

Uso de técnicas de SIG para detectar *Ochetophila trinervis* en Andes Centrales



Leandro Manuel Alvarez

Es Licenciado en Ecología por la Universidad Champagnat. Profesional Adjunto del grupo de Ecología Forestal del Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA) dependiente del CONICET. Su actividad científica mayormente se ha desarrollado en el ámbito de la ecología aplicada al conocimiento de los Bosques Nativos, como coordinador de la logística de campañas en proyectos de investigación. Cuenta con numerosas publicaciones en revistas científicas y capítulos de libros. Ha obtenido una beca parcial para la Maestría en Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Universidad Nacional de Quilmes, en curso. Co-director de tesis de grado y de maestría. Dicta cursos de posgrado sobre sistemas de información geográfica, teledetección y sensores remotos orientados a resolver problemas de índole ecológica.

La pérdida de bosques nativos a escala global es una problemática que afecta servicios ambientales fundamentales para el bienestar de la humanidad, como la retención y la formación del suelo, la protección y la regulación de recursos hídricos, y la fijación de gases de efecto invernadero.¹ Las evidencias se manifiestan en la pérdida total de tierras forestales, la cual ha sido de un 3% entre 1990 y 2015. Los principales impactos se evidencian en las regiones tropicales, mientras que las regiones templadas registran cierta recuperación relacionada con plantaciones forestales.² En este escenario, interesa destacar el rol clave de los bosques en el ciclo hidrológico, por lo cual, la protección y la regulación del suelo y el agua adquieren una importancia fundamental.³

En Argentina, las modificaciones en el uso del suelo y la expansión de la frontera agropecuaria han ocasionado una tasa de deforestación que varía entre 200.000⁴ y 300.000 hectáreas anuales.⁵ Esta situación derivó en que el Congreso de la Nación, en 2007, haya sancionado la Ley 26.331 de Bosques Nativos. Consecuentemente, cada provincia realizó un Ordenamiento Territorial de sus formaciones forestales, con criterios de sustentabilidad para el aprovechamiento (Categoría Verde), el manejo (Categoría Amarillo)

¹ MacDicken, K. G. Global forest resources assessment 2015: what, why and how? *Forest Ecology and Management*, 352, 2015, 3-8.

² Keenan, R. J., Reams, G. A., Achard, F., de Freitas, J. V., Grainger, A. y Lindquist, E. (2015). Dynamics of global forest area: Results from the FAO Global Forest Resources Assessment *Forest Ecology and Management*, 352, 2015, 9-20.

³ Miura, S., Amacher, M., Hofer, T., San-Miguel-Ayanz, J., y Thackway, R. Protective functions and ecosystem services of global forests in the past quarter-century. *Forest Ecology and Management*, 352, 2015, 35-46.

⁴ Montenegro, C., Gasparri, E., Mangui, M., Strada, J., Bono y Parmuchi, G. (2007). *Informe sobre deforestación en Argentina*. Unidad de Manejo del Sistema de Evaluación Forestal (UMSEF). Dirección de Bosques y Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación.

⁵ MacDicken, *op. cit.*

y la protección (Categoría Rojo). En este sentido, la legislación estipula la actualización de la cartografía presentada en el primer inventario.

En el caso de Mendoza, por una cuestión de escala, los bosques en galería de Chacay (*Ochetophila trinervis*) de la cordillera de los Andes no pudieron ser mapeados; no obstante, por el criterio de protección de cuencas, fueron considerados de alta prioridad de conservación.⁶ En el caso de San Juan, hay un sector categorizado como rojo por su valor de protección de los recursos hídricos (hacia el oeste de Calingasta, en la quebrada del arroyo Fiero).⁷ En un relevamiento hecho recientemente se confirma que el bosque nativo está compuesto por *Ochetophila trinervis* y se adecúa a la definición del COFEMA (>20% de cobertura forestal de individuos de altura mayor a 3 m). Por otro lado, mediante una exploración visual en Google Earth, se observan imágenes satelitales de alta resolución, por lo cual, el trabajo en esta región con Sistemas de Información Geográfica y técnicas de tele-detección se hace factible.

Ochetophila trinervis se registra con frecuencia en la Cordillera Frontal de los Andes Centrales, en Uspallata,⁸ en Cordón del Plata,⁹ en Cordón del Portillo y en otros

arroyos del sur de la provincia de Mendoza.¹⁰ Se trata de un árbol mediano que puede alcanzar hasta 8 metros de altura,¹¹ una cobertura de hasta 95%,¹² forma bosques en galería y su presencia se da en los bordes de los ríos, en terrazas aluviales recientes, en arroyos y cauces temporales.¹³ Su follaje caduco es rico en nutrientes, especialmente en nitrógeno;¹⁴ por lo tanto, su probabilidad de detección aumenta en el período estival (noviembre a marzo). La disponibilidad de agua permanente parece ser clave para sus requerimientos de hábitat,¹⁵ por eso son relevantes la circulación de agua superficial y la humedad del suelo. Entre sus funciones ecológicas se destaca la estabilización de suelos y la regulación de cuencas, la fijación de nitrógeno atmosférico mediante nódulos con bacterias simbióticas del género *Frankia* en sus raíces y la capacidad de establecimiento en suelos empobrecidos.¹⁶

Para el siguiente trabajo aplico una serie de índices satelitales y una clasificación supervisada para detectar bosques en galería de *O. trinervis* y condiciones ambientales asociadas. Los resultados esperados son la Superficie del bosque Nativo (ha), humedad (%), distancia a fuentes de agua superficial (m) y vigor del follaje (%).¹⁷

flanco oriental del Cordón del Plata (Mendoza, Argentina). *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica* 42(3-4), 2007, 273-294.

⁶ Villagra, P. E., Cesca, E., Alvarez, J. A., Rojas, F., Bourguet, M., Rubio, C., y Mastrángelo, P. Documento de Ordenamiento de Bosques Nativos de la provincia de Mendoza. *Secretaría de Medio Ambiente. Dirección de Recursos Naturales Renovables, Mendoza*, 51, 2010.

⁷ Fernández, N., Ariza, P., De Paula, E., Ortuño, N., Marquez, J., Mercado, G., Mallea, E., Paez, G., Cappa, F., Fernández, V., y Campos, V. Actualización del Ordenamiento Territorial de Bosques Nativos de la Provincia de San Juan. *Secretaría de Estado de Ambiente y Desarrollo Sustentable. Bosques Nativos, San Juan*, 50, 2015.

⁸ Roig, F. A., Villalba, R. y Ripalta, A. Climatic factors in *Discaria trinervis* growth in Argentine Central Andes. *Dendrochronologia*, 1989, 61-70; Martínez Carretero, E. Vegetación de los Andes Centrales de la Argentina: El Valle de Uspallata, Mendoza. *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica* 34 (3-4), 2000, 127-148.

⁹ Méndez, E. La vegetación de los Altos Andes II: Las Vegas del

¹⁰ Schmelter, A. La influencia de la temperatura en el crecimiento de *Discaria trinervis* en la Cordillera mendocina. *Dendrochronologia*. IANIGLA; Mendoza, Argentina, 2002, 35-39.

¹¹ Tortosa, R. D. El género *Discaria* (Rhamnaceae). *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica* 22(1-4), 1983, 301-335.

¹² Martínez Carretero, *op. cit.*

¹³ Schmelter, *op. cit.*

¹⁴ Reyes, M. F., Gobbi, M. E., & Chaia, E. E. Reproductive ecology of *Ochetophila trinervis* in Northwest Patagonia. *Functional Plant Biology* 38(9), 2011, 720-727.

¹⁵ Roig, F. A., Villalba R. y Ripalta, A. Climatic factors in *Discaria trinervis* growth in Argentine Central Andes. *Dendrochronologia* 6, 1988, 61-70.

¹⁶ Reyes, *et. al.*, *op. cit.*

¹⁷ Este grupo de indicadores se relaciona con el objetivo 15 de

La hipótesis de trabajo sostiene que las condiciones ambientales de humedad, la hidrología del cauce y el vigor de la vegetación son detectables en función del comportamiento espectral y realizando clasificaciones supervisadas de imágenes satelitales Sentinel 2.

El objetivo general es poner a punto un sistema de indicadores ambientales que faciliten la detección de bosques de *O. trinervis* mediante el uso de SIG y sensores remotos. Los objetivos específicos son identificar valores medios de diferentes índices espectrales (NMDI, MNDWI, NDVI y EVI) que permitan encontrar parches de bosques de este tipo. Para el entrenamiento y la evaluación visual se utiliza un bosque conocido en la quebrada del arroyo Fiero, al oeste de Calingasta, en la provincia de San Juan para realizar predicciones en el río Colorado y el arroyo Calingasta, en la misma región, y en el arroyo Chacay, en Uspallata, provincia de Mendoza (ver Figura 1).

Área de estudio

El área de estudio del presente trabajo se localiza en los Altos Andes Centrales e involucra el valle de Calingasta –en el sur de la provincia de San Juan– y el valle de Uspallata –en el norte de la provincia de Mendoza– (ver Figura 1). Independientemente de los límites administrativos, los valles mencionados presentan, debido a su orientación norte-sur, una conexión entre la Pre-cordillera y la Cordillera Frontal, lo cual limita la ocurrencia de precipitaciones.¹⁸ Consecuentemente, el clima predominante

Desarrollo Sustentable: “Promover el uso sostenible de los ecosistemas terrestres, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras y frenar la pérdida de la diversidad biológica”. Y en ese marco, se relaciona con la Meta 15.1: “[...] asegurar la conservación, el restablecimiento y el uso sostenible de los ecosistemas terrestres y los ecosistemas interiores de agua dulce y sus servicios, en particular los bosques, los humedales, las montañas y las zonas áridas, en consonancia con las obligaciones contraídas en virtud de acuerdos internacionales.”

¹⁸ Martínez Carretero, *op. cit.*

es árido, las lluvias se reducen a episodios aislados y la región se caracteriza por una amplitud térmica pronunciada.¹⁹

El paisaje es el resultado de la interacción entre los cordones montañosos, los valles fluviales y la dinámica de drenaje; por lo cual, el material de relleno del fondo de los valles es de origen cuaternario y carácter aluvial. Las unidades que componen este mosaico son: 1) Cordillera Frontal, 2) Pre-cordillera, 3) Valle Tectónico, 4) Huayqueñas (Bad Lands), 5) Piedemontes, 6) Valles Fluviales y 7) Terrazas Fluviales.²⁰ En los arroyos que fluyen desde la Cordillera Frontal hacia el valle, se establecen las comunidades de *O. trinervis*, caracterizadas por la altura de sus ejemplares (>6 m), por la cercanía a los cursos de agua permanentes,²¹ por la alta cobertura (95%) y por ocupar terrazas recientes de ríos y arroyos.²² Los suelos son de textura limo-arcillosa en los estratos superiores y la freática se encuentra a 1-1,5 m de profundidad. Los bosques actuales son de reducida extensión debido a impactos asociados a la tala e indicios de fuego.²³

Metodología

Para el caso de estudio se utilizaron imágenes satelitales Sentinel-2, las cuales se pueden obtener libremente y tienen buena resolución espacial (10m x 10m), ideales para bosques reducidos en extensión. Se seleccionaron dos períodos de estudio para el monitoreo de cambios: el correspondiente a los meses de noviembre a marzo, de 2015 (momento desde el cual funciona el sensor *Copernicus* que provee las imágenes Sentinel-2) y el de 2022. Para estos intervalos se aplicarán diferentes índices espectrales en función de cada variable (Ver Figura 2): El Índice Normalizado

¹⁹ Martínez Carretero, *op. cit.*

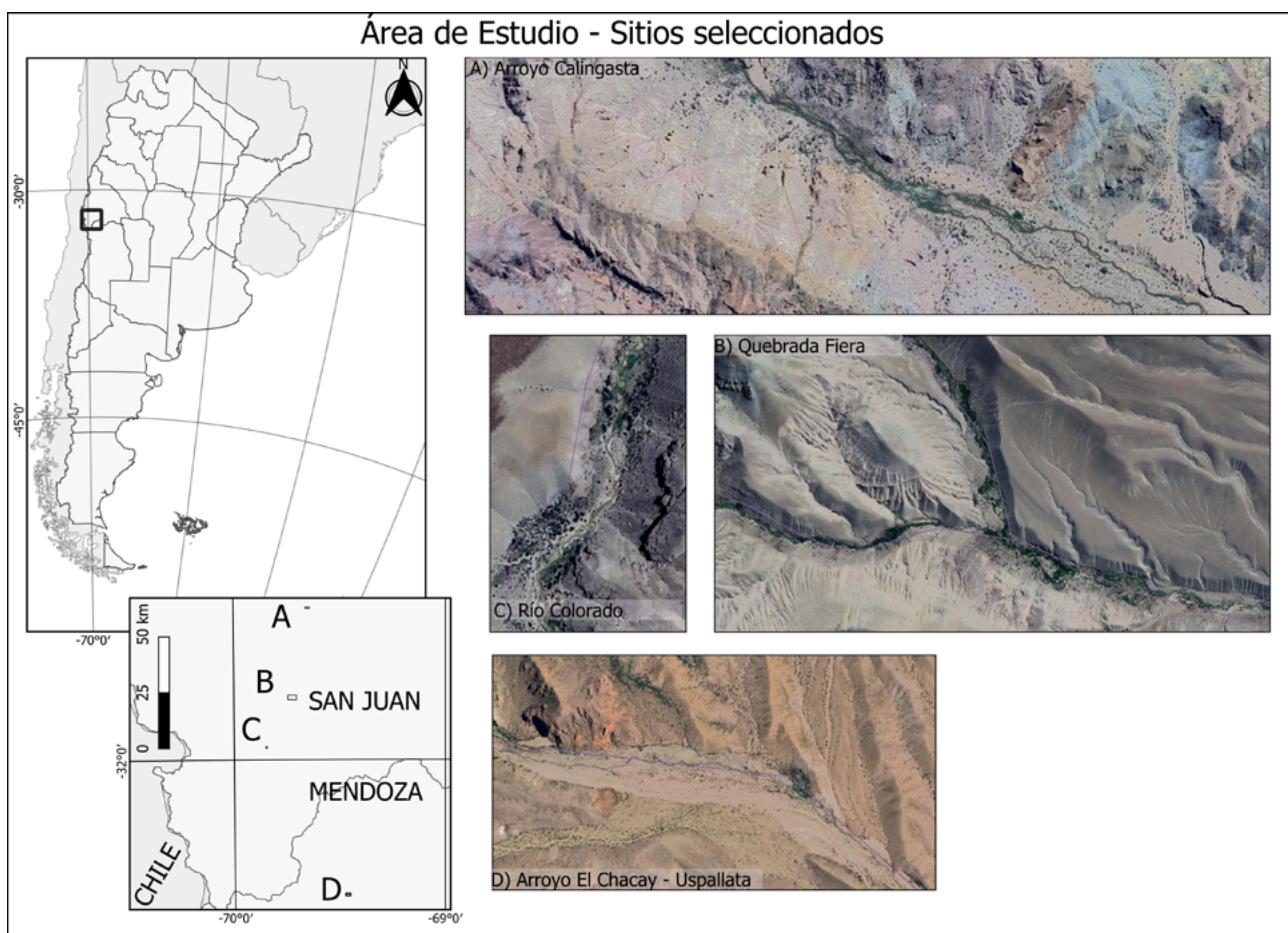
²⁰ Martínez Carretero, *op. cit.*

²¹ Roig, *et. al.*, *op. cit.*

²² Martínez Carretero, *op. cit.*

²³ Martínez Carretero, *op. cit.*

Figura 1. Ubicación del Área de Estudio y sitios seleccionados para aplicar la metodología.



de Diferencia de Agua Modificado (MNDWI, Xu, 2006) se aplica para detectar agua superficial y se calcula así:

$$\text{MNDWI} = (V - \text{SWIR}) / (V + \text{SWIR}),$$

Donde V corresponde a la banda verde y SWIR corresponde a la banda del infrarrojo de onda corta. Este índice fue utilizado con buenos resultados para estudiar variaciones de la Laguna de Llanquihue²⁴ y para estudiar los efectos

²⁴ Bianchi, L., Rivera, J. A., Rojas, F., Navarro, M.B., y Villalba, R. A regional water balance indicator inferred from satellite images of an Andean endorheic basin in central-western Argenti-

na. *Hydrological Sciences Journal* 62(4), 2017, 533-545; Alvarez, L. M., Meglioli, P., Rivera, J. A., Bianchi, L. O., Martín, S. y Sosa, H. Efectos de la variación hidrológica sobre la dinámica poblacional del flamenco austral (*Phoenicopterus chilensis*) en el sitio Ramsar Laguna de Llanquihue, Mendoza, Argentina. *Ornitología Neotropical* 29, 2018, 275-280.

²⁵ Calderón Archina, M. A. y Alvarez, L. M. Políticas del agua y de restauración de los humedales en lagunas de Guanacache: aproximaciones a un diálogo transdisciplinario. *Boletín de Estudios Geográficos* [En prensa], 2022.

procesamiento de esta capa permite evaluar el efecto del agua superficial en los bosques.

El Índice de Diferencia Normalizada de Humedad (NDMI) refleja cambios en la humedad del suelo²⁶ y en la vegetación,²⁷ y se obtiene así:

$$\text{NDMI} = (\text{NIR} - \text{MIR}) / (\text{NIR} + \text{MIR}),$$

En este caso, NIR es el infrarrojo cercano y MIR el infrarrojo medio. Del tratamiento de esta capa deriva el Indicador de Humedad Relativa (%). Finalmente, para evaluar la fenología del bosque, se utilizaron dos índices mediante los cuales se destaca el vigor de la vegetación y se calculan: el Índice de Diferencia Normalizada de Vegetación (NDVI) y el Índice de Vegetación Mejorado (EVI):

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED}),$$

$$\text{EVI} = 2.5 * (\text{SWIR} - \text{RED}) / (\text{SWIR} + 6 * \text{RED} - 7.5 * \text{BLUE} + 1)$$

Donde RED y BLUE corresponden a las bandas roja y azul del espectro visible respectivamente, y SWIR al infrarrojo de onda corta. Los valores numéricos son factores de corrección. El procesamiento de estos índices sirve para estimar el vigor del follaje (%).

El NDVI y el NDMI, junto a otros indicadores, fueron utilizados para correlacionar la biomasa aérea del bosque árido del Chaco en la estación seca tardía (otoño) y elaborar cartografía predictiva.²⁸ Las características ecológicas,

climáticas, edáficas y topográficas son homogéneas en el área de estudio y todos los sitios son de difícil acceso.

El trabajo de imágenes satelitales se realizó con la plataforma abierta Google Earth Engine (GEE), la cual facilita el acceso a amplias bases de datos espaciales.²⁹ Con esta herramienta se redactaron códigos de programación (*scripts*) para calcular los índices y realizar las clasificaciones supervisadas. Los códigos utilizados tienen instrucciones de combinar imágenes satelitales Sentinel 2, en función de su calidad y la ausencia de nubes y errores. Luego, carga una capa del área de estudio, realizada con un buffer de los arroyos mencionados, y una capa de entrenamiento, la cual tiene muestras para indicar qué es bosque (2) y que no (1). Finalmente, realiza una clasificación con el algoritmo Random Forest, sobre las bandas del mosaico de imágenes y los índices procesados, otorgando como producto una serie de capas *raster*, las cuales son filtradas y convertidas en vectores para calcular las superficies. Además, separa muestras de entrenamiento para efectuar una validación con matrices de error.³⁰ El procesamiento de las capas previas, las capas obtenidas y la cartografía elaborada para presentar los resultados se hará con el software abierto QGIS 3.24.2. Los valores medios de cada indicador serán obtenidos con la herramienta *Estadísticas de zona* para los vectores de bosque.

Resultados

El objetivo del presente trabajo fue poner a punto una metodología con SIG y sensores remotos para detectar bosques de *Ochetophila trinervis* en función de una serie de indicadores derivados del procesamiento de imágenes.

²⁶ Wilson, E. H., y Sader, S. A. Detection of forest harvest type using multiple dates of Landsat TM imagery. *Remote Sensing of Environment* 80(3), 2002, 385-396.

²⁷ Freitas, S. R., Mello, M. C., y Cruz, C. B. Relationships between forest structure and vegetation indices in Atlantic Rainforest. *Forest ecology and management* 218(1-3), 2005, 353-362.

²⁸ Gasparri, N. I., Parmuchi, M. G., Bono, J., Karszenbaum, H. y Montenegro, C. L. Assessing multi-temporal Landsat 7 ETM+ images for estimating above-ground biomass in subtropical dry forests of Argentina. *Journal of Arid Environments* 74(10), 2010, 1262-1270.

²⁹ Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D. y Moore, R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote sensing of Environment* 202, 2017, 18-27.

³⁰ Ver código: <https://code.earthengine.google.com/d5e-c8aa3e3cd07f0d16f19270ef6cec6>

Figura 2: Procesamiento de Imágenes Satelitales en el Arroyo Chacay para ilustrar la metodología.

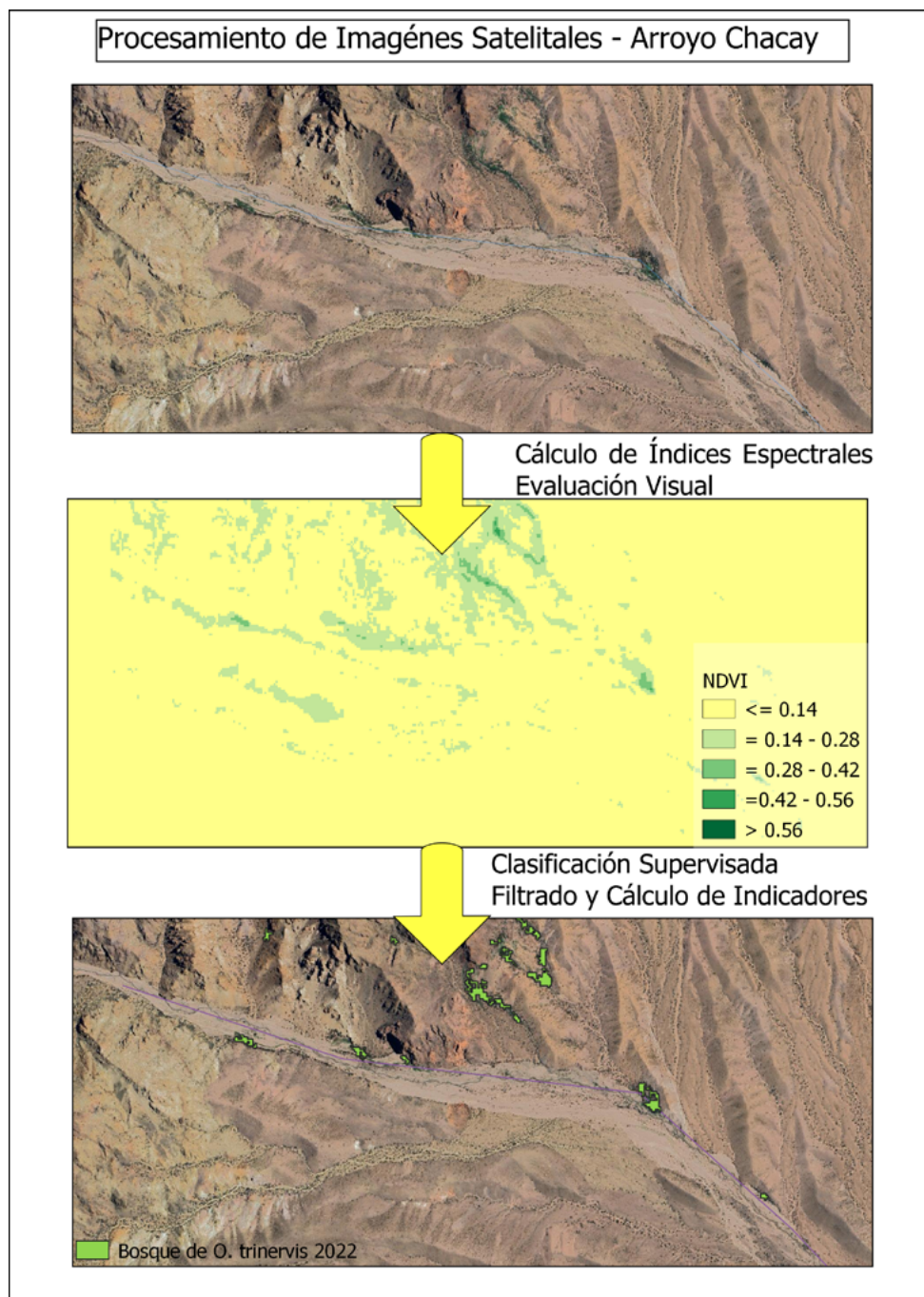


Tabla 1: Se resumen los resultados principales obtenidos del procesamiento de imágenes satelitales.

Sitio	Superficie (ha)	Hidrología Superficial (MNDWI)	Fenología (NDVI)	Fenología (EVI)	Humedad Relativa (NDMI)
Arroyo Calingasta	2,02	0	0,37	0,33	0,15
Quebrada Fiera	65,4	0	0,37	0,32	0,15
Río Colorado	4	0	0,35	0,29	0,15
Arroyo Chacay	4,35	0	0,27	0,2	0,35

Tabla 1: Se resumen los resultados principales obtenidos del procesamiento de imágenes satelitales.

nes satelitales, como la superficie de los parches (ha.), la fenología, la humedad relativa y el agua superficial. Los resultados generales son satisfactorios, ya que se detectaron parches de bosques en los sitios seleccionados. Se obtuvieron clasificaciones con un alto valor de exactitud (95%), las cuales fueron procesadas en función de cada sitio, obteniendo un total de 4 capas con sus respectivos indicadores (Ver Tabla 1).

Los resultados de las clasificaciones presentaron un nivel de exactitud alto, y la interpretación visual de las mismas –sobre mosaicos de alta resolución de Google Earth Engine– demostró que el procesamiento es adecuado ya que registra correctamente parches de bosque de *Ochetophila trinervis*. Se detectaron 75,77 ha de bosques, aunque el sistema de mayor tamaño, el de la Quebrada Fiera, corresponde al 86,3% del total. Los indicadores asociados a cada índice espectral fueron útiles para el proceso, excepto el caso del MNDWI, cuyos valores fueron de 0 para todos los sitios en toda el área, por lo cual no fue posible obtener el indicador de agua superficial.

Respecto a la humedad relativa y la fenología, los indicadores mostraron una asociación positiva para todos los sitios. El bosque de Quebrada Fiera es el que presenta la

mayor superficie, caracterizada por la continuidad espacial y un bajo nivel de fragmentación. Al norte de este sitio, el bosque del Arroyo Calingasta es el de menor tamaño registrado (ver Figura 3). En el Arroyo Chacay, en Uspallata, se registraron pequeños parches de bosque, los cuales conforman una superficie total de 4,35 ha. Apenas mayor que los parches detectados en el Río Colorado, de 4 ha.

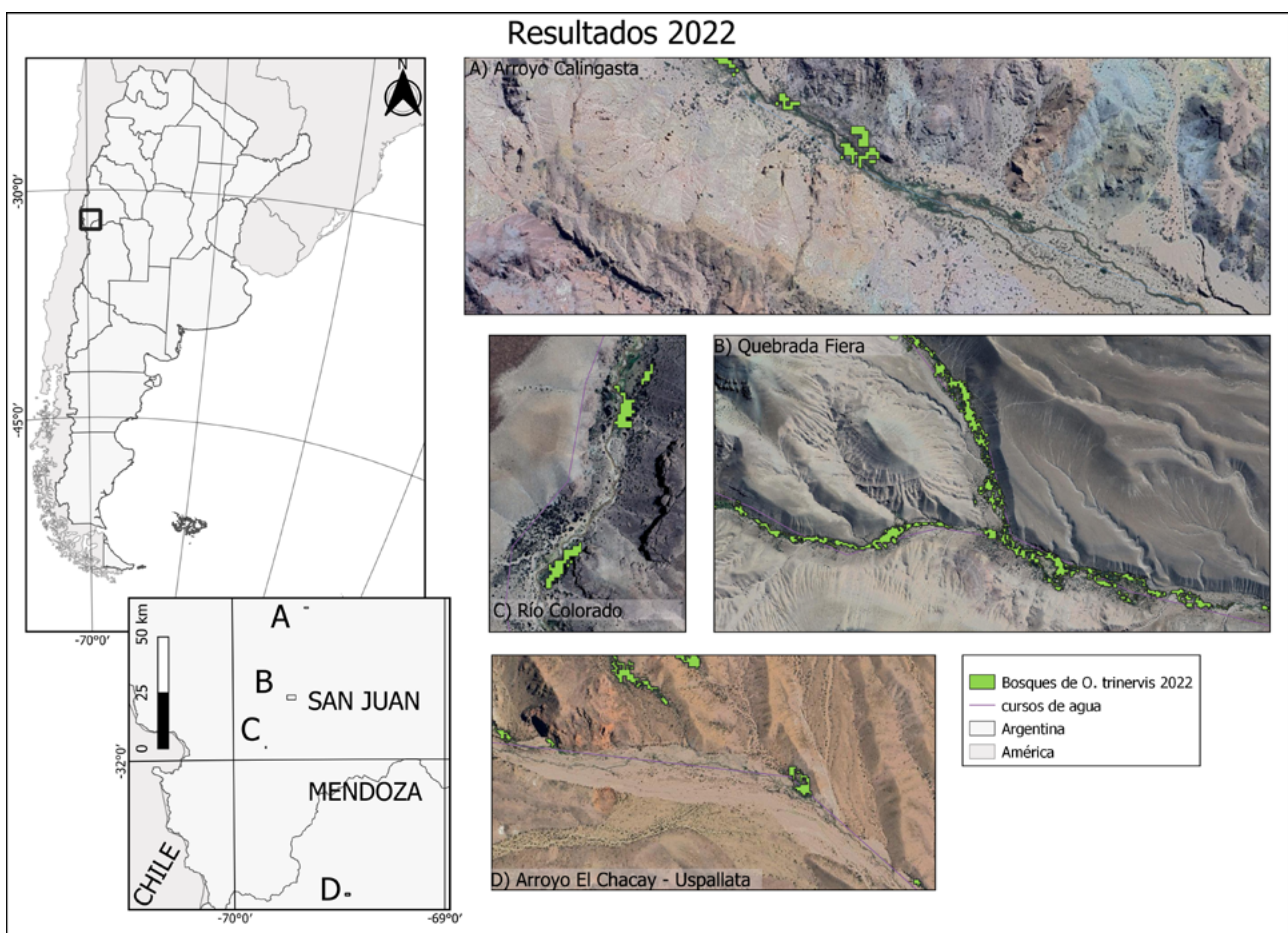
Conclusiones

En el presente trabajo se desarrolla un sistema de indicadores para la detección de bosques de *Ochetophila trinervis* en el noroeste de Mendoza y suroeste de San Juan (Andes Centrales de Argentina). Considerando sus preferencias ambientales –bordes de arroyos, ríos, humedales y terrazas aluviales recientes–,³¹ se seleccionaron índices satelitales que representen estos requerimientos, como la humedad (NDMI), el estado del follaje o la fenología (NDVI, EVI) y el agua superficial (MNDWI). La disponibilidad de estos factores es clave para el desarrollo y la persistencia de las poblaciones de esta especie.³²

³¹ Schmelter, *op. cit.*

³² Roig, *et. al., op. cit.*

Figura 3: Se presentan los parches de bosques detectados en los sitios seleccionados.



Mediante clasificaciones supervisadas sobre imágenes satelitales Sentinel 2 ejecutadas en Google Earth Engine, se detectaron diferentes sistemas de bosques en el Arroyo Calingasta, la Quebrada Fiera, el Río Colorado y el Arroyo Chacay con un alto grado de exactitud (95%). Los indicadores de humedad relativa (NDMI) y fenología (NDVI, EVI) fueron útiles para el entrenamiento del clasificador y el análisis de los resultados, lo cual no sucedió con el agua superficial (MDNWI). Los valores de los píxeles del Índice MDNWI son nulos para el área de es-

tudio, lo cual se interpreta como ausencia de agua acorde a su desarrollo³³ y posterior aplicación.³⁴ De cualquier manera, hay un factor de escala operando, ya que, en los trabajos citados previamente, se aplica esta relación de bandas espectrales para la detección de cuerpos de agua de gran extensión como la Laguna de Llanquanelo o la re-

³³ Xu, H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International journal of remote sensing*, 27(14), 2006, 3025-3033.

³⁴ Bianchi, et. al. *op. cit.*; Alvarez, et. al., *op. cit.*

gión de Guanacache, donde otrora ocupaban superficies de km². En este caso, la intención era detectar arroyos y ríos de montaña, con un resultado que fue negativo. En este sentido, sería necesario explorar otros índices o indicadores para el agua superficial.

Los indicadores asociados a humedad relativa (NDMI) y fenología (NDVI, EVI) fueron fundamentales para la detección de los bosques de *Ochetophila trinervis*. Para el caso del Arroyo Chacay (Uspallata), la superficie detectada fue menor a la esperada, considerando que se trataba de bosques con un estado de conservación adecuado,³⁵ aunque evidenciaba signos de extracción de leña y deterioro.³⁶ En este sistema sería necesario e interesante estudiar procesos históricos recientes mediante un análisis temporal de cambios.

En el Río Colorado se detectaron parches reducidos asociados a terrazas aluviales, posiblemente relictuales debido al intenso tránsito que hay en la zona y el potencial uso y extracción de leña. Por otro lado, en el Arroyo Calingasta se detecta el sistema de menor tamaño. En estos sitios es necesario realizar una visita al terreno para corroborar la presencia de *O. trinervis* y evaluar el alcance del método de detección y mapeo propuesto. En la Quebrada Fiera, donde fue detectado el bosque de mayor superficie (65,4 ha.), se observaron puestos abandonados, con lo cual puede plantearse una disminución de la actividad en la zona. Este factor, las condiciones ambientales propicias y el difícil acceso pueden ser la causa de su estado de conservación. Este bosque presenta una continuidad espacial y una buena estructura, justificando su inclusión en el Ordenamiento Territorial de Bosques Nativos (OTBN) de la provincia de San Juan. En líneas generales, la metodología empleada, basada en el uso de SIG y sensores remotos para detectar bosques de *O. trinervis*, ha presentado buenos resultados, permitiendo detectar

superficies de bosques de una especie con requerimientos de hábitat específicos y que conforma parches de pequeño tamaño. Respecto del sistema de indicadores utilizado, la fenología (NDVI, EVI) y la humedad relativa (NDMI) fueron satisfactorios, mientras que el agua superficial (MNDWI) no fue útil debido a una cuestión de escala y de cómo se aplica el índice correspondiente. En este sentido, es necesario continuar con el desarrollo de técnicas para detectar bosques de montaña en los Andes Centrales, los cuales son reducidos en extensión, pero sus funciones ecológicas son de gran valor debido a la protección de las cuencas y los recursos hídricos.

³⁵ Roig, et. al., op. cit.

³⁶ Martínez Carretero, op. cit.

