

APLICACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA GESTIÓN DE RIESGOS AMBIENTALES EN FORESTACIONES DEL DELTA DEL RÍO PARANÁ

THE APPLICATION OF GEOGRAPHICAL INFORMATION TECHNOLOGIES IN ENVIRONMENTAL RISK MANAGEMENT OF FORESTED LAND IN THE PARANA RIVER DELTA

Virginia Piani¹, Facundo Boladeras¹ y Pablo Aceñolaza²

Fecha de recepción: 8 de abril de 2022 / Fecha de aceptación: 6 de julio de 2022

Cita sugerida: Piani, V. et al. (2022) Aplicación de Tecnologías de Información Geográfica para la Gestión de Riesgos Ambientales en Forestaciones del Delta del Río Paraná *Scientia interfluvii*, vol 13 (1), Universidad Autónoma de Entre Ríos: Paraná.

RESUMEN

Las forestaciones constituyen una de las principales actividades productivas del Delta del Río Paraná. Estas prácticas están frecuentemente asociadas a modificaciones del relieve y al manejo hídrico, generando como consecuencia impactos ambientales que contribuyen al riesgo ambiental. La gestión de riesgos contribuye a reducir estos impactos mediante la planificación territorial sostenible basada en el conocimiento de los atributos funcionales de los ecosistemas. El objetivo de este trabajo fue analizar herramientas para la gestión del riesgo ambiental, en plantaciones forestales del Delta del Río Paraná a partir del uso de Tecnologías de la Información Geográfica (TIG'S). Para ello se utilizaron datos de parcelas forestales caracterizadas en base a sus respuestas espectrales para cada especie forestal de interés. Esta información se incluyó dentro de un Sistema de Información Geográfica (SIG) junto con datos demográficos (INDEC) y de frecuencia de agua. Se describió la relación entre la densidad poblacional, el tipo de forestación y otras variables de interés. Como resultado se pudo

ABSTRACT

Forestation constitutes one of the principal productive activities of the Parana River Delta. These practices are frequently associated with modifications in geographic relief and hydric management, consequently causing environmental impacts that contribute to environmental risk. Risk management contributes to reducing these impacts through sustainable territorial planning based on the knowledge of functional attributes of ecosystems. The objective of this study was to analyse tools for environmental risk management in forest plantations in the Parana River Delta based on the use of Geographical Information Technologies (GIT's). For this, data of forested parcels, characterised on the basis of their spectral responses for each forest species of interest, were used. This information is included within a Geographic Information System (GIS) together with demographic data (INDEC- National Institute of Statistics and Censuses) and of water frequency. The relationship between population density, the type of forestation and other variables of interest was described. As a result, population centres of greater

1. Universidad Autónoma de Entre Ríos- Facultad de Ciencia y Tecnología- Centro Regional de Geomática (UADER-FCyT-CeReGeo). Ruta 11 km 10.5 Oro Verde, Entre Ríos, Argentina.

2. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Centro de Investigación Científica y de Transferencia Tecnológica a la Producción. España 149, Diamante, Entre Ríos, Argentina



ver que, en centros poblados con mayor densidad dentro de la región, como Campana, Zárate, y Villa Paranacito, se registró en conjunto más del 50% de las plantaciones de *Populus* sp. (álamo) y más de un 32% de su superficie endicada con alteración del régimen hídrico local. El trabajo demostró la utilidad de estas herramientas de apoyo para la toma de decisiones.

PALABRAS CLAVES

SIG. Gestión ambiental. Plantaciones. Humedales. Sostenibilidad.

INTRODUCCIÓN

Las funciones ecosistémicas de los humedales, como el almacenaje de carbono, la provisión de hábitat para la fauna silvestre, la recarga de acuíferos, entre otras, se diferencian de las funciones de los ecosistemas netamente terrestres o acuáticos por su alta dependencia del régimen hidrológico. Por lo tanto, la modificación del humedal, sin considerar este aspecto clave, afecta en forma directa o indirecta el funcionamiento ecológico del mismo, como así también de los ecosistemas vecinos (Benzaquén, 2013). El cambio en el uso de la tierra asociado a la actividad forestal genera efectos ambientales atribuibles, por un lado, a las características de las especies cultivadas y, por otro, a las decisiones humanas reflejadas en la forma de manejo (Kandus et al., 2006). La región del Delta del Río Paraná constituye una compleja planicie inundable con características biogeográficas y ecológicas únicas en la Argentina, conformando un macrosistema de humedales fluviales (Quintana y Bó, 2010). En esta región las plantaciones forestales cobraron importancia en las últimas seis décadas, siendo en la actualidad una de las principales actividades productivas tanto de las islas bonaerenses como del Departamento Islas del Ibicuy (provincia de Entre Ríos) (Minotti et al., 2010). La mayoría de estas plantaciones se encuentran concentradas en la zona definida como Delta Inferior (Burkart, 1957). Las principales especies utilizadas en forestaciones de la región son *Salix* sp. (saúce) y *Populus* sp. (álamo), ambas pertenecientes a la familia de las Salicáceas, si bien se pueden encontrar, en menor proporción, plantaciones de

density could be seen within the region of Campana, Zárate, and Villa Paranacito, which together were seen to register over 50% of the plantations of *Populus* sp. (cottonwood) and over 32% of its surface was used for damming which alters the local hydric regimen. The study showed the usefulness of these support tools for decision making.

KEY WORDS

GIS. Environmental management. Plantations. Wetland. Sustainability.

INTRODUCTION

The ecosystemic functions of wetlands, such as the storing of carbon, the provision of habitat for wild life, the recharging of aquifers among others, are differentiated by the functions of ecosystems that are clearly ground-related or aquatic for their high dependence on the hydrologic system. Thus, the modification of wetlands, without consideration of this key aspect directly or indirectly affects ecological functioning of the same, just as it does with neighbouring ecosystems (Benzaquén, 2013). The change in the use of land associated with foresting activity generates environmental effects that can be attributed, on the one hand, to characteristics of the cultivated species and, on the other, to human decisions reflected in the form of their management (Kandus et al., 2006).

The Parana River Delta constitutes a complex flood plain with bio-geographic and ecological characteristics that are unique in Argentina making up a macrosystem of fluvial wetlands (Quintana and Bó, 2010). In this region the forest plantations have become important in the last six decades, currently being used for one of the principal productive activities of the islands of the province of Buenos Aires as well as of the Department of the Islas del Ibicuy in the province of Entre Ríos (Minotti et al., 2010). The majority of these plantations are found concentrated in the zone defined as the Lower Delta (Burkart, 1957). The main species used in forestation of the region are *Salix* sp. (Willow) and *Populus* sp. (cottonwood), both of which belong to the Salicaceae family, even though there can be found plantations of

Pinus sp. (pino) o *Eucalyptus* sp. (eucalipto), sobre todo asociadas al cordón litoral. La superficie forestada con Salicáceas en el Delta alcanza las 80.000 ha (con un 75% actualmente bajo manejo forestal), de las cuales 14.500 ha corresponden a álamos y las restantes a sauces (Casaubon, 2014; Dirección Nacional de Desarrollo Foresto Industrial, 2019). La zona núcleo forestal se encuentra en el Delta Inferior bonaerense, presentando una gran homogeneidad paisajística (Casaubon, 2014).

Dadas las características ecohidrológicas regionales, las prácticas forestales están frecuentemente asociadas a modificaciones del relieve y al manejo hídrico, principalmente en las plantaciones de álamo en la zona núcleo forestal del Delta del Paraná (Acciaresi et al., 2006; Kalesnik et al., 2011). Esta modalidad productiva ocasiona cambios en el humedal a escala local, generando como consecuencia un aumento de los riesgos ambientales asociados a la pérdida de los servicios que los humedales brindan a nivel ecosistémico (amortiguación de los excedentes hídricos, conservación de reservorios de agua dulce, retención y acumulación de contaminantes, incorporación de materia orgánica, entre otros), social (identidad cultural, conservación y transmisión de saberes tradicionales) y económico (productividad) (Kalesnik et al., 2010). En otras palabras, mantener la integridad de estos ecosistemas y sus funciones ecológicas es un objetivo prioritario de las políticas de desarrollo y manejo sustentable de los recursos naturales y productivos (Minotti et al., 2010).

La gestión de riesgos contribuye a reducir estos impactos mediante la planificación territorial sostenible basada en el conocimiento de los atributos funcionales de los ecosistemas (Paruelo, 2008; Minotti et al., 2010; Zamboni et al., 2017). Es necesario desarrollar y aplicar estrategias de manejo que contemplen la sostenibilidad del sistema socio-productivo con la sostenibilidad ambiental. Acciaresi et al. (2006) proponen prácticas de establecimiento, manejo y aprovechamiento forestal susceptibles de ser aplicadas a las plantaciones destinadas a la producción maderera en el Delta del Paraná, para así mitigar los posibles impactos negativos sobre la biodiversidad. Estas propuestas se tomaron en consideración en este trabajo a los fines de aplicar las herramientas utilizadas a situaciones específicas, y evaluar su utilidad como insumos para la gestión de

Pinus sp. (Pine) or *Eucalyptus* sp. (Eucalyptus) to a lesser degree, above all associated to the river coast. The forested surface with these members of these Salicaceae reaches 80.000 hectares (with 75% currently under forest management), of which 14.500 hectares correspond to Cottonwood and the rest to Willow (Casaubon, 2014; Dirección Nacional de Desarrollo Foresto Industrial, National Management of Industrial Forest Development, 2019). The forested nucleus of the zone is found in the Lower Delta of the Buenos Aires region and shows much landscape homogeneity. (Casaubon, 2014).

Given the region's eco-hydrological characteristics, the foresting practices are frequently associated with surface modification and hydric management, mainly in the Cottonwood plantation of the forested nucleus zone of the Parana River Delta (Acciaresi et al., 2006; Kalesnik et al., 2011). This productive modality causes changes in the wetlands on a local scale and, consequently, there are higher environmental risks associated to the loss of the services offered by the wetlands at an ecosystem level (lowering of the hydric excesses, conservation of reserves of fresh water, retention and accumulation of contaminants, incorporation of organic material among others), socially (cultural identity, conservation and transmission of traditional knowledge) and economically (productivity) (Kalesnik et al., 2010). In other words, maintaining the integrity of these ecosystems and their ecological functions is an uppermost aim of the policies related to development and sustainable management of natural and productive resources (Minotti et al., 2010).

Risk management contributes to lessening these impacts through sustainable territorial planning based on the knowledge of the functional attributes of the ecosystems (Paruelo, 2008; Minotti et al., 2010; Zamboni et al., 2017). It is necessary to develop and apply management strategies that contemplate the sustainability of the socio-productive system with environmental sustainability. Acciaresi et al. (2006) propose established practices, management and the profitable use of what is susceptible in forested area, to be applied to the plantations meant for wood production on the Parana River Delta, to thus mitigate the possible negative impacts on biodiversity. These proposals were taken into consideration in this

riesgos ambientales.

Gran parte de la investigación con sensores remotos aplicada a los sistemas forestales se centra en la extracción de parámetros funcionales de rodales, mediante el análisis de las respuestas espectrales en relación con mediciones estructurales (Lie et al., 2018). El análisis de la variación espacial y temporal de la energía reflejada en las diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético es importante para dar respuesta a los problemas relacionados con la gestión de riesgos, la planificación territorial y la toma de decisiones (Coops, 2015). Dentro de los Índices de Vegetación (IV) derivados de este análisis, el Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI) (Tucker, 1979), es uno de los más empleados. El NDVI se usa ampliamente en estudios a mediana y gran escala para determinar la dinámica de la vegetación, e integra la baja reflectancia en longitudes de onda correspondientes al Rojo y la alta reflectancia en la porción del Infrarrojo Cercano.

Las Tecnologías de la Información Geográfica (TIG'S) ofrecen herramientas para el estudio de la cobertura del suelo, descripción de la fenofase y de las variaciones inter e intranuales debidas a cambios o eventos climáticos (Paruelo, 2008); a la vez que permiten trabajar con grandes volúmenes de datos en áreas relativamente inaccesibles (Chuvieco Salinero, 2002). La región cuenta con trabajos de aplicación de estas TIG's (Aceñolaza et al., 2014; Zamboni et al., 2014). Una de estas herramientas es Google Earth Engine (GEE) que consta de una plataforma de cómputo en la nube haciendo posible el análisis de Series Temporales obtenidas de datos derivados de sensores remotos (Wulder et al., 2019), y el desarrollo de algoritmos en línea para la estimación de Índices de Verdor, Firmas Espectrales, entre otros (Gorelick et al., 2017). Estas Series Temporales muestran generalmente variabilidad intra e interanual y tendencias contrastadas según la ubicación geográfica, la escala de trabajo y el período estudiado en diferentes coberturas vegetales (Cai et al., 2018; Piedallu et al., 2019). Estas soluciones han mejorado sustancialmente las posibilidades de monitoreo del desarrollo ambiental y de los recursos terrestres (Klein et al., 2017; Wulder et al., 2019). En este contexto, este trabajo busca ana-

study with a view to applying the tools used in specific situations and to evaluate their utility as inputs for the management of environmental risks

A large part of the research with remote sensors that was applied to forested systems centres around the extraction of functional parameters of wheels through the analysis of spectral responses in relation to structural measurements (Lie et al., 2018). The analysis of the spatial and temporal variation of energy reflected in the different wavelengths of the electromagnetic spectrum is important for finding answers to problems related to risk management, territorial planning and decision making (Coops, 2015). Within the Vegetation Indices (VI) derived from this analysis, the Normalised Differential Vegetation Index (NDVI) (Tucker, 1979), is one of the most used. The NDVI is amply used in medium and large scale studies to determine the dynamics of the vegetation and integrates the low reflectance in wavelengths corresponding to the red and the high reflectance in the portion of the near infrared.

Geographic Information Technologies (GIS) offer tools for the study of groundcover, description of the phenophases, and inter and intra annuals due to climatic changes or events (Paruelo, 2008). At the same time, they allow working with large volumes of data in relatively inaccessible areas (Chuvieco Salinero, 2002). The region has already been seen with work carried out with the application of these GIT's (Aceñolaza et al., 2014; Zamboni et al., 2014). One of the tools used here is the Google Earth Engine (GEE) which provides a cloud computer platform enabling the analysis of Temporal Series obtained from data derived from remote sensors (Wulder et al., 2019), and the development of line algorithms for the estimation of Indices of Vegetation, Spectral Signatures among others (Gorelick et al., 2017). These Temporal Series generally show intra and inter annual variability and tendencies that contrast according to geographic location, the scale of work and the period studied for different vegetal cover (Cai et al., 2018; Piedallu et al., 2019). These solutions have substantially improved the monitoring possibilities of environmental development and of land resources (Klein et al., 2017; Wulder et al., 2019). In this context, this study seeks to analyse resources for the management of environmental risks in forested plantations

lizar recursos para la gestión del riesgo ambiental en plantaciones forestales del Delta del Río Paraná a partir del uso de TIG'S.

MATERIALES Y MÉTODOS

1) Área de estudio

El área de estudio se inserta en la región que se conoce como Delta del Río Paraná (32°5' S, 34°29' S) (Figura 1). Esta región conforma una extensa y morfológicamente compleja planicie inundable cuyos límites definidos la separan de las regiones vecinas. Su mayor desarrollo ocurre sobre la zona nororiental de la provincia de Buenos Aires, el Sur de Entre Ríos y comprende una pequeña porción del Este de Santa Fe (Quintana y Bó, 2010). El Delta se integra en el Complejo Fluvio Litoral del Río Paraná (CFLRP) con influencia fluvial y marítima (Kalesnik y Quintana, 2006; Aceñolaza et al., 2008).

La región del Delta posee un paisaje heterogéneo con una alta diversidad de ambientes y fisonomías incluyendo una red hidrográfica compuesta e intrincada (Zamboni et al. 2017). El conjunto de cursos de agua permanentes como estacionales añade complejidad. Este patrón hidrogeomorfológico (Aceñolaza et al., 2008; Ramonell, 2012) determina la existencia de un perfil con zonas más o menos sujetas al anegamiento fluvial temporal o permanente, con diferentes grados de recurrencia de áreas inundadas (Viva et al., 2017).

Las forestaciones se localizan principalmente en las porciones media e inferior del Delta, en las provincias de Entre Ríos y Buenos Aires (Dirección Nacional de Desarrollo Foresto Industrial, 2019). Considerando lo anteriormente mencionado, el área de estudio se refirió a las porciones deltaicas de las provincias de Entre Ríos y Buenos Aires, tal como se ilustra en el recuadro de la Figura 1.

Los principales centros poblados asociados con el área de estudio son, según los datos correspondientes al Censo 2010: Ibicuy (4.900 hab.) y Villa Paranacito (1.940 hab.) en Entre Ríos; y Tigre (380.709 hab.), Campana (86.860 hab.) y Zárate (98.522 hab.) en Buenos Aires (INDEC, 2012). Las islas pertenecientes al Municipio de Tigre presentan una alta densidad poblacional con zonas utilizadas con fines turístico-recreacionales. La presencia de

of the Parana River Delta using GIT'S.

MATERIALS AND METHODS

1) Study area

The study area is set in the region known as the Parana River Delta (32°5' S, 34°29' S) (Figure 1). This region makes up an extensive and morphologically complex flood plain whose defined limits separate it from neighbouring regions. Its leading development takes place in the Northeastern zone of the province of Buenos Aires, South of Entre Ríos and includes a small portion to the East of Santa Fe (Quintana and Bó, 2010). The Delta is part of the Parana River Coastline Complex -Complejo Fluvio Litoral del Río Paraná (CFLRP) with fluvial and maritime influence (Kalesnik and Quintana, 2006; Aceñolaza et al., 2008).

The Delta region has a heterogeneous landscape with a high diversity of environments and physiognomies including a hydrographic network that is both composed and intricate (Zamboni et al. 2017). The total of the permanent and seasonal water courses add to its complexity. This hydro-geomorphological pattern (Aceñolaza et al., 2008; Ramonell, 2012) determined the existence of zones that are more or less subject to temporal or permanent water-logging with different degrees of recurrence in the flood areas. (Viva et al., 2017).

The forestations are located mainly in the middle and lower portions of the Delta, in the provinces of Entre Ríos and Buenos Aires (National Centre for Industrial Forest Development-Dirección Nacional de Desarrollo Foresto Industrial, 2019). Considering the afore mentioned, the study area refers to the portions of the Delta of the provinces of Entre Ríos and Buenos Aires as illustrated in the inset in Figure 1.

The principal populated centres associated with the study area are, according to the data corresponding to the 2010 Census: Ibicuy (4.900 residents.) and Villa Paranacito (1.940 res.) in Entre Ríos; and Tigre (380.709 res.), Campana (86.860 res.) and Zárate (98.522 res.) in Buenos Aires (INDEC, 2012). The islands pertaining to the Municipality of Tigre present a high population density with zones used for touristic-recreational purposes. The presence of an important urban, industrial cordon situated in

un importante cordón urbano-industrial ubicado en el sector continental de la provincia de Buenos Aires tiene un efecto tanto directo como indirecto sobre su medio natural y socioeconómico, debido a la presión que ejerce la densidad poblacional, la contaminación directa o indirecta que llega por los afluentes continentales al Paraná, los caminos, etc. (Benzaquén, 2013).

2) Metodología

Se descargaron y almacenaron en formato vectorial ESRI Shapefile los polígonos de parcelas forestales disponibles de forma libre y gratuita para la región, generadas en inventarios en los años 2008 (Agroindustria, Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación), 2013 y 2015 (Área SIG e Inventario Forestal del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación) (Brandan et al., 2009; MAGyP, 2013, 2015). Los géneros con los cuales se trabajó fueron *Pinus* sp., *Salix* sp. y *Populus* sp. Además, se utilizaron bases de datos de Series Temporales de respuestas espectrales (NDVI y Firmas Espectrales) generadas por Piani (2019) para las especies seleccionadas, en el período comprendido entre los años 2008-2018.

Se realizó un mapa de densidad poblacional a nivel de radio censal (INDEC, 2012), coloreados de acuerdo al tamaño de la población, para aquellos radios interceptados con las parcelas forestales. Este mapa permitirá asociar la densidad poblacional humana y el tipo de forestación.

Se realizó un mapa de frecuencia de agua utilizando el Índice de Agua de Diferencia Normalizada Modificado (MNDWI). El mismo muestra la frecuencia expresada en porcentaje de cubierta de agua, calculado a partir de una serie temporal de imágenes Landsat 8 OLI y fue adaptado de Viva et al. (2017). Este mapa permite identificar las regiones con mayor propensión a inundarse para un período determinado.

Se generaron una serie de propuestas de aplicaciones de estas TIG's tomando de base las contribuciones de otros autores para la gestión sustentable de las plantaciones en la región (Acciaresi et al., 2006). Finalmente, se graficaron ejemplos de datos de NDVI y Firmas Espectrales para las especies estudiadas, extraídos de la base de datos a nivel de parcela, como forma de visualizar algunas de las

the continental sector of the Province of Buenos Aires has both a direct and indirect effect on its natural and socioeconomic medium, due to the pressure exerted by population density, the direct or indirect contamination that arrives here by means of the continental tributaries to the Parana, the paths, etc. (Benzaquén, 2013).

2) Methodology

The polygons of forest parcels available freely and at no cost for this region were printed and stored in a vectorial ESRI Shapefile format. These were made in the inventories in 2008 (Agroindustry, Ministry of Agriculture, Livestock and Fisheries of the Nation), 2013 and 2015 (GIS Area and Forest Inventory of the Ministry of Agriculture, Livestock and Fisheries of the Nation) (Brandan et al., 2009; MAGyP, 2013, 2015). The tree types worked with were *Pinus* sp., *Salix* sp. and *Populus* sp. Furthermore, data bases of Temporal Series of Spectral Responses were used (NDVI and Spectral Signatures) carried out by Piani (2019) for the selected species in the period ranging from the years 2008 and 2018.

A map of population density was made at a radio census level (INDEC, 2012), coloured according to population size for which radii were intercepted from forest parcels. This map allows the association of human population density with the type of forestation.

A map was made showing water frequency using the Modified Normalised Difference Water Index (MNDWI). This shows the frequency expressed in the percentage covered by the water body. The calculation is based on a temporal series of images from Landsat OLI 8 and adapted by Viva et al. (2017). This map allows the identification of regions with a higher propensity to flooding during a determined period.

A series of proposals of these GIT applications were generated using the contributions of other authors for the sustainable management of plantations in the region (Acciaresi et al., 2006).

Finally, graphs were drawn with examples of NDVI and Spectral Signatures for the studied species, extracted from the data bases pertaining to the parcel so as to visualise some of the possible applications of the GIT's used. Maps were made with average values of NDVI for two contrasting years. The Spectral Signatures were shown on graphs for these parcels for

posibles aplicaciones de las TIG's utilizadas. Se realizaron mapas con valores medios de NDVI para dos años contrastantes. Se graficaron las Firmas Espectrales de esas parcelas para los mismos años que el mapa. Por último, se muestran las Series Temporales de valores medios de NDVI estacionales, anuales, mensuales y para todas las fechas disponibles.

3) Resultados y Discusión

Las parcelas estudiadas mediante Series Temporales permiten identificar en términos generales situaciones de disminución, aumento, o estabilidad en sus Respuestas Espectrales, generando la posibilidad de interpretar sus patrones respecto a prácticas de manejo a escala de parcela. En la Tabla 1 se pueden ver los ejemplos de aplicación de estos TIG's utilizados a partir de aportes de otros autores para la gestión sustentable de las plantaciones en la región (Acciaresi et al., 2006). De esta manera se contribuye a la articulación necesaria entre los expertos técnicos y los encargados de tomar decisiones para ayudar a desarrollar la comprensión, los incentivos y las políticas para respaldar las acciones sobre el terreno (Davis et al., 2019).

Otro aspecto relacionado a la gestión del riesgo es la relación entre la densidad poblacional humana y el tipo de forestación. En la Figura 2 se puede ver el mapa generado para comparar estas dos variables. El núcleo forestal de la provincia de Buenos Aires se encuentra en los municipios de Campana y Zárate, que poseen una alta densidad poblacional. Este núcleo cuenta con la mayor densidad de plantaciones de Salicáceas y más del 50% de las plantaciones de *Populus* sp. analizadas en este estudio. A su vez, esta zona tiene el 42% de la superficie endicada e incluye la mayor concentración de diques/ataja repuntes, a esto se le suma que sus fincas poseen la dedicación más antigua correspondiente a la actividad forestal. La alta concentración de endicamientos en la zona se asocia principalmente a las plantaciones de *Populus* sp., las cuales requieren de buen drenaje, a diferencia de las de *Salix* sp. Los radios censales asociados a este núcleo forestal tienen una densidad media en las zonas de los cultivos y alta en los centros poblados. Otra zona con densidad poblacional media es la asociada al municipio de Tigre. Sin embargo, la superficie endicada

the same years shown on the map. Lastly, the Temporal Series of average NDVI values seen seasonally, annually, monthly and for all of the available dates were shown.

3) Results and Discussion

The parcels studied through the Temporal Series allow the identification in general terms of lessening, increase or stability in the spectral signatures, generating the possibility of interpreting patterns with regard to on-scale parcel management practices. In Table 1, examples can be seen of the application of the GIT's used, based on the contributions of other authors for the sustainable management of plantations in the region (Acciaresi et al., 2006). In this way there is a contribution to the necessary articulation between technical experts and decision makers to help develop understanding, incentives and policies to support the actions on the field (Davis et al., 2019).

Another aspect related to risk management is the relationship between the density of human population and the type of forestation. In Figure 2 these two variables can be seen compared on a map made for this purpose. The forest nucleus in the province of Buenos Aires is found in the municipalities of Campana and Zárate; both of which have high population density. This nucleus is composed of a higher density of Salicaceae tree types and over 50% of the plantations analysed in this study are of *Populus* sp. At the same time, 42% of this zone's surface is used for dams of which a greater concentration is found here. To this is added the estates of the area, which go back furthest historically with regard to forest related activity. The high concentration of land use in the area is mainly associated to the plantations of *Populus* sp., which require good drainage, unlike *Salix* sp. The radii censuses associated to this forest nucleus have an average density in the cultivated zones that become higher in the populated centres. Another zone with average population density is the area pertaining to the municipality of Tigre. However, the surface used in this sector is 6% and this is reflected in the disperse plantations with a greater concentration of *Salix* sp. rather than *Populus* sp. In the province of Entre Ríos the municipality of Villa Paranacito stands out, being the only populated centre with a high population density and having direct contact

en este sector es del 6% y esto se ve reflejado en plantaciones dispersas con mayor concentración de *Salix* sp. que de *Populus* sp. En la provincia de Entre Ríos se destaca el municipio de Villa Paranacito, el único centro poblado en contacto directo con las parcelas forestales, con una densidad de población alta. Aquí la superficie endicada también es elevada (32%) y está asociada tanto a plantaciones de *Populus* sp. como de *Pinus* sp. Por otro lado, esta zona cuenta con importantes fincas ganaderas que también son responsables por los endicamientos (Kandus y Minotti, 2010).

El efecto de los endicamientos también puede apreciarse en el mapa de frecuencia de agua (Figura 3), donde las zonas con mayor superficie endicada se corresponden con los valores inferiores del índice MNDWI, que a la vez coincide con las parcelas forestales asociadas al cultivo de Álamos, tal como se aprecia en la zona cercana a Villa Paranacito.

Estos factores hacen que el riesgo ambiental de estas zonas sea más elevado, relacionado a la modificación del relieve y la hidrología local, y la consecuente pérdida de servicios ambientales. Entonces, se puede asumir que el riesgo aumenta en zonas donde el tamaño de la población y la cantidad de *Populus* sp. plantado son más elevadas.

En el apartado de Figuras se muestran los ejemplos de datos de NDVI y Firmas Espectrales de *Pinus* sp., *Populus* sp. y *Salix* sp. extraídos de la base de datos a nivel de parcela (Figuras 4, 5 y 6). En primer lugar se muestra un mapa con valores medios de NDVI para dos años contrastantes. Luego las Firmas Espectrales de esas parcelas para los años correspondientes y finalmente, se muestran las Series Temporales de valores medios de NDVI estacionales, anuales, mensuales y para todas las fechas disponibles. Esta información permite la detección de anomalías en el comportamiento del cultivo a escala de parcela.

CONCLUSIONES

En este trabajo se analizaron herramientas para la gestión del riesgo ambiental en plantaciones forestales del Delta del Río Paraná a partir del uso de Tecnologías de la Información Geográfica (TIG'S). Aproximadamente el 18% de los humedales del

with the forest parcels. Here, the forest surface area also is high (32%) and associated with plantations of *Populus* sp. and, equally, with *Pinus* sp. On the other hand, this zone has important livestock estates that are also responsible for the dams (Kandus and Minotti, 2010).

The effect of the dams can also be seen in the map showing the water frequency (Figure 3), where the zones with a greater surface used corresponds to inferior values in the MNDWI index that also coincides with the forest parcels associated with the cultivation of Cottonwood, as seen in the zone close to Villa Paranacito.

These factors raise the environmental risks of these zones and this can be related to the modification of the surface and local hydrology, and the consequent loss of environmental services. Thus, it can be assumed that the risk rises in zones where population size and the quantity of *Populus* sp. planted are higher.

In the section dedicated to Figures in this study, examples are shown of data related to NDVI and Spectral Signatures of *Pinus* sp., *Populus* sp. and *Salix* sp. taken from the data base concerning the parcel (Figures 4, 5 and 6). Firstly, a map is shown with average NDVI values for two contrasting years. Then the Spectral Signatures of these parcels for the corresponding years are shown and, finally, the Temporal Series of average NDVI values that are seasonal, annual, monthly and also available for all of the available dates. This information allows the detection of anomalies in the behaviour of cultivations on a parcel related scale.

CONCLUSIONS

The tools used in environmental risk management in forest plantations of the Parana River Delta based on the use of Geographical Information Technologies (GIT's) were analysed in this study.

Approximately 18% of the wetlands of the study area in the Parana Delta have been forested and 19% of this region presents dam systems (with productive aims, of urbanisation and means of communication). These factors have direct consequences in the loss of environmental wellbeing and services associated mainly to the change in the hydrological pulse and local surface which is of greater interest in

área estudiada en el Delta del Paraná poseen forestaciones implantadas y un 19% de esta región presenta sistemas de endicamientos (con fines productivos, de urbanización y vías de comunicación), esto tiene consecuencias directas en la pérdida de bienes y servicios ambientales, asociado principalmente al cambio en el pulso hidrológico y el relieve local, lo que cobra particular interés en las zonas con mayor densidad poblacional (Zárate, Campana, Villa Paranacito).

La importante superficie forestal implantada se presenta como un cambio de uso que impacta de manera diferencial en los distintos tipos de ambientes reemplazados, generando nuevas realidades desde el punto de vista de la conservación ambiental y los servicios ecosistémicos, algunas beneficiosas (ej. sumideros de C), y otras que impactan sobre el conjunto de especies (ej. deterioro del ecosistema). De las especies estudiadas, *Populus* sp. es la más directamente asociada al mayor riesgo ambiental, debido al tipo de manejo que requiere.

Los datos obtenidos son el punto de partida para futuros estudios en sistemas forestales. Los datos a nivel de parcela son de sumo interés para la producción y podrán utilizarse en investigaciones que requieran clasificaciones, estimación de productividad, comparación con parámetros biofísicos y ambientales, entre otros, así como para la identificación y contrastación con otros ecosistemas de referencia.

AGRADECIMIENTOS

Nuestro agradecimiento a la Universidad Autónoma de Entre Ríos, Facultad de Ciencia y Tecnología, Centro Regional de Geomática y al Centro de Investigación Científica y de Transferencia Tecnológica a la Producción, CONICET por facilitar los medios y el espacio para la realización de este estudio. También a Pamela Zamboni por su constante asesoría en la elaboración de esta publicación.

BIBLIOGRAFÍA

- Acciaresi, G., Denegri G. & Gonzalez A. 2006. Inclusión de prácticas de biodiversidad en la planificación y manejo de plantaciones de Salicáceas en el Delta: valorización y comparación financiera con modelos

the zones with a higher population density (Zarate, Campana, Villa Paranacito).

The important forest surface that is planted upon is seen as a change in use that impacts the different types of environments that are replaced in different ways, generating new realities from the point of view of environmental conservation and ecosystem related services, some of which are beneficial (i.e. carbon sinks), and others that have an impact on the totality of the species (i.e. deterioration of the ecosystem). Of the studied species, *Populus* sp. is the most directly associated with the higher environmental risk, due to the type of management it requires.

The data obtained is a take off point for future studies in forest systems. The data at a parcel level is of utmost interest for production and can be used in research that requires classifications, estimation of productivity, comparison of biophysical and environmental parameters among others and also for identification and contrasting with other ecosystems of reference.

ACKNOWLEDGEMENTS

Our thanks to the Universidad Autónoma de Entre Ríos, Facultad de Ciencia y Tecnología, Centro Regional de Geomática and to the Centro de Investigación Científica y de Transferencia Tecnológica a la Producción, CONICET for providing the means and space for carrying out this study. Also to Pamela Zamboni for constant advice in the production of this publication.

tradicionales. En: Actas Jornadas de Salicáceas 2006.

- Aceñolaza, P.G., Zamboni L.P., Sione W.F. & Kalesnik F. 2008. Caracterización de la región superior del Complejo Litoral del Río Paraná: grandes unidades de ambiente. En: Aceñolaza, F. G. 2008 (ed.), Temas de la biodiversidad del litoral fluvial argentino III. Instituto Superior de Correlación Geológica (INSUGEO), 293-308 pp.

- Aceñolaza, P.G., Zamboni L.P., Kalesnik F., Rodríguez E.E., Sione W.F. & Serafini C. 2014. Mapa de cobertura de suelo para un sector del norte del Complejo Fluvio/Litoral del Río Paraná con herramientas de geomática. XVI Simposio Internacional de la Sociedad Latinoamericana de Especialistas en Percepción Remota (SELPER). Actas del Simposio, 1-10 pp.

- Benzaquén, L. 2013. Inventario de los humedales de Argentina: Sistemas de paisajes de humedales del Corredor Fluvial Paraná-Paraguay. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación. Brandan, S., Corinaldesi L. & Frisa L. 2009. Sector Forestal. Año 2008. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca.

- Burkart, A. 1957. Ojeada sinóptica sobre: La vegetación del Delta del Río Paraná. Darwiniana 11(3): 457-561.

- Cai, Y., Guan K., Peng J., Wang S., Seifert C., Wardlow B. & Li Z. 2018. A high-performance and in-season classification system of field-level crop types using time-series Landsat data and a machine learning approach. Remote Sensing of Environment 210: 35-47.

- Casaubon, E. 2014. Propuesta de una nueva silvicultura para los sistemas silvopastoriles de *Populus deltoides* en el bajo Delta del Río Paraná. XXVIII Jornadas Forestales de Entre Ríos. Actas de la Jornada 1-5 pp.

- Chuvieco Salinero, E. 2002. Teledetección Ambiental, la observación de la Tierra desde el espacio. Ariel Ciencia.

- Coops, N.C. 2015. Characterizing forest growth and productivity using remotely sensed data. Cu-

urrent Forestry Reports 1(3): 195–205.

- Davis, R.R., Llavallol C.I. & Reca F. 2019. Key Research Findings from the GEF Project : Biodiversity Conservation in Productive Forestry Landscapes. *Forest Ecology and Management* 435: 219.
- Dirección Nacional de Desarrollo Foresto Industrial. 2019. Inventario nacional de plantaciones forestales por superficie. Recuperado en enero de 2021 de <https://datos.agroindustria.gob.ar/dataset/inventario-nacional-plantaciones-forestales-por-superficie>.
- Gorelick, N., Hancher M., Dixon M., Ilyushchenko S., Thau D. & Moore R. 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment* 202: 18-27.
- Instituto Nacional de Estadística y Censos (INDEC). 2012. Censo nacional de población, hogares y viviendas 2010: censo del Bicentenario: resultados definitivos. INDEC.
- Kalesnik, F. & Quintana R. 2006. El Delta del Río Paraná como un mosaico de humedales. Caso de estudio: La Reserva de Biosfera MAB-UNESCO “Delta del Paraná”. *Revista UnG-Geociências* 5(1): 22-37.
- Kalesnik, F., Enrique C. & Kandus P. 2010. Bosques nativos del Delta del Paraná. En: Kandus, P., Morandeira N. & Schivo, F. (eds.). *Bienes y Servicios Ecosistémicos de los Humedales del Delta del Paraná*. *Wetland International*, 21-22 pp.
- Kalesnik, F., Aceñolaza P., Hurtado M. & Martínez J. 2011. Relationship between vegetation of the levee neo-ecosystems and environmental heterogeneity in the Lower Delta of the Paraná River, Argentina. *Water and environment Journal* 25(1): 88-98.
- Kandus, P., Quintana R.D. & Bó R.F. 2006. Patrones de Paisaje y Biodiversidad del Bajo Delta del Río Paraná. *Mapa de Ambientes*. Grupo de Investigaciones en Ecología de Humedales (GIEH), FCEyN, UBA. Pablo Casamajor Ediciones, Buenos Aires.

- Kandus, P. & Minotti P. 2010. Distribución de terraplenes y áreas endicadas en la región del Delta del Paraná. En: Blanco, D.E. & Méndez F.M. (ed.) Endicamientos y terraplenes en el Delta del Paraná: Situación, efectos ambientales y marco jurídico. Fundación para la Conservación y el Uso Sustentable de los Humedales 104 pp.
- Klein, T., Nilsson M., Persson A. & Hakansson B. 2017. From open data to open analysis-new opportunities for environmental applications? *Environments* 4: 32.
- Lie, Z., Xue L. & Jacobs D.F. 2018. Allocation of forest biomass across broad precipitation gradients in China's forests. *Scientific reports* 8(1): 10536.
Ministerio de Agricultura Ganadería y Pesca (MAGyP). 2013. Mapa de Plantaciones Forestales de la República Argentina. Área SIG e Inventario Forestal. Dirección de Producción Forestal.
- Ministerio de Agricultura Ganadería y Pesca (MAGyP). 2015. Elaboración de un mapa de plantaciones forestales de la República Argentina de actualización permanente. Área SIG e Inventario Forestal. Dirección de Producción Forestal.
- Minotti, P.G., Baigún C., Kandus P., Quintana R.D., Borro M., Schivo F. & Brancolini F. 2010. Servicios ecosistémicos en la ecorregión del Delta del Paraná: consideraciones sobre usos y tendencias, y criterios para su conservación. En: Fernández Reyes, L., Volpedo A.V. & Pérez Carrera A. (eds.) *Estrategias Integradas de Mitigación y Adaptación a Cambios Globales*. Red CYTED 381-394 pp.
- Paruelo, J.M. 2008. La caracterización funcional de ecosistemas mediante sensores remotos. *Revista Ecosistemas* 17(3).
- Piani, V. 2019. Geomática aplicada a forestaciones del Delta del Río Paraná (2008-2018): un enfoque desde la gestión de riesgos ambientales. Tesis Final de Maestría, Maestría en Geomática Aplicada a la Gestión de Riesgos Ambientales. Universidad Autónoma de Entre Ríos.

- Piedallu, C., Chéret V., Denux J.P., Pérez V., Azcona J.S., Seynave I. & Gégout J.C. 2019. Soil and climate differently impact NDVI patterns according to the season and the stand type. *Science of the Total Environment* 651: 2874-2885.
- Quintana, R.D. & Bó R.F. 2010. Caracterización general de la región del Delta del Paraná. En: Blanco, D.E. & Méndez F.M. Endicamientos y terraplenes en el Delta del Paraná: Situación, efectos ambientales y marco jurídico. Fundación para la Conservación y el Uso Sustentable de los Humedales 5-13 pp.
- Ramonell, C. 2012. Evaluación de procesos hidro-geomorfológicos del Río Paraná entre los ejes del Arroyo Leyes y Santa Fe-Paraná. Final Rep. Sec-tei 21-18-10.
- Tucker, C.J. 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment* 8: 127-150.
- Viva, F.M., Piani V.A., Zamboni L.P., Aceñolaza P. & Sione, W. 2017. Índice de Severidad de Área Quemada (dNBR) en el Parque Nacional Pre-Delta (período 1986-2016) utilizando Google Earth Engine. XI Jornada de Educación en Percepción Remota en el Ámbito del Mercosur. Universidad Católica de Temuco. SELPER.
- Wulder, M.A., Loveland T.R., Roy D.P., Crawford C.J., Masek J.G., Woodcock C.E. & Dwyer J. 2019. Current status of Landsat program, science, and applications. *Remote sensing of environment* 225: 127-147.
- Zamboni, L.P., Sione W.F., Tentor F.R. & Aceñolaza P.G. 2014. Cartografía de cambio de cobertura del suelo (1987-1998) para el Parque Nacional Predelta (Entre Ríos, Argentina). *Revista Geográfica de América Central* 52: 179-204.
- Zamboni, L.P., Sione W.F., Tentor F.R. & Aceñolaza P.G. 2017. Cartografía de modelos combustibles en el Complejo Fluvio Litoral del Río Paraná a partir de datos de terreno y derivados de sensores remotos. *Scientia interfluvius* 8(2): 65-77.

TABLAS

Propuesta para la gestión forestal sustentable (Acciaresi <i>et al.</i>, 2006)	Ejemplos de aplicación para la gestión de riesgos ambientales
Mantener en el sitio el material de desecho de podas, raleos y corta final.	Realizar el seguimiento de parcelas aún después de su cosecha, estimación del NDVI y la Firma Espectral asociados a dichos desechos, el cual será diferente al del suelo desnudo.
Realizar la plantación inicial con menor densidad.	Determinar el NDVI y la respuesta espectral (reflectancia) de referencia para plantaciones con diferentes densidades iniciales. Valores bajos de NDVI denotan una menor densidad.
Extender el turno de plantación.	Realizar el seguimiento de parcelas desde el inicio del turno e identificar aquellas donde el NDVI no desciende significativamente a lo largo de la Serie Temporal.
Reemplazar cultivo de <i>Populus</i> sp. en sitios de pajonales por cultivo de <i>Salix</i> sp. con un sistema con escaso movimiento de suelos.	Identificar parcelas forestadas con <i>Populus</i> sp. localizadas en sitios donde no se registran terraplenes ni diferencias de altura relativa. Identificar parcelas forestadas con <i>Salix</i> sp.
Modificar el diseño y ubicación de los rodales y sus caminos y sistemas de sangrías, y respetando las condiciones generales del paisaje.	Identificar parcelas de menor tamaño y con formas irregulares.
Considerar áreas de reserva o sin plantación.	Identificar parcelas cercanas a áreas protegidas.

Tabla 1: Ejemplo de propuestas para la gestión sustentable de forestaciones (Acciaresi *et al.*, 2006), y posibles aplicaciones de los resultados obtenidos en el presente trabajo.

Proposal for the management of sustainable forests (Acciaresi *et al.*, 2006) **Examples of applications for the management of environmental risks**

Maintain the waste related to tree trimmings, thinning and entire tree cutting on the site.	Carry out the overseeing of parcels even after the harvest, the estimation of NDVI and the Spectral Signature associated to the said waste which would be different to bare ground.
Carry out initial planning with lower density.	Determine the NDVI and spectral signature (reflectance) of reference for plantations with different initial densities.
Extend the turns of plantations.	Carry out the overseeing of parcels from the beginning of the turn and identify those in which the NDVI does not descend significantly during the length of the Temporal Series.
Replace the cultivation of <i>Populus</i> sp. where there are grasslands for the cultivation of <i>Salix</i> sp. with a system allowing scarce ground movement.	Identify parcels forested with <i>Populus</i> sp. localized in areas where neither flatlands nor differences of relative height are registered. Identify parcels forested with <i>Salix</i> sp.
Modify the design and location of the stands, paths and systems of indentations, while respecting the general conditions of the landscape.	Identify parcels of lesser size and with irregular forms.
Consider having protected or uncultivated areas.	Identify parcels close to protected areas.

Table 1: Example of proposals for the sustainable management of forested land (Acciaresi *et al.*, 2006), and possible applications of the results obtained in the present study.

FIGURAS

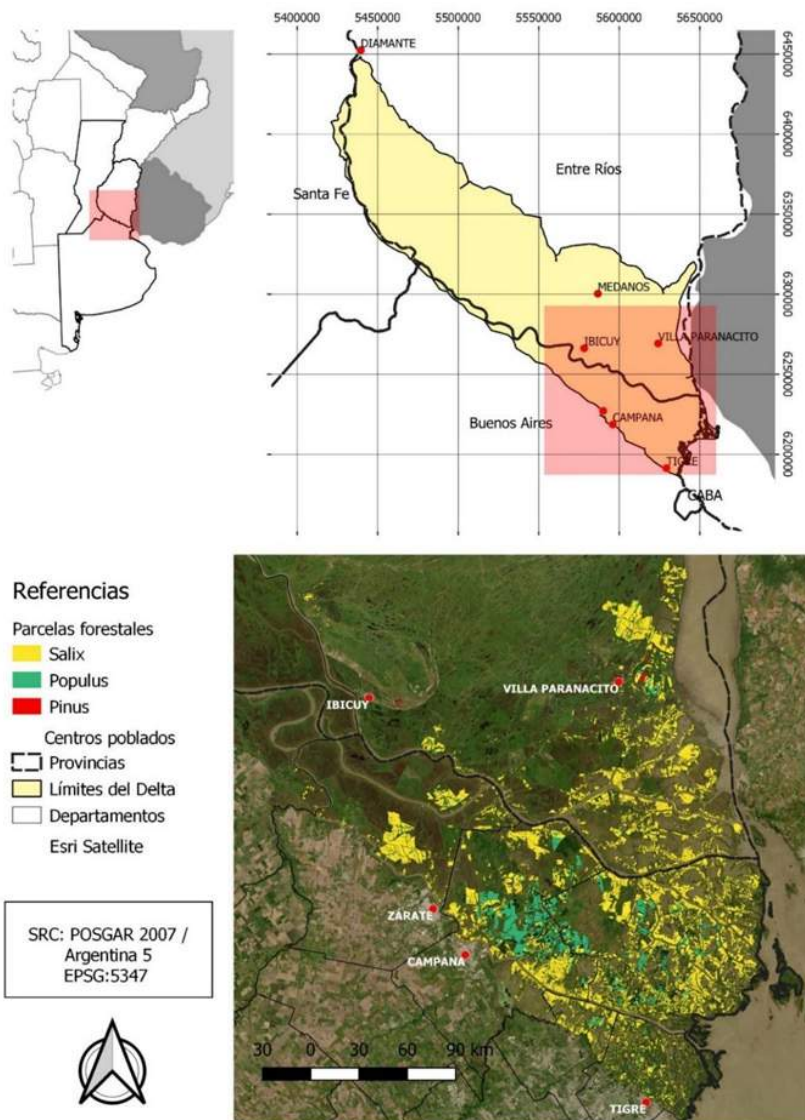


Figura 1: Localización del Área de Estudio. Identificada por un recuadro en las vistas superiores, mostrando su ubicación en Argentina (A), en el Delta del Paraná (B) y el detalle del área forestada (C). Parcelas diferenciadas por especies. Adaptado de Brandan et al., (2009) y MAGyP (2013, 2015)

Figure 1: Location of Study Areas. Identified by a frame of the higher vistas, showing its location in Argentina (A), in the Paraná Delta (B) and details of forested area (C). Parcels differentiated by species. Adaptation by Brandan et al., (2009) and MAGandP (2013, 2015)..

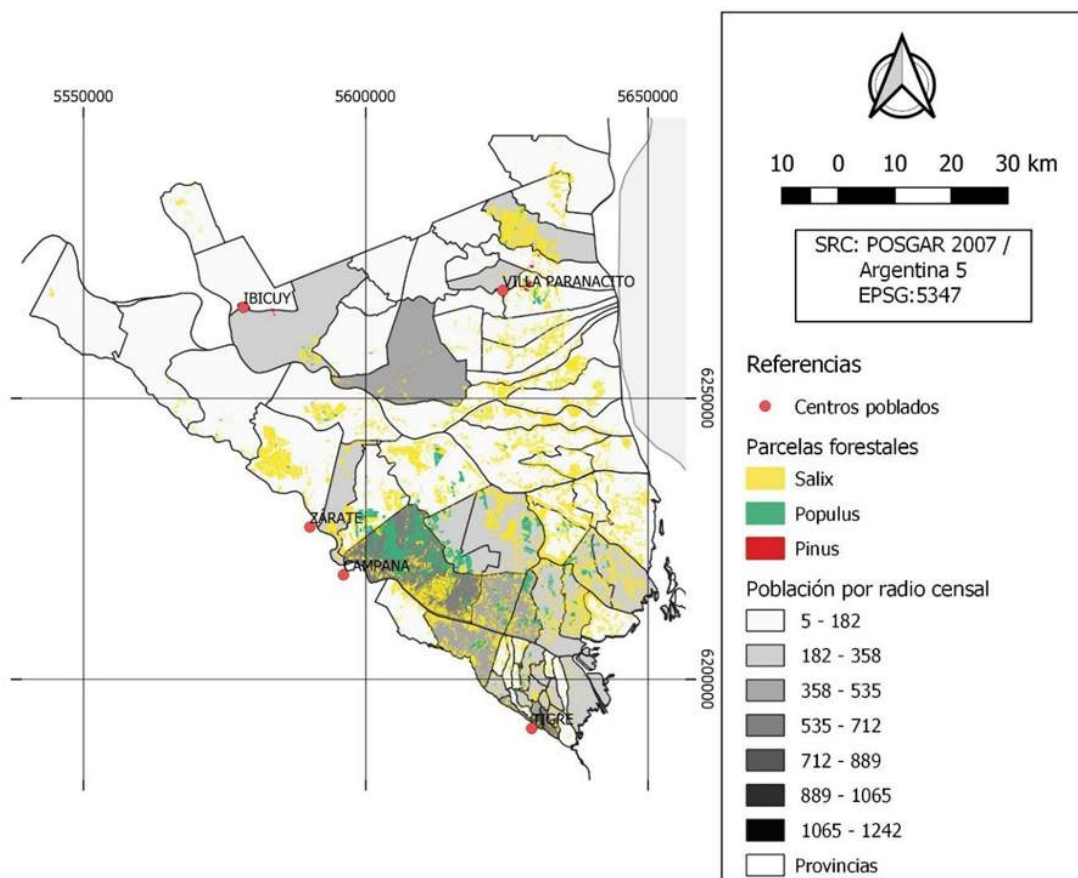


Figura 2: Población por radio censal. Datos correspondientes al Censo 2010 del INDEC (INDEC, 2012).

Figure 2: Population by census radius. Data corresponds to the Census of 2010 of INDEC (INDEC, 2012).

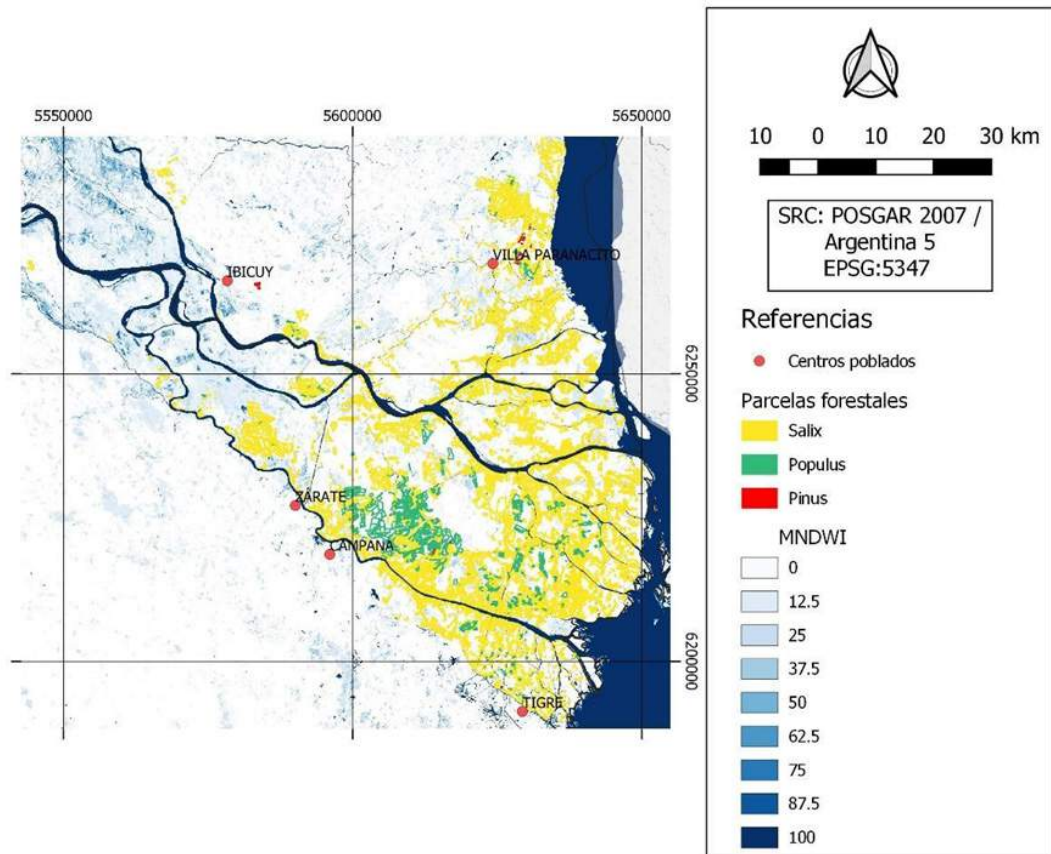


Figura 3: Mapa de frecuencia de agua, índice MNDWI. Adaptado de Viva et al., (2017).

Figure 3: Map of frequency of fresh water, MNDWI index. Adaptation by Viva et al., (2017).

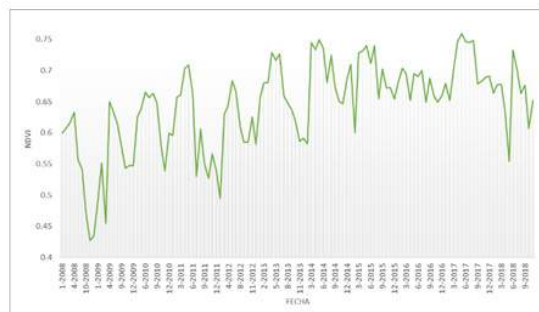
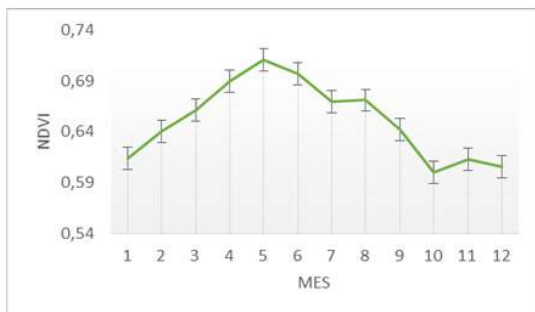
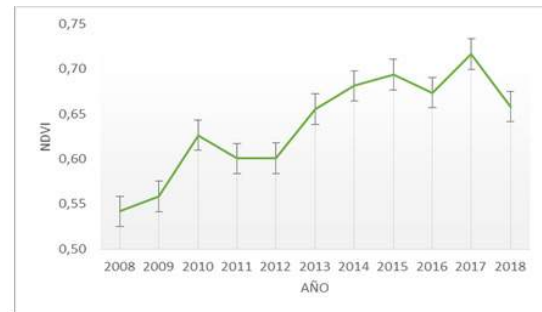
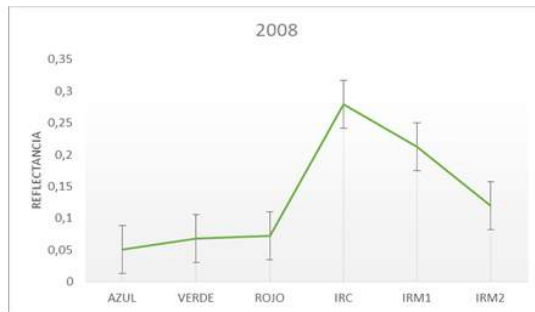
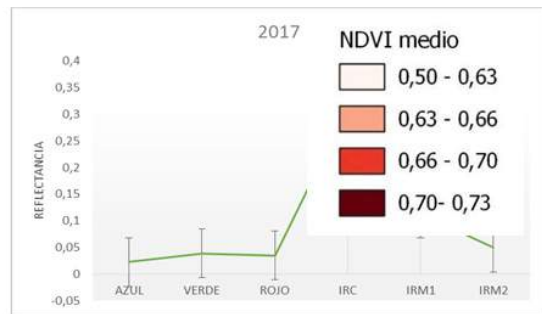
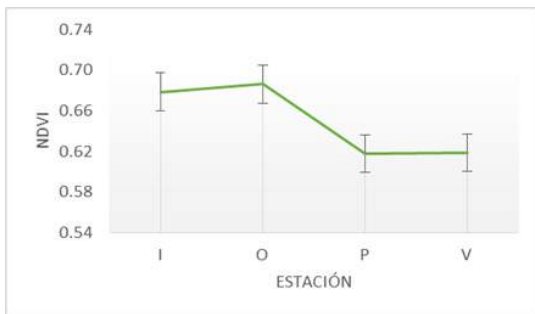
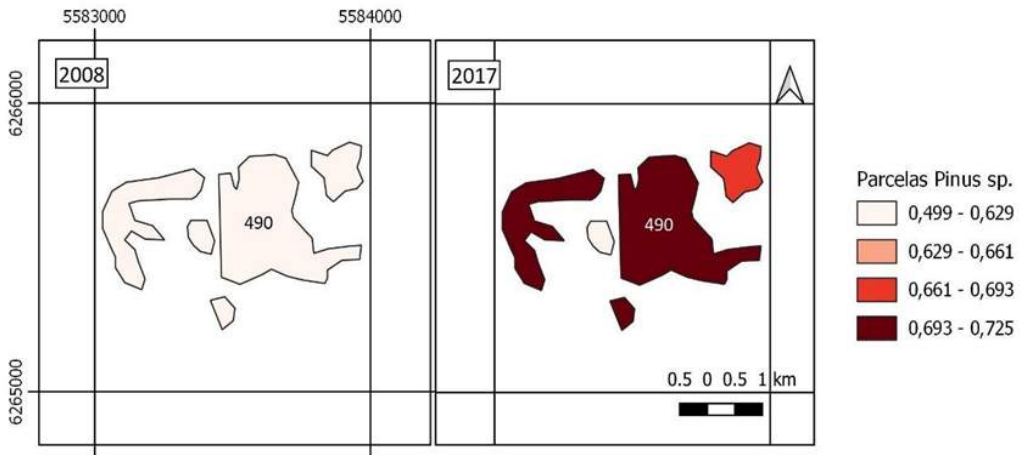


Figura 4: Ejemplo de datos obtenidos para Pinus sp. para la parcela 490. Las barras corresponden a CV.

Figure 4: Example of data obtained for Pinus sp. for parcel 490. The bars correspond to the VC.

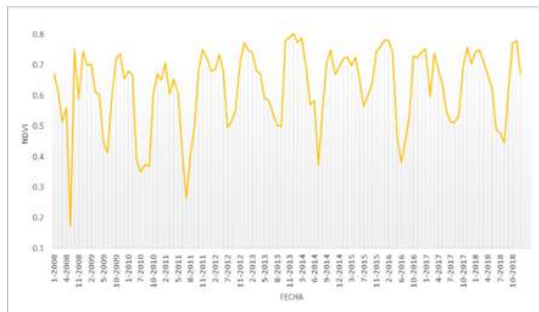
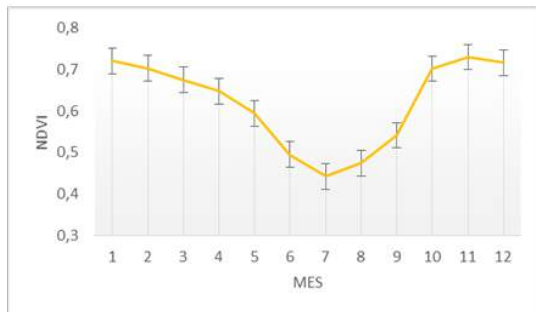
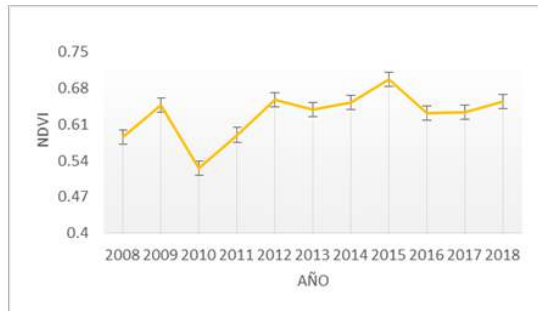
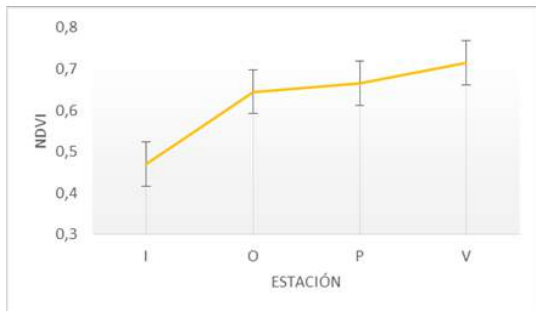
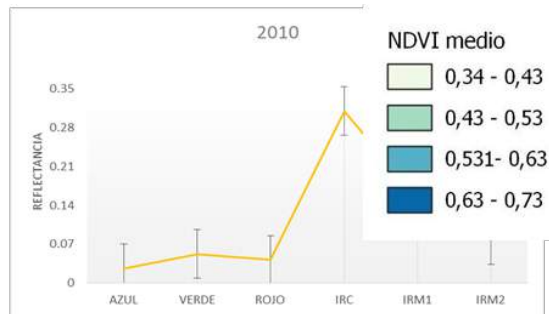
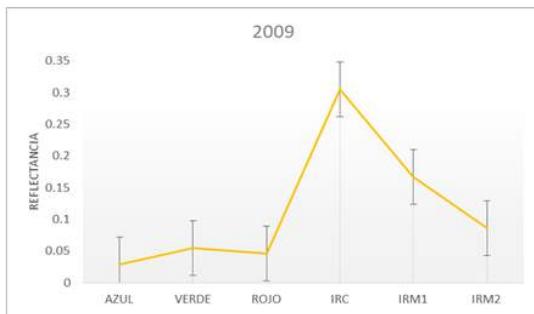


Figura 5: Ejemplo de datos obtenidos para Populus sp. para la parcela 2421. Las barras corresponden al CV.

Figure 5: Example of the data obtained for Populus sp. for parcel 2421. The bars correspond to the VC.

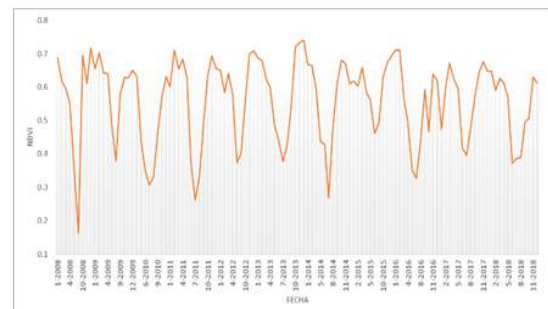
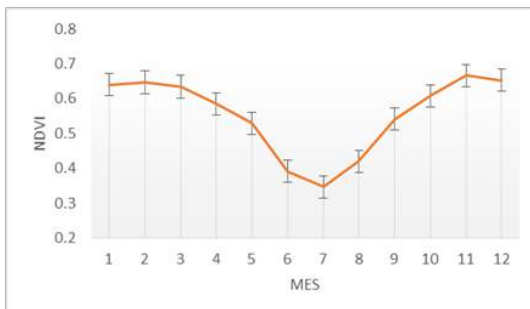
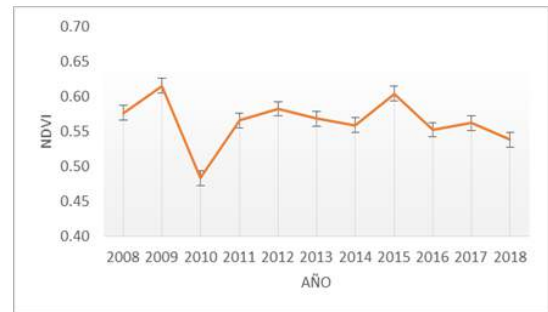
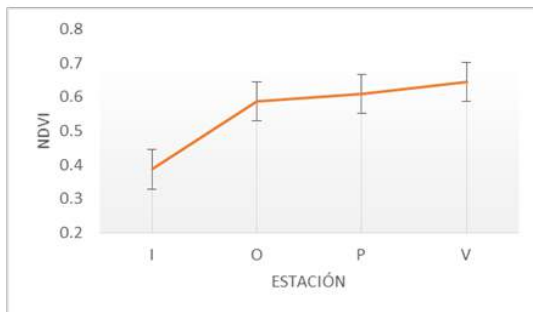
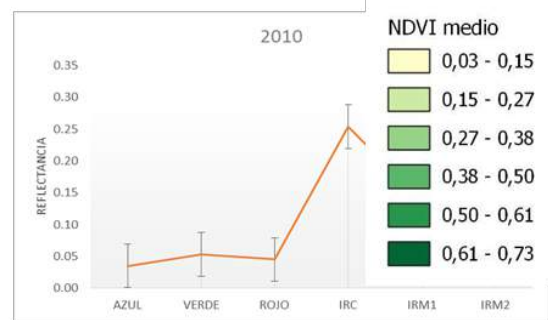
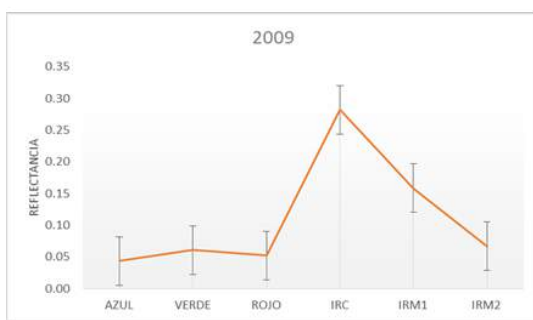
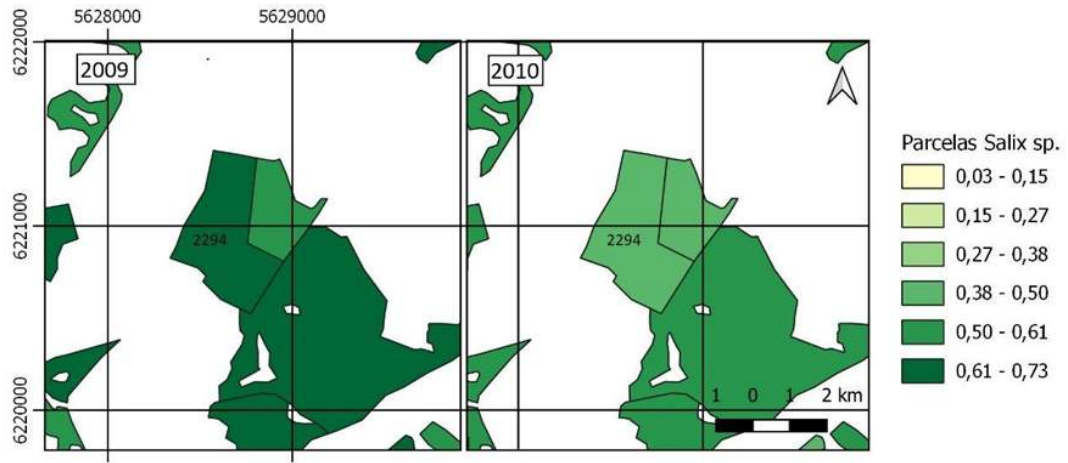


Figura 6: Ejemplo de datos obtenidos para Salix sp. para la parcela 2294. Las barras corresponden al CV.

Figure 6: Example of data obtained for Salix sp. for parcel 2294. The bars correspond to the VC.