de la tabla 1. Para la obtención del mapa de LULC de cada año la muestra se dividió en 2 conjuntos de datos. De la totalidad del dataset creado, el 20 % se utilizó para la validación del modelo mientras que el 80 % restante para su entrenamiento. Además, los datos que se usaron para entrenar/validar fueron elegidos de forma aleatoria. Para la obtención del mapa se utilizó Code Editor de GEE, el cual está basado en una IDE que usa el lenguaje para la API JavaScript. El algoritmo usado para la clasificación supervisada basada en píxeles es Random Forest (RF) con el uso de 250 árboles y 2 ramificaciones. La elección del clasificador se debe a que es el más utilizado y el que da mejores resultados (Belgium & Csillik, 2017; Chen *et al.*, 2017). Una vez obtenida las imágenes clasificadas se obtuvieron indicadores de evaluación de calidad y performance. Estas métricas fueron, el porcentaje de clasificación del mapa general e índice kappa (k) junto a una validación visual de las coberturas para ambos años.

Finalmente, una vez obtenido los mapas LULC para los años 1985 y 2023, el estudio de los cambios del suelo se llevó a cabo por *Land Change Modeler* del software *Idrisi Selva v.17*. el cual hace una superposición cartográfica de dos cortes temporales. Esta superposición construye una matriz de tabulación cruzada que sirve como punto inicial del análisis de LULC. A partir de dicha matriz se obtienen como resultado 1) el estudio de cambios a partir de gráficas de ganancias y pérdidas de

las categorías y 2) el cambio neto a partir de la diferencia de ganancias y pérdidas (Pontius *et al.*, 2004). Esta metodología es ampliamente utilizada para estudios que tiene como objetivo cuantificar expansión urbana, fragmentación de ecosistemas, evaluar riesgos ambientales o manejos de cuencas (Mendoza *et al.*, 2002; de León Mata *et al.*, 2014; Humacata, 2022).

RESULTADOS Y DISCUSIONES

A partir de los resultados obtenidos por el procedimiento llevado a cabo por la clasificación supervisada para los años 1985 y 2023 en la plataforma de GEE se exhiben en la figura 2. De su comparación se evidencia un cambio notable en las diferentes clases. La primera de ellas es la clase vegetación (verde), la cual en el año 1985 ocupaba una superficie de 55 km² y para el año 2023 esta superficie se redujo a solamente a 13 km². Por otro lado, la clase agrícola (naranja) experimentó un notable incremento pasando de una superficie de 65 Km² a llegar a casi los 100 km² representando casi el 50% de la superficie total de la CaEL. Se destaca la clase urbana (rojo) que incluye la demarcación de los caminos secundarios y las áreas urbanas al cierre de la cuenca. Una diferencia a destacar entre ambos años el incremento de la zona urbanizada en 1 km² durante este período. Por último, la clase de afloramiento (gris) que representa el sistema de Ventania a priori se mantiene constante.

En la figura 2, los recuadros A y B representan ejemplos de sectores en donde se puede apreciar los cambios de coberturas. En el primer recuadro se observa como se dio el cambio de vegetación hacia agrícola y zona urbana. Este sector al encontrarse en el cierre de la cuenca y en cercanías a una zona urbanizada, como crece hacia el sector en donde esta ubicada la planicie de inundación del arroyo El Negro. Por otra parte,

en el segundo recuadro se destaca como la vegetación fue reemplazada en su totalidad por zona de explotación agrícola. La cual, es la que en mayor medida modifico dentro de la cuenca.

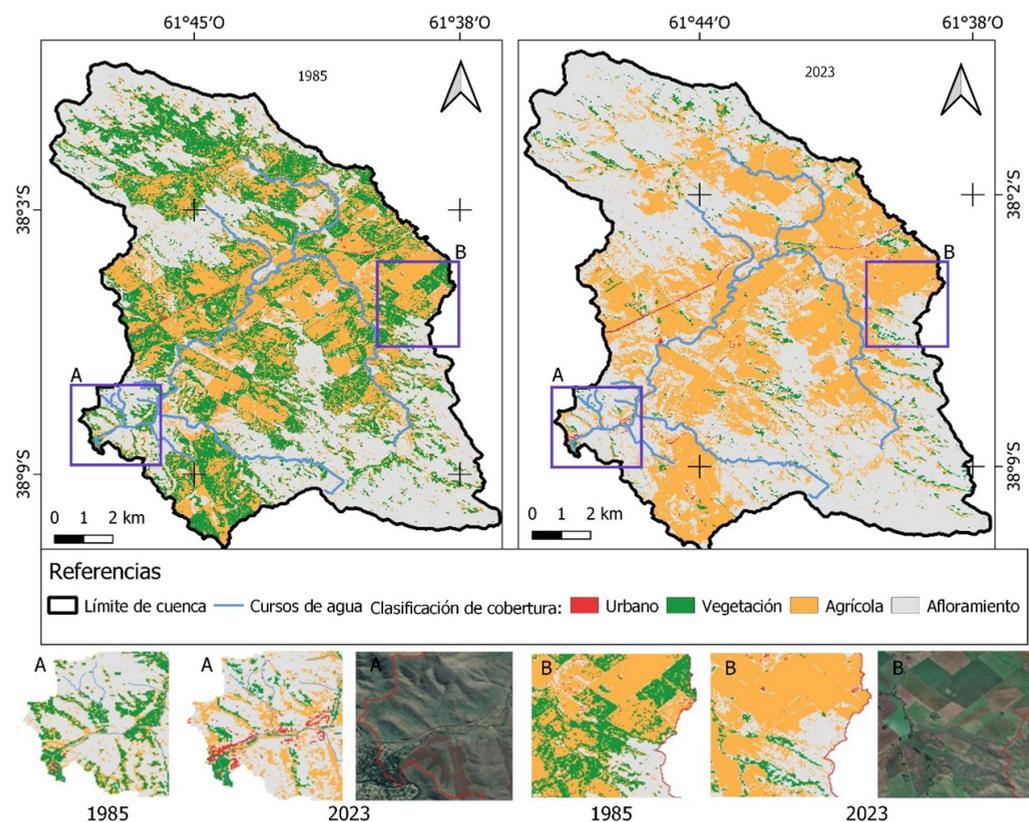


Fig. 2. LULC de CaEL para los años 1985 (izq) y 2023 (der). Fuente: elaboración propia a partir del uso de la plataforma GEE y los SIG (2024)

La tabla 2 presenta el resultado generado a partir de la validación del modelo, para los años 1985 y 2023. La precisión general entregó un valor de 0.79 y 0.87 y el índice Kappa 0.71 y 0.81 indicando que el modelo tuvo una buena proporción de coincidencias y la LULC está bien representada. En general, los valores relacionados a la exactitud del productor (EP) y usuario (EU) supera el 0.60. Esto sugiere que el modelo de RF identifica con buena precisión las diferentes clases, siendo la vegetación la que menor desempeño tiene y la urbana la de mayor.

Tabla 2. Exactitud del productor (EP) y de usuario (EU), precisión general e índice Kappa resultante del clasificador LULC a partir de los datos de validación de los años 1985 y 2023.

	1985		2023	
	EP	EU	EP	EU
Urbano (U)	1	1	1	0.83
Vegetación (V)	0.6	0.63	0.8	0.92
Agrícola (A)	0.80	0.71	0.85	0.85
Afloramiento (Af)	0.85	0.92	0.86	0.86
Precisión General	0.79		0.87	
Índice Kappa (k)	0.71		0.81	

La cuantificación de las pérdidas y ganancias para cada cobertura clasificada se presenta en la figura 3. Durante el período de 38 años que pasaron entre ambos mapas LULC, se puede apreciar como cada categoría ha experimentado reducciones o incrementos en su superficie. El cambio más identificable en valores absolutos es la vegetación, ya que es la que más ha perdido su superficie llegando a los 50 km². Por otro lado, la clase que ha ganado mayor superficie es la agrícola con 49 km². Este cambio en LULC hacia actividades agrícolas dentro de la CaEL plantea posibles problemas ambientales, especialmente en lo concerniente a la erosión hídrica, si no se aplican prácticas agrícolas adecuadas para su conservación.

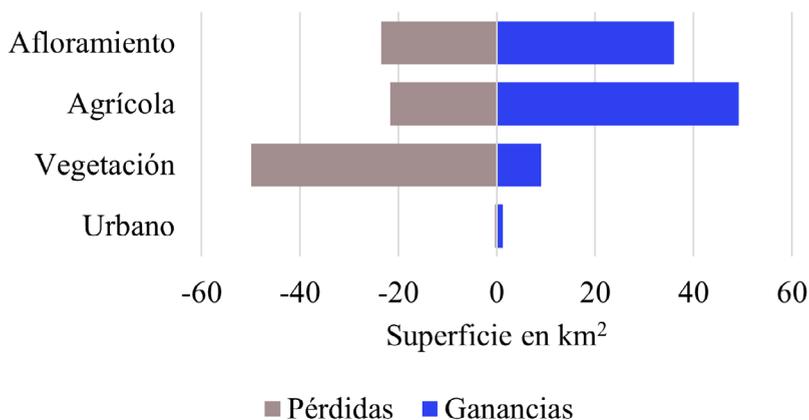


Fig. 3. Ganancias y pérdidas por categoría (km²). Fuente: elaboración propia 2024.

La figura 4 representa el cambio neto de cada categoría entre los años 1985 y 2023. La vegetación fue la única clase que su cambio neto fue negativo, con lo cual se encuentra una pérdida de 40 km². Mientras que las clases restantes su cambio fue positivo, incrementando su superficie. Donde la clase que aumento más es la agrícola con 28 km² aproximadamente, seguido de afloramiento y por último la superficie urbana. Cabe mencionar una hipótesis que podría explicar el incremento de afloramiento tanto la figura 3 como en la figura 4. Esta está relacionada con la pérdida de vegetación natural que se desarrolla sobre los afloramientos. En el año 1985 la vegetación estaría cubriendo parte de los afloramientos y para el año 2023 no, quedando al descubierto el afloramiento de roca.

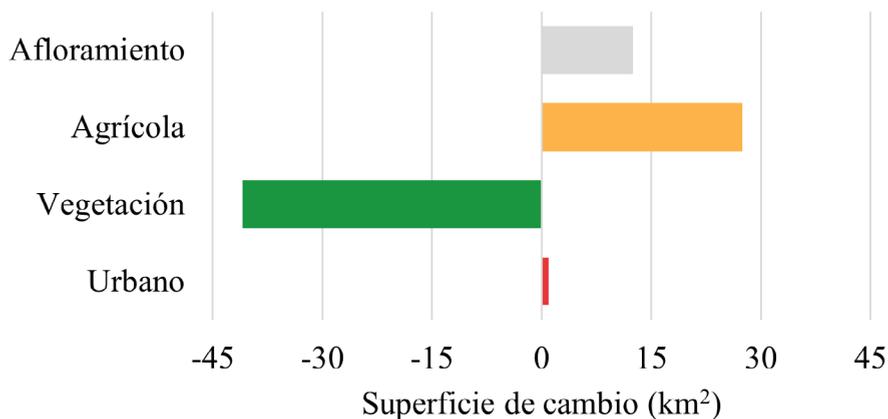


Fig. 4. Cambios netos por categoría (km²). Fuente: elaboración propia 2024.

Si analizamos como se dio la transición de una categoría específica, del total de superficie perdida de vegetación, resulta que el 65% de la superficie ocupada en el año 1985 por vegetación paso a la clase agrícola para el año 2023. Por este motivo, es de interés identificar y relacionar los sectores donde se identifican procesos de erosión hídrica con el cambio de clase de vegetación a agrícola.

A partir de los cambios de LULC ya analizados y siendo el mayor cambio dentro de CaEL el paso de superficie con vegetación hacia superficie agrícola se espacializaron las pérdidas y ganancias de vegetación en la figura 5. Posteriormente, de la fotointerpretación mediante

las imágenes Landsat para ambos años y el uso de Google Earth Pro se focalizó la observación en las zonas en donde de pérdida de vegetación y si se encuentran actualmente procesos de erosión del suelo. Es allí donde se identificaron 20 lugares donde existen procesos de erosión hídrica (puntos violetas) entre ellos: erosión laminar, formación de surcos, cárcavas y procesos de erosión de márgenes fluviales del arroyo El Negro (Figura 5).

En 5A se aprecia una red de cárcavas, en el 5B una cárcava activa que al llegar al campo aledaño en su desarrollo comienza a generar erosión laminar y en el 5C se puede observar erosión en surcos. En la figura 5D se destaca el incremento de la erosión lateral propia de un meandro que afecta los márgenes de un afluente del arroyo El negro. En esta última se esta evidenciando que, con el paso del tiempo, la red de drenaje esta realizando pequeños cambios entre 3 a 5 metros en distintas partes del tramo de la red fluvial ensanchando su cauce. Sumado a esta se están generando nuevos lineamientos que no están integrados en la red de drenaje como los casos expuestos en A, B y C.

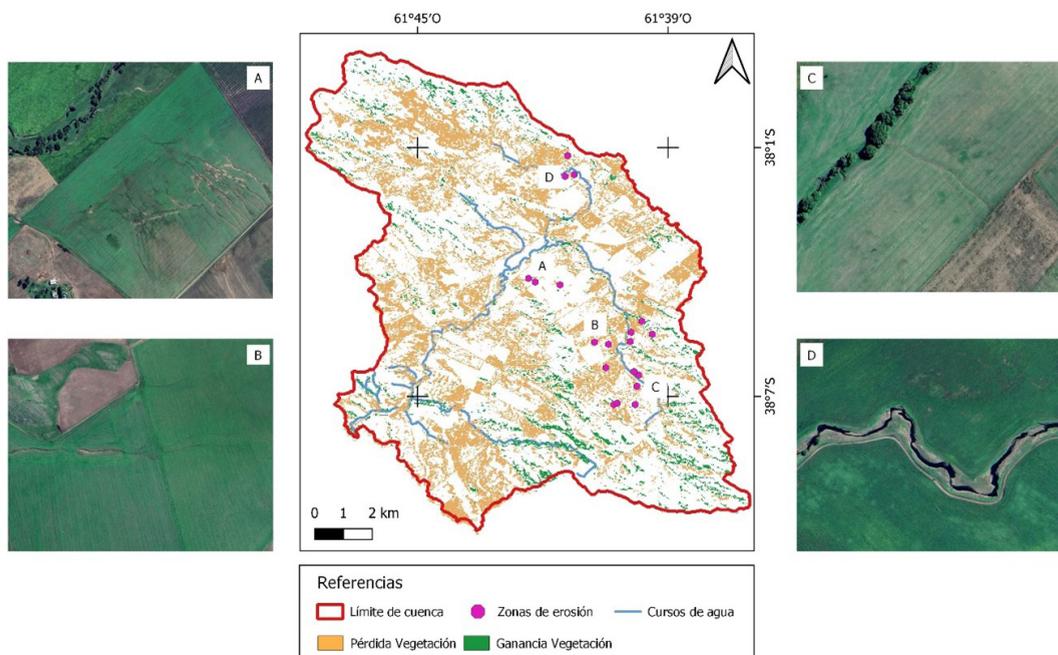


Fig. 5. Ganancias y pérdidas de vegetación entre 1985 y 2023 e identificación de zonas de procesos de erosión del suelo. Fuente: elaboración propia 2024.

CONCLUSIONES

La cuenca del arroyo El Negro presenta un cambio significativo de Cobertura y Uso del Suelo (LULC) esto se pudo determinar a partir la clasificación supervisada de las imágenes satelitales para los años 1985 y 2023. El mayor cambio lo presenta la clase vegetación que pasó de 55 km² (1985) a 13 km² (2023) y el agrícola que pasó de 65 km² (1985) a casi los 100 km² (2023) representando casi el 50 % de la superficie total de la CaEL en la actualidad. Las dos clases restantes tuvieron menor cambio, con un aumento de la superficie urbanizada en el sector bajo de la cuenca sobre la llanura de inundación del cauce principal. Se identificaron también varios sectores donde se desarrollan diferentes procesos de erosión hídrica dentro de campos de producción agrícola (principalmente en zonas de piedemonte) y propias de la evolución de la red de drenaje.

Es importante destacar que, el uso de la herramienta GEE permitió facilitar el proceso de obtención de mapas de LULC simplificando el proceso de adquisición de las diferentes imágenes y la obtención de los índices espectrales para la clasificación supervisada dando buenos resultados. Sumado a esto, el modelo RF permitió discernir de manera fiel las coberturas de la cuenca con una precisión global del 79 % y 87 % para los años 1985 y 2023 respectivamente.

Por otra parte, la validación y cuantificación de los cambios de LULC sumado a la identificación de sectores donde se activan o generan proceso de erosión hídrica en sectores de mayor cambio puede tornarse una herramienta de apoyo a la toma de decisiones y detallar sectores donde es importante generar un monitoreo continuo para seguir la evolución de procesos de degradación de suelos y de los ecosistemas.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se realizó en el marco del proyecto “Geografía Física Aplicada al estudio de la interacción sociedad-naturaleza.

Problemáticas ambientales a diferentes escalas témporo-espaciales".
Dirección: Dra. Verónica Gil. Código: 24/G092. Secretaría General de
Ciencia y Tecnología, Universidad Nacional del Sur.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Beron de la Puente: Conceptualización, análisis formal, visualización,
escritura borrador, redacción, edición.

Gil: Financiación para equipamiento necesario, revisión y edición.

Revollo: Metodología y asistencia de la metodología de obtención de
la cartografía de usos y cobertura del suelo, revisión.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores no poseen conflictos de interés

BIBLIOGRAFÍA

Abbondanza, S (2019). *Cambios en la cobertura vegetal y erosión del suelo en Sierras Chicas - Córdoba, en el periodo 2005-2017: aproximaciones desde el modelo RUSLE con base en la teledetección*. Instituto de Altos Estudios Espaciales Mario Gulich. Tesis de Maestría en Aplicaciones de Información Espacial.

Belgiu, M. y O. Csillik (2017). Sentinel-2 cropland mapping using pixel-based and object-based time-weighted dynamic time warping analysis. *Remote Sensing of Environment*, 204(2018), 509-523. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.10.005>

Beron de la Puente, F., Revollo Sarmiento, N. y V, Gil (2023). *Clasificación Inteligente de Cultivos de Verano en la Plataforma Google Earth Engine*. En: Congreso de AgroInformática (CAI 2023) - JAIIO 52. CABA, Argentina.

- Beron de la Puente, F. J., Gil, V. y P.A. Zapperi (2022). El factor edáfico (K) y la generación de cárcavas en una microcuenca serrana. Tornquist, Argentina. *Cardinalis*, (18), 95-108.
- Bocco, G., M. Mendoza y A. Velázquez (2001). Remote sensing and GIS-based regional geomorphological mapping. A tool for land use planning in developing countries. *Geomorphology*, 39(3-4): 211-219.
- Campo, A. M., Gil, V., Ybarra Alcaráz, G. V., y A. Volonté (2016). Tipificación morfológica de cursos principales: Cuenca del arroyo El Negro, sistema de Ventania, Argentina. *Boletín Geográfico*, (37),38, 49-60.
- Chen, W., Xie, X., Wang, J., Pradhan, B., Hong, H., Bui, D. T., Duan, Z. y J. Ma (2017). A comparative study of logistic model tree, random forest, and classification and regression tree models for spatial prediction of landslide susceptibility. *Catena*, 151, 147-160. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.11.032>
- de León Mata, G. D., Pinedo Álvarez, A. y J. H. Martínez Guerrero (2014). Aplicación de sensores remotos en el análisis de la fragmentación del paisaje en Cuchillas de la Zarca, México. *Investigaciones geográficas*, (84), 42-53. <https://doi.org/10.14350/rig.36568>
- Ellison, D., Morris, C. E., Locatelli, B., Sheil, D., Cohen, J. Murdiyarso, D., y Gutierrez, V. (2017). Trees, forests and water: cool insights for a hot world. *Global Environmental Change*, 43: 51-61.
- Flood, N. (2013). Seasonal composite Landsat TM/ETM+ images using the medoid (a multi-dimensional Median). *Remote Sensing*, 5(12), 6481-6500. <https://doi.org/10.3390/rs5126481>
- Gallegos Reina, A., y M. J. Perles Roselló (2019). Relaciones entre los cambios en los usos del suelo y el incremento de los riesgos de inundabilidad y erosión: análisis diacrónico en la provincia de Málaga (1957-2007). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, (81), 2740, 1-38. <http://dx.doi.org/10.21138/bage.2740>

- Gao, B.C (1996). NDWI-A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote sensing of environment* 58(3), 257-266. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)
- Gil, V. (2011). Geomorfología fluvial en el arroyo El Negro, Buenos Aires, Argentina. *Revista Universitaria de Geografía*, (20)1, 1-12.
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodríguez, E. P., Gao, X. y G. Ferreira (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment* 83, 195-213.
- Humacata, L. (2022). Análisis espacio-temporal de cambios de coberturas y usos del suelo en la cuenca del río Luján (1990-2010). *Revista Huellas*, (26),1. <http://dx.doi.org/10.19137/huellas-2022-2609>
- Mendoza, M., Bocco G., Granados E. y M. Bravo (2002). Implicaciones hidrológicas del cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo: una propuesta de análisis espacial a nivel regional en la cuenca cerrada del lago de Cuitzeo, Michoacán, México. *Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía de la UNAM*, (49) 92-117.
- Metternicht, G. (2003). Vegetation indices derived from high-resolution airborne videography for precision crop management. *International Journal of Remote Sensing* 24(14), 2855-2877. <https://doi.org/10.1080/01431160210163074>
- Milazzo, F., Fernández, P., Peña, A., y T. Vanwalleghem (2022). The resilience of soil erosion rates under historical land use change in agroecosystems of Southern Spain. *Science of The Total Environment*, 822, 153672, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153672>.
- Najera González, O., Bojórquez Serrano, J. I., Flores Vilchez, F., Murray Nuñez, R. M. y A. González García Sancho (2016). Riesgo de erosión hídrica y estimación de pérdida de suelo en paisajes geomorfológicos volcánicos en México. *Cultivos Tropicales*, (37)2, 45-55.

- Nguyen, C.T.; Chidthaisong, A., Kieu Diem, P. y L.Z. Huo (2021). A Modified Bare Soil Index to Identify Bare Land Features during Agricultural Fallow-Period in Southeast Asia Using Landsat 8. *Land* 10(3), 231. <https://doi.org/10.3390/land10030231>
- Nyssen, J., Poesen, J., Moeyersons, J., Luyten, E., Veyret-Picot, M., Deckers, J., Haile, M., y G. Govers (2002). Impact of road building on gully erosion risk: A case study from the Northern Ethiopian Highlands. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27(12): 1267-1283.
- Pontius, R. G. Jr., Shusas, E. y M. McEachern (2004). Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, (101), 251-268. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2003.09.008>
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A. y D.W. Deering (1973). *Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS*. En: 3rd ERTS Symposium, NASA SP-351 I, 309-317
- Sequeira, N. D., Vazquez, P. y L. Zulaica (2015). Consecuencias ambientales de la expansión agrícola en el partido de Benito Juárez (Buenos Aires, Argentina), en el período 2003-2011. *Revista Geoaraguaia*, 5(2).
- Sacido, M.B., Vazquez, P y A. Somoza (2020). *Pastizales nativos y avance de la agriculturización en una Cuenca de la Región Pampeana Argentina*. En: Simposio Gestión sostenible del campo natural: 11-18. Uruguay.
- Santana, C. G. y J. N. B. Pineda (2011). *Descripción del cambio de uso y cobertura del suelo en los bosques primarios del Estado de México, durante 1976-2000*.
- Trujillo-Jiménez, M. A., Liberoff, A. L., Pessacg, N., Pacheco, C. y S. Flaherty (2021). *Metodología de clasificación automática de uso y cobertura de suelo*. En: XIII Congreso de Agrolnformática (CAI 2021)-JAIIO 50. Buenos Aires.

-
- Van Lynden, G. W. J. y L.R. Oldeman, L. R. (1997). *The assessment of the human-induced soil degradation in South and Southeast Asia. Wageningen*. The Netherlands: International Soil Reference and Information Centre.
- Vázquez, P. y L. Zulaica (2011). Cambios en el uso de la tierra del partido de Tandil y principales impactos ambientales. *Revista Párrafos Geográficos*, 10(2), 242-267
- Zha, Y., Gao, J. y S. Ni. (2003). Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. *International journal of remote sensing* 24(3), 583-594. [https:// doi.org/10.1080/01431160304987](https://doi.org/10.1080/01431160304987)