

ARTÍCULO

ANÁLISIS DE LA COBERTURA DEL SUELO A PARTIR DEL USO DEL ALGORITMO RANDOM FOREST

Land cover analysis using the random forest algorithm

Arce Cendoya, S. ^{1 *}, Barragán, F. G. ¹ & Gernaldi, A. M. ^{1 2}

RESUMEN: Las coberturas del suelo desempeñan un papel crucial en una variedad de procesos ambientales y ecológicos. Las mismas influyen en la susceptibilidad y la vulnerabilidad de un área a diversos riesgos naturales, como inundaciones, deslizamientos de tierra, incendios forestales y sequías. Detectar y cuantificar estos cambios a lo largo del tiempo permite evaluar el impacto de actividades humanas como la agricultura, la urbanización y la minería en el medio ambiente y tomar medidas correctivas para mitigar sus efectos negativos. El trabajo tiene como objetivo determinar las coberturas del suelo para el partido de Puan en dos temporadas (estival e invernal) a partir de la aplicación del algoritmo Random Forest. Se trabajó con imágenes satelitales de Sentinel - 2 corregidas a superficie, con las cuales se obtuvieron índices espectrales y una posterior clasificación supervisada para la determinación de las coberturas del suelo. La escala temporal corresponde al año 2023, con la estación estival (enero) y la estación invernal (julio). Los resultados permitieron identificar la distribución de los usos del suelo en el partido de Puan y su respuesta frente a las variaciones estacionales en un mismo año.

PALABRAS CLAVE: Cobertura del Suelo, Índices Espectrales, Sentinel, Imágenes Satelitales, Árboles de decisión.

1 Depto. de Geografía y Turismo, Universidad Nacional del Sur, Argentina.

2 Instituto Argentino de Oceanografía, Argentina. CONICET-IADO, Bahía Blanca, Argentina.

* Autor de correspondencia. Sebastián Arce Cendoya. E-mail sebastian.arce@uns.edu.ar

Como citar este artículo: Arce Cendoya, S., Barragán, F. G. & Gernaldi, A. M. (2024). Análisis de la cobertura del suelo a partir del uso del algoritmo random forest. *Revista FACENA* 34(2), 270-289. Doi: <https://doi.org/10.30972/fac.3427776>

Recibido/Received: 02/09/2024. Revisión: 03/09/2024. Aceptado/Accepted: 15/11/2024.

Editor asociado: Félix Ignacio Contreras.

Publicado en línea: 26/12/2024. ISSN 1851-507X en línea.

ABSTRACT: Land covers play a crucial role in a variety of environmental and ecological processes. They influence the susceptibility and vulnerability of an area to various natural hazards, such as floods, landslides, forest fires and droughts. Detecting and quantifying these changes over time makes it possible to assess the impact of human activities such as agriculture, urbanisation and mining on the environment and to take corrective measures to mitigate their negative effects. The aim of this work is to determine the land cover for the Puan district in two seasons (summer and winter) by applying the Random Forest algorithm. We worked with Sentinel-2 satellite images corrected to surface, with which we obtained spectral indices and a subsequent supervised classification for the determination of land cover. The time scale corresponds to the year 2023, with the summer season (January) and the winter season (July). The results allowed us to identify the distribution of land uses in the Puan district and their response to seasonal variations in the same year.

KEYWORDS: Land Cover, Spectral Indices, Sentinel, Satellite Images, Decision trees.

INTRODUCCIÓN

Las coberturas del suelo, que comprenden la vegetación, el agua, el suelo desnudo y otros tipos de superficies terrestres, desempeñan un papel crucial en una variedad de procesos ambientales y ecológicos. La comprensión de estas coberturas y su distribución espacial es fundamental para el estudio y la gestión de ecosistemas, la monitorización de cambios ambientales y la evaluación de riesgos naturales (FAO, 2022).

Cuando se refiere a coberturas del suelo, se las define como se refieren a la cubierta (bio)física que se observa sobre la superficie terrestre. En este sentido, no solo describe la vegetación natural (arbórea, arbustiva, herbácea) y los elementos antrópicos de la actividad humana (cultivos,

infraestructuras, edificios, etc.) presentes en el territorio, también incorpora a otras como afloramientos rocosos, suelo desnudo, cursos y cuerpos de agua (Cardozo *et al.*, 2021; Molo *et al.*, 2021; Saucedo *et al.*, 2021).

Las coberturas del suelo influyen en la susceptibilidad y la vulnerabilidad de un área a diversos riesgos naturales, como inundaciones, deslizamientos de tierra, incendios forestales y sequías. Identificar áreas propensas a eventos extremos y desarrollar medidas de mitigación y adaptación para reducir la exposición y el impacto de estos eventos en las comunidades es crucial. Además, los cambios son indicadores tempranos de alteraciones ambientales y presiones antropogénicas en un área determinada. Detectar y cuantificar estos cambios a lo largo del tiempo permite evaluar el impacto de actividades humanas como la agricultura, la urbanización y la minería en el medio ambiente y tomar medidas correctivas para mitigar sus efectos negativos.

En este contexto, con la teledetección óptica se puede acceder a información referida a las coberturas a través de su respuesta espectral. El procesamiento de imágenes satelitales, que involucra la adquisición y análisis de datos desde plataformas aéreas o satelitales, se ha convertido en una herramienta eficaz para abordar la caracterización y el monitoreo de las coberturas del suelo a escala regional y global (Chuvienco, 2008).

El uso de información satelital para el monitoreo de la cobertura del suelo ha revolucionado la forma en que se estudia y se comprende el cambio en el uso de la tierra. Los satélites proporcionan imágenes de alta resolución y cobertura global, lo que permite obtener información precisa y detallada sobre la distribución de los diferentes tipos de cobertura del suelo (Vidal Quini *et al.*, 2023; Vidal Quini, 2021; Talukdar *et al.*, 2020; Barragán y Geraldí, 2018).

Derivado del procesamiento de imágenes satelitales ópticas, se obtienen diversos índices espectrales, como el Bare Soil Index (BSI) (Nguyen *et al.*, 2021), el Normalized Difference Built-up Index (NDBI) (Zha

et al., 2003), el Normalized Difference Water Index (NDWI) (McFeeters, 1996), el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) (Chuvienco, 2008) y el Landsat Soil Adjusted Vegetation Index (Chuvienco, 2008). Estos índices permiten resaltar diferentes aspectos de la composición del suelo, de las áreas con construcción e infraestructura, de los cuerpos de agua y de la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación. Los índices espectrales consisten en un cociente entre las bandas del espectro electromagnético, incluyendo la longitud de onda visible (0.4 a 0.7 μm) y la del infrarrojo cercano y medio (0.7 a 1.3 μm y 1.3 a 8 μm), lo que permite analizar las coberturas de interés a partir de su respuesta espectral.

Existen diversos visualizadores a escala global y regional que utilizan productos satelitales para la elaboración de mapas y análisis de coberturas del suelo. A nivel global, destacan plataformas como el Global Land Analysis and Discovery (GLAD), el OSM Land Use/Land Cover, y el Copernicus Dynamic Land Cover (CDLC). Estos visualizadores web permiten acceder a datos actualizados y precisos sobre la cobertura y el uso del suelo, facilitando el monitoreo de cambios temporales y espaciales.

Además, proporcionan herramientas interactivas para visualizar, comparar y analizar diferentes tipos de coberturas en diversas regiones del mundo, siendo fundamental para la gestión ambiental, la planificación territorial y la investigación científica.

A lo anterior se suman, diferentes estudios han utilizado el procesamiento de imágenes y aplicación de índices espectrales con la posterior clasificación supervisada para la obtención del producto final de las coberturas del suelo (Arias *et al.*, 2019; Fernández Fierro, 2020; Ramírez *et al.*, 2020; Noi Phan *et al.*, 2020; Eraso Terán, 2022; Tobar Díaz, 2023).

La presente investigación tiene como objetivo determinar las coberturas del suelo para el partido de Puan en dos temporadas (estival e invernal) a partir de la aplicación del algoritmo Random Forest.

Área de estudio

El área de estudio corresponde al partido de Puan, localizado en el sudoeste bonaerense (Figura 1), el mismo limita con los partidos-municipios de Adolfo Alsina al norte, Saavedra y Tornquist al este, Villarino al sur y con la provincia de La Pampa al oeste. Está compuesto por las localidades de Azopardo, Bordenave, Darregueira, Estela, Felipe Sola, López Lecube, Puan, San German, Tres Cuervos, Víboras, Erize, 17 de Agosto y Villa Iris (Figura 2).

El partido de Puan, presenta una serie de características de localización que influyen en sus actividades económicas y desarrollo socioeconómico. Como se expresó anteriormente se encuentra ubicada en el sudoeste de la provincia, limitando con la provincia de La Pampa al oeste y con el partido de Adolfo Alsina al sur. Su localización estratégica cerca de importantes vías de comunicación, como la Ruta Nacional N° 33 y la Ruta Provincial N° 67, facilita el acceso a mercados regionales y nacionales, lo que ha impulsado el desarrollo de diversas actividades económicas en la zona. Presenta una economía diversificada, que abarca sectores como la agricultura, la ganadería, la industria y el turismo. En términos agrícolas, la región cuenta con extensas áreas dedicadas al cultivo de cereales (principalmente trigo, maíz y cebada), oleaginosas (soja) y cultivos forrajeros. Las condiciones climáticas favorables y la disponibilidad de tierras fértiles han permitido el desarrollo de una agricultura productiva, siendo la actividad agrícola una de las principales fuentes de ingresos para la población local.



Fig. 1. Localización relativa del partido de Puan. Fuente: Elaboración propia de los autores.

Además de la agricultura, la ganadería también desempeña un papel importante en la economía de Puan. La región cuenta con una significativa actividad ganadera, principalmente enfocada en la cría de ganado vacuno y ovino. La producción de carne y productos lácteos contribuye significativamente al sector agropecuario, generando empleo y riqueza en la comunidad.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para llevar adelante la investigación se utilizaron imágenes satelitales del satélite Sentinel 2 - MSI, con un nivel de procesamiento

2-A correspondiente a reflectancia superficie. Las imágenes utilizadas corresponden a la zona T20HMD, T20HMC, THND y T20HNC (figura 2) que fueron convertidas a un mosaico con los límites del partido antes mencionado. En cuanto a la escala temporal para el análisis de las coberturas, se consideraron los meses de verano, enero específicamente; y los meses de invierno, julio específicamente.

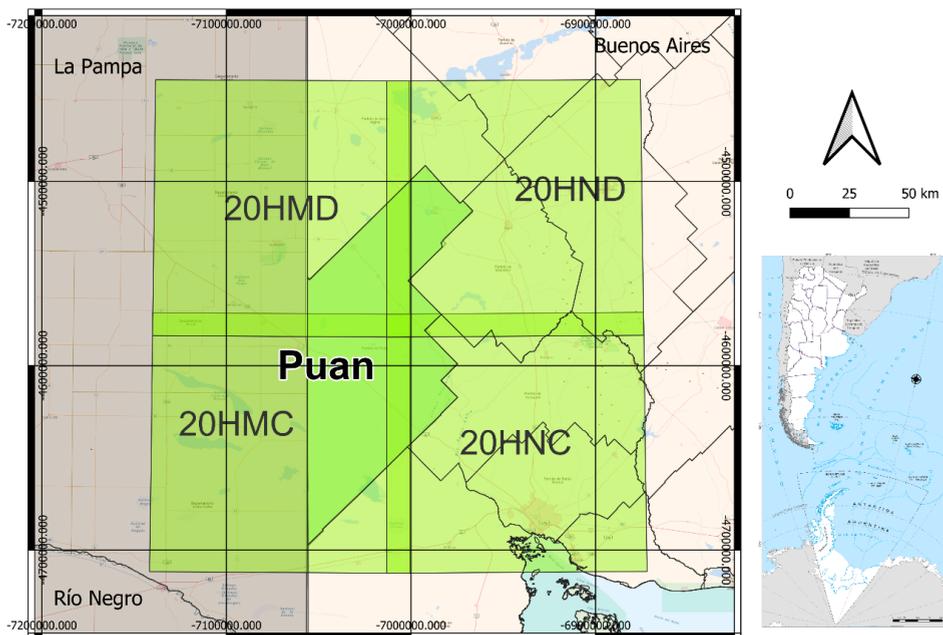


Fig. 2. Grilla de imágenes satelitales convertidas en mosaico. Fuente: Elaboración propia de los autores.

Los índices espectrales (Tabla I) son herramientas fundamentales en la clasificación supervisada, dado que permiten aprovechar la información contenida en los diferentes sectores del espectro electromagnético. Estos índices proporcionan medidas cuantitativas de características biológicas, químicas y físicas, lo cual facilita la discriminación entre las diversas categorías de cobertura.

Se calcularon los siguientes índices: el Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) expresado en las diferencias entre la longitud de onda del rojo (RED) y del infrarrojo cercano (NIR) (Tabla I). Los resultados de este índice están definidos por valores que van de -1.0 a 1.0, donde los

valores negativos están formados principalmente por nubes, agua y nieve y los valores negativos cercanos a cero están formados principalmente por rocas y suelo descubierto. Los valores positivos (0,1 o menor) corresponden a áreas sin rocas, arena o nieve. Los valores moderados 0,2 a 0,3 representan arbustos y praderas, mientras que los valores de 0,6 a 0,8 indican zonas con cultivos, bosques templados y tropicales.

El Normalized Difference Water Index (NDWI) es utilizado para resaltar el aspecto de los cuerpos de agua permitiendo que dichas masas de agua estén contrastadas del resto de las coberturas en la imagen (Tabla I). Este índice considera los sectores del espectro de la longitud de onda del verde y la del infrarrojo cercano. Los valores del índice corresponden a 0,2 - 1 con superficie de agua, de 0,0 - 0,2 con zonas de inundación o gran humedad, de -0,3 - 0,0 vinculado a una sequía moderada o superficies sin agua, el rango entre -1 - -0,3 con áreas de sequía o superficies sin agua.

El Bare Soil Index (BSI) combina bandas espectrales azules, rojas, infrarrojas cercanas e infrarrojas de onda corta (Tabla I) para capturar las variaciones del suelo. Este índice estará asociado a la detección de las categorías de estepa y afloramiento rocoso principalmente. Los valores corresponden a áreas de vegetación donde es negativo, con valores cercanos a 0 vinculados a suelo desnudo, y valores positivos relacionados a agua (Nguyen *et al.*, 2021).

El Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI) es un índice espectral utilizado para evaluar la vegetación en áreas con cobertura vegetal densa, donde la reflectancia del suelo afecta la precisión de otros índices de vegetación. El SAVI ajusta la influencia del suelo en el índice de vegetación, lo que lo hace especialmente útil en áreas con suelo expuesto o con vegetación muy densa. Se calcula a partir de la utilización de la banda NIR que representa el valor de reflectancia en la banda infrarroja cercana, RED que representa el valor de reflectancia en la banda roja y L que es un factor de ajuste que puede variar de 0 a 1, dependiendo de las características del suelo y la vegetación del área (Tabla I). Generalmente se suele usar un

valor de L igual a 0,5, pero en algunos casos puede ser necesario ajustar ese valor para obtener resultados más precisos dependiendo el objetivo de estudio. El rango del SAVI está entre -1.5 y 1.5. Considerando a L con el valor 0,5; relativo a áreas donde la cubierta de dosel es baja (< 40 %) y la superficie del suelo está desnuda, donde la reflectancia del brillo en los espectros de la longitud de onda rojo e infrarrojo cercano puede afectar significativamente los valores del índice de vegetación.

Tabla I. Índices espectrales aplicados sobre las imágenes satelitales. Fuente: Elaboración propia de los autores

Índice espectral	Calculo	Calculo con S2 - A
NDVI	$\frac{NIR + RED}{NIR - RED}$	$\frac{B8 + B4}{B8 - B4}$
NDWI	$\frac{GREEN + NIR}{GREEN - NIR}$	$\frac{B3 + B8}{B3 - B8}$
BSI	$\frac{(RED + SWIR) - (NIR + BLUE)}{(RED + SWIR) + (NIR + BLUE)}$	$\frac{(B4 + B5) - (B8 + B2)}{(B4 + B5) + (B8 + B2)}$
SAVI	$\frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED + L) * 1 * L}$	$\frac{(B8 - B4)}{(B8 + B4 + 0.5) * 1 * 0.5}$

Se aplicó el algoritmo Random Forest (RF) ha surgido como una herramienta en el campo de la clasificación de coberturas del suelo, ofreciendo una metodología robusta y eficiente para la identificación y categorización de diferentes tipos de superficies terrestres a partir de datos de imágenes satelitales. Este enfoque, basado en la construcción de múltiples árboles de decisión y la combinación de sus predicciones, ha demostrado ser altamente efectivo en una variedad de aplicaciones ambientales y geoespaciales. El RF se basa en la combinación de múltiples arboles de decisión independientes para alcanzar un solo resultado. Cada árbol se construye utilizando un conjunto diferente de variables predictoras y un subconjunto aleatorio de observaciones, lo que permite capturar la variabilidad y la complejidad de los datos de entrada. Una

vez contruidos los árboles, el RF combina sus predicciones mediante votación o promediado, generando una clasificación final que integra la información de todos los árboles.

Una de las principales ventajas del RF es su capacidad para manejar conjuntos de datos grandes y complejos, así como para lidiar con problemas de sobreajuste y alta dimensionalidad. Además, el RF es altamente flexible y se adapta a una variedad de escenarios y condiciones ambientales, lo que lo hace adecuado para su aplicación en diferentes contextos geográficos y ecológicos. En el contexto de la clasificación de coberturas del suelo, el RF ha demostrado ser especialmente útil debido a su capacidad para manejar datos multispectrales y multitemporales obtenidos de imágenes de satélite y otros sensores remotos. Al aprovechar la información espectral, espacial y temporal disponible en estas imágenes, el RF puede identificar y distinguir entre diferentes tipos de cobertura del suelo, como vegetación, agua, suelo desnudo y áreas urbanizadas, con una precisión y eficiencia significativas.

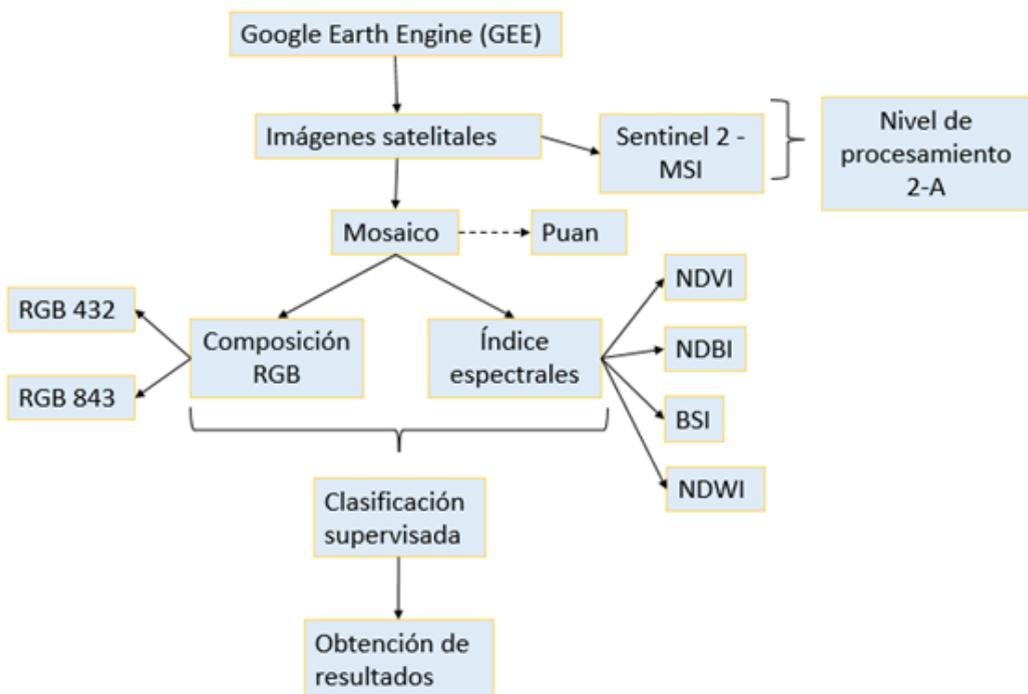


Fig. 3. Diagrama de flujo de método aplicados. Fuente: Elaboración propia de los autores.

El procesamiento y análisis de datos se llevó a cabo con Google Earth Engine (GEE) (Figura 3), una plataforma para el análisis geoespacial en la nube. GEE permite la integración de múltiples fuentes de datos y proporciona herramientas avanzadas para el procesamiento de imágenes, facilitando el manejo de grandes volúmenes de datos y el análisis temporal y espacial.

RESULTADOS

El estudio revela, para la temporada estival (figura 5 y 5.1), la prevalencia de la cobertura de pastizal, ocupando aproximadamente el 78% de los píxeles en el área de estudio. A pesar de que la región está dedicada principalmente a la agricultura de secano, durante la temporada analizada, la mayoría de las parcelas permanecen sin cobertura tras la cosecha de cultivos gruesos/finos, lo cual explica el predominio del pastizal sobre la tierra de cultivo y representa apenas un 1.7%.

En relación con la cobertura de planta urbana, se consideró la posibilidad de que incluya píxeles de suelo desnudo, además de los propios centros poblados del partido. Sin embargo, estos últimos consisten mayormente en localidades pequeñas, con pocas clasificadas como ciudades según criterios demográficos del INDEC. Asimismo, la densa presencia de arbolado público dificulta la obtención de muestras representativas. Este análisis permite explicar la presencia significativa de la cobertura de monte (13.7%), la cual, si bien prevalece en zonas rurales, también se encuentra en áreas urbanas, rodeando los cascos de estancias y ubicaciones similares.

Por último, el área de estudio se encuentra en una cuenca fluvio lacustre, donde predominan las pequeñas cuencas de drenaje. Los cuerpos de agua representan el 0.8% de los píxeles, mientras que las salinas ocupan el 0.2%. Sin embargo, las áreas húmedas tienen una mayor cobertura, alcanzando el 3%. Esto podría atribuirse a la prolongada sequía que afecta a la región en los últimos años y al consiguiente desecamiento de lagunas, lo que resulta en suelos anegados con o sin una película de agua superficial.

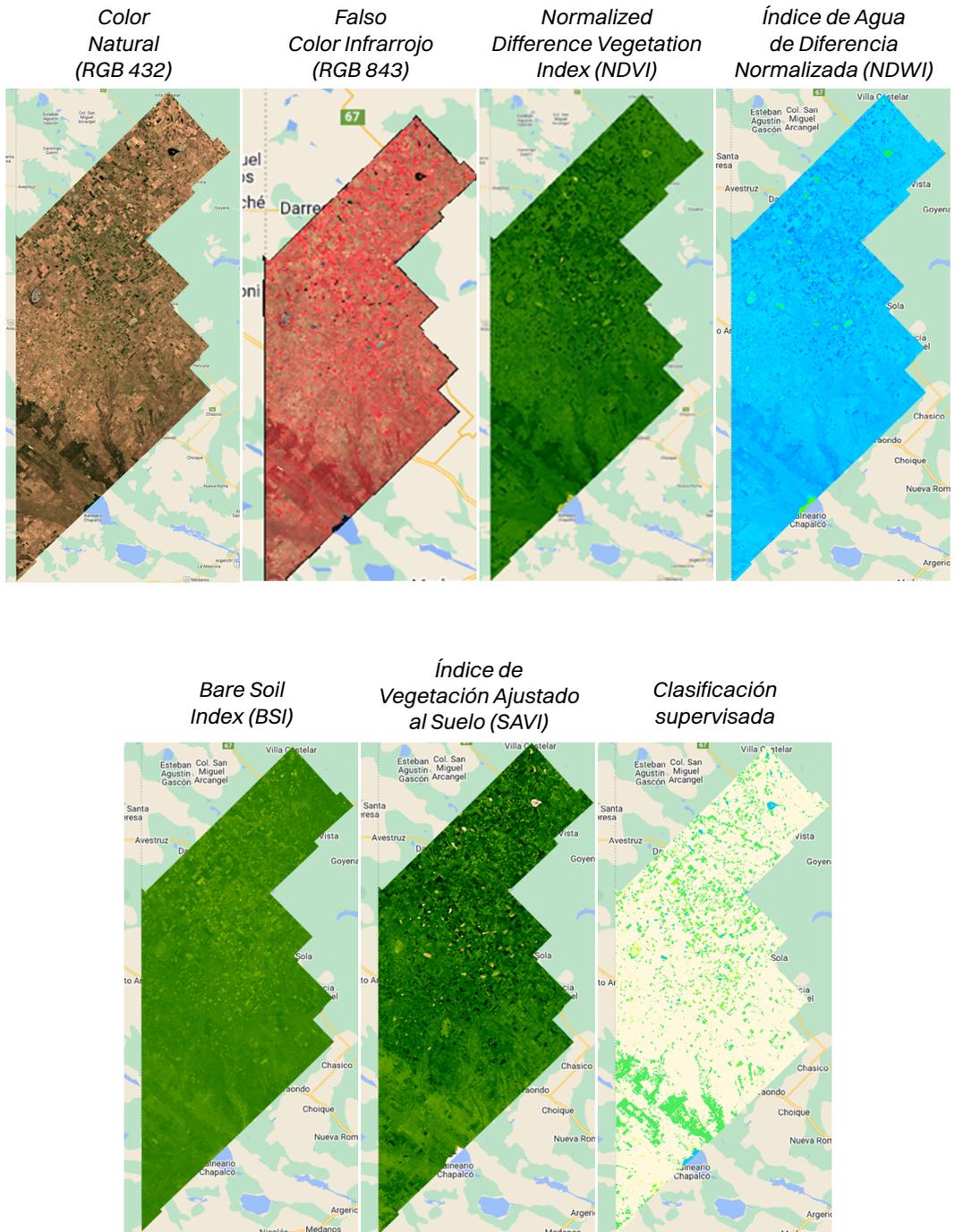


Fig. 4. Composiciones de bandas, índices espectrales y clasificación supervisada resultante, de la temporada estival. Fuente: Elaboración propia de los autores.

Clase	N° de clase	Porcentaje de píxeles (%)
Cuerpo de agua	1	0,8601
Monte	2	13,7051
Tierras para cultivo	3	1,74857
Humedal	4	3,05491
Salinas	5	0,25024
Pastizal	6	78,3612
Planta urbana	7	2,01885

Fig. 4.1. Estadísticas de la clasificación supervisada de la temporada estival. Fuente: Elaboración propia de los autores

Durante la temporada invernal (figuras 4 y 4.1), se mantiene una prevalencia significativa de la cobertura de pastizales, que abarcan el 47% de los píxeles del partido en estudio. Este dominio de los pastizales está relacionado con las condiciones climáticas de la región, que favorecen el crecimiento de especies herbáceas adaptadas al frío. A continuación, las tierras destinadas a cultivo ocupan el 23% de los píxeles, reflejando el inicio de la siembra de la cosecha fina, predominantemente trigo y otros cereales de invierno.

La tercera cobertura más extensa corresponde a los montes, que cubren el 18% de los píxeles. Este tipo de vegetación, compuesta por árboles y arbustos nativos, se beneficia del incremento en la precipitación durante el invierno, lo que favorece su expansión y densificación. En cuanto a los cuerpos de agua, estos ocupan un 10% de los píxeles, una cifra que se ve incrementada debido a la mayor acumulación de agua en depresiones, lagunas, bañados y humedales, típicos de esta época del año. Este fenómeno también contribuye a la proliferación de vegetación ribereña y asociada a zonas húmedas.

Un aspecto notable es la reducción de la cobertura relacionada con las áreas urbanas. Aunque los píxeles correspondientes a las localidades existentes dentro del partido se mantienen estables, se observa una disminución en los píxeles asociados a suelos descubiertos. Esto se debe al incremento de la cobertura de montes y tierras de cultivo, que tienden a colonizar estas áreas, reduciendo la exposición del suelo.

Este análisis no solo resalta la dinámica estacional de las coberturas del suelo, sino que también subraya la influencia de factores climáticos,

como la precipitación, en la configuración del paisaje. Además, evidencia cómo las actividades agrícolas y los procesos naturales interactúan en la conformación de las coberturas del suelo durante el invierno, proporcionando información valiosa para la gestión del territorio y la planificación del uso del suelo en la región.

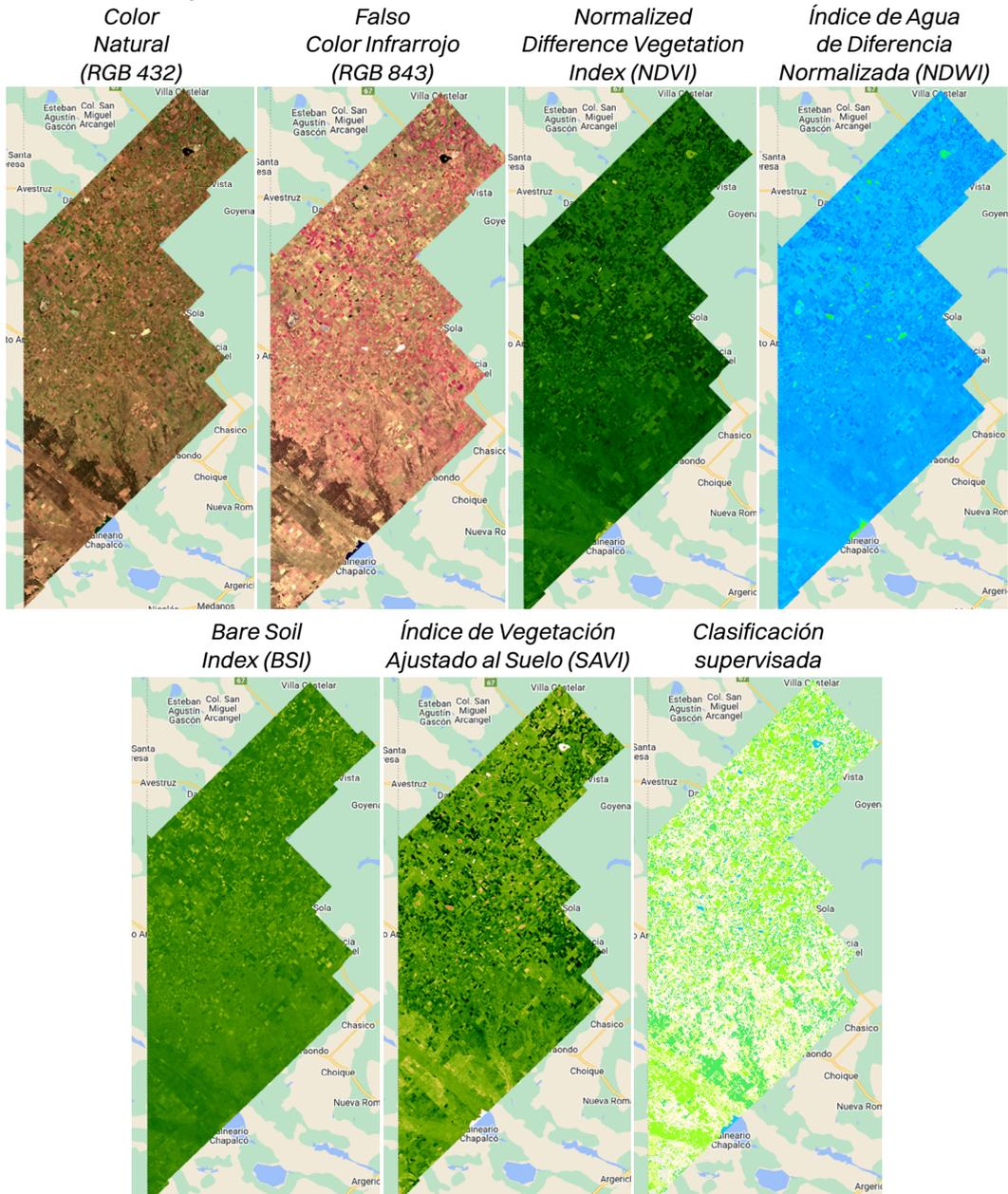


Fig. 5. Composiciones de bandas, índices espectrales y clasificación supervisada resultante, de la temporada invernal. Fuente: Elaboración propia de los autores.

Clase	N° de clase	Porcentaje de pixeles (%)
Cuerpo de agua	1	0,81155
Monte	2	18,1074
Tierras para cultivo	3	23,2577
Humedal	4	8,72414
Salinas	5	0,26191
Pastizal	6	46,8643
Planta urbana	7	1,77189

Fig. 5.1. Estadísticas de la clasificación supervisada de la temporada invernal. Fuente: Elaboración propia de los autores.

DISCUSIÓN

El partido de Puan pertenece a la provincia fitogeográfica “del espinal” y “pampeana” (Cabrera, 1976). Presenta una mezcla de arbustos perennifolios, característicos del oeste, junto con los pastizales de gramíneas bajas y herbáceas predominantes en el este, no solo define la estructura ecológica del área, sino que también influye en los procesos hidrológicos y biogeoquímicos de los humedales. La persistencia de estas formaciones vegetales, como los montes de arbustos perennifolios asociados con vegetación psammófila en áreas arenosas y halófilas en depresiones salinizadas (Navarro, 2002).

Al ser un área dedicada a la producción agrícola, en las últimas décadas, la conversión de tierras para cultivo, junto con la intensificación gradual de la agricultura en tierras ya cultivadas, comenzó a reemplazar las tierras naturales, ganaderas y mixtas por estos sistemas agrícolas, reduciendo significativamente la fitogeografía nativa de la región (Paruelo *et al.*, 2006; Frank, 2014; Somoza, 2023).

En lo que refiere a la demografía del partido, dentro de las 17 localidades se registró una población de 16.133 habitantes, continuando con la tendencia general del partido de crecimiento paulatino entre períodos intercensales (Indec, 2022). Esto se traduce en destinar mayor

parte de los suelos a continuar con el tendido de la planta urbana, lo cual significa destinar suelo potencialmente productivo a la expansión urbana de las localidades (Buzai, 2016).

Esta región está conformada por diferentes cuencas originada por procesos de deflación eólica, que actúan sobre suelos caracterizados por un material originario eólico fino, aluvial fino y eólicos arenosos (Pereyra, 2012). A su vez, presenta relieves suavemente y favorecidos por una baja energía morfogenética del relieve (Pereyra, 2012a), que formaron a lo largo de la historia los diferentes cuerpos de agua del partido. Los mismos se componen de laguna, lagos, bañados, chacras, humedales (Geraldí, 2011). Estos presentan una variabilidad espacial sociedad a las variaciones en las condiciones climáticas, específicamente la temperatura y las precipitaciones (Vidal Quini *et al.*, 2023).

REFLEXIÓN FINAL

El trabajo realizado ofrece una comprensión profunda de las coberturas del suelo en el partido de Puan, subrayando la importancia crucial de conocer la distribución y el estado de estos recursos naturales. Este conocimiento es fundamental para la gestión efectiva y la planificación territorial en la región. En un contexto donde los recursos naturales son cada vez más limitados y las presiones sobre el uso del suelo son crecientes, contar con información precisa y detallada permite a los tomadores de decisiones implementar estrategias más sostenibles y adaptativas.

El uso del algoritmo Random Forest ha demostrado ser una herramienta valiosa en este proceso, especialmente en un entorno como el Sudoeste bonaerense, donde las coberturas de suelo presentan respuestas espectrales similares, lo que dificulta su diferenciación. La capacidad de este algoritmo para trabajar con árboles de decisión y mejorar la precisión en la clasificación es una ventaja significativa en la discriminación de coberturas. Esto se debe a que Random Forest, al

combinar múltiples árboles de decisión, reduce la varianza y aumenta la estabilidad y la exactitud de los resultados, lo que es crucial para manejar la complejidad inherente a los datos de cobertura del suelo.

Además, la aplicación de este método no solo permite una mejor comprensión de la situación actual, sino que también sienta las bases para futuros estudios y aplicaciones en la región. La mejora en la exactitud de la clasificación puede facilitar la identificación de cambios en el uso del suelo a lo largo del tiempo, proporcionando datos valiosos para la evaluación de políticas de conservación y desarrollo sostenible. En resumen, los resultados obtenidos destacan la relevancia de utilizar técnicas avanzadas de clasificación como Random Forest para el análisis de coberturas del suelo, y su implementación podría ser extrapolable a otras áreas con características similares, contribuyendo así a un manejo más informado y eficiente del territorio.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Todos los autores realizaron el diseño metodológico, la escritura, revisión y formateo del artículo.

BIBLIOGRAFÍA

- Arias, F. C., Saucedo, G. I., & Cardozo, O. D. (2019). Las coberturas de la tierra en el Departamento Almirante Brown (Chaco). Una comparación entre los años 2000 y 2016.
- Barragán, F. G., & Geraldi, A. M. (2018). Aplicación de teledetección para la determinación de zonas inundadas en la llanura Pampeana de Argentina. X Congreso Internacional Geomática 2018. <http://www.informaticahabana.cu/sites/default/files/ponencias2018/GEO143.pdf>
- Buzai, G. D. (2018). Crecimiento urbano y potenciales conflictos entre usos del suelo en el municipio de Luján Cuadernos Geográficos 57(1), 155-176. DOI: <http://dx.doi.org/10.30827/cuadgeo.v57i1.5656>

- Cabrera, A. L. (1976). Territorios fitogeográficos de la República Argentina. *Boletín de la sociedad Argentina de Botánica*, 4(1-2).
- Cardozo, O. D., Vera, C. A., & Godoy, R. G. (2021). Detección de cambios en las coberturas de la tierra en el gran Resistencia entre el 1990 y 2020.
- Chuvieco Salinero, E. (2008). Teledetección ambiental: la observación de la Tierra desde el espacio.
- Copernicus Dynamic Land Cover (CDLC). Disponible en: <https://land.copernicus.eu/en/products/global-dynamic-land-cover>
- Eraso Terán, O. H., Badia Perpinyà, A., Gisbert Traveria, M. (2022). Google Earth Engine aplicado al monitoreo de superficies quemadas y cambios de coberturas y usos del suelo, *GeoFocus*, *Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 29, 89-113. <https://dx.doi.org/10.21138/GF.764>
- Fernández-Fierro, A. A., Rosero-Erazo, C. R., Beltrán-Dávalos, A. A., & Echeverría-Guadalupe, M. M. (2020). Caracterización y dinámica de la cobertura de suelo mediante Teledetección: caso de estudio volcán Tungurahua, Ecuador. *Dominio de las Ciencias*, 6(2), 906-938.
- Frank, F., Ricard, F., & Viglizzo, E. (2014). Cambios en el uso de la tierra y emisión de gases invernadero. PASCAL M, ZUBILLAGAM, TABOADA M. *Suelos, Producción Agropecuaria y Cambio Climático. Avances en Argentina*. 1st ed. Buenos Aires: Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación.
- Geraldi, A. M., Piccolo, M. C., & Perillo, G. M. E. (2011). El rol de las lagunas bonaerenses en el paisaje pampeano. *Revista Ciencia Hoy*, 21(123), 16-22. <http://www.cienciahoy.org.ar/ch/ln/hoy123/lagunas.htm>
- Global Land Analysis and Discovery (GLAD). Disponible en: <https://glad.umd.edu/>
- Instituto Nacional de Estadística y Censo (INDEC). Datos de Censo Nacional 2022.

- Landsat Soil Adjusted Vegetation Index (2023). Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS).
- McFeeters, S.K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *Int. J. Rem. Sens.*, 17(7), 1425-1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
- Molo, C. X., & Cardozo, O. D. (2021). Análisis de la dinámica de las coberturas de la tierra en el este chaqueño entre 2015 y 2019. *Geográfica digital*, 18(36), 135-148.
- Nguyen, C. T., Chidthaisong, A., Kieu Diem, P., & Huo, L. Z. (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.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). 2022
- OSM Land Use/Land Cover. Disponible en: <https://osmlanduse.org>
- Paruelo, J. M., Guerschman, J. P., Pineiro, G., Jobbagy, E. G., Verón, S. R., Baldi, G., & Baeza, S. (2006). Cambios en el uso de la tierra en Argentina y Uruguay: marcos conceptuales para su análisis. *Agrociencia Uruguay*, 10(2), 47-61.
- Pereyra, F.X (2012) "Suelos de la Argentina: Geografía de suelos, factores y procesos formadores." SEGEMAR. Instituto de Geología y Recursos Naturales. ANALES N° 50. ISSN 0328-2325.
- Pereyra, F.X (2012a) "Geomorfología de la Provincia de Buenos Aires." SEGEMAR. Dirección de Geología Ambiental y Aplicada. Serie Contribuciones Técnicas Ordenamiento territorial N°10. ANALES N° 50. ISSN 0328-9052
- Phan, T. N., Kuch, V., & Lehnert, L. W. (2020). Land cover classification using Google Earth Engine and random forest classifier—The role of image composition. *Remote Sensing*, 12(15), 2411.

- Ramírez, M., Martínez, L., Montilla, M., Sarmiento, O., Lasso, J., & Díaz, S. (2020). Obtención de coberturas del suelo agropecuarias en imágenes satelitales Sentinel-2 con la inyección de imágenes de dron usando Random Forest en Google Earth Engine. *Revista de Teledetección*, (56), 49-68.
- Saucedo, G. I., Cardozo, O. D., & Bondar, C. E. (2021). Análisis multitemporal de coberturas de la tierra en el Parque Nacional El Impenetrable, Provincia del Chaco, 2000-2019.
- Somoza, A., & Vázquez, P. (2023). Variación espacio temporal del stock de carbono orgánico y su relación con los cambios en el uso del suelo. Partido de Tandil, Región Pampeana Austral, Argentina. *Revista Geográfica de América Central*, (70), 476-513.
- Tobar-Díaz, R., Gao, Y., Mas, J. F., & Cambrón-Sandoval, V. H. (2023). Clasificación de uso y cobertura del suelo a través de algoritmos de aprendizaje automático: revisión bibliográfica. *Revista de Teledetección*, (62), 1-19.
- Vida, N. M., & Geraldi, A. M. (2021). Sinergia de imágenes Sentinel 1 y Sentinel 2 A Cuadernos Geográficos 60(3), 233-252. <http://dx.doi.org/10.30827/cuadgeo.v60i3.18039>
- Vidal Quini, N. E. & Geraldi, A. M. (2023). Metodología para el análisis de la frecuencia de cuerpos de agua someros en la región pampeana, Argentina. *Investigaciones Geográficas*. Advance online publication. <https://doi.org/10.14198/INGEO.23410>
- Y. Zha, J. Gao & 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. <http://dx.doi.org/10.1080/01431160304987>