

Algoritmos de clasificación automática para el ordenamiento territorial de los bosques nativos de la provincia de Buenos Aires

RAFAEL GRIMSON^{1,✉}; FACUNDO SCHIVO¹; JUAN GOYA²; MARCELO ARTURI²; MARÍA R. DERGUY²; MARTÍN SANDOVAL²; SILVIA TORRES ROBLES³; LAURA B. RODRÍGUEZ³ & PAULA PRATOLONGO⁴

¹Instituto de Investigación e Ingeniería Ambiental (IIIA-3iA), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Universidad Nacional de General San Martín (UNSAM), Ciudad de Buenos Aires, Argentina. ²Laboratorio de Investigación de Sistemas Ecológicos y Ambientales (LISEA), Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata (UNLP), La Plata, Buenos Aires, Argentina. ³Universidad Nacional de Río Negro (UNRN), Centro de Estudios Ambientales desde la Norpatagonia (CEANPa), Viedma, Río Negro, Argentina. ⁴Centro de Recursos Naturales Renovables de la Zona Semiárida (CERZOS), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Universidad Nacional del Sur (UNS), Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina.

RESUMEN. El objetivo de este trabajo es actualizar y mejorar la cartografía existente sobre la distribución espacial de los bosques nativos de la provincia de Buenos Aires. Se desarrolló en el marco de un proyecto de transferencia ejecutado por investigadores del sistema científico tecnológico nacional para la Dirección de Bosques del Ministerio de Ambiente de la Provincia de Buenos Aires. El proyecto se enfocó en diseñar y llevar adelante una metodología para identificar y delimitar coberturas de bosque nativo uniformes para toda la provincia. Para actualizar la cartografía se usó una combinación de información relevada a campo con la interpretación visual de series multitemporales de imágenes ópticas de alta resolución, generalizada usando algoritmos de aprendizaje automático alimentados con información derivada de series de imágenes satelitales multiespectrales Sentinel-2. Los productos obtenidos se evaluaron por medio de la matriz de contingencia calculada a partir de datos etiquetados a campo. Se detalla la metodología utilizada para la clasificación automática, incluyendo la de etiquetado de puntos de entrenamiento, la información espectral empleada para alimentar los clasificadores, la selección de la metodología de clasificación en sí, los detalles del posprocesamiento para cada formación boscosa y la evaluación de los productos finales obtenidos. La delimitación obtenida excluye 235182 ha de las 968397 ha del mapeo vigente —que consideramos no correspondientes a bosque nativo— e incorpora 187512 ha de bosque nativo que no habían sido mapeadas antes. Así, la superficie total de bosque nativo mapeada en la provincia se redujo en 4.9%. La evaluación, realizada mediante 719 puntos etiquetados a campo, asigna una exactitud global de 0.89 y un índice kappa de 0.85 a la clasificación obtenida. Esto indica que la metodología propuesta es adecuada para delimitar bosques nativos en la provincia.

[Palabras clave: Delta, Caldenal, Monte, Talares de Barranca, Talares del Este, Bosque Ribereño, Sentinel-2]

ABSTRACT. The objective of this work is to update and improve the existing cartography on the spatial distribution of native forests in the Buenos Aires province, Argentina. It was developed within the framework of a project executed by researchers of the national scientific and technological system for the Dirección de Bosques of the Ministerio de Ambiente de la Provincia de Buenos Aires, focusing on the design and execution of a uniform methodology for the identification and delineation of native forest covers for the entire province. The cartographic update used a combination of field-collected information, complemented with visual interpretation of multitemporal series of high-resolution optical images, generalized using machine learning algorithms fed with information derived from Sentinel-2 multispectral satellite image series. The products obtained were evaluated using metrics derived from the contingency matrix, calculated from field-labeled data. The methodology used for automatic classification is detailed, including the methodology for labeling training points, the spectral information used to feed the classifiers, the selection of the classification methodology itself, as well as the details of the post-processing procedure applied to each specific forest formation and the evaluation of the final products obtained. The delineation obtained excludes 235182 ha from the 968397 ha of the current map, which we consider to not correspond to native forests, and incorporates 187512 ha of native forests that had not been previously mapped, reducing the total mapped area of native forests in the province by 4.9%. The evaluation, carried out with 719 field-labeled points, assigns an overall accuracy of 0.89 and a kappa index of 0.85 to the classification obtained, indicating that the proposed methodology is suitable for the delineation of native forests in the province.

[Keywords: Delta, Caldenal, Monte, Talares de Barranca, Talares del Este, Bosque Ribereño, Sentinel-2]

INTRODUCCIÓN

Los bosques nativos de la Argentina sufren una marcada pérdida de superficie. Entre otros factores, esto se debe a la expansión de la actividad agropecuaria, a los incendios y a la sobreexplotación del recurso forestal (Peri et al. 2021). Para controlar esta situación, las regulaciones del uso y manejo de los bosques conforman un factor clave (Stickler et al. 2013). Los organismos públicos nacionales y provinciales enfrentan el desafío de diseñar instrumentos de gestión ambiental eficientes para identificar los bosques nativos y regular su uso de forma sostenible (Mónaco et al. 2020). La Ley General del Ambiente (2002) define el ordenamiento territorial como un proceso que tiene en cuenta múltiples aspectos de la realidad a diferentes escalas para asegurar el uso adecuado de los recursos naturales en términos productivos, garantizando una degradación mínima. En este contexto, desde el año 2007, la legislación nacional argentina establece los presupuestos mínimos de protección ambiental para el enriquecimiento, la restauración, la conservación, el aprovechamiento y el manejo sostenible de los bosques nativos, así como criterios de sostenibilidad ambiental para zonificar territorialmente el área de los bosques nativos existentes en cada jurisdicción de acuerdo a tres categorías de conservación diferentes (Ley Nacional N°26331). El Ordenamiento Territorial de los Bosques Nativos (OTBN) es un instrumento de la política y de gestión ambiental para la planificación del manejo y la conservación de estos ecosistemas. La implementación de estos instrumentos depende del suministro adecuado de información geográfica sobre la cobertura y el cambio de uso del suelo (Potapov et al. 2022).

En el caso de la provincia de Buenos Aires, el OTBN vigente fue realizado durante el año 2014 y aprobado por la Ley Provincial 14888 (2017) en base a diversos trabajos previos con metodologías diversas. Este OTBN identifica cinco formaciones boscosas de diferentes características: Bosques del Delta, Talar de Barranca, Bosque Ribereño, Talar del Este y Caldenal y Monte, que cubren en conjunto 969943 ha en la provincia. En la formación Bosques del Delta, los bosques nativos se asientan sobre albardones, espiras de meandro, viejos cordones de origen marino y medias lomas entre el albardón y el pajonal. En los albardones se desarrollan el Monte Blanco y el Bosque de Albardón. Algunas de

sus especies características son *Ocotea acutifolia* (Nees) Mez (laurel criollo), *Nectandra falcifolia* Nees J.A. Castigl. (laurel de río), *Citharexylum montevidense* (Spreng.) Mold. (tarumá) y *Blepharocalyx salicifolius* (Kunth) O. Berg (anacahuita). Actualmente, esta comunidad es relictual y se incorporaron elementos exóticos como *Ligustrum lucidum* W.T. Aiton (ligustro) y *Ligustrum sinense* Lour. (ligustrina). En el extremo norte del delta bonaerense, los bosques están compuestos por *Salix humboldtiana* Willd. (sauce) y *Tessaria integrifolia* L. (aliso), las que forman asociaciones pioneras en bancos o en las orillas arenosas de ríos y arroyos. En las medias lomas se desarrollan bosques de *Erythrina crista-galli* L. (ceibo), también denominados ceibales. Los Talares de Barranca, ubicados en el norte bonaerense, presentan una riqueza importante de especies de flora vascular nativa. Numerosas formas de porte arbóreo componen estos bosques; entre otros, *Celtis ehrenbergiana* Gillies (tala), *Vachellia caven* (Molina) Seigler and Ebinger (espinillo) y *Schinus longifolius* (Lindl.) Speng. (molle). El Bosque Ribereño, en su distribución más austral, presenta comunidades edáficas con predominio de *Ocotea* sp. y *Nectandra* sp. (laureles), *Allophylus edulis* (A. St.-Hil.) Radlk (chal chal) y *B. salicifolius* (anacahuita). En las zonas elevadas es frecuente encontrar especies tradicionalmente cultivadas como *Salix* spp. (sauces), *Populus* spp. (álamos) y *Eucalyptus* spp. (eucaliptos). En esta región se encuentran especies exóticas invasoras como *L. lucidum*, *L. sinensis* y *Acer* sp. (arce). Los Talares del Este se caracterizan por las asociaciones de *C. ehrenbergiana* y *Scutia buxifolia* Reissek (coronillo). También es común encontrar en toda el área de distribución *Jodina rhombifolia* (Hook. and Arn.) Reissek (sombra de toro) y *V. caven*. Finalmente, la formación Caldenal y Monte se caracteriza por la presencia de *Neltuma caldenia* (Burkart) C.E. Hughes y G.P. Lewis (caldén), que forma bosques xerófilos más o menos densos. Como árboles secundarios se encuentran *Neltuma flexuosa* (DC.) C.E. Hughes and G.P. Lewis (algarrobo dulce), *G. decorticans* y *J. rhombifolia*. Hacia el SO, la estructura y la composición varía hacia sistemas dominados por arbustos, con mayor cobertura y altura que el Monte típico, y con bosques aislados de *G. decorticans*.

La reglamentación de la Ley 26331 indica que el OTBN se debe actualizar cada cinco años. Este trabajo se da en el marco de dicha actualización y deriva de un proyecto de transferencia llevado adelante por investigadores del sistema científico

tecnológico nacional para la Dirección de Bosques del Ministerio de Ambiente de la Provincia de Buenos Aires, con el objetivo de actualizar y mejorar la cartografía existente sobre la distribución espacial de los bosques nativos de la provincia de Buenos Aires (PBA), en el marco del Proyecto Fortalecimiento de la Política Ambiental de la Provincia de Buenos Aires, del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (Proyecto PNUD ARG/22/008). El trabajo se realizó entre junio y diciembre de 2023 y dio como resultado una versión actualizada de la delimitación de los bosques nativos provinciales (Figura 1), una valoración cuali-cuantitativa de los 10 criterios de sustentabilidad ambiental (CSA) enunciados en el Anexo II de la Ley N° 14888 y su integración mediante una

metodología multi-criterios. A partir de esta integración y la ponderación posterior se obtuvo una clasificación de los bosques en las tres categorías de conservación indicadas por la Ley: bajo (categoría III, verde), mediano (categoría II, amarillo) y alto (categoría I, rojo), de acuerdo con lo pautado por el COFEMA (COFEMA, Res. N° 236/12). Los resultados alcanzados fueron presentados en una base de datos geográfica, adjunta al informe técnico final (Grimson et al. 2023). Los siguientes pasos de la actualización del OTBN incluyen la realización de un proceso participativo. El trabajo se realizó con diversas herramientas y fuentes de información para desarrollar una metodología uniforme de identificación y delimitación de coberturas de bosque nativo para toda la provincial, y para

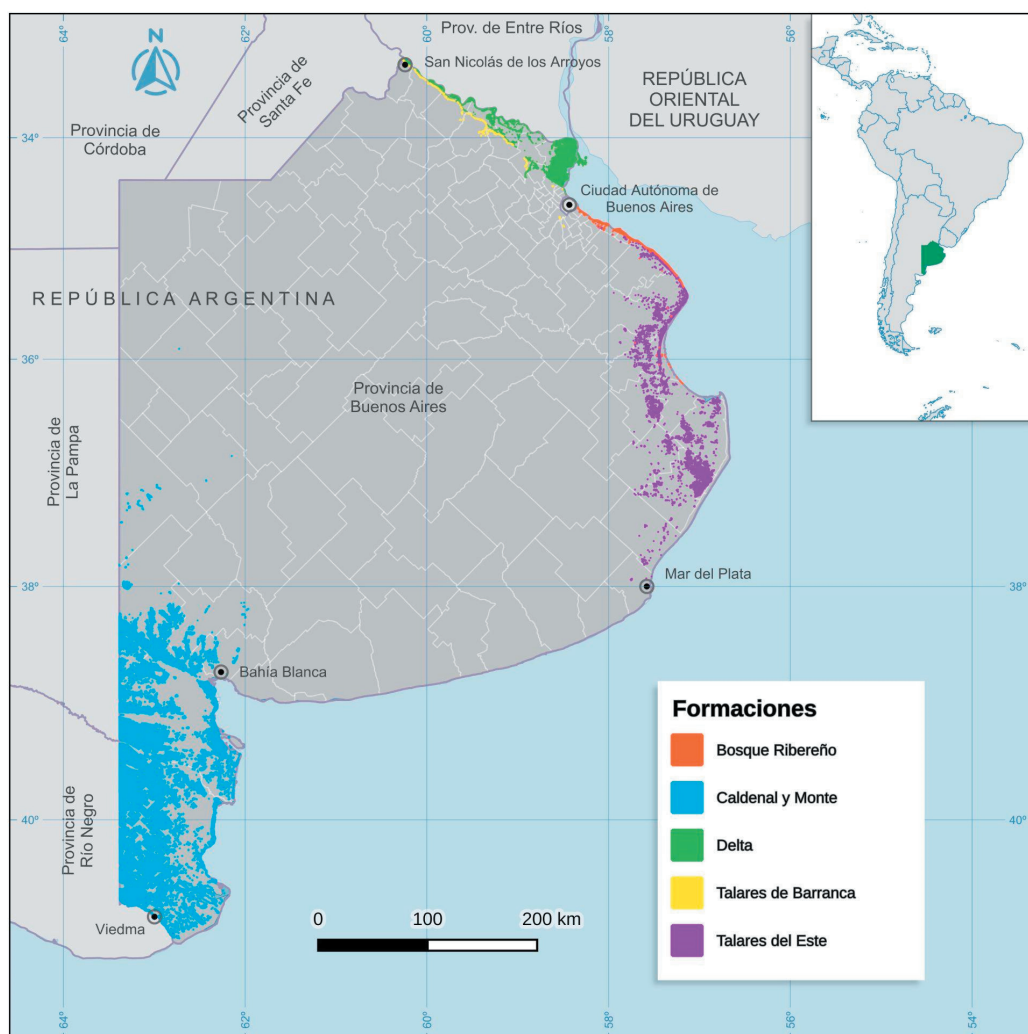


Figura 1. Ubicación de las cinco formaciones de bosque nativo de la provincia de Buenos Aires según la delimitación obtenida en el presente trabajo.

Figure 1. Location of the five native forest formations in the province of Buenos Aires as outlined by the present work.

llevarla adelante. Los objetivos específicos responden a dos preguntas básicas de investigación: ¿Existen áreas de bosque nativo que no se encuentran incluidas en el OTBN actual? y ¿Existen sectores mapeados en el OTBN actual que no se corresponden con superficies de bosque nativo? La característica de la metodología propuesta es que se puede mejorar en etapas sucesivas conforme se realicen las audiencias públicas —o nuevas actualizaciones—, y pretende aprovechar la disponibilidad de series de imágenes satelitales que se han incrementado en los últimos años. Este artículo describe las elecciones metodológicas realizadas, así como las dificultades encontradas en el proceso y espera ser un aporte para continuar en el camino de la estandarización metodológica en la actualización de los OTBN en la Argentina.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para la actualización cartográfica se utilizó una combinación de información relevada a campo, complementada con la interpretación visual de series multitemporales de imágenes ópticas de alta resolución,

y generalizada usando algoritmos de procesamiento automático alimentados con información derivada de imágenes satelitales multispectrales Sentinel-2. Los productos obtenidos fueron evaluados calculando las métricas usuales en la disciplina, derivadas de la matriz de contingencia. La identificación y delimitación de las coberturas de bosque nativo en la provincia de Buenos Aires se basó en un algoritmo de clasificación supervisada (Figura 2). Utilizar un clasificador supervisado requiere datos etiquetados, tanto para el entrenamiento como para la evaluación de los resultados. La generación de estos datos etiquetados se describe en la etapa de pre-procesamiento (Figura 2A1 y 2A2). Para poder ejecutar el clasificador también es necesario elegir y generar la información que lo alimente (en nuestro caso, bandas e índices de imágenes satelitales) a partir de la que pueda generalizar los datos etiquetados al resto del territorio. La generación de esta información se describe también en la etapa de pre-procesamiento (Figura 2A3). La elección del algoritmo en sí, el correspondiente ajuste de parámetros del mismo y la forma en que los datos etiquetados se separaron en datos de entrenamiento y de evaluación se describen en la etapa de procesamiento

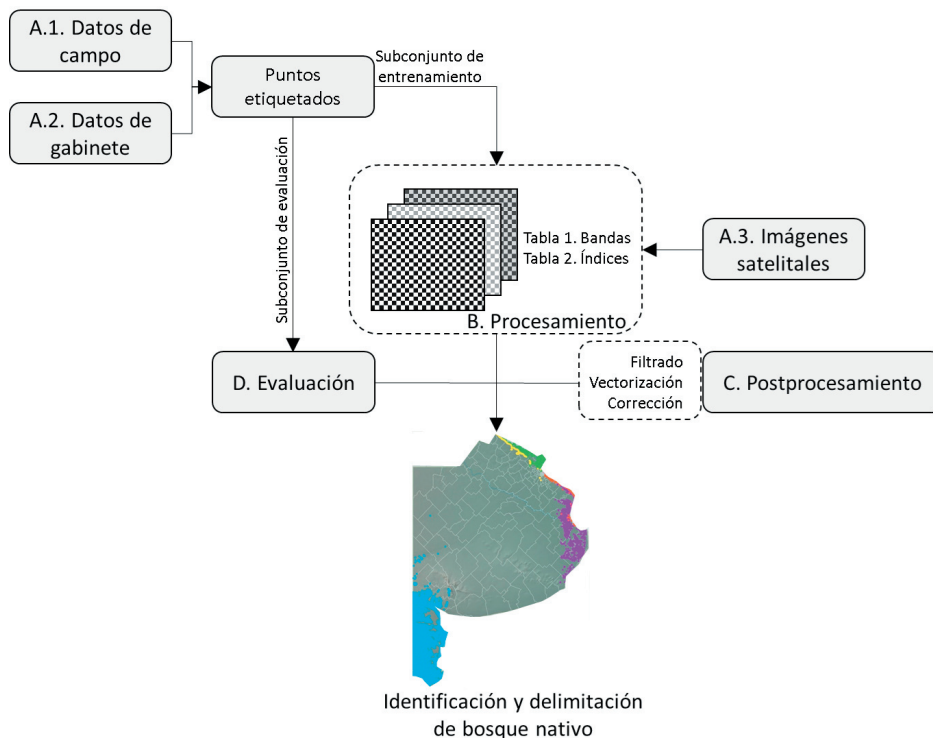


Figura 2. Esquema metodológico propuesto para la identificación y delimitación de las formaciones de bosque nativo presentes en la provincia de Buenos Aires.

Figure 2. Methodological framework proposed for the identification and delineation of the native forest formations present in the province of Buenos Aires.

(Figura 2B). Finalmente, los resultados del clasificador fueron filtrados, vectorizados y corregidos de forma manual en una etapa que denominamos de post-procesamiento (Figura 2C). El producto obtenido fue evaluado en la etapa de evaluación.

Pre-procesamiento

Para etiquetar puntos es necesario definir el conjunto de etiquetas a utilizar. En este trabajo, los clasificadores deben dar como respuesta una clasificación que permita distinguir al menos dos clases fundamentales: Bosque y No-Bosque. Siempre es posible entrenarlos para obtener una clasificación más detallada que refine estas dos clases incorporando otra información presente en cada paisaje. En las pruebas parciales realizadas se obtuvieron mejores resultados al utilizar clasificadores que detectaban clases de información espectralmente homogéneas, por lo que se decidió subdividir estas dos grandes clases en diferentes subclases de cobertura, cuando resultó conveniente, y se las resumió en las dos clases fundamentales al finalizar el proceso. Por este motivo, durante el trabajo de campo se relevó el tipo de cobertura en cada sitio visitado.

1) Relevamiento de datos de campo. Se dedicaron 27 jornadas a los relevamientos de campo con el objetivo de obtener al menos 100 puntos etiquetados *in situ* para cada una de las cinco formaciones boscosas de la provincia. Los recorridos fueron diseñados en gabinete con la prioridad puesta en abarcar la mayor heterogeneidad ambiental y espectral posible, teniendo en cuenta la accesibilidad a los diferentes predios y la optimización de los recorridos. En cada punto relevado se registraron las coordenadas geográficas utilizando un navegador GPS (sistema de posicionamiento global), y se completó una planilla en la que se identificaron el tipo de cobertura (e.g., pajonales, pastizales, plantaciones forestales, ceibales, bosque de albardón, talaes y vegetación leñosa caldenal-monte) y otras variables que no se utilizaron en el proceso de delimitación descrito en este artículo. Cada punto de observación representa una situación homogénea de al menos 50x50 m (25 m en cualquier dirección, desde el punto GPS) y representativa del área. Si las situaciones de control disponibles no alcanzaban esa extensión (como el caso de formaciones con una estructura de desarrollo predominantemente lineal), el tamaño mínimo admisible fue 20x20 m. Las observaciones se

centraron en permitir establecer un tipo de cobertura y la pertenencia —o no— de cada punto a la formación boscosa correspondiente. De este conjunto de puntos etiquetados a campo se extrajo el conjunto de puntos de evaluación, que no fueron utilizados en el entrenamiento.

2) Puntos etiquetados en gabinete. Para contar con un mayor número de puntos etiquetados y cubrir sectores en los que no fue posible acceder, se complementó la base de datos obtenida a campo con puntos etiquetados a partir de series de imágenes en el espectro visible de Google Earth Pro (Google LLC, Mountain View, CA, USA), extrapolando lo observado a campo a otros puntos similares. Esta tarea fue realizada en su totalidad en gabinete, obteniendo puntos etiquetados complementarios para las distintas formaciones boscosas. Estos puntos fueron usados solo para entrenar los algoritmos. El conjunto de puntos relevados a campo, pero no separados como puntos de evaluación, junto con los puntos etiquetados en gabinete fue denominado conjunto de puntos semilla.

3) Imágenes y atributos para la clasificación. Como atributos para las clasificaciones se utilizaron bandas e índices derivados del sensor Sentinel-2 que tienen una excelente cobertura espacial, alta frecuencia de revisita y una óptima resolución espacial para esta tarea (Claverie et al. 2018). El sensor multiespectral a bordo de los Sentinel-2 recolecta información en 13 bandas diferentes. Se sabe que el exceso de información no redundante en una mejor performance de los clasificadores y dificulta la interpretación de los resultados (Lu and Weng 2007). Por esto, no es conveniente alimentar los algoritmos con las 13 bandas y una gran variedad de índices —incluyendo todas las fechas disponibles—, sino reducir este conjunto seleccionando un subconjunto pequeño suficientemente rico. De todas las bandas se eligió trabajar con cinco: las tres del espectro visible (i.e., B4[R], B3[G] y B2[B]), una banda de infrarrojo cercano (B8[NIR]) y una de infrarrojo de onda corta (B11[SWIR]); esta última tiene 20 m de resolución espacial y fue refinada a 10 m, que es la resolución espacial de las demás bandas consideradas. Además, se seleccionaron tres índices que utilizan estas bandas para resaltar información relevante para clasificar coberturas en nuestro contexto: NDVI (Rouse et al. 1973), SAVI (Huete 1988) y MNDWI (Du et al. 2016). Cada uno de estos índices seleccionados ayuda a diferenciar

coberturas, estados fenológicos y cantidad de agua, y su aporte es sustancial en al menos una formación. Se optó por utilizar el mismo conjunto de datos en toda la provincia. De esta forma, para cada píxel, en cada fecha se conservaron ocho bandas: cinco bandas espectrales y tres índices. Con el objetivo de reducir la cantidad de información que alimenta al clasificador, evitar el problema de la presencia de nubes en las imágenes ópticas y de lograr procedimientos simples y replicables se optó por resumir todas las imágenes disponibles para el último año en una imagen resumen de ocho bandas para cada estación. Cada imagen resumen se computó, para cada píxel, cada banda y cada estación como la mediana de todas las imágenes del período. A partir de un script escrito en la plataforma Google Earth Engine (GEE) (Gorelick et al. 2017) se generó, para cada sector de estudio, un cubo de datos (una estructura de datos tridimensional que apila bandas derivadas de información espectral sobre cada punto en el espacio) que cubre dicho sector con una resolución espacial de 10x10 m y contiene información de 32 bandas (la mediana de las 8 bandas consideradas, para cada una de las cuatro estaciones). Para generar este cubo de datos se seleccionaron todas las imágenes de la colección armonizada de Sentinel-2 de la plataforma GEE, calibradas a reflectancia en superficie, correspondientes a las últimas cuatro estaciones que se habían completado al momento de escribir el algoritmo: entre el 21 de junio de 2022 y el 20 de junio de 2023. Luego, excluyendo del análisis los datos con nubes (para cada píxel y cada fecha), se calculó la mediana dentro de cada estación para las bandas e índices seleccionados. De esta manera, se obtuvo una imagen con ocho bandas para cada estación o, de forma equivalente, una imagen de 32 bandas con información del último año. Estas imágenes fueron transformadas linealmente de manera de que las 32 bandas tuvieran media cero y el mismo desvío estándar (15000) para evitar que diferencias de escala se traduzcan en diferentes importancias relativas de los atributos (Müller and Guido 2016). El resultado fue exportado como GEO-TIFF con tipo de dato entero de 16 bits. Estas 32 bandas ecualizadas fueron los atributos utilizados para la clasificación de las coberturas.

4) Generación de polígonos de entrenamiento. En una etapa posterior se expandieron los puntos semilla a polígonos utilizando la herramienta ROI generation del

semi-automatic classification plugin (SCP) (Congedo 2021) de QGIS. El SCP permite crear polígonos —denominados ROI (del inglés, *regions of interest*)— utilizando un algoritmo de región incremental que define un entorno alrededor de un píxel semilla incluyendo los píxeles espectralmente homogéneos en función de los atributos seleccionados (en nuestro caso, las 32 bandas previamente definidas) y un radio espectral determinado. Se definió un radio espectral para cada tipo de cobertura de manera que la herramienta generalice los puntos a polígonos sin incorporar otras coberturas, pero permitiendo abarcar la heterogeneidad espectral de la cobertura en cuestión. Este radio fue calibrado manualmente mediante sucesivas iteraciones hasta lograr polígonos satisfactorios para cada tipo de cobertura.

5) Generación de puntos de entrenamiento.

Como el enfoque de nuestros clasificadores es per-píxel, de estos polígonos se extrajeron puntos de entrenamiento. Para esto, los polígonos de entrenamiento se muestrearon de manera regular, seleccionando un punto cada 30 m tanto en latitud como en longitud; así se obtuvo, en general, un punto cada 900 m² de polígono. Con esta metodología se incrementó un orden de magnitud la cantidad de puntos de entrenamiento con respecto a los puntos semilla y se logró capturar mejor la heterogeneidad espacial de cada tipo de cobertura considerada. El conjunto de puntos así obtenido se denominó conjunto de puntos de entrenamiento.

Procesamiento

1) Algoritmo de clasificación automática. Se evaluaron las opciones de utilizar un enfoque de clasificación per-píxel o uno basado en objetos (Phiri and Morgenroth 2017; Mahdianpari et al. 2020); se eligió la primera opción por ofrecer una flexibilidad mayor y porque los resultados no dependen del algoritmo de segmentación utilizado (Hossain 2019). Como algoritmo de clasificación se decidió utilizar el Random Forest (Bishop 2006) ya que es uno de los de mejor performance para este tipo de tareas (Mahdianpari et al. 2020; Navarro et al. 2022) y ampliamente utilizado en el ámbito forestal y en teledetección por tener la capacidad de trabajar con grandes conjuntos de datos, capturar procesos no lineales y tolerar la multicolinealidad (Piramuthu 2008; González-Roglich and Swenson 2016). Se dividió el territorio

ocupado por las formaciones boscosas de la provincia en tres grandes sectores: un sector ubicado entre la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (CABA) y San Nicolás de los Arroyos, que abarca al Delta del Paraná y sus barrancas incorporando las formaciones Delta y Talaes de Barranca; otro, ubicado al sur de la CABA y hasta las inmediaciones de Mar del Plata, que abarca las formaciones Bosque Ribereño y Talaes del Este, y un tercer sector que abarca desde las inmediaciones de Bahía Blanca hasta la margen norte del Río Negro en el extremo sur de la provincia, que cubre la formación Caldenal y Monte. En cada sector se entrenó y evaluó un clasificador de manera independiente; para esto se seleccionaron las coberturas más relevantes del sector, de manera de entrenar el clasificador con clases espectralmente más homogéneas que Bosque y No-Bosque. Así, las etiquetas utilizadas en cada sector pueden diferir ya que se adaptan al entorno y a la heterogeneidad propia de cada formación boscosa.

2) Ajuste de parámetros y entrenamiento. El conjunto de puntos de entrenamiento fue utilizado integralmente para el entrenamiento final de los clasificadores. Sin embargo, en etapas intermedias, este conjunto fue dividido de manera aleatoria en un 70% de puntos utilizados para realizar entrenamientos parciales y un 30% utilizado para evaluar los resultados intermedios obtenidos. No se detallan estas evaluaciones intermedias ni sus resultados parciales, pero es importante mencionar que se utilizaron para seleccionar los atributos que alimentan los clasificadores (bandas espectrales e índices), así como las etiquetas (que refinan las clases Bosque y No-Bosque) utilizadas en cada sector para entrenarlos, y los parámetros globales de los algoritmos a utilizar. Esta partición en 70% y 30% fue realizada respetando el polígono de origen de los puntos de manera de poner todos los puntos provenientes de cada polígono en uno de ambos conjuntos, y no separarlos. Esta decisión fue tomada para evitar entrenar y evaluar un clasificador con puntos provenientes de un mismo polígono, cuyos valores espectrales están altamente correlacionados por estar espacialmente cerca, situación que podría llevar a un sobreajuste de los clasificadores. Así, las particiones 70-30% fueron realizadas sobre los polígonos de entrenamiento, dando lugar a una partición de los puntos, y no sobre los puntos directamente. Las evaluaciones de los resultados de correr el clasificador seleccionado con el 70% de los datos de entrenamiento y evaluarlo

con el 30% restante fueron denominadas evaluaciones internas y es una primera instancia de evaluación de la calidad del producto raster obtenido directamente de los clasificadores; estos resultados son presentados en el Material Suplementario. Finalmente, los tres clasificadores fueron entrenados con el conjunto de datos de entrenamiento completo y ejecutados en cada uno de los tres sectores, obteniendo un raster con una clasificación binaria para cada sector de estudio. Esta clasificación fue sometida a un post-procesamiento que se describe a continuación y posteriormente evaluada utilizando el conjunto de puntos de evaluación obteniendo la evaluación final del producto.

Post-procesamiento

Al raster con cada pixel clasificado como Bosque o No-Bosque, se le aplicaron filtros multi-escala de manera de obtener áreas coherentes, que satisfagan los criterios establecidos para el OTBN (Resolución 230 del COFEMA 2012). Estos filtros permiten evitar la incorporación de formaciones demasiado pequeñas, así como remover huecos en las formaciones halladas y hallar la conectividad natural de las mismas allí donde exista y los parches boscosos detectados por los clasificadores queden cercanos pero disjuntos. El algoritmo de filtrado fue desarrollado por el equipo de trabajo y está disponible junto con otras herramientas desarrolladas en el marco de este proyecto como plug-in de QGIS para ser utilizado en otros contextos (De Luca and Grimson 2023). Una vez filtrados, los rasters se vectorizaron. La metodología se completó con una revisión por expertos de los polígonos obtenidos por los procedimientos automáticos, utilizando imágenes de alta resolución en Google Earth Pro. Como resultado se obtuvieron los polígonos relativos a cada formación boscosa, que es el producto final del procedimiento. Se detallan estas etapas de post-procesamiento a continuación.

1) Filtrado y vectorización. El procedimiento de clasificación automática produce un raster en el que cada píxel del área de estudio tiene asignada una clase. Como la clasificación es per-píxel, este raster suele detectar sectores aislados a una escala que supera nuestra escala de trabajo: un píxel conteniendo un árbol en medio de un pastizal puede resultar clasificado como bosque, o un claro en medio de un bosque puede resultar clasificado como No-Bosque. Incluso, en algunos casos,

la clasificación de formaciones lineales (como los talares) puede presentar discontinuidades allí donde baja la densidad de árboles y desde el satélite se observan sectores sin vegetación arbórea, a pesar de que la interpretación adecuada es que se trata de una formación lineal con continuidad espacial. Para tratar estas problemáticas se diseñó y aplicó el procedimiento de filtrado multi-escala. El filtro trabaja a cuatro escalas diferentes: radios de 20, 30, 40 y 50 m. Para cada radio se define un umbral entre 0 y 100%, usando típicamente valores cercanos al 50%. Para cada píxel se determina si el área clasificada como área boscosa en los entornos definidos por esos radios supera el umbral correspondiente. Si así fuera, para alguno de los cuatro filtros, se determina que el píxel corresponde a un área de bosque, incluso si no fue así clasificado originalmente. En cambio, si no se supera ninguno de los umbrales, se determina que ese píxel no debe ser considerado bosque, permitiendo remover pequeños sectores aislados. Este filtrado permite quitar el efecto sal y pimienta (Jensen 2016) que resulta de los procedimientos de clasificación con imágenes de alta resolución espacial. Los umbrales fueron calibrados manualmente para cada formación. Finalmente, sobre el resultado de este procedimiento se realizó una vectorización y un posterior suavizado que convierte la clasificación raster en una capa vectorial con polígonos delimitando las formaciones boscosas.

2) Corrección manual. Los polígonos delimitando las formaciones boscosas obtenidos luego del filtrado todavía pueden contener pequeños errores, presentar sectores desconectados o conectar formaciones que deberían estar separadas (e.g., por ser atravesadas por un pequeño arroyo). Estos errores se corrigieron de forma manual editando los vértices de los polígonos por medio de herramientas vectoriales en QGIS a partir de imágenes satelitales de alta resolución en Google Earth Pro y con la ayuda de capas externas (e.g., una capa de macizos forestales o de cursos de agua) que permitan quitar sectores que no corresponde mapear como bosque nativo. Esto permitió realizar ajustes menores y corregir errores allí donde resultó conveniente. Estas correcciones se realizaron luego de vectorizadas las capas y el procedimiento fue diferente para cada formación.

Para la formación Bosques del Delta, en el etiquetado no fue posible diferenciar

espectralmente de una manera satisfactoria los bosques nativos y las forestaciones, por lo que se decidió realizar esa separación en una etapa de post-procesamiento. Por otro lado, se consideró conveniente distinguir a los ceibos dentro de los bosques nativos presentes en el área, ya que presentan un comportamiento espectral diferencial. En una primera etapa entonces, se consideraron dos clases: Ceibal por un lado y Bosque/Forestaciones por el otro. Esta segunda clase puede contener bosques de *Salix humboldtiana* Willd. (sauce) y *Tessaria integrifolia* Ruiz and Pav. (aliso), parches de monte blanco, forestaciones activas o plantaciones abandonadas que son consideradas bosque nativo por la Ley Nacional de Bosques (LNB, N°26331). Por su parte, de la clase No-Bosque se desagregó la subclase Agua, que permite etiquetar los cursos de agua (i.e., Río Paraná, de la Plata, otros ríos y arroyos menores y canales). El resto de las coberturas se agruparon en la clase Otro No-Bosque. Así, las etiquetas consideradas fueron Agua, Ceibal, Bosque/Forestaciones y Otro No-Bosque. Durante el procesamiento manual, luego de obtener el raster proveniente del script en GEE, filtrarlo y vectorizarlo, los polígonos fueron procesados manualmente en QGIS. La primera tarea fue distinguir los bosques nativos de las plantaciones forestales (que, en algunos casos, comparten especies y presentan señales muy similares en el espectro electromagnético). Por esto, luego de obtener los polígonos mencionados, en una primera etapa del post-procesamiento se quitaron los macizos forestales utilizando el mapa de Plantaciones Forestales provisto por la Secretaría de Agricultura Ganadería y Pesca de la Nación (SAGyP 2023). Además, se procedió a remover los principales cursos de agua donde fuera necesario, ya que si bien el clasificador no confunde el agua con otras coberturas, el filtrado en algunos casos incorporó como zona boscosa a pequeños arroyos. Luego se realizó una revisión sistemática de los polígonos obtenidos en Google Earth Pro. Lo primero que se observó fue que quedaron plantaciones forestales dentro de lo mapeado como Bosque, por lo que se procedió a eliminar manualmente estos sectores del mapeo. También se corrigieron los límites de las formaciones donde fue necesario. Por último, los polígonos obtenidos fueron comparados con los del ordenamiento anterior y se detectaron algunas diferencias. Por un lado, el criterio utilizado para definir bosque nativo es más amplio en la actual consultoría, ya que los bosques de albardón

y de media loma del bajo delta fueron excluidos del OTBN anterior, por lo que resulta esperable una mayor cobertura. Pero, por otra parte, se detectaron diferencias en todo el Delta, indicando tanto un incremento como un decremento de la superficie boscosa. Los sectores que no fueron considerados como boscosos por el nuevo mapeo y sí lo eran en el anterior ordenamiento fueron analizados por separado. Si se trata de un sector boscoso o que fue boscoso anteriormente, pero fue desmontado, incendiado, o hubo un cambio en el uso del suelo, se procedió a incorporarlo al nuevo mapeo, tal como indica la LNB. En otros casos, cuando las diferencias pueden atribuirse a diferencias metodológicas o a cambios geomorfológicos en las islas (e.g., erosión fluvial), preservamos los nuevos resultados sobre los anteriores.

Para la formación de Talares de Barranca, los parches boscosos se encuentran en muchos casos como relictos confinados, con una estructura predominantemente lineal de un ancho que puede ser comparable, o incluso inferior, al tamaño del píxel del sensor elegido (10 m). Además, esta formación presenta una gran heterogeneidad espacial y un alto grado de degradación (con invasión de especies exóticas) lo que dificulta el uso de clasificadores automáticos. Por otra parte, su superficie acotada (ocupa 1901 ha, lo que representa el 0.21% de los bosques nativos de la provincia) y el hecho de estar ubicadas en las barrancas permite una revisión manual en profundidad de la misma. Por todo esto se decidió revisar manualmente esta formación sin entrenar algoritmos de aprendizaje automático. Para la revisión manual del sector potencial de esta formación se partió de una capa raster de pendientes derivada de un modelo digital de elevación que permite ubicar espacialmente las barrancas a lo largo de la provincia de Buenos Aires, con sus ingresiones hacia el continente, allí donde desembocan los principales cursos fluviales. Fue comparada con la capa del OTBN anterior que fue revisada por completo en detalle, y contrastada con imágenes previas y actuales de alta resolución. También se realizaron diversos relevamientos a campo que permitieron constatar la heterogeneidad de esta formación.

Dado que las formaciones de Bosque Ribereño y Talares del Este comparten parte de su territorio, su procesamiento se realizó en conjunto, entrenando un mismo clasificador. Por este motivo, la evaluación del clasificador considera ambas formaciones. No se debe

interpretar de esto una intención de asignar una unidad funcional a ambas formaciones; solo es consecuencia de su distribución espacial. Luego de un análisis preliminar de los usos de la tierra más frecuentes en el área de estudio y de algunas pruebas con clasificadores en regiones acotadas, se definieron siete grandes grupos de cobertura: Agua, Ribereño (por la formación de bosque nativo), Talar (por la formación de bosque nativo), Herbácea (que incluye también arbustales y cultivos), Inundable, Forestal (plantaciones forestales) y Urbano (que incluye edificaciones y suelo desnudo). Luego de obtenido, el raster proveniente del script en GEE fue filtrado. El filtro aplicado generó áreas continuas de bosque que responden a la expresión espacial de estas formaciones, generando una clara correspondencia con imágenes de alta resolución y con el OTBN vigente. El producto vectorizado fue procesado de forma manual en QGIS. Para el caso de los bosques ribereños, el procesamiento manual consistió en la exclusión de áreas de plantaciones forestales de igual modo que lo efectuado para la formación Delta. Esto reduce los errores asociados a la confusión espectral entre el bosque nativo y las forestaciones, principalmente de *Salix* spp., de cultivos de mimbre (*Salix viminalis* L.). También se modificaron manualmente los límites de áreas urbanas adyacentes y se rectificaron áreas inundables adyacentes a las áreas de bosque que en determinada época del año son similares espectralmente, en particular para períodos con precipitaciones medias superiores a la media estacional.

Para los bosques de tala del este bonaerense, la edición manual consistió en incluir algunas áreas adyacentes a cordones densos de tala que forman parte de la misma unidad, pero por la resolución espacial de las imágenes Sentinel (10x10 m) no fueron claramente identificadas. En términos generales, para el área comprendida entre los partidos de Magdalena y Castelli, la configuración lineal de los talares del este implicó una revisión exhaustiva de estas formaciones con imágenes de alta resolución. Esta rectificación resultó en una aceptable superposición entre el OTBN actual y el propuesto.

El área geográfica donde se encuentra la formación Caldenal y Monte comprende ~3000000 ha a lo largo de un gradiente geográfico norte-sur de 350 km, que implica diferencias espectrales marcadas en las distintas coberturas. Por este motivo, se entrenaron dos clasificadores diferentes y

se evaluaron los mapas por separado en dos sectores: 1) región norte (comprende los partidos Bahía Blanca, Tornquist, Puán y Villarino), y 2) región sur (abarca el partido de Patagones). Fuera de estos partidos hay pequeñas formaciones que fueron mapeadas manualmente.

Para la formación Caldenal y Monte se decidió incorporar a los puntos de entrenamiento etiquetados como Bosque, tanto situaciones boscosas como situaciones con vegetación leñosa con distinto grado de disturbio, de acuerdo con la definición de bosque nativo previsto por la Ley 14888 de la provincia de Buenos Aires. Los disturbios están relacionados con el fuego y con el uso de maquinarias que buscan reducir la cobertura leñosa como parte de las prácticas de clareo de monte, sobre todo para realizar ganadería extensiva. Por lo tanto, los puntos de entrenamiento etiquetados como bosque representan la variabilidad de situaciones de cobertura leñosa de la región, vinculadas a la dinámica de la vegetación natural. Además de la clase Bosque, para esta región se utilizaron las siguientes etiquetas: Agua, Cultivo bajo riego, Cultivo en seco, Urbano, Vegetación de médanos y Vegetación exótica. En la región sur, además, se diferenció dentro de Bosque una subclase denominada Bosque bajo con arbustal y se incorporaron las clases Pastizal con arbustos aislados, Salinas y Vegetación costera.

Luego de obtener el raster de la clasificación proveniente del script en GEE, su posterior filtrado y vectorizado, los polígonos fueron procesados manualmente en QGIS. Se realizó una revisión sistemática de los polígonos obtenidos, eliminando cascos de estancias, vegetación exótica asociada a caminos y cortinas de estancias, zonas suburbanas y zonas de cultivos. En particular en la zona de la Corporación de Fomento Río Colorado (CORFO) se eliminaron amplias superficies clasificadas como bosque, que en realidad presentaron alta cobertura de vegetación exótica o palustre. También se corrigieron límites de las formaciones, allí donde fuera necesario.

Por último, los polígonos obtenidos fueron comparados con los del ordenamiento anterior y se detectaron algunas diferencias. Los sectores que no fueron considerados como boscosos por el nuevo mapeo y sí lo eran en el anterior ordenamiento se analizaron por separado. Si se trataba de un sector boscoso

o que fue boscoso anteriormente y afectado por fuego o reducción de la cobertura leñosa (i.e., desmonte, cadeneo, rolado), se procedió a incorporarlo al nuevo mapeo tal como indica la LNB. En otros casos, cuando las discrepancias pudieron atribuirse a diferencias metodológicas, se preservaron los nuevos resultados sobre los anteriores.

Evaluación de la clasificación

La evaluación final de los productos vectoriales obtenidos luego del postprocesamiento y las correcciones manuales se realizó a partir de la matriz de confusión (Bishop 2006) generada para el conjunto de datos de evaluación. Estas matrices de confusión completas ofrecen la mejor evaluación posible de los productos obtenidos, a partir de los puntos seleccionados para la evaluación. De ellas se derivaron dos métricas: la exactitud global y el coeficiente kappa de Cohen (Cohen 1960). Ambas métricas presentan sus limitaciones (Pontius and Millones 2011) pero son las usuales en la disciplina y resultan informativas (Bishop 2006). Esta evaluación aporta información sobre la calidad del producto final en relación a los datos relevada a campo, considerando dos clases para cada formación: Bosque y No-Bosque.

RESULTADOS

Los resultados finales fueron compilados en una base de datos geográficos. La metodología completa fue descrita en un informe técnico asociado.

Para la formación Bosques del Delta se utilizaron 8515 puntos de entrenamiento. La evaluación final del producto post-procesado (Figura 3) dio lugar a una matriz de confusión según la cual los 69 puntos clasificados como No-Bosque se corresponden con esa categoría, mientras que de los 48 puntos clasificados como Bosque, 43 pertenecen realmente a esta categoría y 5 puntos pertenecen a la categoría No-Bosque. De esta matriz se deriva una exactitud global de 0.95 y un índice kappa de 0.90.

Para la formación Talares de Barranca, la evaluación final del producto obtenido (Figura 3) se basó en 100 datos etiquetados a campo. Considerando las clases Bosque y No-Bosque, la matriz de confusión muestra que 47 de los 50 puntos clasificados como No-Bosque se corresponden con esta categoría (y

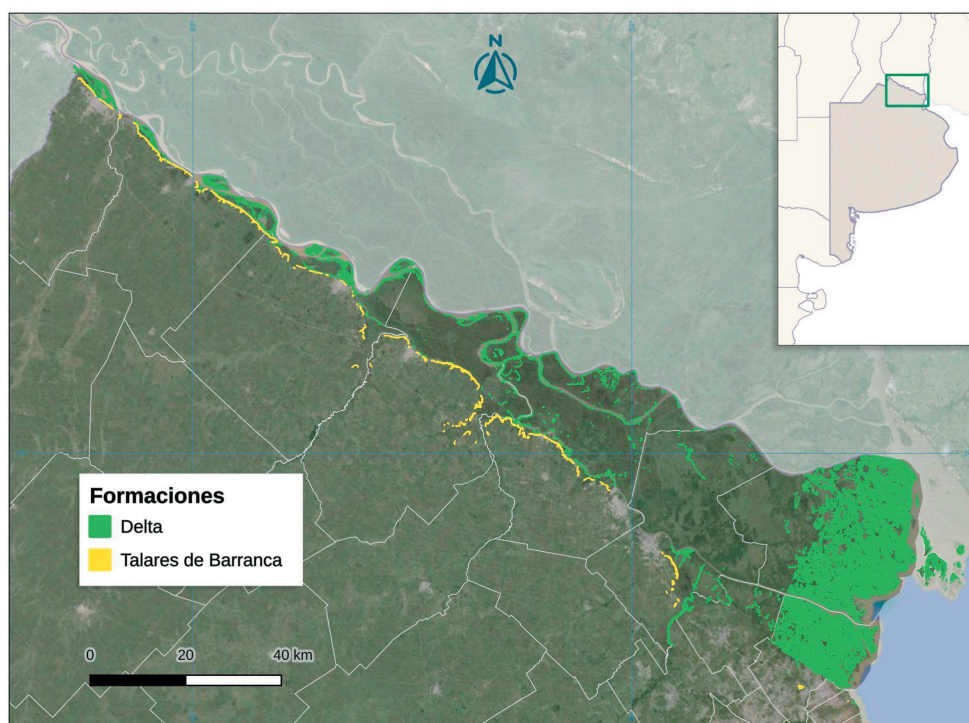


Figura 3. Resultados de la delimitación de las formaciones Delta y Talares de Barranca.

Figure 3. Results of the delineation of the Delta and Talares de Barranca formations.

tres eran realmente bosques), mientras que 49 de los 50 puntos clasificados como Bosque pertenecen a esa categoría y solo un punto se corresponde con la categoría No-Bosque. De esta matriz se derivan una exactitud global de 0.96 y un índice kappa de 0.92. Se detectaron parches de la formación que no habían sido mapeados, parches considerablemente deteriorados entre el mapeo anterior y la actualidad, y otros que fueron desmontados, no presentando hoy bosque nativo. Cuando la degradación o el desmonte fue posterior a la sanción de la LNB o no fue posible determinar con certeza que el bosque no existía en la fecha de la sanción de dicha ley, se preservaron los polígonos originales en el mapeo actual, tal como indica en la LNB. Hemos detectado algunos pocos casos de polígonos que no corresponden a talares de barranca o que habían sido desmontados antes del año 2007; estos polígonos fueron removidos del nuevo mapeo.

Para las formaciones Bosque Ribereño y Talares del Este se utilizaron 1170 de puntos de entrenamiento. La evaluación final del producto post-procesado (Figura 4) se basó en 252 puntos relevados a campo, dando lugar a una matriz de confusión según la cual, de los 103 puntos clasificados como

No-Bosque, 92 se corresponden con esa categoría, 3 corresponden a Bosque Ribereño y 8 corresponden a Bosque de Tala. De los 73 puntos clasificados como Bosque Ribereño, 47 se corresponden con esa categoría, 24 corresponden a No-Bosque y 2 corresponden a Bosque de Tala. Finalmente, de los 76 puntos clasificados como Bosque de Tala, 61 se corresponden con esa categoría, 14 corresponden a No-Bosque y solo un punto pertenece a la categoría Bosque Ribereño. De esta matriz se deriva una exactitud global de 0.79 y un índice kappa de 0.61.

Para la formación Caldenal y Monte se consideraron 18515 y 34742 puntos de entrenamiento, respectivamente, para región norte y sur. La evaluación final del producto post-procesado (Figura 5) se basó en 250 puntos relevados a campo, dando lugar a una matriz de confusión según la cual, de los 107 puntos clasificados como No-Bosque, 96 pertenecen a esa categoría y 11 corresponden a Bosque. Por su parte, de los 143 puntos clasificados como Bosque, 138 pertenecen a esa categoría y solo 5 corresponden a No-Bosque. De esta matriz se derivan una exactitud global de 0.94 y un índice kappa de 0.87. A su vez, de la matriz de contingencia de 6x6 compuesta por los 719 puntos de evaluación correspondientes a las

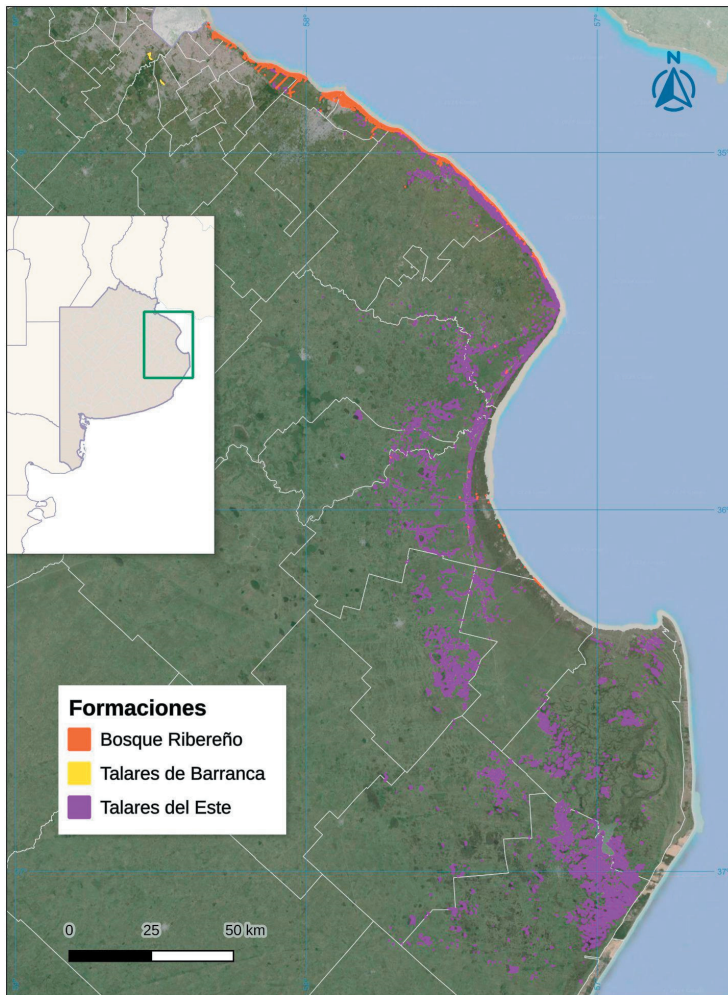


Figura 4. Resultados de la delimitación de las formaciones Bosque Ribereño y Talares del Este.

Figure 4. Results of the delineation of the Bosque Ribereño and Talares del Este formations.

cinco formaciones, se deriva una exactitud global de 0.89 y un índice kappa de 0.85. Haciendo una comparación entre el OTBN vigente y la nueva propuesta, para el Talar de Barranca, la superficie mapeada en el OTBN vigente alcanza las 3594 ha. Se propone una reducción de 2068 ha (57.5%), correspondiente a áreas que hoy no revisten la categoría Talar de Barranca; al mismo tiempo, se propone un incremento de 375 ha (10.4%) correspondiente a áreas que no se encontraban mapeadas en el OTBN vigente. Considerando estos cambios, la formación Talar de Barranca cubre 1901 ha en la nueva propuesta (-47.1% con respecto al OTBN vigente). Para la formación Delta (13324 ha en el OTBN vigente) se propone una reducción de 1800 ha (13.5%) y un incremento de 44451 ha (333.6%), resultando en una nueva superficie de 55975 (+320.1%). Para la formación Bosque Ribereño (4421 ha en el OTBN vigente) se propone una reducción de 910 ha (21.6%) y un incremento de 3901 (92.4%), lo que resulta en una nueva superficie

de 7212 ha (+70.9%). Para la formación Talar del Este (54299 ha en el OTBN vigente), se propone una reducción de 29556 ha (54.4%) y un incremento de 12507 ha (23.0%), resultando en una nueva superficie de 37250 ha (-31.4%). Finalmente, para la formación Caldenal y Monte (892959 ha en el OTBN vigente) se propone una reducción de 200848 ha (22.5%) y un incremento de 126278 ha (14.1%), lo que resulta en una nueva superficie de 818389 ha (-8.4%). Considerando a todas las formaciones en conjunto, el área de bosque mapeada en el OTBN vigente es de 968397 ha, sobre las que se propone una reducción de 235182 ha (24.3%) y un incremento de 187512 (19.4%). De esta forma, la superficie de bosque en la nueva propuesta alcanza las 920727 ha (-4.9% con respecto al OTBN vigente) (Tabla 1).

DISCUSIÓN

En el caso de los Bosques del Delta, observamos que una gran parte del monte

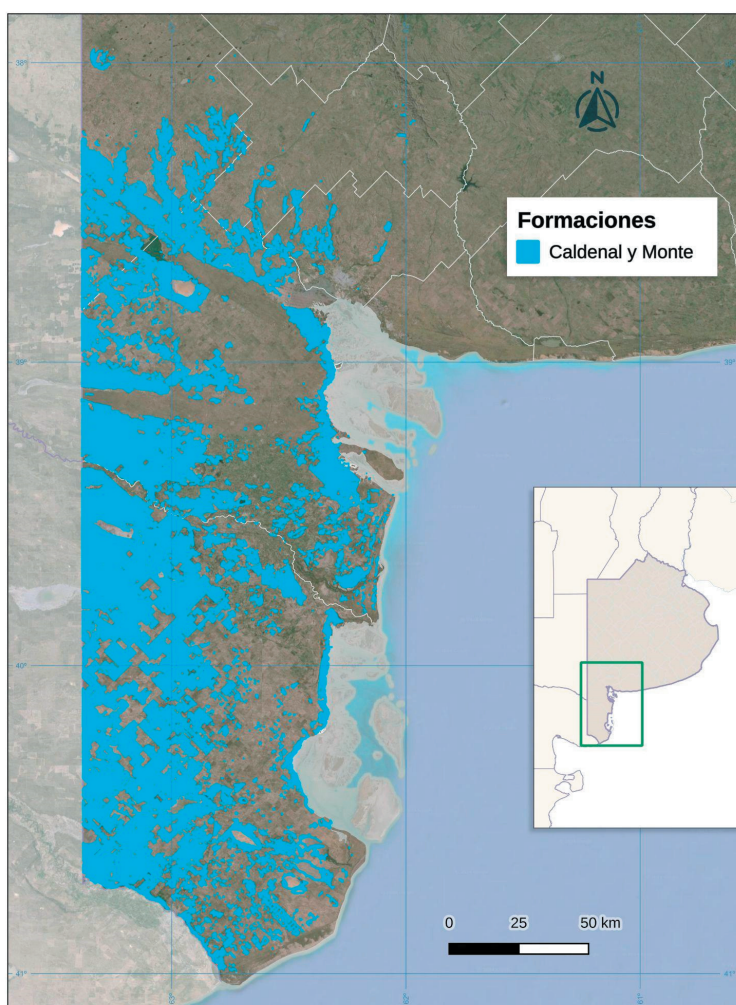


Figura 5. Resultados de la delimitación de la formación Caldenal y Monte.

Figure 5. Results of the delineation of the Caldenal y Monte formation.

blanco y del bosque de albardón, ubicados en el bajo delta y mapeados en la nueva propuesta, no está incluida en OTBN vigente. Esa omisión explica, sobre todo, el gran incremento en su superficie. En cambio, en el OTBN vigente, los Talares de Barranca

están delimitados en detalle. También se incorporó a ese ordenamiento un buffer de 50 m alrededor de la formación y con una menor categoría de conservación, con el objetivo de preservar el entorno de la formación. Este buffer suma 1736 ha extras a las 1858 de la

Tabla 1. Superficie para cada formación mapeada en el OTBN vigente, superficie que se propone quitar en la actualización, superficie que se propone agregar (que no estaba mapeada) y superficie de la nueva propuesta con el porcentaje de variación respecto al mapeo vigente. Las superficies están expresadas en hectáreas y los porcentajes de variación están computados con respecto al OTBN vigente.

Table 1. Area for each mapped formation in the current OTBN, area proposed to be removed in the update, area proposed to be added (not previously mapped) and area of the new proposal with the percentage of variation compared to the current mapping. The areas are expressed in hectares and the percentages of variation are calculated with respect to the current OTBN.

	Mapeo vigente	Reducción	Incremento	Nueva propuesta
Talar de Barranca	3594	2068 (57.5%)	375 (10.4%)	1901 (-47.1%)
Delta	13324	1800 (13.5%)	44451 (333.6%)	55975 (320.1%)
Bosque Ribereño	4221	910 (21.6%)	3901 (92.4%)	7212 (70.9%)
Talar del Este	54299	29556 (54.4%)	12507 (23.0%)	37250 (-31.4%)
Caldenal y Monte	892959	200848 (22.5%)	126278 (14.1%)	818389 (-8.4%)

formación boscosa propiamente dicha. De acuerdo con las observaciones realizadas por la autoridad nacional de aplicación y a las pautas establecidas por el COFEMA (COFEMA 2012), estos polígonos, al no representar bosques nativos sino su entorno, no deben figurar en el OTBN; por esta razón fueron removidos del mismo en el nuevo mapeo. De ahí que se observe una reducción importante en la superficie propuesta para esta formación respecto al OTBN vigente. Consideramos que resulta fundamental proteger el entorno de estas formaciones particularmente vulnerables y sensibles a las actividades realizadas en sus inmediaciones. Creemos que esto se debe hacer por medio del ordenamiento ambiental del territorio bonaerense, posiblemente estableciendo una categoría de conservación provincial, pero por fuera del marco del OTBN.

La reducción de la superficie de los Talares del Este, en comparación con el OTBN vigente, está asociada a la eliminación de pastizales en las áreas de inter-cordón, incluida como parte intrínseca de esta formación en el OTBN vigente. Su inclusión puede haber sido resultado de la aplicación de un buffer sobre las áreas efectivas de bosque. Al ser formaciones con una estructura predominantemente lineal, un pequeño buffer alrededor de la misma fácilmente duplica la superficie, como ocurrió con los talares de barranca. De manera similar, en el extremo sur de la distribución de estos bosques, en los partidos de Madariaga y Mar Chiquita se incluyeron en el OTBN vigente áreas de pastizales anegables que son espectralmente similares a los talares y, en menor medida, se incorporaron áreas de lagunas. En la delimitación propuesta, el bosque de tala es identificado espectralmente con precisión, logrando un recorte final de los cuerpos de agua adyacentes a la formación más preciso, lo que lleva a una reducción de la superficie delimitada para la formación.

En el caso de la formación del bosque ribereño se observa un aumento considerable de la superficie identificada. Este aumento se manifiesta sobre todo en el sector costero del centro-sur del partido de Berisso y en el norte de Magdalena; su no inclusión en el OTBN vigente se debe a un criterio que no pudo ser determinado con claridad, aunque se presume que se realizó un recorte geográfico de algunos sectores. Además, en algunos casos se propone una definición más precisa de las áreas de plantaciones forestales. Finalmente, las diferencias entre la propuesta y el OTBN

vigente para la formación Caldenal y Monte se deben principalmente al uso, en este trabajo, de imágenes de mayor resolución espacial para la clasificación supervisada de los bosques nativos y a la eliminación de zonas que perdieron su cobertura boscosa antes de la sanción de la LNB y habían sido incluidas en el OTBN vigente. Algunas de las dificultades más grandes encontradas están relacionadas con la enorme superficie de la provincia, la dispersión de las áreas boscosas y la dificultad de realizar relevamientos exhaustivos a campo en un breve plazo. Al respecto, consideramos que lo ideal sería establecer sitios de control con un monitoreo continuo por parte del Estado Provincial y la incorporación de nueva información por medio de un trabajo de campo permanente en el territorio. El programa de monitoreo podría tener dos ejes. Por un lado, una parte algorítmica que detecte de manera automática y en tiempo real potenciales desmontes o sectores boscosos con cambios en el uso del suelo a partir de imágenes satelitales libres. Por el otro, un programa de monitoreo sistemático a campo que permita la visita a cada parche de cada formación boscosa a lo largo de un período establecido. De esta forma, se podría llevar a cabo una caracterización estructural más detallada, realizar un monitoreo sistemático del avance de las especies exóticas y constatar el estado de conservación de cada parche de bosque, observando sus particularidades y propiciando la generación de planes de manejo adaptados a cada situación. Esta sugerencia se basa en el concepto de que la actualización de los OTBN debe ser un proceso continuo. Otra de las grandes dificultades con la que nos encontramos fue la distinción entre bosques nativos secundarios y plantaciones forestales (en algunas situaciones, coexistiendo en un mismo terreno). En muchos casos, no logramos separar espectralmente estas dos clases de manera automática, por lo que utilizamos información auxiliar (e.g., la capa de Plantaciones Forestales provista por la Secretaría de Agricultura Ganadería y Pesca de la Nación [SAGyP 2023]) complementada con un arduo procesamiento manual. Sería ideal contar con una capa completa y actualizada de plantaciones forestales localizadas en las áreas de distribución de los bosques nativos. Sin embargo, aun contando con esta información, debe reconocerse una dificultad conceptual que excede las limitaciones metodológicas. En resumen, mientras que los bosques secundarios provienen de áreas antes ocupadas por bosques, se desarrollan de

forma natural y tienden a ser más diversos y complejos en su estructura y funciones, las plantaciones forestales son áreas donde se cultivan árboles de manera deliberada para la producción comercial, con una menor diversidad y una estructura más uniforme. Una vez abandonada la actividad forestal, la estructura y funciones del bosque se van recuperando en forma gradual y no existe un criterio único que permita discriminar una plantación forestal abandonada de un bosque secundario. De manera análoga, una capa actualizada de canales, ríos y arroyos puede ayudar a mejorar los resultados del filtrado que, en el afán por unir regiones aledañas donde existe una continuidad espacial, en algunos casos incorpora arroyos y otras estructuras finas como parte de los polígonos de bosques nativos. Además, se encontraron ciertas discrepancias relacionadas con la definición de bosque nativo entre la Ley Nacional 26331 y la Ley Provincial 14888. La Ley Nacional 26331 define a los bosques nativos como ecosistemas forestales naturales compuestos predominantemente por especies arbóreas nativas maduras, mientras que la Ley Provincial 14888 incorpora también en su definición de bosque nativo a las especies arbustivas. Es decir, esta no se limita a las situaciones boscosas definidas por la presencia de especies arbóreas de un determinado porte, sino que incorpora a sus ecosistemas leñosos circundantes siguiendo un criterio similar al propuesto por Martínez Pastur et al. (2023), respecto de adoptar una concepción dinámica de los paisajes forestales. De hecho, las definiciones que se plantean para árboles y arbustos son ambiguas y están supeditadas a los ecosistemas en las que se utilizan (Martínez Pastur et al. 2023). En el caso de la provincia de Buenos Aires, la definición adoptada en este trabajo, adaptado a la ley provincial, permite un mayor alcance para la protección de las comunidades leñosas de la formación Caldenal y Monte de la provincia de Buenos Aires. Esta formación está sometida a un intenso régimen de disturbios naturales y antrópicos; se ubica entre las unidades de vegetación Monte Oriental —o de Transición— y Caldenal (Oyarzabal et al. 2018), donde la vegetación varía desde un matorral de Zigofiláceas a bosques xerófilos con dominancia de las especies arbóreas *Geoffroea decorticans* y especies de los géneros *Neltuma* spp. (Torres Robles et al. 2015; Oyarzabal et al. 2018). Estas comunidades de vegetación leñosa están siendo amenazadas por distintos disturbios antrópicos y naturales (Gaspari et al. 2021).

La formación Caldenal y Monte representa un mosaico dinámico conformado por vegetación en diferentes etapas de desarrollo después de haber sido afectadas por incendios y reducción de la cobertura leñosa (e.g., cadeneo, rolado) de diferente antigüedad (Torres Robles and Rodríguez 2023). Estos disturbios producen cambios en la cobertura arbórea y arbustiva, afectan la altura de los árboles y los arbustos, y la densidad de individuos arbóreos, pero no produce cambios en la composición de la vegetación (Torres Robles et al. 2015; Torres Robles and Rodríguez 2023). En ese paisaje boscoso dinámico es necesario que las etapas con predominio de arbustos bajos sean protegidas para permitir que alcancen un mayor desarrollo estructural. En este sentido, se decidió en conjunto con la Dirección de Bosques de la Provincia, definir una sola clase de bosque para la formación, que incorpore la diversidad de situaciones de cobertura leñosa de la región, utilizando un criterio dinámico en línea con lo propuesto por Martínez Pastur et al. (2023) y a la definición de la Ley Provincial. Se trata de una propuesta sólidamente fundamentada y superadora a lo establecido por la Ley Nacional, y no deberían existir conflictos en términos de superficies a proteger.

Un aspecto relevante para la protección de los bosques nativos es la necesidad de concordancia entre provincias al establecer los mapas de las áreas boscosas, y su categorización, de modo que las unidades de vegetación sean tratadas de manera congruente a través de los límites administrativos. La falta de criterios unificados ha sido analizada en el norte del país, habiéndose encontrado un bajo nivel de concordancia en la categorización de los bosques (García-Collazo et al. 2013). Esa falta de concordancia fue atribuida tanto a la información de base utilizada para definir las áreas de bosque como a diferentes interpretaciones de los criterios de sustentabilidad de los que deriva la categorización. Martínez Pastur et al. (2023) indicaron la necesidad de revisar la definición de bosque sobre la que se basan los OTBN y señalan ambigüedades en lo establecido por la Resolución COFEMA230/12. Las diferentes definiciones de bosque adoptadas por diferentes provincias es una de las causas de la falta de concordancia de los OTBN. Un claro ejemplo de esta falta de concordancia se observa en el Caldenal y Monte de la provincia de Buenos Aires que comparte límites administrativos con las

provincias de La Pampa y Río Negro. Tanto en La Pampa (Ley Provincial N° 2624) como en Buenos Aires (Ley Provincial N° 14888) se incorporaron a las formaciones Caldenal y Monte en los ordenamientos de los bosques nativos; sin embargo, la provincia de Río Negro (Ley Provincial N° 4552) no incluyó a esta formación. En los bosques del Delta e Islas del Río Paraná también se observa una falta de continuidad entre los resultados encontrados en este trabajo y los OTBN de Santa Fe (Ley Provincial N° 13372) y, en especial, Entre Ríos (Ley Provincial N° 10284), que no identifica estos bosques. Con respecto a Santa Fe, además, se observa una falta de continuidad de la formación Talaes de Barranca, concordante con el límite administrativo. Situaciones ambientales y fisonómicas que en este trabajo fueron consideradas bosques nativos no fueron incluidas por esas provincias. En el caso de Santa Fe se indicó que la superficie de bosques del Delta e Islas del Paraná representaron una superficie muy reducida y que también influyeron errores en los procesos de confección de los mapas (Ministerio de Ambiente y Cambio Climático 2019).

Además de eventuales diferencias de interpretación de la definición de bosque existen aspectos técnicos que podrían influir sobre la falta de concordancia en los OTBN de diferentes provincias. En algunos casos, las diferencias entre provincias pueden vincularse con la resolución espacial utilizada; en otros, con la disponibilidad temporal de imágenes en el momento de realizar el ordenamiento. Así, para el caso de Entre Ríos se usaron datos satelitales de la serie Landsat de 30 m de resolución espacial, los mejores datos libres disponibles para el año de implementación de aquel OTBN. En el caso de Santa Fe, se combina el uso de datos Landsat con datos Sentinel-2 de 10 m de resolución, de acuerdo con las características de la zona de análisis. Por su parte, el OTBN vigente de la provincia de Buenos Aires, combinó el uso de la Serie Landsat con imágenes del catálogo Google Earth, sumado a un análisis de interpretación visual abordado con técnicas de digitalización manual. Esos procedimientos dieron por resultado una delimitación subjetiva no estandarizada y difícilmente replicable. En la propuesta metodológica que presentamos se optó por el uso de datos Sentinel-2 basada en una delimitación automática y una posterior revisión manual con imágenes del catálogo Google Earth, lo que permite avanzar en una

metodología uniforme de clasificación, limitar el procesamiento manual de datos y el uso de distintas resoluciones espaciales y plantear un procedimiento replicable en otras provincias. Con respecto a la posibilidad de incorporar futuras mejoras en el procedimiento, sería interesante evaluar la posibilidad de incorporar en la clasificación automática información adicional a la derivada del sensor multiespectral Sentinel-2. Entre otras cosas, capas derivadas de un modelo digital de elevación pueden aportar información sumamente valiosa para delimitar formaciones como los Talaes de Barranca. Hemos utilizado esta información en la revisión manual, pero no la incorporamos en los clasificadores, entre otras cosas, por no contar con modelos con la misma resolución espacial que las imágenes satelitales que cubran toda la formación. Tampoco incorporamos en esta clasificación información de textura, que mostró mejoras en el producto obtenido en este tipo de ambientes (Rajngewrc et al. 2022; Silveira et al. 2023). A pesar de considerar que pueden realizar un aporte muy relevante para monitorear bosques (Silveira et al. 2023), en este trabajo no utilizamos imágenes SAR. En particular, consideramos promisorio el aporte del satélite argentino SAOCOM de microondas en banda L, del que aún no contamos con series multitemporales de imágenes suficientemente ricas que cubran de manera adecuada en el espacio y el tiempo el área de estudio. Consideramos interesante a futuro incorporar este tipo de imágenes en la delimitación y el monitoreo de bosques nativos. Para esto resulta fundamental garantizar una cobertura y una frecuencia de imágenes suficientes. Los sensores SAR (y, en particular, aquellos en banda L) tienen un enorme potencial para capturar la variabilidad espacio temporal de los bosques (Koyama et al. 2019).

El OTBN de la provincia de Buenos Aires reviste una importancia fundamental tanto desde una perspectiva ambiental como socioeconómica. Los ecosistemas boscosos de la Provincia de Buenos Aires albergan una biodiversidad única y proveen una serie de servicios ecosistémicos cruciales, como la regulación del clima, la conservación del suelo y la provisión de agua. Además, son espacios de recreación y turismo que generan oportunidades de desarrollo local. El adecuado ordenamiento territorial garantiza la conservación y el aprovechamiento de estos recursos naturales, previniendo la deforestación indiscriminada y promoviendo

prácticas sostenibles de manejo forestal. En este artículo presentamos las elecciones metodológicas realizadas, así como las dificultades encontradas al intentar utilizar una metodología computacional uniforme y repetible, para la identificación y delimitación de las formaciones de bosque nativo de la provincia de Buenos Aires. Teniendo en cuenta que el OTBN actual fue realizado con una diversidad de criterios y aplicando metodologías no siempre consistentes entre sí, consideramos que este trabajo resulta una propuesta superadora, aplicando una misma metodología para toda la provincia. El trabajo realizado por el equipo al desarrollar y aplicar una metodología uniforme para delimitar los bosques nativos de la provincia, basada en el uso de una plataforma en la nube y utilizando imágenes de libre distribución, requirió del desarrollo del algoritmo de filtrado y de metodologías de post-procesamiento específicas para cada formación, y permitió alcanzar una delimitación actualizada de los bosques nativos de la Provincia con muy buenos indicadores de precisión.

AGRADECIMIENTOS. Dada la envergadura del trabajo, el mismo requirió el apoyo de muchas personas. Queremos agradecer especialmente a María Eugenia Escoda, Verónica Trevisan, Rocío Melzi Fiorenza, Tatiana Cinquetti, Elena Sahade, Facundo

Carricaburu, Marcela Bissio, Nazareno Asin, Juan Ordoñez, Laura Pinciroli y Gabriel Tery del Ministerio de Ambiente de la Provincia por todo el apoyo y acompañamiento brindado durante el desarrollo del mismo. A Eugenio Liggesmeyer, Director Provincial de Islas, y a la Policía Bonaerense por el apoyo logístico y el acompañamiento en las numerosas salidas a campo, así como a las productoras y productores locales que nos abrieron sus tranqueras para realizar los relevamientos a campo. A Damián Voglino, investigador del Museo Regional de Ciencias Naturales A. Scasso de la Ciudad de San Nicolás, por sus invaluable aportes conceptuales y su participación en las salidas de campo. A Horacio Sirolli, docente de la Universidad de Buenos Aires por haber revisado críticamente los mapas producidos. A Gabriel De Luca, personal de apoyo a la investigación y especialista en información geoespacial del CONICET, por su colaboración en el procesamiento de la información espacial, el diseño de herramientas informáticas a medida para el proyecto y la confección de los mapas que acompañan el presente artículo. A Patricia Kandus y Priscilla Minotti por su escucha atenta y sus consejos siempre precisos. Finalmente, queremos agradecer a los cuatro revisores anónimos que han leído críticamente el manuscrito y realizado valiosos aportes que fueron incorporados al mismo.

REFERENCIAS

- Banko, G. 1998. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data and of methods including remote sensing data in forest inventory. Interim Report IR-98-081. URL: tinyurl.com/mrv8k9xk.
- Bishop, C. M., and N. M. Nasrabadi. 2006. Pattern recognition and machine learning. Springer, New York, USA.
- Claverie, M., J. Ju, J. G. Masek, J. L. Dungan, E. F. Vermote, J. C. Roger, S. V. Skakun, and C. Justice. 2018. The Harmonized Landsat and Sentinel-2 surface reflectance data set. *Remote Sensing of Environment* 219:145-161. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.09.002>.
- Cohen, J. 1960. A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and Psychological Measurement* 20(1):37-46. <https://doi.org/10.1177/001316446002000104>.
- Congalton, R. G. 1991. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment* 37(1):35-46. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(91\)90048-B](https://doi.org/10.1016/0034-4257(91)90048-B).
- Congedo, L. 2021. Semi-automatic classification plugin: A python tool for the download and processing of remote sensing images in QGIS. *Journal of Open Source Software* 6(64):3172. <https://doi.org/10.21105/joss.03172>.
- Consejo Federal de Medio Ambiente (COFEMA). 2012. Resolución COFEMA 230. Pautas para la consideración, identificación y mapeo de los bosques nativos en el Ordenamiento Territorial de los Bosques Nativos, Argentina, 20 de Marzo de 2012.
- De Luca, P. G., and R. Grimson. 2023. Complemento para QGIS con herramientas de automatización de procesos geoespaciales utilizados en la confección del OTBN de la PBA, 2023. URL: github.com/caprieldeluca/otbn.
- Du, Y., Y. Zhang, F. Ling, Q. Wang, W. Li, and X. Li. 2016. Water bodies' mapping from Sentinel-2 imagery with modified normalized difference water index at 10-m spatial resolution produced by sharpening the SWIR band. *Remote Sensing* 8(4):354. <https://doi.org/10.3390/rs8040354>.
- García Collazo, G., A. Panizza, and J. M. Paruelo. 2013. Ordenamiento territorial de bosques nativos: resultados de la zonificación realizada por provincias del norte argentino. *Ecología Austral* 23(2):97-107. <https://doi.org/10.25260/EA.13.23.2.0.1165>.
- Gaspari, F. J., J. Goya, M. Arturi, S. Burns, L. de Antueno, and S. Torres Robles. 2021. Diagnóstico ambiental y socio económico de cuencas forestales: cuenca forestal Puan-Villarino-Patagones, Provincia de Buenos Aires. Informe Final

- de Consultoría. Proyecto: Fondo Cooperativo de Preparación para el Carbono de los Bosques (FCPF) - Donación N° TF019086. Dirección Nacional de Bosques, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Fundación Innova-T, CONICET.
- González-Roglich, M. and Swenson, J. 2016. Tree cover and carbón mapping of Argentine savannas: Scaling from field to region. *Remote Sensing of Environment*, 172: 139–147. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.11.021>
- Gorelick, N., M. Hancher, M. Dixon, S. Ilyushchenko, D. Thau, and R. Moore. 2017. Google Earth Engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment* 202:18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>.
- Grimson, R., F. Schivo, J. Goya, M. Arturi, M. Derguy, M. Sandoval, S. Torres Robles, L. B. Rodríguez, and P. Prato Longo. 2023. Informe final de la consultoría OTBN-PBA. IIIA-3iA, UNSAM-CONICET.
- Hossain, M.D. and C. Dongmei. 2019. Segmentation for object-based image analysis (OBIA): A review of algorithms and challenges from remote sensing perspective. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 150:115–134. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.02.009>.
- Huete, A. R. 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment* 25(3):295–309. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X).
- Jensen, J. R. 2016. *Introductory digital image processing: A remote sensing perspective*. Pearson Education, Incorporated, London, Reino Unido.
- Koyama, C., M. Watanabe, M. Hayashi, T. Ogawa, and M. Shimada. 2019. Mapping the spatial-temporal variability of tropical forests by ALOS-2 L-band SAR big data analysis. *Remote Sensing of Environment* 233. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111372>.
- Ley Provincial N° 14,888. Protección de los Bosques Nativos de la Provincia de Buenos Aires. Decreto 366/17 E La Plata, 27 de julio de 2017. URL: tinyurl.com/mvzbbyjv.
- Ley Nacional N° 26,331. Presupuestos Mínimos de Protección Ambiental de los Bosques Nativos. CABA, 19 de diciembre de 2007. URL: tinyurl.com/m3mhynx.
- Lu, D., and Q. Weng. 2007. A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance. *International Journal of Remote Sensing* 28(5):823–870. <https://doi.org/10.1080/01431160600746456>.
- Mahdianpari, M., B. Brisco, J. E. Granger, F. Mohammadimanes, B. Salehi, S. Banks, S. Homayouni, L. Bourgeau-Chavez, and Q. Weng. 2020. The second generation Canadian Wetland Inventory map at 10 meters resolution using Google Earth Engine. *Canadian Journal of Remote Sensing* 46(3):360–375. <https://doi.org/10.1080/07038992.2020.1802584>.
- Martínez Pastur, G., Amoroso, M. M., Baldi, G., Barrera, M. D., Brown, A. D., Chauchard, L. M., Galetto, L., Garibaldi, L. A., Gasparri, I., Kees, S. M., Matteucci, S. D., Politi, N., Roig, F. A., & Peri, P. L. (2023). ¿Qué es un bosque nativo en la Argentina? Marco conceptual para una correcta definición de acuerdo con las políticas institucionales nacionales y el conocimiento científico disponible. *Ecología Austral*, 33(1), 152–169. <https://doi.org/10.25260/EA.23.33.1.0.2040>
- Mónaco, M. H., P. L. Peri, F. A. Medina, H. P. Colomb, V. A. Rosales, F. Berón, E. Manghi, et al. 2020. Causas e impactos de la deforestación de los bosques nativos de Argentina y propuestas de desarrollo alternativas. URL: tinyurl.com/3y5vs2p4.
- Müller, A. C., and S. Guido. 2016. *Introduction to machine learning with Python: a guide for data scientists*. O'Reilly Media, Inc., Sebastopol, CA, USA.
- Navarro, M. F., J. P. Navarro, E. Livraguai, and Y. Sica. 2022. Mapa de distribución potencial de humedales en Argentina. Informe técnico. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
- Paruelo, J. M., M. Teixeira, L. Staiano, M. Mastrángelo, L. Amdan, and F. Gallego. 2016. An integrative index of Ecosystem Services provision based on remotely sensed data. *Ecological Indicators* 71:145–154. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.06.054>.
- Peri, P. L., G. J. Martínez Pastur, and T. M. Schlichter. 2021. Uso sostenible del bosque. Aportes desde la silvicultura argentina. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de la Nación.
- Phiri, D., and J. Morgenroth. 2017. Developments in Landsat land cover classification methods: A review. *Remote Sensing* 9(9):967. <https://doi.org/10.3390/rs9090967>.
- Piramuthu, S. 2008. Input data for decision trees. *Expert Systems with Applications* 34:1220–1226. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2006.12.030>.
- Pontius Jr, R. G., and M. Millones. 2011. Death to Kappa: birth of quantity disagreement and allocation disagreement for accuracy assessment. *International Journal of Remote Sensing* 32(15):4407–4429. <https://doi.org/10.1080/01431161.2011.552923>.
- Potapov, P., M. C. Hansen, A. Pickens, A. Hernández-Serna, A. Tyukavina, S. Turubanova, V. Zalles, et al. 2022. The global 2000–2020 land cover and land use change dataset derived from the Landsat archive: first results. *Frontiers in Remote Sensing* 3:856903. <https://doi.org/10.3389/frsen.2022.856903>.
- Rajngewerc, M., R. Grimson, L. Bali, P. Minotti, and P. Kandus. 2022. Cover classifications in wetlands using Sentinel-1 data (Band C): a case study in the Paraná river delta, Argentina. *Revista de Teledetección* 60:29–4. <https://doi.org/10.4995/raet.2022.16915>.
- Rouse, J. W., R. H. Haas, J. A. Schell, and D. W. Deering. 1973. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. *Third ERTS Symposium, NASA SP-351 I*: 309–317.
- SAGyP. 2023. Mapa de plantaciones forestales de actualización permanente. Área SIG e Inventario Forestal. Dirección Nacional de Desarrollo Foresto Industrial. Secretaría de Agricultura Ganadería y Pesca de la Nación.
- Silveira, E. M., V. C. Radeloff, S. Martinuzzi, G. J. M. Pastur, J. Bono, N. Politi, and A. M. Pidgeon. 2023. Nationwide native forest structure maps for Argentina based on forest inventory data, SAR Sentinel-1 and vegetation metrics

- from Sentinel-2 imagery. *Remote Sensing of Environment* 285:113391. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113391>.
- Stickler, C. M., D. C. Nepstad, A. A. Azevedo, and D. G. McGrath. 2013. Defending public interests in private lands: compliance, costs and potential environmental consequences of the Brazilian Forest Code in Mato Grosso. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 368(1619):20120160. <https://doi.org/10.1098/rstb.2012.0160>.
- Torres Robles, S. S., & Rodríguez, L. B. (2023). Caracterización y distribución de las comunidades leñosas del ecotono sur Espinal-Monte, Argentina. *Ecología Austral*, 33(3), 641–657. <https://doi.org/10.25260/EA.23.33.3.0.2055>
- Torres Robles, S. S., M. Arturi, C. Contreras, G. Peter, and J. M. Zeberio. 2015. Variaciones geográficas de la estructura y composición de la vegetación leñosa en el límite entre el espinal y el Monte en el Noreste de la Patagonia (Argentina). *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica* 50(2):209-215. <https://doi.org/10.31055/1851.2372.v50.n2.11664>.
- Tucker, C. J. 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environments* 8:127-150. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0).
- Van Rossum, G., and F. L. Drake. 2009. *Python 3 Reference Manual*. CreateSpace, Scotts Valley, CA, USA.
- Xie, H., Y. Q. Tian, J. A. Granillo, and G. R. Keller. 2007. Suitable remote sensing method and data for mapping and measuring active crop fields. *International Journal of Remote Sensing* 28(2):395-411. <https://doi.org/10.1080/01431160600702673>.
- Xu, H. 2008. A new index for delineating built-up land features in satellite imagery. *International Journal of Remote Sensing* 29(14):4269-4276. <https://doi.org/10.1080/01431160802039957>.