

Trabajo Final de Maestría

“Geomática aplicada a forestaciones del Delta del Río Paraná (2008-2018): un enfoque desde la gestión de riesgos ambientales”

Trabajo Final de Maestría presentado como requisito para obtener el grado de
Magister en Geomática Aplicada a la Gestión de Riesgos Ambientales
Resolución Nº 1461-12 Consejo Superior UADER

Por

Lic. Virginia A. Piani

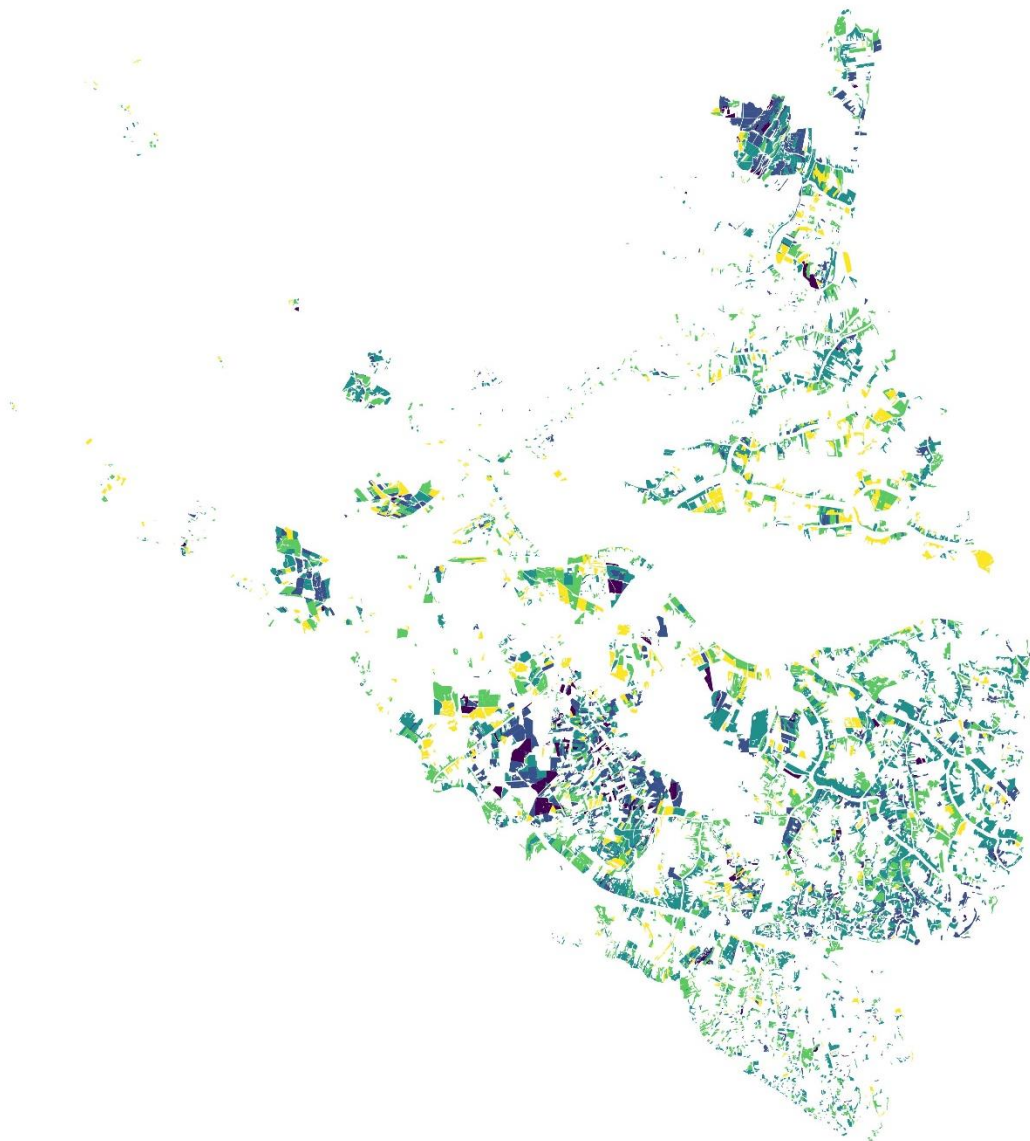
Licenciada en Biología – Universidad Autónoma de Entre Ríos – 2017

Directora: **Dra. L. Pamela Zamboni**

Codirector: **Dr. Pablo G. Aceñolaza**

Diamante, Argentina

Geomática aplicada a forestaciones del Delta del Río
Paraná (2008-2018): un enfoque desde la gestión de
riesgos ambientales



Agradecimientos

Agradezco a la Universidad Autónoma de Entre Ríos, Facultad de Ciencia y Tecnología; al CICyTTP, CONICET; al Centro Regional de Geomática y la Maestría en Geomática Aplicada a la Gestión de Riesgos Ambientales, al igual que el Comité Académico, Cuerpo docente, Personal técnico y administrativo. También agradezco especialmente a los evaluadores, gracias a que sus sugerencias y comentarios ayudaron a enriquecer el presente trabajo.

Quiero agradecerles a los integrantes del CeReGeo, en especial a su director, el Dr. Walter Sione. Sin ellos no estaría a donde estoy ahora. Gracias por todos estos años llenos de oportunidades, crecimiento y experiencias.

Agradezco a mis directores, la Dra. Pamela Zamboni y el Dr. Pablo Aceñolaza, por toda su paciencia y por enseñarme tanto. Gracias Pamela por dedicarme tantas horas y siempre apoyarme.

Un especial agradecimiento al Lic. Francisco Viva por la inmensa ayuda, sobre todo en el área de informática, y al Mg. Fernando Tentor y la Lic. Paola Soñez por todo el apoyo durante el cursado y en el presente TFM.

Gracias a mis padres, por el amor incondicional, el apoyo y la educación que me trajeron hasta aquí.

Índice

AGRADECIMIENTOS.....	4
ÍNDICE.....	5
ÍNDICE DE FIGURAS.....	6
ÍNDICE DE TABLAS.....	8
RESUMEN.....	9
1. INTRODUCCIÓN.....	12
1.1 ANTECEDENTES.....	14
1.1.1 <i>Manejo Forestal en el Delta del Río Paraná.....</i>	<i>14</i>
1.1.2 <i>Riesgo y gestión ambiental en forestaciones del Delta.....</i>	<i>15</i>
2. OBJETIVOS.....	17
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	17
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	18
3.1 ÁREA DE ESTUDIO.....	18
3.1.1 <i>Características generales.....</i>	<i>18</i>
3.1.2 <i>Demografía y uso del suelo.....</i>	<i>22</i>
3.1.3 <i>Geomorfología.....</i>	<i>24</i>
3.1.4 <i>Clima.....</i>	<i>24</i>
3.1.5 <i>Vegetación.....</i>	<i>24</i>
3.1.6 <i>Características edáficas.....</i>	<i>25</i>
3.2 METODOLOGÍA.....	25
3.2.1 <i>Software y plataformas utilizados.....</i>	<i>25</i>
3.2.2 <i>Descarga y procesamiento de Parcelas forestales.....</i>	<i>26</i>
3.2.3 <i>Construcción de Series Temporales de NDVI.....</i>	<i>26</i>
3.2.4 <i>Generación de la base de datos espaciales de Series Temporales de NDVI.....</i>	<i>27</i>
3.2.5 <i>Generación de Series Temporales de Respuestas Espectrales (Visible-IR).....</i>	<i>27</i>
3.2.6 <i>Análisis estadísticos.....</i>	<i>28</i>
a) <i>Análisis de Series Temporales de NDVI.....</i>	<i>29</i>
b) <i>Análisis de Respuestas Espectrales (Visible- IR).....</i>	<i>29</i>
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	30

4.1	SERIES TEMPORALES DE NDVI	30
4.1.1	NDVI para el período 2008-2018.....	30
4.1.2	ST de NDVI por estación climática.....	31
4.1.3	ST de NDVI por año.....	31
4.1.4	ST de NDVI por mes	32
4.1.5	ST de NDVI por fecha.....	33
4.1.6	ST de NDVI por especie.....	36
a)	Pinus sp.....	36
b)	Populus sp.....	37
c)	Salix sp.....	38
4.2	SERIES TEMPORALES DE FIRMAS ESPECTRALES.....	40
4.2.1	Firmas Espectrales.....	40
4.2.2	ST de Respuestas Espectrales por año.....	43
4.2.3	ST de Respuestas Espectrales por mes	44
4.2.4	ST de Respuestas Espectrales por especie.....	46
4.3	APORTES A LA GESTIÓN DEL RIESGO.....	47
5.	CONCLUSIONES.....	54
6.	BIBLIOGRAFÍA	55

Índice de figuras

<i>Fig. 1. Localización del Área de estudio, identificada por un recuadro en las vistas superiores, mostrando su ubicación en el país, en el Delta del Paraná y el detalle del área forestada. Parcelas diferenciadas por especies. Adaptado de Brandan et al., (2009) y MAGyP (2013, 2015).</i>	20
<i>Fig. 2. Mapa de frecuencia de agua, índice MNDWI. Frecuencia expresada en porcentaje de cubierta de agua para el año 2013, calculado a partir de una serie temporal de imágenes Landsat 8 OLI. Adaptado de Viva et al., (2017).</i>	21
<i>Fig. 3. Sistemas de paisajes de humedales del Delta del Paraná considerados en el estudio. Adaptado de Benzaquén (2013). En tonos azules se aprecian las subunidades de los Humedales del Complejo Litoral del Río Paraná, y en tonos grises las correspondientes a los Humedales del Delta del Paraná.</i>	22
<i>Fig. 4. Población por radio censal. Datos correspondientes al Censo 2010 del INDEC (INDEC, 2012).</i>	23
<i>Fig. 5. ST de NDVI por estación climática. Se presentan valores medios. Las barras corresponden al CV.</i>	31
<i>Fig. 6. ST de NDVI por año. Se presentan valores medios. Las barras corresponden al CV. También se presentan los años de El Niño y La Niña. Adaptado de Golden Gate Weather Services (2019).</i>	32
<i>Fig. 7. ST de NDVI mensual. Se presentan valores medios. Las barras corresponden al CV.</i>	33

<i>Fig. 8. ST de valores medios de NDVI para el conjunto de fechas disponibles.</i>	35
<i>Fig. 9. Variación temporal de los valores medios de NDVI y sus respectivas desviaciones por estación climática para Pinus sp.</i>	36
<i>Fig. 10. Variación temporal de los valores medios de NDVI y sus respectivas desviaciones por mes para Pinus sp.</i>	37
<i>Fig. 11. Variación temporal de los valores medios de NDVI y sus respectivas desviaciones por estación climática para Populus sp.</i>	38
<i>Fig. 12. Variación temporal de los valores medios de NDVI y sus respectivas desviaciones por mes para Populus sp.</i>	38
<i>Fig. 13. Variación temporal de los valores medios de NDVI y sus respectivas desviaciones por estación climática para Salix sp.</i>	39
<i>Fig. 14. Variación temporal de los valores medios de NDVI y sus respectivas desviaciones por mes para Salix sp.</i>	39
<i>Fig. 15. Valores medios de reflectancia de las especies estudiadas para toda la serie temporal.</i>	41
<i>Fig. 16. Firmas espectrales de referencia. Los valores de longitud de onda (μm) de cada banda son: Azul: 0,45-0,51; Verde: 0,53-0,59; Rojo: 0,64-0,67; IRC: 0,85-0,88; IRM1: 1,57-1,65; IRM2: 2,11-2,29. (Adaptado de Xi et al., 2016 para sistemas forestales en China).</i>	41
<i>Fig. 17. ST de Respuestas Espectrales medias por año. Las barras corresponden al CV.</i>	44
<i>Fig. 18. ST de Respuestas Espectrales medias por mes. Las barras corresponden al CV.</i>	45
<i>Fig. 19. Variación temporal de los valores medios de Respuestas Espectrales y sus respectivas desviaciones para Pinus sp.</i>	46
<i>Fig. 20. Variación temporal de los valores medios de Respuestas Espectrales y sus respectivas desviaciones para Populus sp.</i>	47
<i>Fig. 21. Variación temporal de los valores medios de Respuestas Espectrales y sus respectivas desviaciones para Salix sp.</i>	47
<i>Fig. 22. Ejemplo de datos obtenidos para Pinus sp. para la parcela 490. Las barras corresponden al CV.</i>	51
<i>Fig. 23. Ejemplo de datos obtenidos para Populus sp. para la parcela 2421. Las barras corresponden al CV.</i>	52
<i>Fig. 24. Ejemplo de datos obtenidos para Salix sp. para la parcela 2294. Las barras corresponden al CV.</i>	53

Índice de tablas

<i>Tabla 1. Resumen de las tablas obtenidas para las Series Temporales de NDVI. Los registros nulos corresponden a la ausencia de datos (parcelas sin observaciones para una determinada fecha) (Ej. por presencia de nubes).....</i>	<i>27</i>
<i>Tabla 2. Combinación de bandas de los sensores Landsat 5, 7 y 8 y sus correspondientes aplicaciones. Fuente: Adaptado de Cai et al., (2018).....</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 3. Resumen estadístico de NDVI por especie.....</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 4. Resumen estadístico de Respuestas Espectrales por especie.....</i>	<i>42</i>
<i>Tabla 5. Ejemplo de propuestas para la gestión sustentable de forestaciones (Acciaresi et al., 2006), y posibles aplicaciones de los resultados obtenidos en el presente trabajo.....</i>	<i>48</i>

Resumen

Las forestaciones constituyen una de las principales actividades productivas del Delta del Río Paraná, un macroecosistema en el cual los procesos hidrológicos son parte fundamental de la conformación y dinámica del paisaje. El 18% de los humedales del área estudiada están forestados y un 19% de esta región presenta sistemas de endicamientos. De la superficie total forestada, el 16% corresponde a sauce (*Salix* sp.), el 3% a álamo (*Populus* sp.), y menos del 1% a pino (*Pinus* sp.). Estas prácticas están frecuentemente asociadas a modificaciones del relieve y al manejo hídrico, generando como consecuencia impactos ambientales que contribuyen al riesgo ambiental. Entre estos impactos cabe mencionar la pérdida de servicios ecosistémicos como el amortiguamiento de excedentes hídricos, la conservación de reservorios de agua dulce, la retención y acumulación de contaminantes, entre otros. Una gestión ambiental efectiva debe tomar en consideración estos impactos, y evaluar los riesgos ambientales derivados de la transformación del paisaje. Los efectos ecológicos de las forestaciones son atribuibles, por un lado, a la acción intrínseca de las especies cultivadas, y por el otro, a decisiones humanas reflejadas en la forma de manejo, como la densidad inicial de plantas y la existencia o no de raleo.

La geomática es una herramienta de gran utilidad en la gestión del riesgo ambiental, al contribuir en la identificación, seguimiento y evaluación de los ecosistemas forestales a partir de los atributos estructurales y funcionales de la cobertura vegetal. El análisis de las respuestas de las coberturas en las distintas porciones del espectro electromagnético permite derivar variables sintéticas asociadas a procesos biofísicos como los Índices de Verdor o las Firmas Espectrales. De este modo, identificar patrones en las respuestas espectrales de la vegetación a lo largo del tiempo mejora la comprensión de la fenofase y de las variaciones inter e intranuales debidas a cambios internos o a eventos climáticos. Por otro lado, la geomática permite el análisis de grandes volúmenes de datos empleando plataformas computacionales en La Nube como Google Earth Engine (GEE).

En este contexto, se analizaron los patrones de Respuesta Espectral mediante las Firmas Espectrales y el Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI) en forestaciones del Delta del Río Paraná a partir de las colecciones de GEE de imágenes satelitales de los sensores Landsat (LT5_L1T_TOA_FMASK, LE7_L1T_TOA_FMASK y LC8_L1T_TOA_FMASK) para el período de enero de 2008 a diciembre 2018, para así generar información que contribuya a la gestión del riesgo ambiental. Se trabajó con la plataforma computacional de GEE, el software QGIS y SQLite. Se corrigieron las topologías, se re-escalaron los datos y se estandarizaron las bases de datos filtrándose los registros válidos. Como resultado se obtuvieron registros de NDVI y de Respuestas Espectrales (en 6 bandas: Azul, Verde, Rojo, Infrarrojo Cercano, Infrarrojo Medio 1, Infrarrojo Medio 2) para parcelas forestadas con *Pinus* sp., *Populus* sp. y *Salix* sp., generadas en inventarios forestales en los

años 2008, 2013 y 2015 por el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación. Los resultados se presentan por fecha disponible (288 escenas aproximadamente) a lo largo de la ventana temporal para todas las parcelas estudiadas (NDVI: 23, 1.257 y 6.614 parcelas; y Firma Espectral: 23, 30 y 30 parcelas para *Pinus sp.*, *Populus sp.* y *Salix sp.* respectivamente). Estos registros de NDVI y Respuestas Espectrales se utilizaron para construir Series Temporales que se presentan en forma conjunta y por especie para analizar las variaciones estacionales, anuales, mensuales. En cuanto a los resultados obtenidos para la Series Temporales de NDVI para el período estudiado, las tres especies presentaron valores medios cercanos a 0,6, en coincidencia con lo registrado para plantaciones de *Pinus taeda* en Brasil., y menores a los de *Eucalyptus sp.* para la región (0,8) y mostraron una respuesta marcadamente estacional, con valores inferiores en invierno (Salicáceas: 0,4; *Pinus sp.*: 0,55) y superiores en primavera/verano (0,65 para las 3 especies estudiadas), reflejando la condición de caducifolia/perenne respectivamente. Considerando el patrón anual, *Pinus sp.* mostró valores medios anuales de NDVI superiores (aproximadamente 0,60 a 0,64) a las Salicáceas (0,55 a 0,65), mientras que estas últimas presentaron respuestas similares a lo largo de las Series Temporales. Mensualmente, las tres especies presentaron los valores mínimos en los meses de invierno, si bien en *Pinus sp.* la disminución no fue marcada; las Salicáceas superaron los valores máximos alcanzados por *Pinus sp.* (0,65) en los meses de primavera-verano. Finalmente, el análisis de la Serie Temporal de NDVI por fecha reflejó un patrón, si bien con variaciones en cada uno de los ciclos anuales, que presenta una tendencia similar de respuesta de la cobertura vegetal para las tres especies estudiadas, posiblemente asociada a las condiciones ecohidrológicas regionales. El análisis de las Series Temporales de las Respuestas Espectrales indicó que las tres especies presentaron valores medios de reflectancia similares entre sí (Azul: 0,03-0,04; Verde: 0,05-0,06; Rojo 0,05; IRC: 0,27-0,28; IRM1: 0,14-0,16 y IRM2: 0,07-0,08) y que las Firmas Espectrales obtenidas son comparables a la curva teórica característica para plantaciones forestales, con un pico de la reflectancia (0,05-0,06) en la porción correspondiente a la banda Verde y uno mayor en la región del IRC (0,27-0,28). El Coeficiente de Variación fue mayor en las Salicáceas que en *Pinus sp.*, reflejando las diferencias entre las especies caducifolias y perennes.

En términos de la gestión de riesgos ambientales, se describió la relación entre la densidad poblacional, el tipo de forestación y sus efectos ambientales. Estos resultados aportaron un valioso conocimiento en relación a las medidas propuestas para la región para la reducción de impacto de las plantaciones sobre los servicios ambientales, y por ende la mitigación del riesgo. Se identificaron plantaciones con tendencia a la disminución, aumento y estabilidad en sus respuestas espectrales, con la posibilidad de interpretar sus patrones en términos de prácticas de manejo a escala de parcela. Se analizaron a modo de ejemplo algunos casos específicos, relacionando la información generada en este trabajo con datos demográficos y ambientales. En Campana, Zárate y Villa Paranacito (municipios con una alta densidad

poblacional dentro de la región) se registró en conjunto más del 50% de las plantaciones de *Populus* sp., más de un 32% de su superficie endicada y alteración del régimen hídrico local, bajo manejo de grandes productores. Esta conjunción de factores aumentan el riesgo ambiental en estas zonas donde el tamaño de la población y la cantidad de *Populus* sp. plantado son más elevadas. El trabajo demostró la utilidad de estas herramientas de apoyo para la toma de decisiones por productores forestales y gestores para entender y monitorear los cambios en la vegetación y evaluar las consecuencias en el uso del suelo en un contexto de cambio climático.

1. 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 aquellas 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 el 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 “Bajo Delta” (Burkart, 1957), pudiendo encontrarse también algunas plantaciones en la zona definida como “Delta Medio” por Burkart (1957) o “Predelta” por Bonfils (1962).

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 (*Populus* sp.) en la zona núcleo forestal del Delta del Paraná (Acciaresi *et al.*, 2006). Esta modalidad productiva altera el régimen hidrológico del humedal, 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). 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. Para ello es necesario desarrollar y aplicar estrategias de manejo que contemplen la sostenibilidad del sistema socio-productivo con la sostenibilidad ambiental (Acciaresi *et al.*, 2006). La gestión de riesgos contribuye a reducir estos impactos mediante la planificación territorial sostenible (Minotti *et al.*, 2010) basada en el conocimiento de los atributos funcionales de los ecosistemas (Paruelo, 2008; Zamboni *et al.*, 2017).

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 (radiación solar incidente que es reflejada por una cobertura determinada: reflectancia) en las diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético, principalmente en las regiones del visible (Rojo, Verde, Azul), Infrarrojo (Cercano y Medio: IRC e IRM) y en los Índices de Vegetación derivados, es importante para dar respuesta a los problemas relacionados con la gestión de riesgos, la planificación territorial y la toma de decisiones (Coops, 2015).

Diferentes tipos de coberturas (suelo, vegetación sana, vegetación enferma, agua, infraestructuras, entre otras) reflejan la radiación de manera distintiva en las diferentes longitudes de onda, y el conjunto de estos valores forman una Firma Espectral (FE) que las identifica en un momento específico (Nosetto *et al.*, 2003). La vegetación vigorosa o sana presenta una firma con una baja reflectancia en el visible, con un pico en la banda de Verde debido a la presencia de clorofila, y una mucho mayor en el Infrarrojo Cercano, que disminuye en el Infrarrojo Medio (Chuvienco Salinero, 2002). Mientras mayor sea el contraste entre las bandas del visible y las del infrarrojo, mayor será el vigor de la vegetación y más clara su discriminación frente a otros tipos de cubierta. En el caso de vegetación senescente o enferma, la reflectancia aumenta en las bandas del Azul y el Rojo, y disminuye en el Infrarrojo, en relación a la cobertura vegetal sana, por lo que existe un menor contraste en estas últimas bandas. Los conjuntos de firmas espectrales de una variedad de cubiertas terrestres dispuestos ordenadamente, bajo la forma de librería, son útiles para potenciales usuarios interesados en conocer patrones de respuestas espectrales (Hernández y Montaner, 2009).

En relación a los Índices de Vegetación (IV), 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 (debido a la absorción por parte de la clorofila) y la alta reflectancia en la porción del Infrarrojo Cercano (debido a la estructura del mesófilo de las hojas).

La geomática, y dentro de ella la teledetección, ofrece 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 permite trabajar con grandes volúmenes de datos en áreas relativamente inaccesibles (Chuvienco Salinero, 2002). Las Series Temporales (ST), definidas como una colección de observaciones de una variable recogidas secuencialmente en el tiempo, 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). Google Earth Engine (GEE) es una plataforma de computación en La Nube que hace posible el análisis de ST de datos derivados de sensores remotos, como los de las misiones

LANDSAT (EM, TM y OLI) (Wulder *et al.*, 2019), y el desarrollo de algoritmos en-línea para la estimación de IV, FE, entre otros (Gorelick *et al.*, 2017). 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).

1.1 Antecedentes

1.1.1 Manejo Forestal en el Delta del Río Paraná

Las principales especies utilizadas en forestaciones en el Delta del Paraná son *Salix* sp. (sauce) y *Populus* sp. (álamo), ambas pertenecientes a la familia de las Salicáceas, si bien se pueden encontrar, en menor proporción, plantaciones de *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 álamo y las restantes a sauces (Casaubon, 2014; Dirección Nacional de Desarrollo Foresto Industrial, 2019). En general se utilizan densidades iniciales de plantación entre 400 y 1.100 plantas por hectárea, con manejo asociado a la poda y el raleo. La zona núcleo forestal se encuentra en el Delta Inferior bonaerense, presentando una gran homogeneidad paisajística (Casaubon, 2014).

La actividad forestal de pequeños productores se expresa espacialmente como un patrón de parcelas pequeñas, propias de una economía de tipo “familiar”. Estas parcelas están asociadas a zanjas, atajarepunes y canales que aceleran el drenaje de los excedentes hídricos producidos, fundamentalmente, por la acción de los vientos del sudeste. Las unidades productivas de mayores dimensiones, pertenecientes a grandes empresas, utilizan en mayor medida endicamientos y terraplenes. Formando parte de ese patrón, también se encuentran numerosas parcelas resultado del abandono de las actividades productivas, que dan paso a nuevos bosques secundarios dominados por especies de árboles exóticos (Kalesnik *et al.*, 2011). El objetivo de la producción es la obtención de madera con destino al debobinado, aserrado y triturado para las especies de álamo, y con destino al aserrado y triturado en el caso de la madera de sauce. Estos son los productos tradicionalmente obtenidos en rotaciones cortas (turnos que van desde los 8 a 13 años) (Kandus *et al.*, 2006).

El modo de producción tradicional tiene una unidad mínima de producción de 500 ha que corresponde a productores medianos los cuales, al igual que los grandes (con una unidad mínima de 1.700 ha), se encuentran en capacidad de realizar labores tradicionales de preparación y cuidados del sitio en forma mecanizada. El modelo de producción consta de una etapa de Plantación, Poda selectiva, Podas media y alta, un Raleo y Corta Final por Tala Rasa, con un turno de aproximadamente 10 años. El caso de los pequeños productores (unidad mínima de 200 ha), dedican a forestación el 78% de la superficie, con el 22% restante dedicado a otras producciones (mimbre o frutales). De las hectáreas forestadas (78%),

dedican el 20% (correspondiente a zonas de albardón), para la producción de fibra de *Populus* sp., mientras que las restantes son forestadas con *Salix* sp. bajo un sistema de “zanja abierta” (Acciaresi *et al.*, 2006).

En las pequeñas superficies se observa una diversificación de actividades que incluyen las plantaciones de mimbre, frutícolas, de nuez pecan, la apicultura y el agro-ecoturismo así como viveros forestales, ornamentales y florícolas. También resulta importante en algunos sectores el turismo y la recreación que incluyen una variada infraestructura para tal fin (Bó y Quintana, 2013).

1.1.2 Riesgo y gestión ambiental en forestaciones del Delta

Si bien no hay un único concepto de riesgo ambiental que unifique los enfoques teóricos de diferentes disciplinas, hay acuerdo en que se refiere al “resultado imprevisto como consecuencia de nuestras propias actividades o decisiones. La posibilidad de daños futuros al ambiente debido a decisiones que se toman en el presente y condicionan lo que acontecerá en el futuro, aunque no se sabe con certeza de qué modo” (Natenzon y Ríos, 2015). Como componentes del riesgo aparecen la peligrosidad, vulnerabilidad, exposición e incertidumbre, dando cuenta de que para que exista un riesgo debe haber tanto una amenaza como una población vulnerable a sus impactos. El riesgo es, en consecuencia, una condición latente o potencial, y su grado depende de la intensidad probable del peligro y los niveles de vulnerabilidad y exposición existentes (Fernández, 1996).

Integrar el riesgo en la gestión forestal significa aplicar todo el proceso de gestión de riesgos a las decisiones tomadas sobre los ecosistemas forestales. En el Delta del Paraná el desarrollo de actividades productivas, obras hidrotécnicas, urbanización, contaminación, entre otros, requiere poner en marcha planes de manejo y criterios de uso de los recursos que sean compatibles con la dinámica natural del Delta. Las transformaciones ocasionadas por la producción forestal asociadas a la construcción de caminos y terraplenes han construido un territorio con características de ecosistema terrestre, proceso conocido como “pampeanización” (Galafassi, 2011; Benzaquén, 2013). La pérdida de los pulsos de inundación o bien su minimización mediante levantamientos de terraplenes costeros que tienen por fin evitar las inundaciones y facilitar la instalación de caminos, ejercen un impacto sobre los patrones de drenaje y consecuentemente sobre los ciclos biogeoquímicos. El avance de las áreas endicadas se perfila como uno de los principales impactos a corto y mediano plazo (Minotti *et al.*, 2010). En respuesta a esto, 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 discutir los resultados obtenidos, aplicarlos a situaciones específicas, y evaluar su utilidad como insumos para la gestión de

riesgos ambientales. En este contexto, este trabajo busca proveer herramientas e información sobre los patrones de respuesta de los sistemas productivos forestales estudiados a lo largo de una serie temporal larga, a partir de sus respuestas espectrales, usando datos derivados de sensores remotos de mediana resolución, con el fin de aportar elementos valiosos para evaluar las prácticas forestales y sus posibles efectos ambientales.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

- Generar información que contribuya a la gestión del riesgo ambiental mediante el estudio de los patrones de respuesta espectral en forestaciones del Delta del Río Paraná a partir de imágenes satelitales de resolución espacial media para el período 2008 a 2018.

2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar sistemas forestales del Delta del Río Paraná en base al análisis de la distribución espacio-temporal de Respuestas Espectrales de la cobertura vegetal.
- Construir y analizar Series Temporales del Índice de Vegetación Diferencial Normalizado y de la reflectancia en las bandas del Visible y el Infrarrojo en sistemas forestales del área de estudio para el período 2008-2018.
- Determinar Firmas Espectrales de referencia para forestaciones del Delta del Río Paraná, generando una librería de Firmas Espectrales forestales regional.
- Proponer elementos para la gestión del riesgo ambiental en estos ecosistemas a partir de la identificación de patrones espacio temporales de respuesta espectral y su relación con otras variables.

3. Materiales y métodos

3.1 Área de estudio

3.1.1 Características generales

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 mareal (Kalesnik y Quintana, 2006; Aceñolaza *et al.*, 2008).

La región posee un paisaje heterogéneo con una alta diversidad de ambientes y fisonomías incluyendo una red hidrográfica compuesta e intrincada. El conjunto de cursos de agua permanentes como estacionales añade complejidad. Incide también el régimen de inundación del río Uruguay en la porción final de la región. En ésta última adquieren mayor importancia los efectos de las mareas que afectan las aguas del río de la Plata, con una amplitud de 1 m, en forma diaria, y los de las sudestadas (vientos del sector SE), que pueden soplar durante varios días y causar la elevación del nivel del agua hasta 2,5 m por encima del nivel de base (Benzaquén, 2013). 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 (Figura 2) (Viva *et al.*, 2017). La característica regional particular es la de ser un delta de fondo de estuario; al desagotar en agua dulce (Río de la Plata), la carga sedimentaria continúa formando islas y extendiéndose hacia el Sur. Es por ello que se habla de un delta vivo.

Si bien se han propuesto diferentes clasificaciones para el Delta del Río Paraná, en este trabajo siguió la propuesta por Burkart (1957), quien se refiere a los tramos Superior, Medio y Bajo/Inferior, que difieren en las características geológicas, geomorfológicas e hidrológicas. El Delta Superior se extiende desde Diamante, provincia de Entre Ríos, hasta Villa Constitución, provincia de Santa Fe; este sector es el relativamente más elevado desde el punto de vista topográfico, posee una pendiente regional importante y, en su origen, predominan los procesos fluviales. El Delta Medio, abarca desde Villa Constitución hasta Ibicuy, provincia de Entre Ríos; la mayoría de los ambientes aquí presentes son de origen marino, modificados posteriormente por la acción de procesos fluviales. Finalmente, el Delta Bajo se extiende desde Ibicuy hasta la desembocadura en el río de la Plata; éste incluye zonas con geformas antiguas (aproximadamente 4.500 años AP) de origen marino junto con áreas de sedimentación más reciente, producto del modelado fluvial de los ríos, particularmente del

río Paraná. La zona frontal del Delta Bajo es la única que, desde el punto de vista geomorfológico, forma un “delta” en sentido estricto, con un avance por formación de nuevas islas en el estuario del Río de la Plata. (Burkart, 1957; Morello *et al.*, 2012). Cabe destacar también la clasificación introducida por Bonfils (1962) que dividió el Delta en cuatro unidades: “Delta Antiguo”, “Predelta” (que se corresponde con el Delta Medio), “Bajíos Ribereños” y “Bajo Delta”, según diferentes tipos de suelo.

Desde el punto de vista biogeográfico y ecológico, el Delta del Paraná tiene características únicas, debido a su conformación geomorfológica e hidrológica, que lo convierten, junto con el río Uruguay, en una red de penetración de especies de linaje subtropical, chaqueño y paranaense en las llanuras templadas pampeana y mesopotámica, donde conviven las especies de ambos orígenes (Kalesnik y Quintana, 2006; Kandus *et al.*, 2006).

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). Se diferencian en esta área sistemas de paisajes de humedales asociados al Corredor Fluvial Paraná-Paraguay, los cuales constituyen territorios que presentan un origen geológico, climático y geomorfológico común, con modelos de drenaje y permanencia del agua distintivos (Benzaquén, 2013). De estos sistemas, las forestaciones se concentran en la unidad “Humedales del complejo Litoral del Paraná Inferior”, y dentro de ésta en la subunidad “Bosques y praderas del Sudeste de Entre Ríos” (Quintana y Bó, 2013); con un 92% de plantaciones de *Salix* sp., 5% de *Populus* sp. y 3% de *Pinus* sp. (Figura 3). Por otro lado en la unidad “Humedales del Delta del Paraná”, subunidad “Pajonales y bosques de las islas deltaicas” (Bó y Quintana, 2013), se registra un 83% de plantaciones de *Salix* sp., 16,8% de *Populus* sp., y un 0,2% de *Pinus* sp. (Figura 3) (MAGyP, 2013, 2015).

Desde el punto de vista de la superficie destinada forestación, se estimaron 78.843 ha (MAGyP, 2015), de las cuales 2.645 ha (0.6 % de la superficie total) corresponden a los “Humedales del complejo litoral del Paraná Inferior” (con una superficie de aproximadamente 480.000 ha). Las 76.198 ha restantes (17% de la superficie total) corresponden a “Humedales del Delta del Paraná” (con una superficie de aproximadamente 430.000 ha). En otros términos, aproximadamente el 1% de los “Humedales del Complejo Litoral del Paraná Inferior” y el 18% de “Humedales del Delta del Paraná” están forestados (Figura 3); de la superficie total, el 16% corresponde a *Salix* sp., el 3% a *Populus* sp., y menos del 1 % a *Pinus* sp. (MAGyP, 2013, 2015).

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.

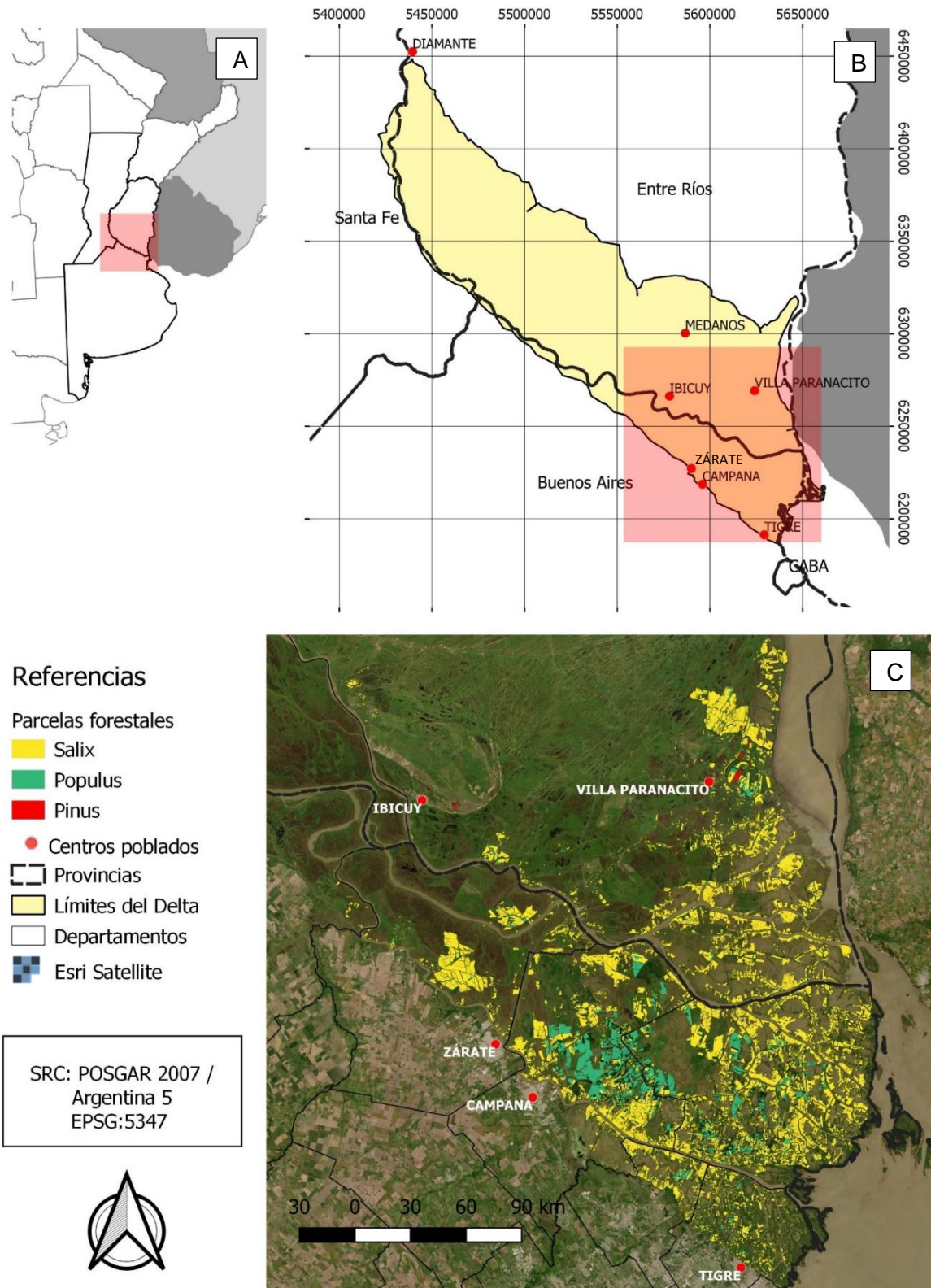


Fig. 1. Localización del Área de estudio, identificada por un recuadro en las vistas superiores, mostrando su ubicación en Argentina (A), en el Delta del Paraná (B) y el detalle del área forestada (C). Parcelas diferenciadas por especies. Adaptado de Brandan et al., (2009) y MAGyP (2013, 2015).

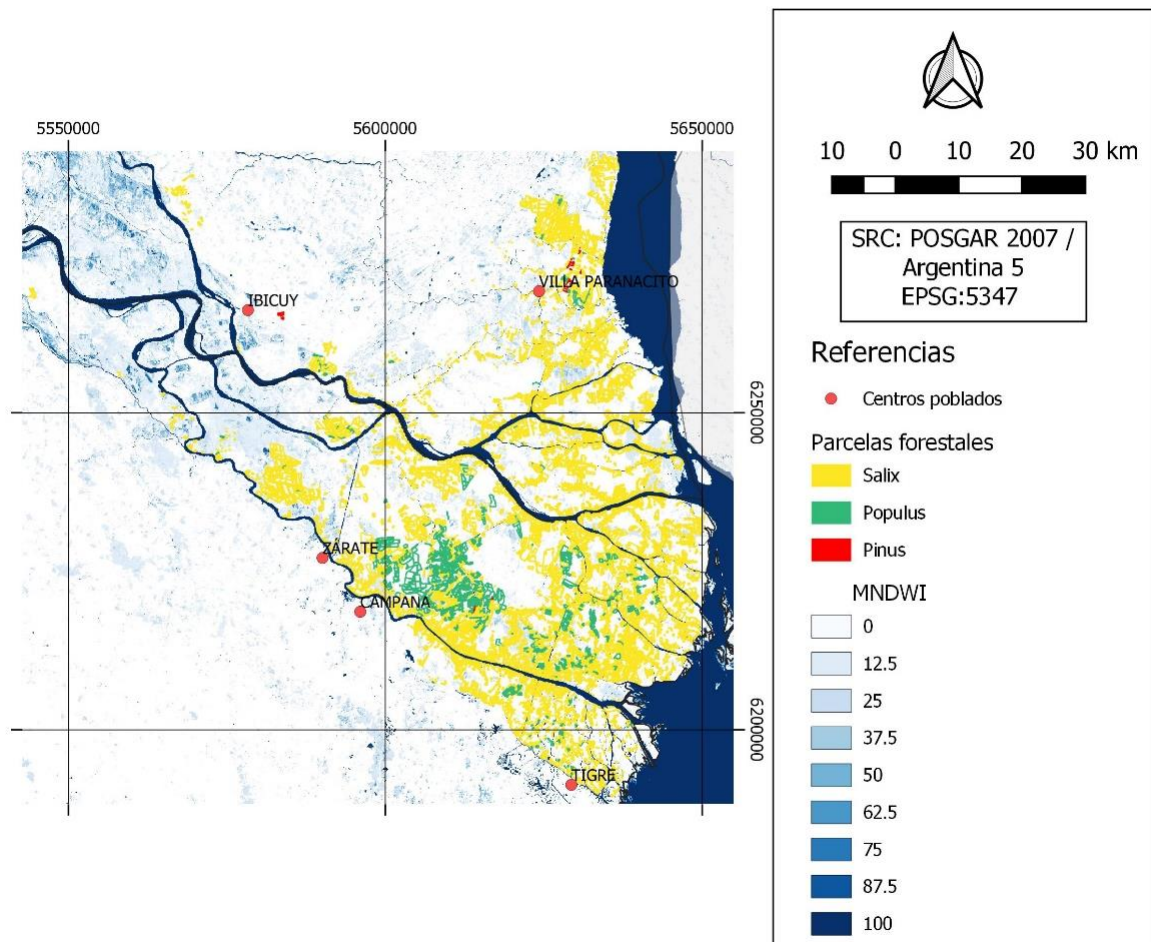


Fig. 2. Mapa de frecuencia de agua, índice MNDWI. Frecuencia expresada en porcentaje de cubierta de agua para el año 2013, calculado a partir de una serie temporal de imágenes Landsat 8 OLI. Adaptado de Viva et al., (2017).

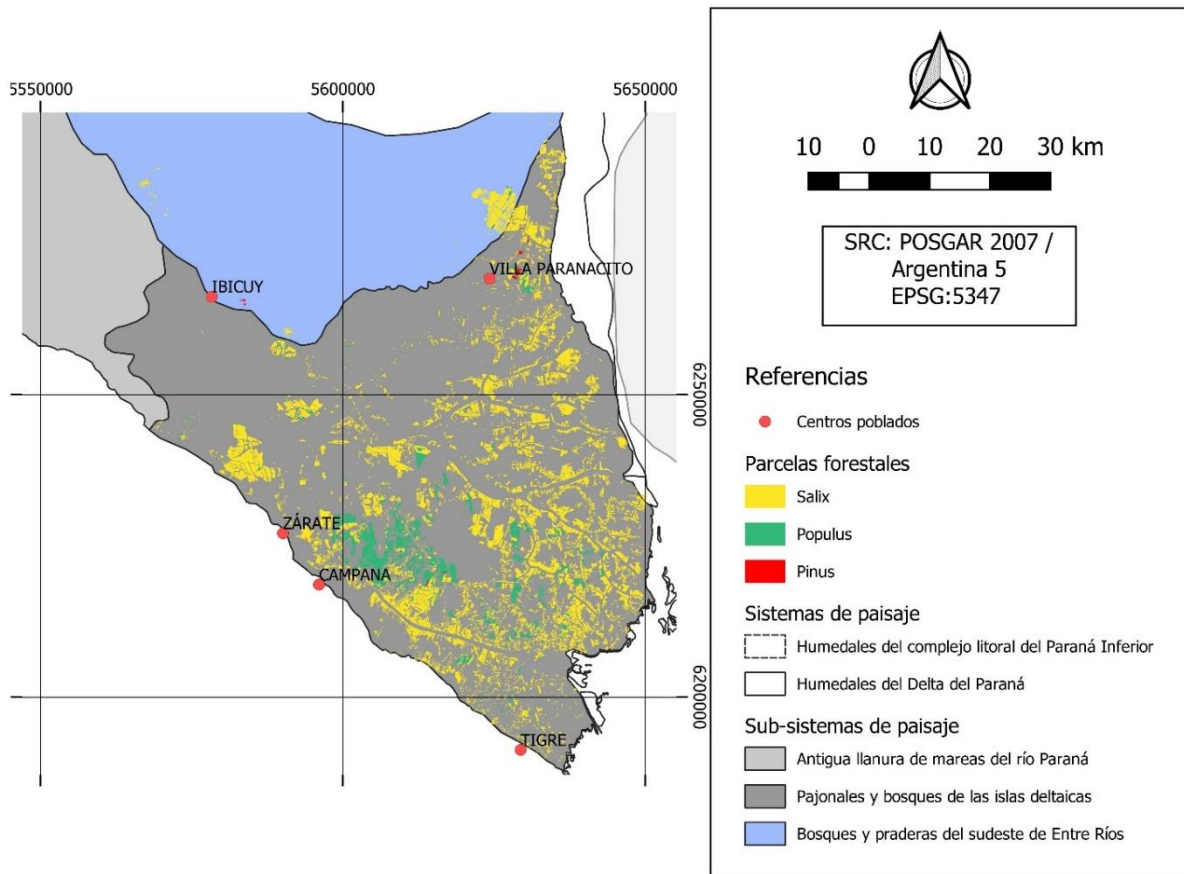


Fig. 3. Sistemas de paisajes de humedales del Delta del Paraná considerados en el estudio. Adaptado de Benzaquén (2013). En tonos azules se aprecian las subunidades de los Humedales del Complejo Litoral del Río Paraná, y en tonos grises las correspondientes a los Humedales del Delta del Paraná.

3.1.2 Demografía y uso del suelo

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 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). En la Figura 4 se aprecia la 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. Se destaca en la mencionada figura que una de las zonas de mayor densidad poblacional, en cercanía de la localidad de Campana, coincide con la zona núcleo forestal de Buenos Aires.

Las condiciones características de los sistemas de humedales, el patrón espacial heterogéneo y la dinámica temporal han determinado la historia de la ocupación humana y de los usos de la tierra, en cuanto a tipo de actividad y a intensidad y estrategia de uso (Morello *et al.*, 2012). El subsistema “Bosques y praderas del Sudeste de Entre Ríos” (Figura 3) tiene un uso netamente ganadero (principalmente bovino) sobre pasturas naturales, aunque se han realizado intentos de agricultura (soja y sorgo forrajero). También cuenta, en menor proporción, con plantaciones de Salicáceas y pinos, al igual que con apicultura. En las zonas de dunas de los alrededores de Ibicuy existe una importante actividad extractiva de arena (Quintana y Bó, 2013).

La principal actividad productiva en los “Pajonales y bosques de las islas deltaicas” (Figura 3) es la forestación con Salicáceas, principalmente en los territorios isleños de San Fernando y Campana, en los cuales grandes superficies isleñas han sido endicadas para tal fin. Actualmente, en muchos establecimientos que superan las 150 ha., la forestación se combina con otras formas productivas como la ganadería extensiva. Como consecuencia del uso del suelo, se registra en el área de estudio una serie de modificaciones del relieve correspondientes a diques, terraplenes, construcción de caminos, entre otros (Kandus y Minotti, 2010).

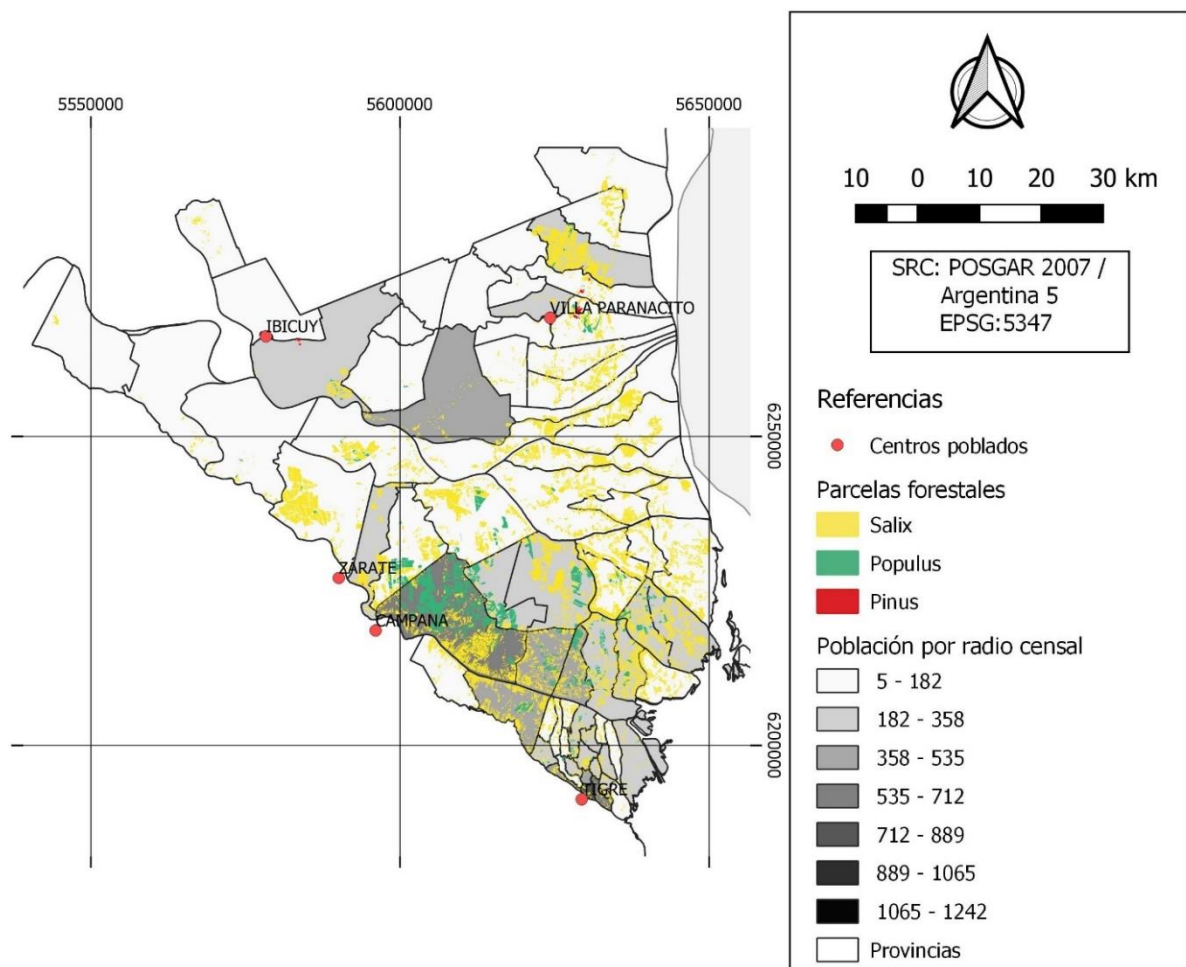


Fig. 4. Población por radio censal. Datos correspondientes al Censo 2010 del INDEC (INDEC, 2012).

3.1.3 Geomorfología

Las islas presentan un perímetro formado por albardones y una parte central deprimida que aloja sectores pantanosos. El sector interior está afectado por la presencia de una capa freática muy cercana a la superficie que produce condiciones de anaerobiosis. Esta situación retarda la incorporación de la materia orgánica a la fracción mineral del suelo. Hay sectores con depósitos de turba y presencia de gas metano. El suelo está constituido por una sucesión de capas de diferente espesor y granulometría afectadas por hidromorfismo generalizado (Ramonell, 2012). La heterogeneidad de geoformas causada por la morfodinámica activa, las características ácuicas y la historia geológica caracterizada por los cambios climáticos y su influencia en la morfodinámica, han influido en la pedogénesis y determinado gran variabilidad espacial de los suelos, escaso desarrollo y presencia de discontinuidades litológicas (Morello *et al.*, 2012).

3.1.4 Clima

La región se caracteriza por un clima templado húmedo con lluvias todo el año. La temperatura media anual ronda los 18° C, y la precipitación media anual alcanza los 1.000 mm. La estación del INTA Delta, ubicada en el Delta Inferior, registra 1.020 mm de precipitación media anual en los últimos 40 años, con un promedio de 83 días lluviosos por año. Los meses más lluviosos son Enero, Febrero y Marzo (105 a 129 mm mensuales) y los menos lluviosos son Junio, Julio y Agosto (57 a 59 mm mensuales). La temperatura media mensual del mes más frío (Julio) es 10,5 °C y la del mes más cálido (Enero) es 22,6 °C. Los vientos son suaves con una media anual de 4 km/h. En todas las estaciones del año predominan los vientos del Nordeste (Morello *et al.*, 2012).

3.1.5 Vegetación

La distribución y abundancia de las especies vegetales está modelada por el escurrimiento de agua de los cursos y por la longitud y alternancia de períodos de suelo inundado y de suelo seco. El ensamble de especies de estos ambientes tiene características fisiológicas particulares, como consecuencia de la presión selectiva de los pulsos. Por esto, pueden sobrevivir en condiciones de sequías e inundaciones extraordinarias (Benzaquén, 2013). Aceñolaza *et al.*, (2014) discriminaron para el CFLP clases de cobertura a partir de características fisonómicas de la vegetación (bosques, arbustales, vegetación herbácea de gran porte y vegetación herbácea de baja altura). Los bosques asociados al Delta Medio (bosque ribereño), presenta especies como el sauce criollo (*Salix humboldtiana*), el aliso de río (*Tessaria integrifolia*), el canelón (*Rapanea laetevirens*) y el laurel (*Nectandra angustifolia*). En el Bajo Delta se destaca la selva de galería o monte blanco de forma relictual, compuesta por leñosas como el ingá (*Inga uruguensis*), anacahuita (*Blepharocalyx salicifolius*), sauco

(*Sambucus australis*), ceibo (*Erythrina crista-galli*). Actualmente muchas de estas comunidades se reemplazaron por un bosque secundario dominado por especies exóticas (Kalesnik *et al.*, 2011) como ligustro (*Ligustrum lucidum*), ligustrina (*Ligustrum sinense*), mora (*Morus* sp.), fresno (*Fraxinus* sp.) (Morello *et al.*, 2012). La vegetación arbustiva corresponde a los varillares (*Solanum glaucophyllum*) y sesbaniales (*Sesbania* sp.), con escasa representación espacial y ubicadas en zonas de elevación topográfica intermedia. Las herbáceas de alto porte se diferencian en pajonales/totorales/juncales/pirizales (*Coleataenia prionitis*, *Cortaderia selloana*, *Massula latifolia*, *Schoenoplectus californicus*, *Cyperus giganteus*) ubicados en las medias lomas; y las herbáceas bajas están representadas por pastizales de alta cobertura entre las que se destaca la comunidad dominada por *Polygonum* spp. que cubre regiones extensas en zonas bajas y bordes de lagunas.

3.1.6 Características edáficas

Predominan los suelos imperfectamente drenados con saturación hídrica frecuente o permanente, generando un prolongado déficit en oxígeno libre. Los suelos de estos sistemas alcanzan su mayor expresión en los sectores de los cordones litorales. La acumulación de carbono orgánico en los suelos de los sectores bajos de las islas, así como su mayor acidez relativa, se deben a que la degradación de la materia orgánica es menor. En estos ambientes, los horizontes de materia orgánica pueden llegar a tener 30 cm de espesor. Su principal fuente es el material transportado en suspensión por el río e ingresado al interior de las islas durante los períodos de inundación. Por el contrario, los sectores de dunas y mantos de arena presentan una activa morfogénesis, con geoformas jóvenes, con lo cual los suelos presentan escaso desarrollo. Sobre los depósitos arenosos, con escasa cobertura vegetal, se desarrollan suelos con bajo contenido de materia orgánica y buen drenaje (Benzaquén, 2013).

3.2 Metodología

Se describen a continuación los recursos y procedimientos empleados para la obtención, almacenamiento, análisis y visualización de los datos.

3.2.1 Software y plataformas utilizados

Para la visualización, selección de parcelas y generación de mapas se utilizó el software libre Quantum GIS (versión 3.6.1), un Sistema de Información Geográfica (SIG) de código abierto y multipropósito que se puede usar para la creación, edición, análisis y mapeo de datos espaciales (Graser y Olaya, 2015). Se utilizó como sistema de referencia de coordenadas a POSGAR 2007/ Argentina faja 5. Las Series Temporales de NDVI y de Firmas Espectrales se construyeron mediante la plataforma de computación en La Nube Google Earth Engine (GEE). La base de datos espaciales se generó utilizando SQLite, una base de datos relacional integrada de código abierto. Este esquema de trabajo permitió almacenar los datos en tablas

separadas y luego relacionarlas entre sí, pudiendo asimismo ser importadas dentro de otras aplicaciones (SQLite, 2019). Para el procesado de la base de datos se utilizó R, un lenguaje y entorno de libre disposición para la computación estadística con una amplia variedad de técnicas estadísticas y gráficas (González y Acosta, 2013). Para los análisis estadísticos se utilizó R y el software Infostat (Licencia CeReGeo-FCyT-UADER).

3.2.2 Descarga y procesamiento de Parcelas forestales

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). Posteriormente se seleccionaron parcelas de interés en base a la presencia de las mismas en dos o más fechas (2008-2015 y 2008-2013) (“Parcelas 2008 igual 2013” y “2008 igual 2015”), y a otros criterios resultantes de la exploración de los datos. Las parcelas se obtuvieron mediante el proceso de unión de las capas vectoriales.

3.2.3 Construcción de Series Temporales de NDVI

Para las parcelas resultantes de la selección previa, se construyeron Series Temporales (ST) del NDVI, a partir de algoritmos de Google Earth Engine y datos provenientes del sensor Landsat. Se trabajó con las colecciones Landsat LT5_L1T_TOA_FMASK, LE7_L1T_TOA_FMASK y LC8_L1T_TOA_FMASK, que se encuentran ortorectificadas y cuentan con un algoritmo de filtrado de nubes y sombras de nubes (Fmask) (Zhu y Woodcock, 2012). Se consideró como ventana temporal para el análisis de los patrones de respuesta de 215 escenas (frecuencia quincenal) el período 01-01-2008 a 31-12-2018. De esta forma se dispone de información actualizada para forestaciones identificadas en los inventarios, así como de los posibles cambios asociados al manejo. Las parcelas seleccionadas se separaron por especie (*Pinus* sp., *Salix* sp. y *Populus* sp.) y se construyeron a partir de las mismas Fusion Tables, tablas cuyo formato es compatible con GEE.

El Índice de Vegetación Diferencial Normalizado fue calculado con la siguiente ecuación (Tucker, 1979):

$$NDVI = \frac{IRC - Rojo}{IRC + Rojo}$$

Dónde: IRC: Banda del Infrarrojo Cercano; Rojo: Banda del Rojo

Los valores de NDVI varían entre -1 y 1. Los alores mayores a 0,3 se asocian a coberturas vegetales (Zamboni, 2017).

Como resultado se obtuvieron tablas con valores de NDVI para cada especie, por parcela y fecha, en formato .csv.

3.2.4 Generación de la base de datos espaciales de Series Temporales de NDVI

Se almacenaron las parcelas en formato vectorial Geopackage. Luego se comprobó la validez de geometrías mediante QGIS y se corrigió la topología de la capa. Se exportó la capa válida como SpatialLite, dentro de un archivo SQLite para facilitar el análisis de grandes conjuntos de datos.

Se incorporaron los datos de la Serie Temporal de NDVI por parcela en formato .csv obtenidos de GEE, separados por especie, a la base de datos SQLite. A partir de estos datos se crearon tablas con los valores de NDVI, id de las parcelas, año, estación climática, mes, día. Se utilizó R Studio (paquetes “RSQLite” y “sqldf”), para integrar la base de datos al software SIG. Se obtuvieron tres tablas, una para *Pinus sp.*, otra para *Populus sp.* y otra para *Salix sp.* (Tabla 1).

Tabla 1. Resumen de las tablas obtenidas para las Series Temporales de NDVI. Los registros nulos corresponden a la ausencia de datos (parcelas sin observaciones para una determinada fecha) (Ej. por presencia de nubes).

Archivo	Cantidad de parcelas	Registros totales	Registros validos (n)	Registros nulos
ST NDVI <i>Pinus sp.</i>	23	5.419	4.999	420
ST NDVI <i>Populus sp.</i>	1.257	401.568	283.540	118.028
ST NDVI <i>Salix sp.</i>	6.614	2.089.623	1.454.927	634.696

3.2.5 Generación de Series Temporales de Respuestas Espectrales (Visible-IR)

Para la estimación de las Firmas Espectrales se seleccionaron las 30 parcelas de mayor tamaño para *Salix sp.* y *Populus sp.*, y 23 parcelas para *Pinus sp.* A partir de las mismas se crearon las Fusion Table para ser ingresadas en GEE. Se desarrolló un algoritmo en GEE para construir una Serie Temporal de las Respuestas Espectrales de cada parcela para las distintas bandas de los sensores estudiados. Dichas respuestas se expresaron en valores de reflectancia. Al igual que para la estimación de las Series Temporales de NDVI, se consideró como ventana temporal el período 2008-2018, para las escenas disponibles. El algoritmo devuelve un archivo de la ST con la mediana de cada banda seleccionada por cada polígono (parcela) suministrado. En la Tabla 2 se muestran las bandas consideradas por cada tipo de satélite Landsat (5 TM, 7 ETM, 8 OLI) y el color asignado a cada una, donde IRC es el Infrarrojo Cercano, IRM1 es el Infrarrojo Medio 1 e IRM2 Infrarrojo Medio 2. Por lo tanto, se referirá a las bandas por la porción del espectro electromagnético al que se corresponden.

Tabla 2. Combinación de bandas de los sensores Landsat 5, 7 y 8 y sus correspondientes aplicaciones. Fuente: Adaptado de Cai *et al.*, (2018).

Sensor/Banda	Azul	Verde	Rojo	IRC	IRM1	IRM2
Landsat 5	B1	B2	B3	B4	B5	B7
Landsat 7						
Landsat 8	B2	B3	B4	B5	B6	B7
Longitud de onda (micrómetros)	0,44-0,51	0,52-0,60	0,63-0,69	0,77-0,90	1,55-1,75	2,06-2,35
Aplicaciones posibles	Reflectancia del agua. Detección de vegetación enferma.	Discriminación de clases de vegetación	NDVI, por absorción de la clorofila	NDVI, alta reflectancia. Contenido de biomasa y salud de la vegetación	Contenido de humedad de suelo y vegetación	Estrés hídrico de los cultivos y la orientación del riego

A efectos de obtener Firmas Espectrales comparables y que sean de utilidad independientemente del momento en el que se obtienen las imágenes, es necesario asegurar que las variaciones de reflectancia respondan sólo a cambios en las propiedades físicas o químicas de los elementos (Nosetto *et al.*, 2003). Para esto se utilizaron imágenes de Landsat Surface Reflectance (SR) que eliminan el efecto atmosférico mediante correcciones atmosféricas. Todos los datos del Landsat SR se procesaron en base a las imágenes orto-rectificadas Level 1 Terrain-corrected (L1T), los cuales tienen una alta precisión geométrica. Los datos SR del Landsat 8 (OLI) se procesaron y corrigieron con LaSRC (USGS, 2017a), y los del Landsat 5 y 7 ETM + SR con LEDAPS (USGS, 2017b; Chen *et al.*, 2017). Se trabajó con las colecciones de GEE Landsat LANDSAT/LT05/C01/T1_SR, LANDSAT/LE07/C01/T1_SR y LANDSAT/LC08/C01/T1_SR. Si bien los rangos espectrales de las bandas tienen pequeñas diferencias entre Landsat 5/7 y Landsat 8, estas son más pequeñas que una desviación estándar de las curvas espectrales de la serie de tiempo, por lo que no tendrán un impacto significativo en los resultados (Cai *et al.*, 2018).

El algoritmo arrojó como resultado tablas en formato .csv. Cada tabla contiene los valores de reflectancia de cada una de las bandas seleccionadas por cada parcela para toda la Serie Temporal. Dichos valores se re-escalaron con un factor de escala de 0,0001, de forma de visualizar los valores correspondientes a la reflectancia, los cuales van de 0 a 1 (USGS, 2017a).

3.2.6 Análisis estadísticos

A continuación se describen los análisis estadísticos realizados para cada sección de este trabajo. En cada una de ellas se realizaron gráficos de línea, de caja y bigote y se construyeron tablas. Se estimaron los valores de tendencia central (media) y de dispersión (Coeficiente de Variación (CV)).

a) Análisis de Series Temporales de NDVI

Para el análisis estadístico de las ST de NDVI, se obtuvieron las medidas resumen de los datos, separados por especie. Luego, se procedió a realizar el test de Shapiro-Wilks (SW) para analizar la normalidad. Debido a que los datos no presentaron distribución normal, se analizaron las varianzas mediante el test estadístico no paramétrico Kruskal-Wallis (KW) (Balzarini *et al.*, 2008). Se compararon las varianzas por estación climática, por año, mensualmente y para cada una de las fechas disponibles. Para determinar entre qué estación, año y mes existían diferencias, se realizaron pruebas de Múltiple Rangos, que determinan cuáles medias son significativamente diferentes de otras e identifica grupos homogéneos.

b) Análisis de Respuestas Espectrales (Visible- IR)

Para el análisis estadístico de las Respuestas Espectrales, se obtuvieron las medidas resumen de los datos, separados por especie. Luego, se procedió a realizar el test de SW para probar la normalidad. La banda del IRC presentó datos con distribución normal, por lo que se realizó una prueba ANOVA para el análisis de la varianza. Debido a que el resto de los datos no presentaron distribución normal, las diferencias de varianzas se estimaron mediante el test estadístico no paramétrico KW.

4. Resultados y Discusión

4.1 Series Temporales de NDVI

4.1.1 NDVI para el período 2008-2018

La Tabla 3 muestra los estadísticos de resumen de las ST de NDVI por especie. En ésta se observa el número de parcelas y la cantidad de registros u observaciones válidas para la ST (n). La media (0,6) resultó similar para las tres especies estudiadas, en coincidencia con los datos reportados por Alvares *et al.* (2013), de NDVI medio de 0,6 para plantaciones de *Pinus taeda* en áreas templadas de Brasil. A la vez, los valores resultan inferiores a los estimados por Maire *et al.* (2011), de valores medios de NDVI de 0,8 para *Eucalyptus* sp. para la misma región. Estas diferencias se asocian a las tasas de crecimiento diferencial que presentan las especies estudiadas.

La desviación estándar (SD) fue baja en todos los casos, asociado al elevado tamaño de la muestra (n) y a que los grupos de observaciones son homogéneos. Lo mismo ocurre con el Coeficiente de Variación (CV), utilizado para comparar la homogeneidad de dos o más series de datos aun cuando estén expresadas en distintas unidades de medida. Las medidas de dispersión (SD, CV) son menores en *Pinus* sp. que en las restantes especies, lo que se relaciona a su condición de especie perennifolia.

De particular interés en la Tabla 3 son el sesgo estandarizado y la curtosis estandarizada, medidas que determinan si la muestra proviene de una distribución normal. Valores de estos estadísticos fuera del rango de -2 a +2 indican desviaciones significativas de la normalidad. En este caso, los valores de sesgo estandarizado y de curtosis estandarizada no se encuentran dentro del rango esperado para datos provenientes de una distribución normal. Por lo tanto, se testeó la distribución de los datos para cada una de las especies.

Tabla 3. Resumen estadístico de NDVI por especie

NDVI	<i>Pinus</i> sp.	<i>Populus</i> sp.	<i>Salix</i> sp.
Cantidad de parcelas	23	1.257	6.614
n (número de registros válidos)	4.999	283.540	1.454.927
Media	0,6	0,6	0,58
Desviación Estándar	0,09	0,14	0,13
Coeficiente de Variación- CV (%)	15	23	23
Sesgo Estandarizado	-36	12.555	1,74E+06
Curtosis Estandarizada	31	38	274

A continuación se presentan los resultados de la ST de NDVI comparativamente para las tres especies en conjunto, por estación, año, mes, y fecha. Los resultados de las pruebas de hipótesis para cada una de las especies estudiadas (por estación, año, mes, y fecha) se presentan en el apartado 4.1.6 (descripción por especie).

4.1.2 ST de NDVI por estación climática

La Figura 5 muestra los valores medios y el CV de la ST de NDVI por estación climática. Las tres especies presentaron valores inferiores de NDVI en invierno (*Salix* sp. y *Populus* sp.: 0,4; *Pinus* sp. 0,6), con tendencias a aumentar hacia el verano (aproximadamente 0,7 para las 3 especies estudiadas). Las Salicáceas (especies caducifolias) presentaron los valores más bajos en invierno y los más altos en verano, en comparación con *Pinus* sp. que presentó los valores más altos tanto en otoño como en verano. Estos resultados coinciden con las tendencias teóricas sobre el aumento del NDVI estivalmente, atribuidas frecuentemente al alargamiento de la temporada de crecimiento debido al incremento de la temperatura y consecuentemente de la actividad fotosintética de las plantas (Piedallu *et al.*, 2019).

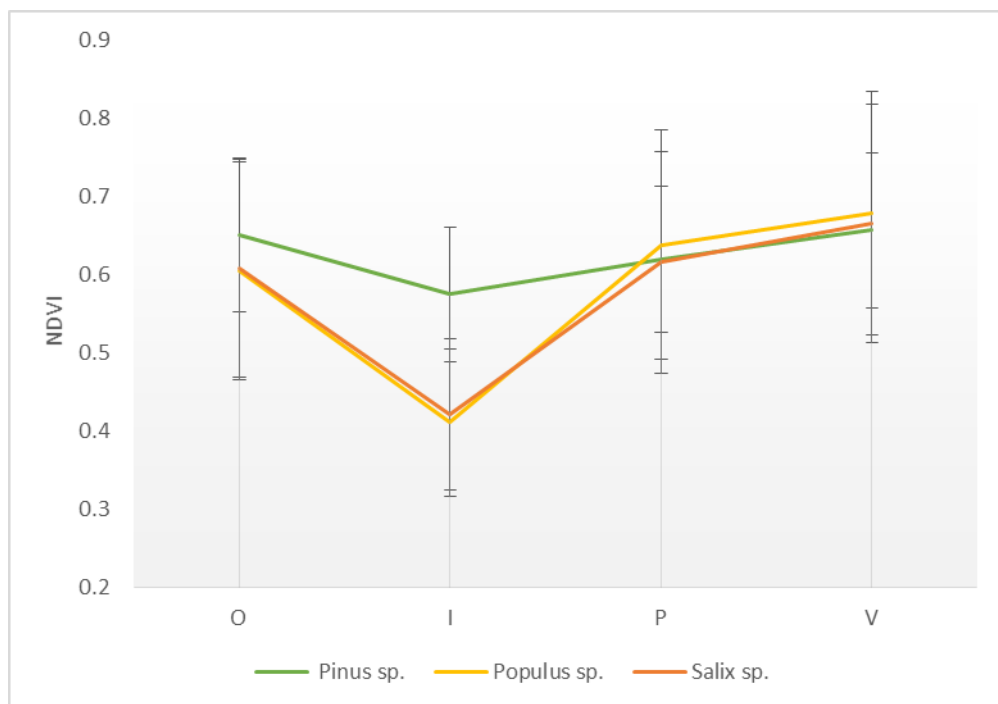


Fig. 5. ST de NDVI por estación climática. Se presentan valores medios. Las barras corresponden al CV.

4.1.3 ST de NDVI por año

En la Figura 6 se muestran los valores medios y los CV de la ST de NDVI por año. En general, *Pinus* sp. presentó valores anuales superiores a las Salicáceas, excepto al inicio de la ST (2008, 2009), donde las tres especies registraron un similar valor de NDVI (0,55-0,6) que puede asociarse a la temprana edad de las plantaciones. Por otro lado, la respuesta en estos años coincide con un período de sequía extraordinaria, la cual pudo haber producido un

descenso de la actividad fotosintética a causa de la escases de agua (Scarpati y Capriolo, 2013).

Pinus sp. mostró una tendencia creciente en el NDVI a lo largo de los años, mientras que *Salix sp.* y *Populus sp.* exhibieron una mayor estabilidad principalmente a partir del año 2011, si bien *Salix sp.* presentó valores inferiores a *Populus sp.* en toda la ST. Para las tres especies el año 2016 se asoció a una importante caída de los valores, lo que indicaría condiciones regionales determinantes para la disminución del NDVI. Del mismo modo, para las Salicáceas se identificó una importante caída entre los años 2009 y 2010. El descenso de los valores de NDVI puede estar dado por la presencia de agua en las parcelas, interfiriendo con la medición del índice. Sumado a lo anterior, estos años presentaron un alto valor del Índice de Intensidad del fenómeno El Niño, lo cual se asocia a la ocurrencia de ciclos húmedos y eventos de inundación (Bianchi y Cravero, 2010).

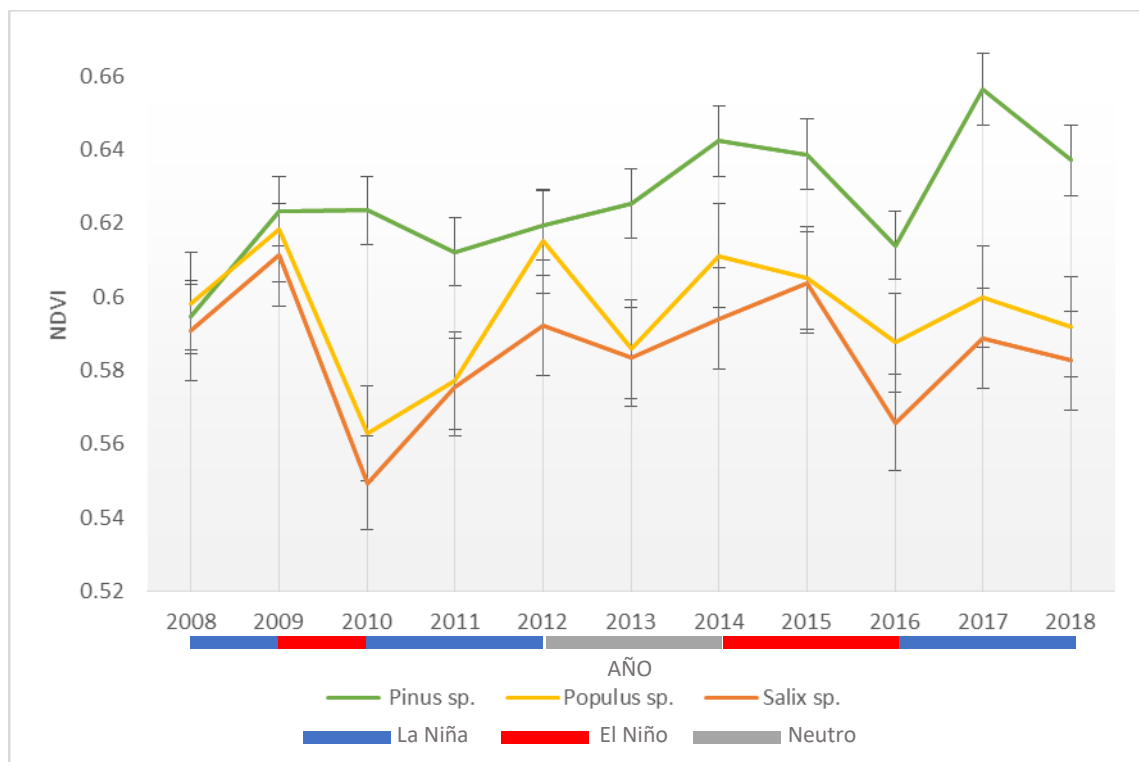


Fig. 6. ST de NDVI por año. Se presentan valores medios. Las barras corresponden al CV. También se presentan los años de El Niño y La Niña. Adaptado de Golden Gate Weather Services (2019).

4.1.4 ST de NDVI por mes

Los valores medios mensuales y el CV de la ST de NDVI se muestran en Figura 7. En la mencionada figura se aprecia la marcada diferencia entre el verdor de la vegetación en los distintos meses del año para las 3 especies, principalmente para las Salicáceas, con los registros inferiores en junio, agosto (0,5) y julio (0,4). *Pinus sp.* presentó valores superiores a

0,6 desde Febrero a Octubre, mientras que *Salix* sp. y *Populus* sp. superaron los valores máximos alcanzados por *Pinus* sp. (0,65) a partir de Octubre.

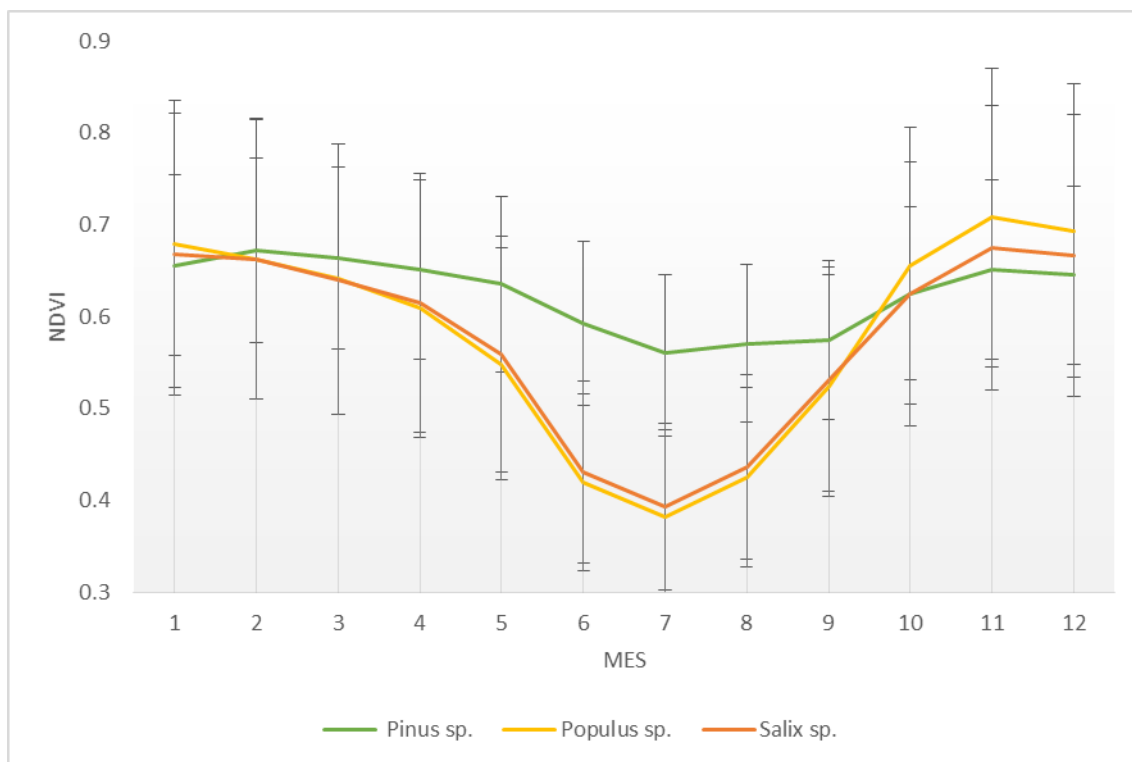


Fig. 7. ST de NDVI mensual. Se presentan valores medios. Las barras corresponden al CV.

4.1.5 ST de NDVI por fecha

En la Figura 8 se muestra la ST completa de valores medios de NDVI para todas las fechas disponibles consideradas en el estudio. Este gráfico permitió conocer detalladamente la respuesta de la vegetación e identificar los momentos en los que se dieron valores con mayor dispersión con respecto a la media, y que por lo tanto indican un comportamiento diferente al patrón de respuesta típico. Este tipo de situación es de gran relevancia para el manejo productivo ya que brinda información o alertan sobre alteraciones que, si son identificadas tempranamente, pueden ser afrontadas de forma más eficiente. El esquema de NDVI para cada fecha de la ST refleja para la mayoría de los años estudiados un patrón de respuesta similar, aunque con pequeñas variaciones en cada uno de los ciclos anuales. El vigor de la vegetación disminuye en los meses de invierno principalmente en las Salicáceas, seguido de un aumento fundamentalmente en estas dos especies para los meses de primavera-verano. Este patrón refleja una tendencia similar de respuesta de la cobertura vegetal para las tres especies estudiadas. Esta similitud en el NDVI de unidades homogéneas de vegetación a nivel regional se asocia al acoplamiento entre el verdor de la vegetación y las características hidrogeomorfológicas de la región (Zamboni, 2017). Por otro lado, el NDVI está asociado al

área foliar de la vegetación y al contenido de clorofila; por lo que varía según el tipo de vegetación, la extensión de la cubierta vegetal, el suelo, la geomorfología, las concentraciones de CO₂, la deposición de nitrógeno y las restricciones climáticas. La información aquí generada sirve de insumo para analizar posteriormente la relación con factores asociados a la variación de la vegetación (de índole ecológicos, geomorfológicos, topográficos, climáticos, de manejo, etc.) (Piedallu *et al.*, 2019).

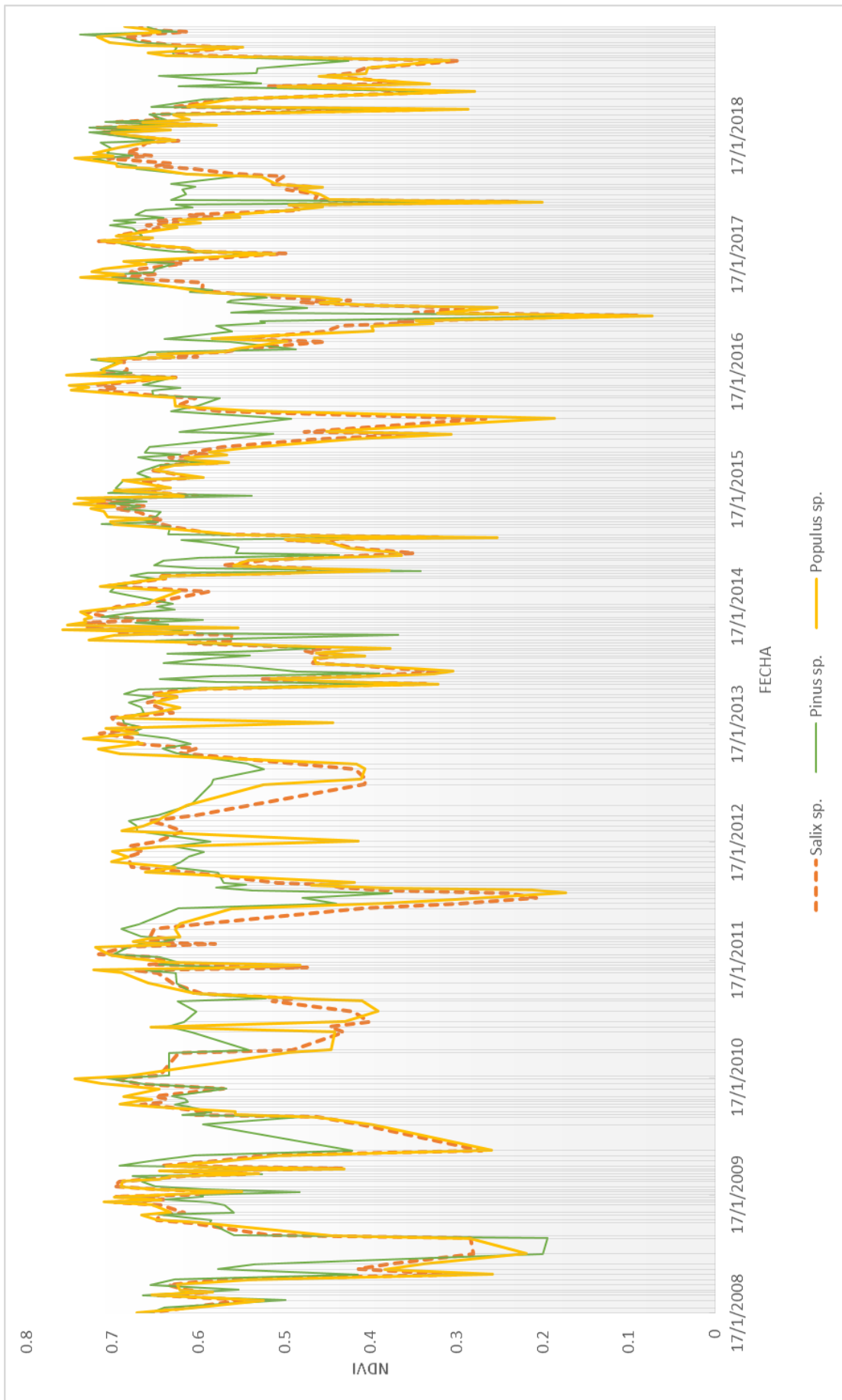


Fig. 8. ST de valores medios de NDVI para el conjunto de fechas disponibles.

4.1.6 ST de NDVI por especie

A fin de contribuir al conocimiento sobre el estado de verdor de cada una de las especies estudiadas, se presentan a continuación los resultados obtenidos para el NDVI de cada una de las especies estudiadas. Se incluyen en este apartado los resultados de las pruebas de hipótesis realizadas para cada especie.

a) *Pinus* sp.

Los datos no presentaron distribución normal (SW: $n= 4.999$; $p= <0,05$; $\alpha=0,05$). Los valores de NDVI presentaron diferencias significativas entre las estaciones, excepto entre otoño y verano que registraron valores más elevados (KW: $n= 4.999$; $H= 522$; $p= <0,05$; $\alpha=0,05$) (Figura 9). Estos resultados se asocian al aumento de la tasa fotosintética en el verano (Piedallu *et al.*, 2019) que no se ve afectada por el descenso de temperatura en otoño.

Anualmente se observaron diferencias significativas entre los valores de NDVI (KW: $n= 4.999$; $H= 201$; $p= <0,05$; $\alpha=0,05$) siendo los años iniciales (2008) y finales (2017) de la ST los valores más bajos y más altos respectivamente, diferenciándose de los demás. Esta tendencia al aumento puede responder asimismo a la cronosecuencia de las plantaciones, que superan en 2017 los 10 años.

Los valores de NDVI presentaron diferencias significativas entre los meses ($n= 4.999$; $H= 769$; $p= <0,05$; $\alpha=0,05$) (Figura 10). En el análisis de grupos homogéneos, los meses de Diciembre y Enero (verano), Abril y Mayo (otoño) no presentaron diferencias significativas, como se evidenció en el análisis estacional.

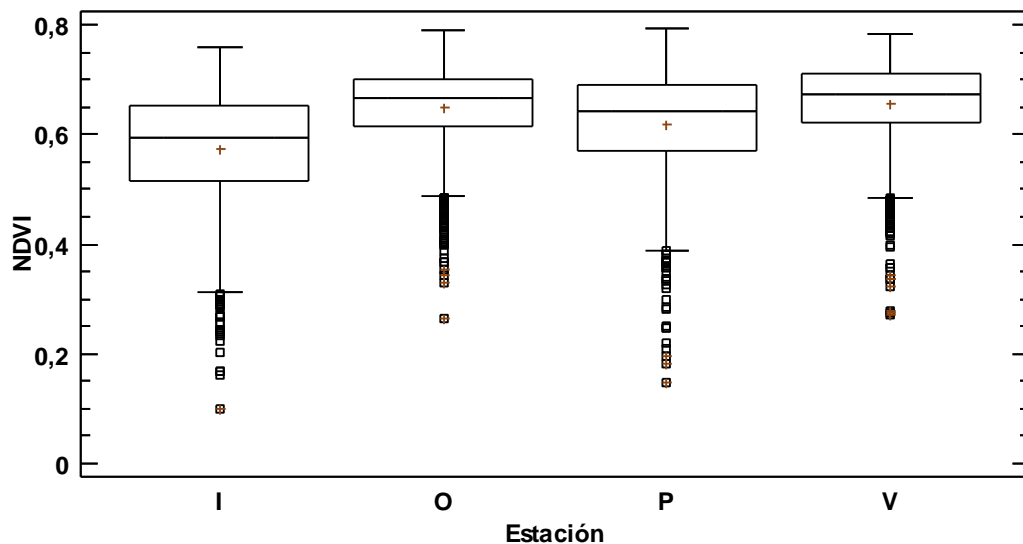


Fig. 9. Variación temporal de los valores medios de NDVI y sus respectivas desviaciones por estación climática para *Pinus* sp.

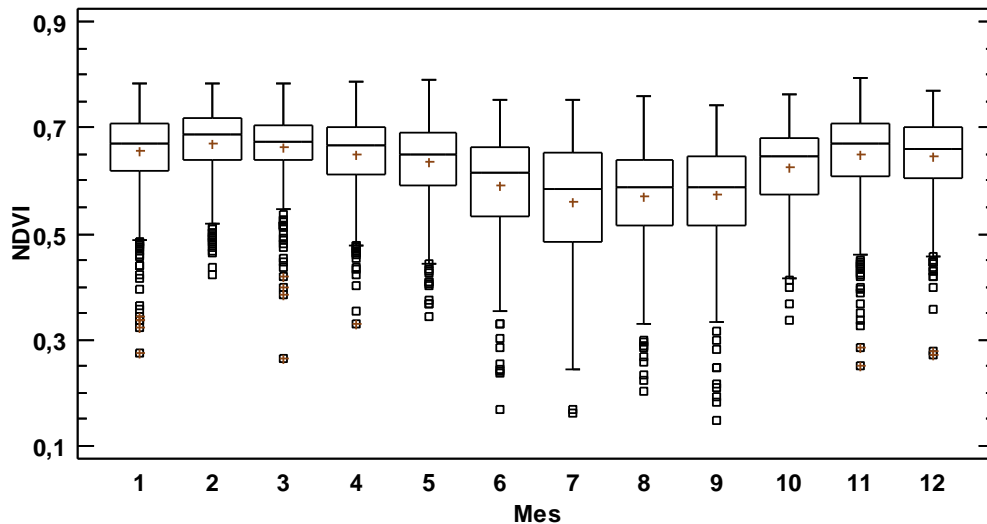


Fig. 10. Variación temporal de los valores medios de NDVI y sus respectivas desviaciones por mes para *Pinus sp.*

b) *Populus sp.*

Los valores de NDVI presentaron diferencias significativas entre todas las estaciones ($n=283.540$; $H=120.570$; $p < 0,05$; $\alpha=0,05$). Estos valores aumentaron desde el invierno hacia el verano (Figura 11). Esto responde al hecho de que *Populus sp.* es una especie caducifolia, por lo que la pérdida de hojas en otoño hace que el NDVI disminuya significativamente en invierno. En primavera, la recuperación del follaje y el aumento de la actividad fotosintética hace que el NDVI aumente hasta alcanzar un máximo en el verano (Piedallu *et al.*, 2019).

Anualmente se encontraron diferencias significativas de NDVI ($n=283.540$; $H=2.540$; $p < 0,05$; $\alpha=0,05$) entre todos los años. Cabe destacar la diferencia entre los años 2009 (valores más altos) y 2010 (valores más bajos). Más allá de este descenso interanual al inicio de la ST, esta especie no mostró ninguna tendencia a lo largo de los años.

Los valores mensuales de NDVI mostraron diferencias significativas entre todos los meses ($n=283.540$; $H=159.065$; $p=0$; $\alpha=0,05$) (Figura 12), asociado a la marcada estacionalidad dada la característica de caducifolia de la especie. Los valores más bajos correspondieron a junio, julio y agosto (invierno) y los más altos a noviembre (primavera), diciembre y enero (verano).

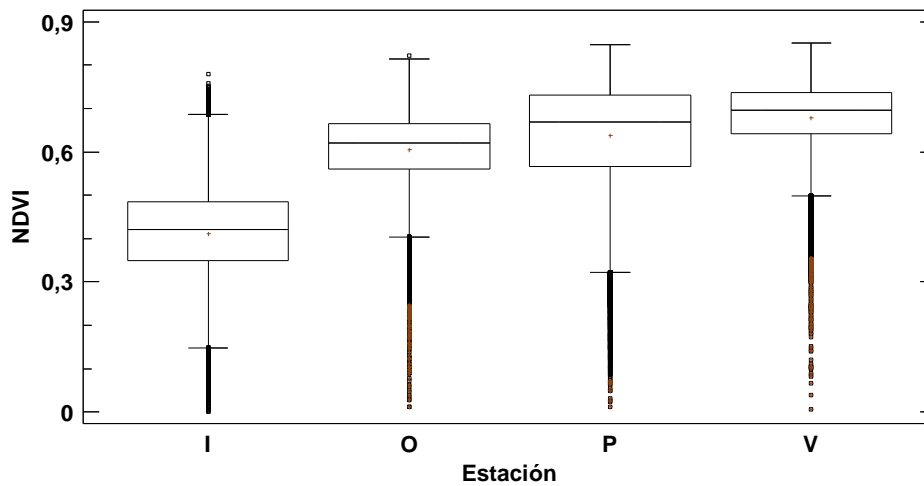


Fig. 11. Variación temporal de los valores medios de NDVI y sus respectivas desviaciones por estación climática para *Populus sp.*

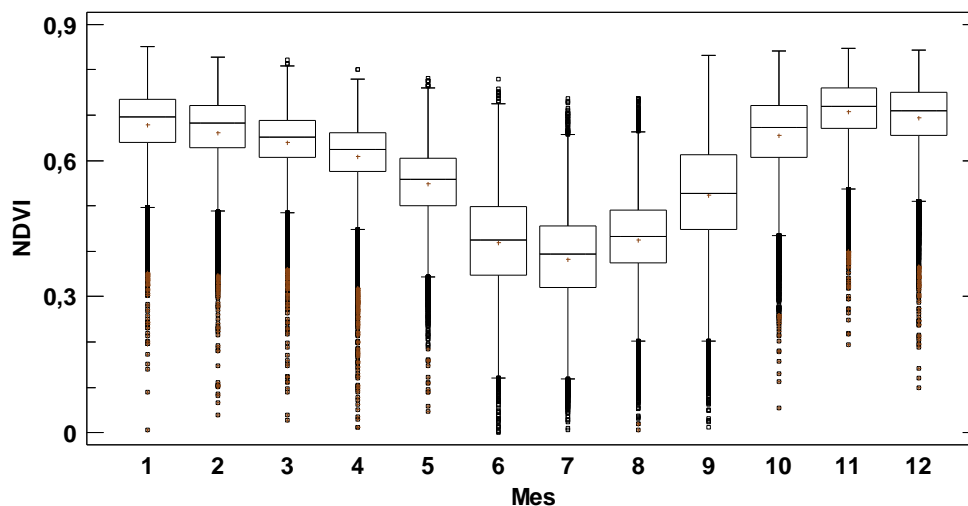


Fig. 12. Variación temporal de los valores medios de NDVI y sus respectivas desviaciones por mes para *Populus sp.*

c) *Salix sp.*

En términos generales el comportamiento del NDVI para *Salix sp.* fue similar al de *Populus sp.* Los valores de NDVI presentaron diferencias significativas entre las estaciones (KW: $n= 1.454.927$; $H= 609.806$; $p= <0,05$; $\alpha=0,05$). En invierno el verdor disminuye aumentando hacia el verano (Figura 13). Anualmente se observaron diferencias significativas entre los valores de NDVI de todos los años (KW: $n= 1.454.927$; $H= 17.590$; $p= <0,05$; $\alpha=0,05$). Al igual que en *Populus sp.*, se destaca la diferencia entre los años 2009 y 2010, con los valores más altos y más bajos respectivamente.

Mensualmente se observaron diferencias significativas entre los meses (KW: $n= 1.454.927$; $H= 751.090$; $p= <0,05$; $\alpha=0,05$), excepto entre Febrero/Diciembre, Marzo/Abril, Junio/Julio

(Figura 14). Al igual que en *Populus sp.*, los valores inferiores correspondieron a Junio, Julio y Agosto (invierno) y los superiores a Noviembre (primavera), Diciembre y Enero (verano).

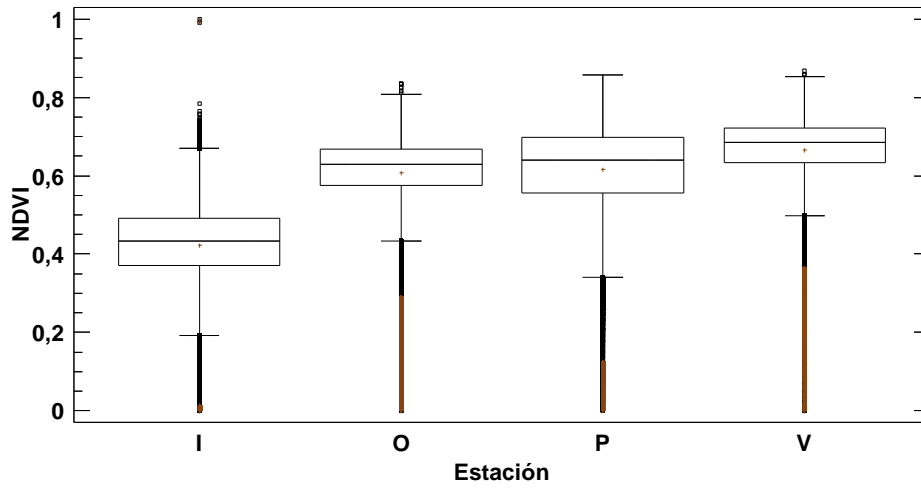


Fig. 13. Variación temporal de los valores medios de NDVI y sus respectivas desviaciones por estación climática para *Salix sp.*

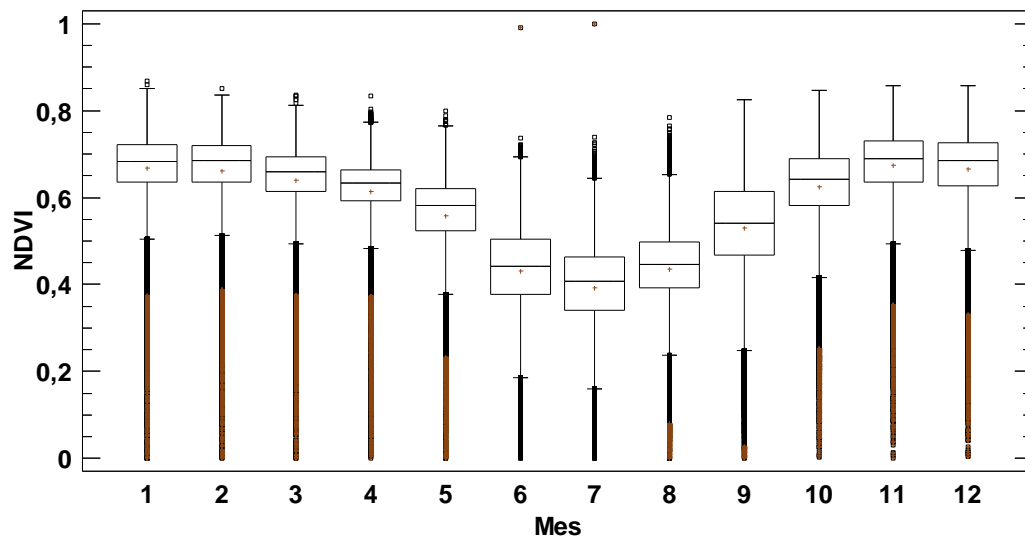


Fig. 14. Variación temporal de los valores medios de NDVI y sus respectivas desviaciones por mes para *Salix sp.*

4.2 Series temporales de Firmas espectrales

Una de las ventajas de disponer de un gran volumen de datos es la de analizar los patrones de respuesta interanualmente e intra-anualmente, a fin de identificar y evaluar cambios. Se presenta a continuación los resultados de la reconstrucción de las Firmas Espectrales y de las reflectancias para algunas de las bandas del Visible y el Infrarrojo.

4.2.1 Firmas Espectrales

Se obtuvieron los valores medios de las Firmas Espectrales de las tres especies estudiadas con datos de las bandas correspondientes a la región Visible del espectro electromagnético (Azul, Verde, Rojo) y del Infrarrojo (IRC, IRM 1 e IRM 2) (Figura 15 y Tabla 4). Los mismos se utilizaron para generar una librería de FE regional de plantaciones forestales.

En términos generales las tres especies presentaron una respuesta similar entre sí en todas las bandas, y los valores registrados reflejan un buen estado de sanidad vegetal. La firma espectral de las tres especies estudiadas es similar a la curva teórica para diferentes tipos de plantaciones forestales en China (Xi *et al.*, 2016) (Figura 16), con una reflectancia aproximadamente de 0,05-0,06 en la porción correspondiente a la banda verde, una disminución en la porción del Rojo y un aumento significativo en la región del IRC (0,27-0,28), luego de lo cual la respuesta disminuye. Este patrón se explica debido a que la clorofila de una planta en crecimiento absorbe la energía del rango del visible y especialmente en la porción correspondiente al Rojo para llevar a cabo la fotosíntesis, mientras que la energía cercana al infrarrojo es reflejada de manera muy eficaz gracias a la estructura del mesófilo de la hoja.

Cabe mencionar que si bien los patrones de reflectancia fueron similares a los teóricos para sistemas forestales (Xi *et al.*, 2016), los valores registrados fueron más bajos que los frecuentemente reportados para la vegetación (visible: 0,3; IRC: 0,5) (Lillesand *et al.*, 2004).

La tabla 4 muestra los estadísticos correspondientes a las Respuestas Espectrales de cada una de las bandas analizadas y por especie. El coeficiente de variación resultó elevado para aquellas bandas donde la respuesta fue baja, es decir, en las bandas del espectro visible; y *Pinus* sp. presentó menor variabilidad que las Salicáceas, reflejando las condiciones de perenne y caducifolia de estas especies respectivamente.

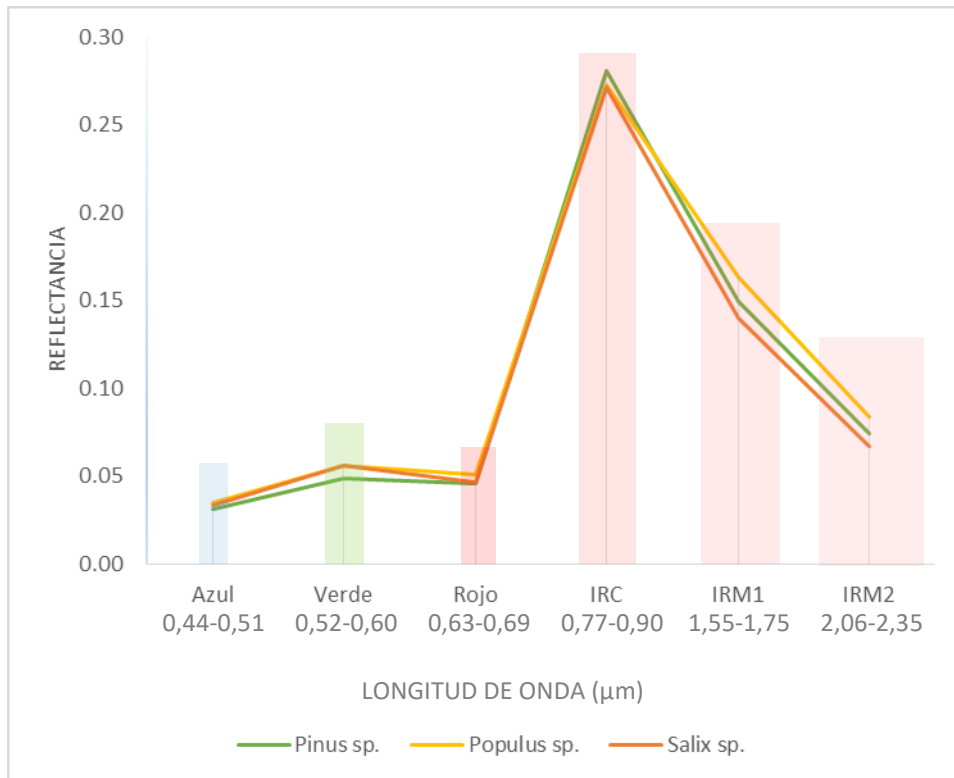


Fig. 15. Valores medios de reflectancia de las especies estudiadas para toda la serie temporal.

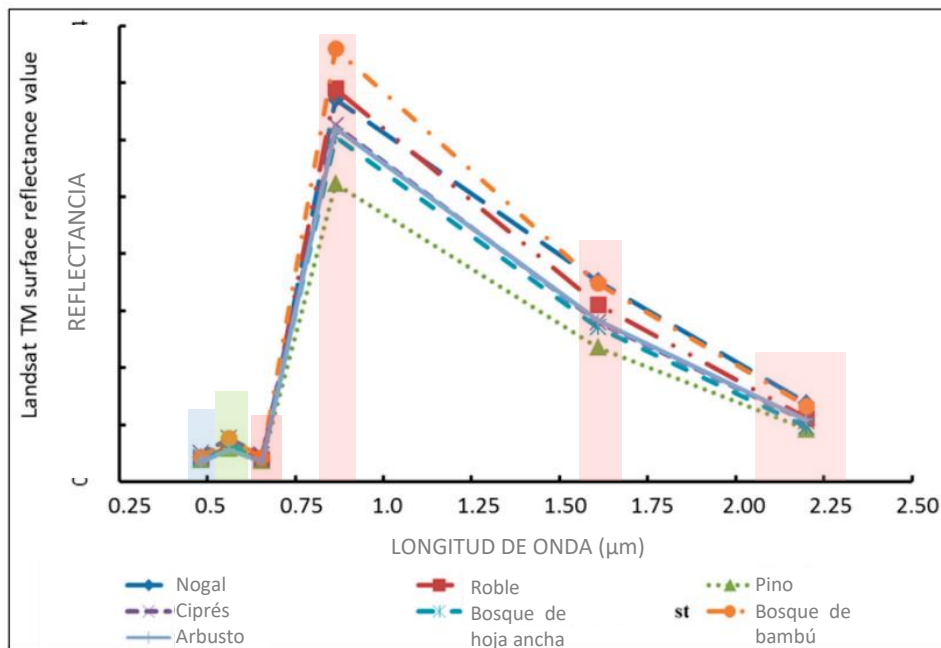


Fig. 16. Firmas espectrales de referencia. Los valores de longitud de onda (μm) de cada banda son: Azul: 0,45-0,51; Verde: 0,53-0,59; Rojo: 0,64-0,67; IRC: 0,85-0,88; IRM1: 1,57-1,65; IRM2: 2,11-2,29. (Adaptado de Xi et al., 2016 para sistemas forestales en China).

Tabla 4. Resumen estadístico de Respuestas Espectrales por especie.

	Pinus sp.				Populus sp.				Salix sp.										
	Azul	Verde	Rojo	IRC	IRM1	IRM2	Azul	Verde	Rojo	IRC	IRM1	IRM2	Azul	Verde	Rojo	IRC	IRM1	IRM2	
Cantidad de parcelas																			
n (número de registros)			23																30
Media			8530																9304
Coefficiente de Variación																			
Sesgo			0.03	0.05	0.28	0.15	0.07	0.04	0.06	0.05	0.27	0.16	0.08	0.03	0.06	0.05	0.27	0.14	0.07
Estandarizado			58%	40%	51%	39%	55%	49%	31%	43%	27%	27%	42%	64%	36%	45%	25%	21%	33%
Curtosis			85.2	61.51	61.88	-0.82	39.07	49.6	38.1	39.74	2.42	15.81	33.14	289.13	250.83	208.86	-2.09	79.19	114.63
Estandarizada			315.01	133.23	85.03	20.27	28.63	131.93	70.08	40.01	-7.18	0.75	11.33	2027.3	1585.7	1062.2	-7.09	327.56	385.15

4.2.2 ST de Respuestas Espectrales por año

Para analizar y comparar interanualmente las reflectancias de las tres especies estudiadas se graficaron los valores medios por año para cada una de las bandas del Visible y del Infrarrojo (Figura 17). En términos generales, las parcelas de *Pinus* sp. y *Salix* sp. presentaron patrones de respuesta similares entre sí y diferentes a los de *Populus* sp. para todas las bandas analizadas, tal como se aprecia en la Figura 17.

Tomando en cuenta la banda Azul, frecuentemente empleada para identificar cubiertas de agua o para la detección de vegetación enferma, *Populus* sp. mostró un aumento en la respuesta a lo largo de los años, mientras que para *Pinus* sp. y *Salix* sp. la reflectancia disminuyó.

En la banda correspondiente al Verde las tres especies presentaron valores de reflectancia que frecuentemente se asocian a los valores teóricos para la vegetación sana (0,04-0,07) si bien *Pinus* sp. presentó una respuesta inferior a las Salicáceas para todos los años de la ST.

Para el IRC (banda que permite estimar la biomasa y el estado de salud de la vegetación) los valores de las tres especies coinciden con los valores teóricos cercanos a 0,2-0,3 para ecosistemas forestales (Xi *et al.*, 2016). Sin embargo, en esta banda es notable la diferencia en el patrón de respuesta de *Populus* sp., con valores más elevados al principio de la ST y una disminución a partir del año 2013.

En las bandas del IRM1 e IRM2, *Populus* sp. tuvo la respuesta más elevada, la cual fue relativamente constante a lo largo de los años, con valores superiores en el 2008. Por otro lado, *Salix* sp. presentó los valores más bajos. La banda del IRM 1 está asociada con el contenido de agua de la vegetación; a menor reflectancia, mayor es el contenido de agua. Esto puede estar asociado a la mayor tolerancia que *Salix* sp. presenta a terrenos inundados o con mal drenaje (Acciaresi *et al.*, 2006; Cai *et al.*, 2018).

En general, *Pinus* sp. presentó menores valores de reflectancia para el azul, el verde y el rojo (RGB) que las otras especies. Sin embargo, presentó los valores más elevados de IRC. Esto se debe a que en estas bandas existe un efecto importante de los pigmentos de las hojas, y, por lo tanto, la mayor cobertura del suelo determina una mayor absorción de la energía incidente y así, una menor reflectancia (Nosetto *et al.*, 2003). Algo similar sucede con *Populus* sp., donde a mayor respuesta de las bandas RGB, menor respuesta en el IRC.



Fig. 17. ST de Respuestas Espectrales medias por año. Las barras corresponden al CV.

4.2.3 ST de Respuestas Espectrales por mes

Para analizar las respuestas intra-anales, se presenta la Figura 18 que muestra los valores medios mensuales para las bandas del Rojo y del Infrarrojo. Las plantaciones respondieron de forma similar en la banda del Rojo.

En la banda del IRC, *Salix sp.* presentó los valores más elevados en Marzo y Abril (otoño) y los valores inferiores en Septiembre, Octubre y Noviembre (primavera). La respuesta de *Populus sp.* fue relativamente constante a lo largo de los meses.

Pinus sp. y *Populus sp.* mostraron un comportamiento similar para las bandas del IRM1 e IRM2, si bien en el primero la repuesta fue mayor. Los valores superiores de *Populus sp.* se dieron en Febrero y los de *Pinus sp.* en Diciembre. *Salix sp.* presentó valores inferiores a las otras especies. Sin embargo, la respuesta aumenta progresivamente en IRM 2 hasta llegar a los mayores registros en octubre. *Salix sp.* presentó un comportamiento similar al descrito para *Pinus sp.* y *Populus sp.* en la sección anterior, donde a mayor respuesta en las bandas del RGB, menor respuesta en el IRC.

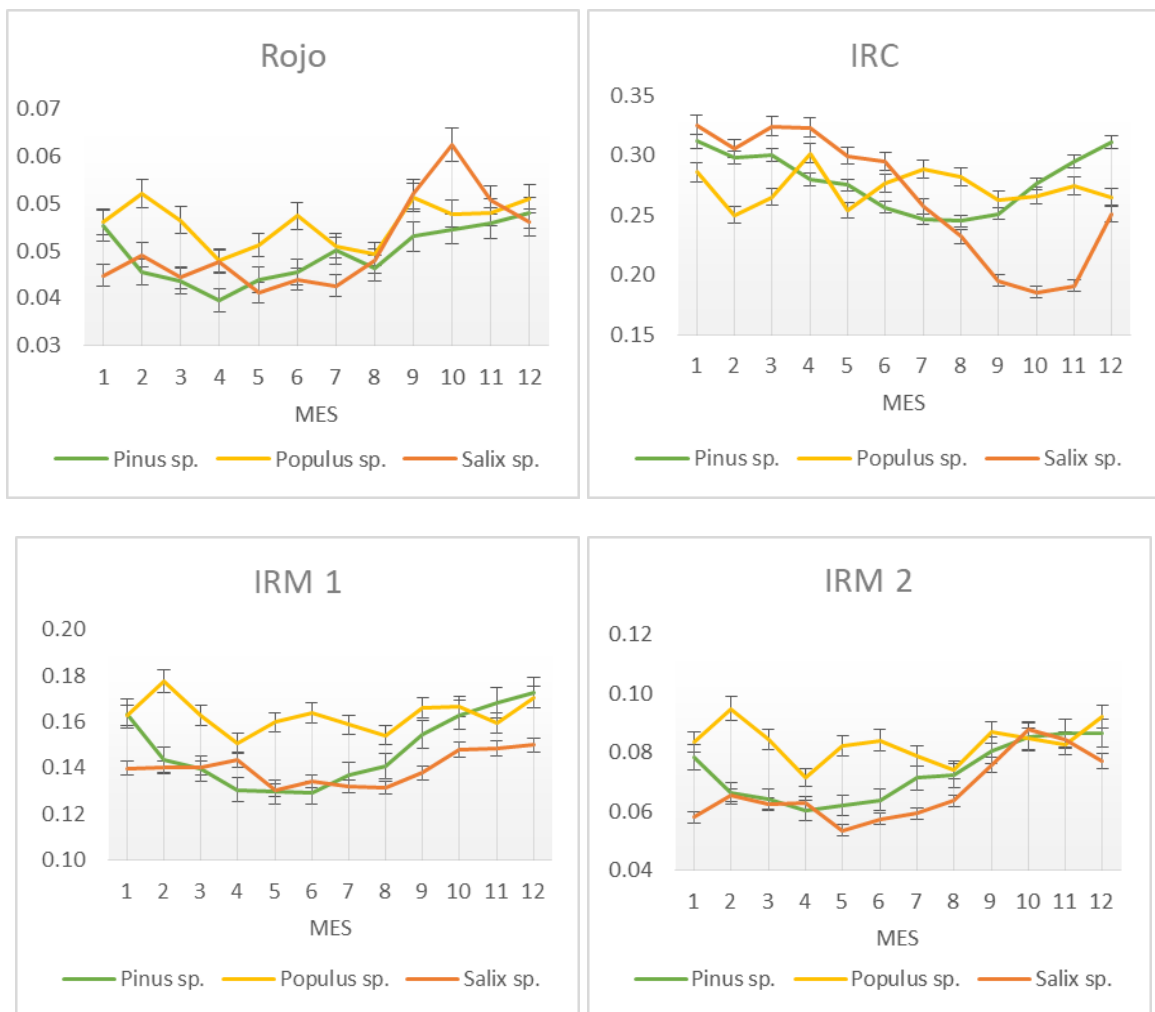


Fig. 18. ST de Respuestas Espectrales medias por mes. Las barras corresponden al CV.

Las tres especies presentaron respuestas similares, con los mayores valores en los meses de primavera-verano y una disminución en otoño-invierno, debido a que la clorofila disminuye su contenido dentro de las hojas, tal como es esperable para vegetación vigorosa. En el caso de *Populus sp.* el aumento en los meses de invierno puede estar asociado a fenología (Jensen, 2007) o bien al contenido de humedad (aumento en el visible y disminución en el IR).

De lo anterior se desprende que las variaciones registradas en las distintas bandas para los diferentes meses pueden reflejar cambios en el contenido de humedad de la vegetación, asociados a la disponibilidad local de agua y a los requerimientos de cada especie. Cabe destacar que la variación de los niveles de respuesta y, por lo tanto, la curva de la firma espectral cambia junto con las condiciones de la superficie reflectante (Nosetto *et al.*, 2003), lo que requiere de un análisis más detallado por especie y para una ST larga.

4.2.4 ST de Respuestas Espectrales por especie

Los valores más altos de reflectancia se dieron en el IRC en las tres especies estudiadas (Figuras 19 a 21). Los valores máximos registrados en el presente trabajo son similares a los teóricos de referencia para la vegetación (Lillesand *et al.*, 2004) ($> 0,6$ para IR y $> 0,4$ para el Visible). Estos gráficos sintetizan la variabilidad existente en los datos de reflectancia de todas las parcelas y fechas relevadas para cada especie.

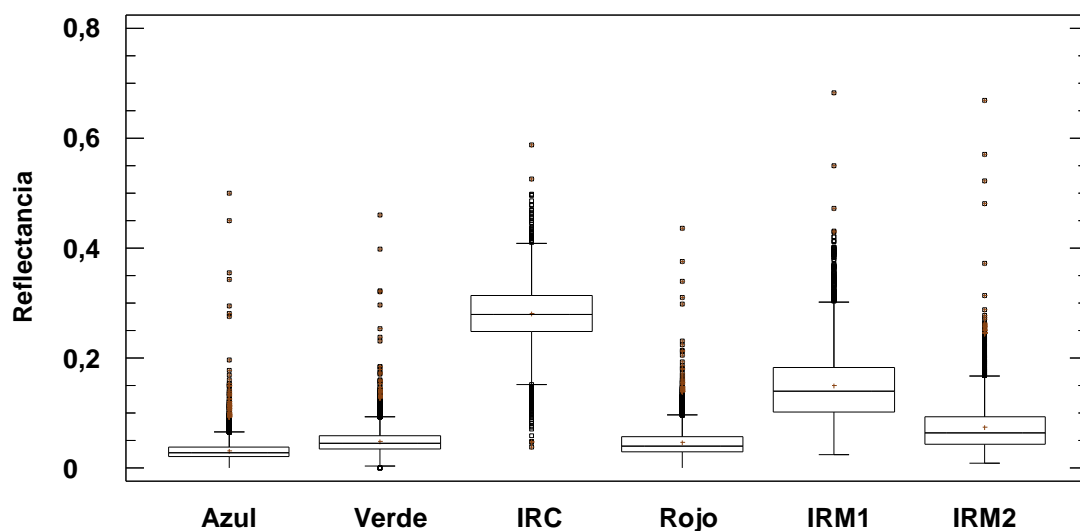


Fig. 19. Variación temporal de los valores medios de Respuestas Espectrales y sus respectivas desviaciones para *Pinus sp.*

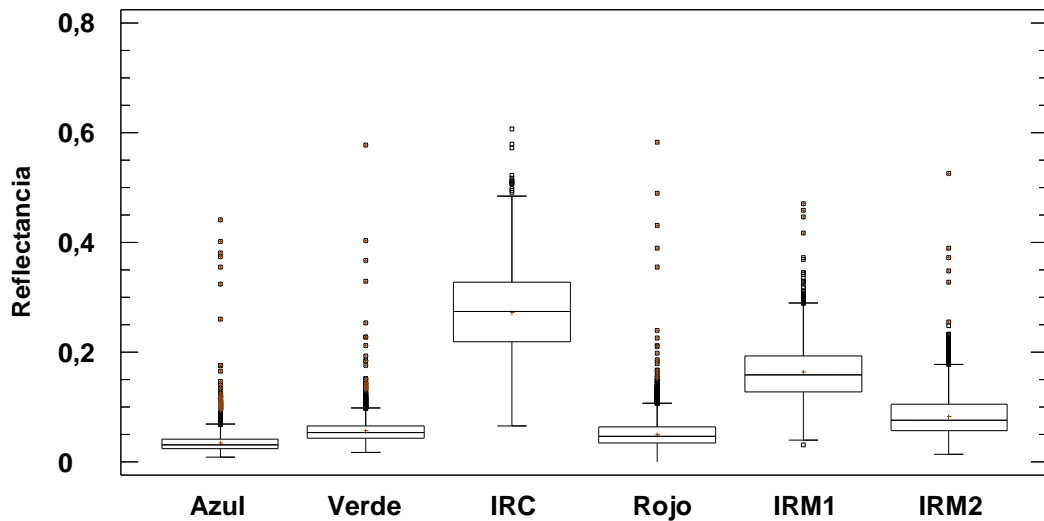


Fig. 20. Variación temporal de los valores medios de Respuestas Espectrales y sus respectivas desviaciones para *Populus sp.*

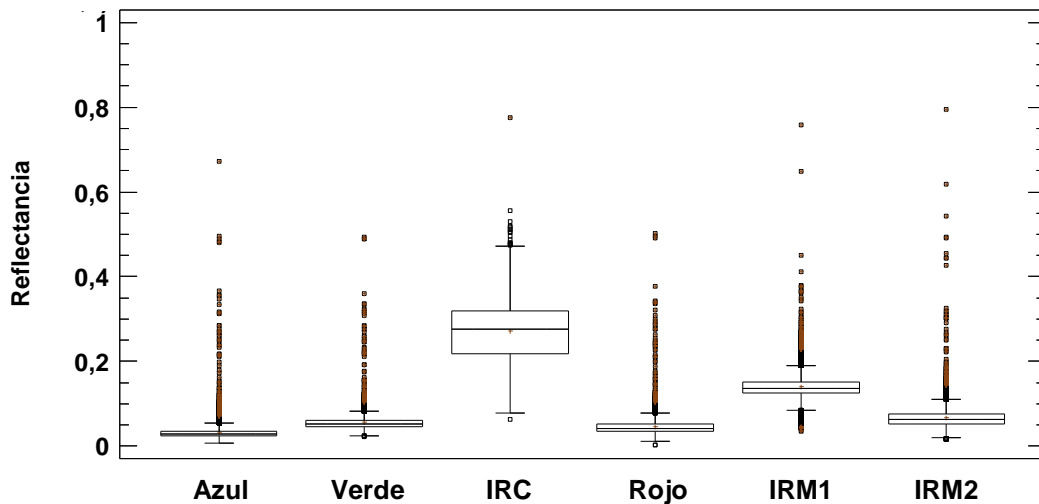


Fig. 21. Variación temporal de los valores medios de Respuestas Espectrales y sus respectivas desviaciones para *Salix sp.*

4.3 Aportes a la gestión del riesgo

Los resultados del presente Trabajo Final de Maestría contribuyeron a la identificación, evaluación y monitoreo de especies estudiadas de acuerdo a las medidas propuestas para la reducción de impacto de las plantaciones sobre los servicios ambientales (Acciaresi *et al.*, 2006), y por ende la mitigación del riesgo asociado a las mismas. Las parcelas estudiadas quincenal o mensualmente a lo largo de la ST de 10 años permitieron identificar en términos generales situaciones de disminución, aumento, o estabilidad en sus Respuestas Espectrales, generando la posibilidad de interpretar sus patrones en términos de prácticas de manejo a escala de parcela. Se describe a continuación, a modo de visualizar las potencialidades de

las herramientas aplicadas y las aplicaciones de los productos generados, una serie de acciones (medidas) y las alternativas para su estudio utilizando los resultados del presente trabajo (Tabla 5) y tomando de base las contribuciones 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).

Tabla 5. Ejemplo de propuestas para la gestión sustentable de forestaciones (Acciaresi *et al.*, 2006), y posibles aplicaciones de los resultados obtenidos en el presente trabajo.

Propuesta para la gestión forestal sustentable (Acciaresi <i>et al.</i> , 2006)		Ejemplos de aplicación de resultados del TFM para la gestión de riesgos ambientales
Escala de parcela	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 FE asociados a dichos desechos, el cual será diferente al del suelo desnudo.
	Realizar la plantación inicial con menor densidad	Determinar el NDVI y la reflectancia (para la banda del IRC y otras) de referencia para plantaciones con diferentes densidades iniciales. Valores bajos de NDVI denotan una menor densidad (Kinyanjui, 2010).
	Extender el turno	Realizar el seguimiento de parcelas desde el inicio del turno e identificar aquellas donde el NDVI no desciende significativamente a lo largo de la ST.
	Reemplazar total o parcialmente el tradicional cultivo de <i>Populus</i> sp. en sitios de pajonales con sistematización de “zanja cerrada” 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.

Escala de Paisaje	Modificar el diseño y ubicación de los rodales y sus caminos y sistemas de sangrías, abandonando las formas regulares, 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.

Otro aspecto relacionado a la gestión del riesgo es la relación entre la densidad poblacional humana y el tipo de forestación. 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 cuenta con la mayor densidad de plantaciones de Salicáceas y más del 50% de las plantaciones de *Populus* sp. analizadas en este estudio. A la vez, esta zona tiene el 42% de su superficie endicada e incluye la mayor concentración de diques y atajarrepuntes y las fincas más antiguas dedicadas a la actividad forestal (Kandus y Minotti, 2010). 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 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 responsable por los endicamientos (Kandus y Minotti, 2010).

El efecto de los endicamientos también puede apreciarse en el mapa de frecuencia de agua (Figura 2), (Viva *et al.*, 2017), 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.

Finalmente, se muestra una serie de ejemplos de datos de NDVI y FE de *Pinus* sp., *Populus* sp. y *Salix* sp. extraídos de la base de datos a nivel de parcela, como forma de visualizar algunas de las posibles aplicaciones del TFM (Figuras 22 a 24). Primero se muestra un mapa

con valores medios de NDVI para dos años contrastantes. Luego las FE de esas parcelas para los mismos años que el mapa. Finalmente, se muestran las ST de valores medios de NDVI estacionales, anuales, mensuales y para todas las fechas disponibles. Esta información nos permite la detección de anomalías en el comportamiento del cultivo a escala de parcela.

En el caso de *Pinus* sp. (Figura 22) se tomó de referencia la parcela ID=490 y se muestra un mapa de valores medios de NDVI para los años 2008 (valores inferiores de la ST de NDVI) y 2017 (valores superiores de la ST de NDVI), seguido de la FE de la parcela para esos dos años y de la ST de valores medios de NDVI. La particularidad detectada en esta parcela es que, a diferencia de lo estimado para otras parcelas de *Pinus* sp., presentó valores inferiores de NDVI en verano y primavera, y superiores en invierno y otoño.

Para *Populus* sp. (Figura 23) se tomó la parcela ID=2.421. Se presenta el mapa de valores medios de NDVI para los años 2009 (valores superiores de la ST de NDVI) y 2010 (valores inferiores de la ST de NDVI), la FE de la parcela para esos dos años y la ST de valores medios de NDVI. Los valores inferiores del año 2010 están asociados con la presencia de agua y esto se ve reflejado en las FE, que no cambian en dos años consecutivos, a diferencia del NDVI.

Para el caso de *Salix* sp. se utilizó la parcela ID=2.294 y los mismos años que *Populus* sp. (Figura 24). Nuevamente los valores inferiores en el año 2010 son asociados a la presencia de agua, sin embargo el NDVI de *Salix* sp. en este año es inferior al de *Populus* sp. ($>0,5$), lo cual se puede explicar debido a la presencia de la primera especie en áreas con menor grado de endicamiento y, por lo tanto, susceptibles a anegamientos. También se destaca la disminución de la respuesta en la banda del IRM 1, lo que indica mayor contenido de agua asociado a la vegetación.

Geomática aplicada a forestaciones del Delta del Río Paraná

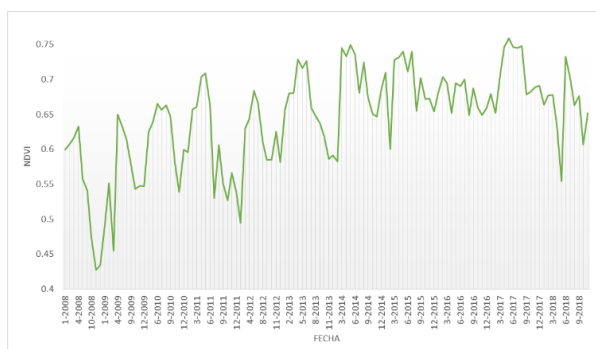
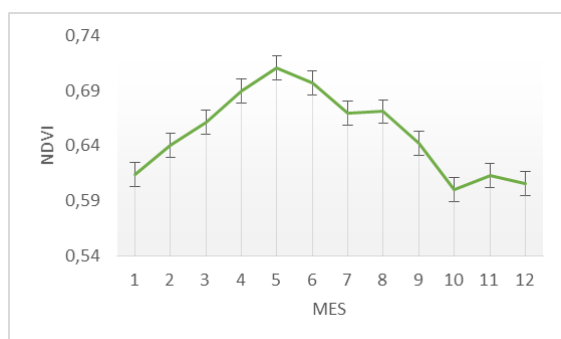
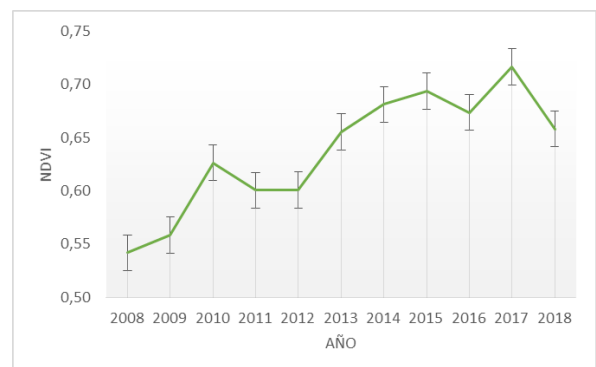
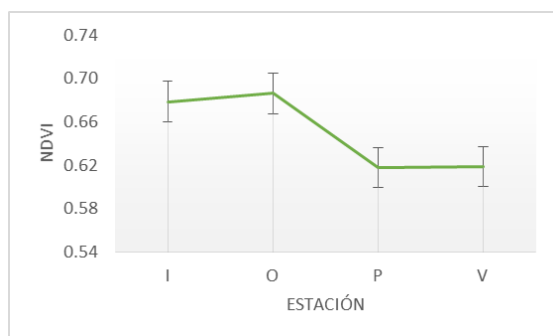
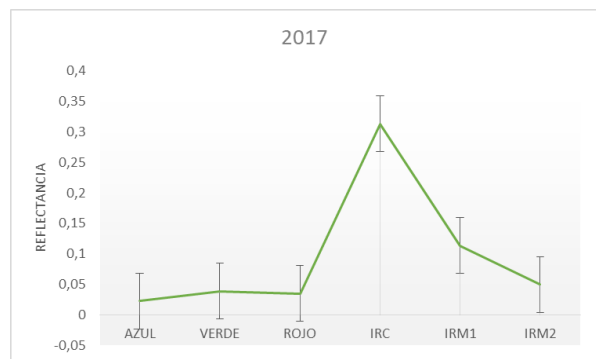
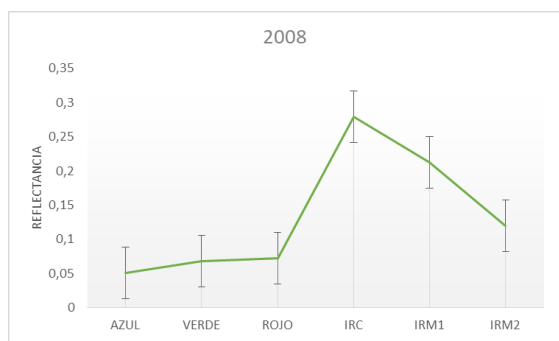
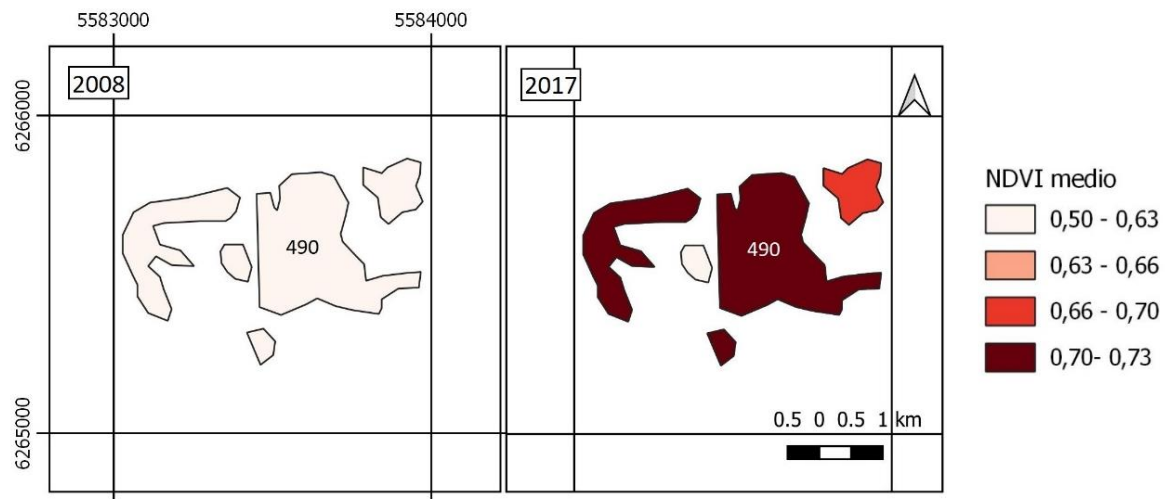


Fig. 22. Ejemplo de datos obtenidos para *Pinus sp.* para la parcela 490. Las barras corresponden al CV.

Geomática aplicada a forestaciones del Delta del Río Paraná

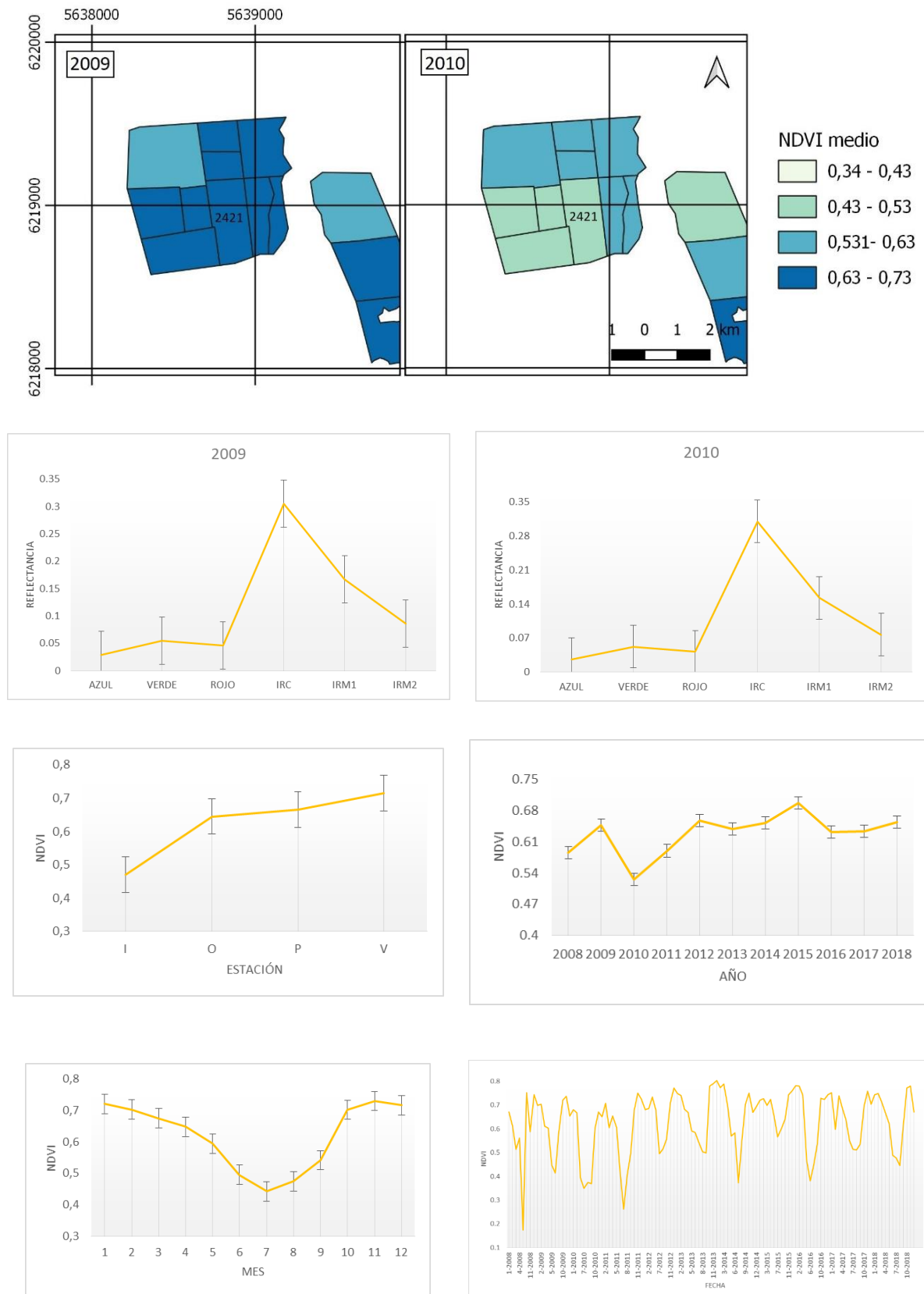


Fig. 23. Ejemplo de datos obtenidos para *Populus sp.* para la parcela 2421. Las barras corresponden al CV.

Geomática aplicada a forestaciones del Delta del Río Paraná

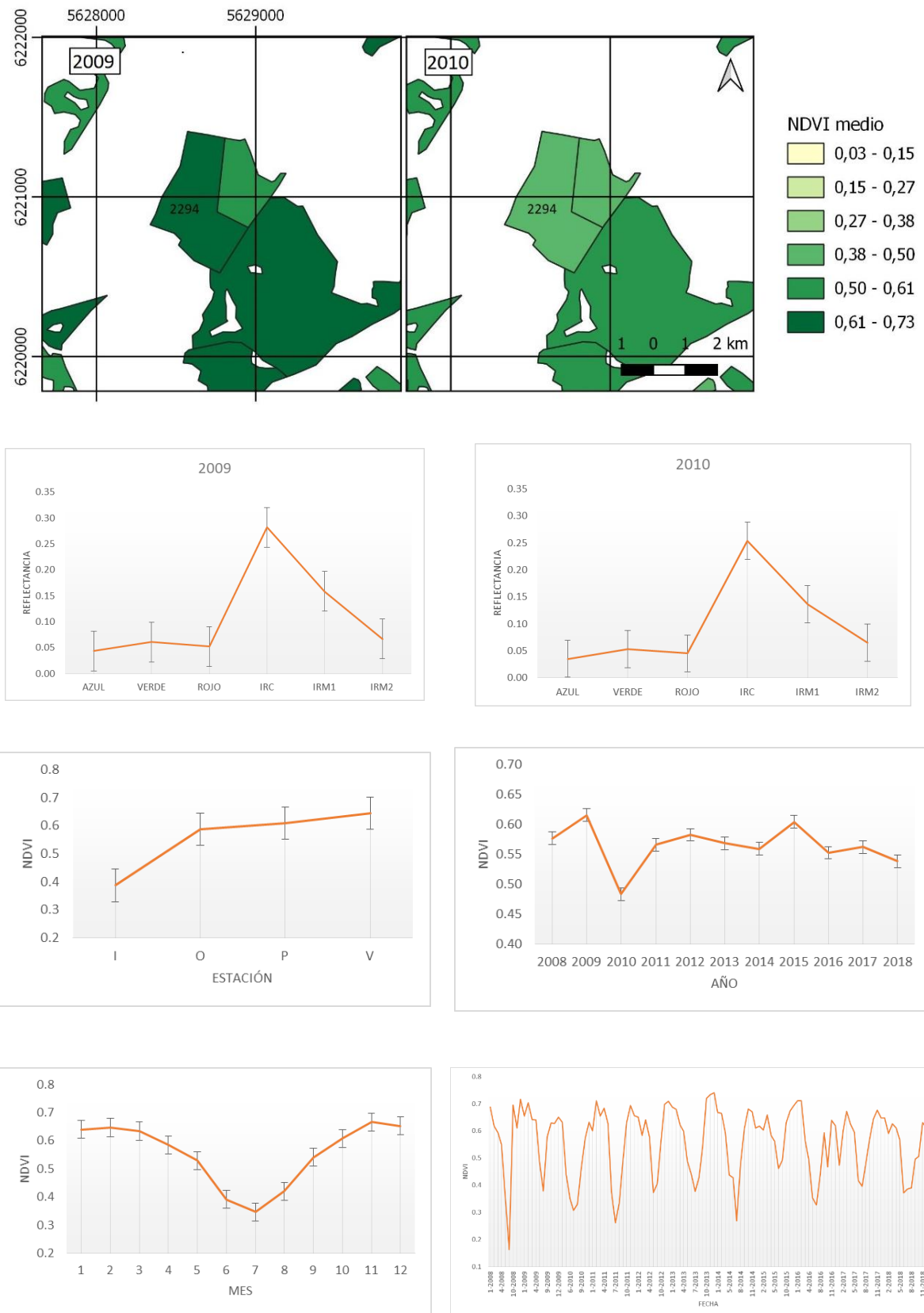


Fig. 24. Ejemplo de datos obtenidos para *Salix sp.* para la parcela 2294. Las barras corresponden al CV.

5. Conclusiones

Se analizaron los patrones de respuesta en forestaciones del Delta del Río Paraná a partir de imágenes satelitales de resolución espacial media para el período 2008 a 2018.

Google Earth Engine permitió la caracterización y el seguimiento de sistemas forestales, a través de las Series Temporales de NDVI y de Respuestas Espectrales. Se obtuvieron Firmas Espectrales de referencia de *Pinus* sp., *Salix* sp. y *Populus* sp. y se compararon con valores teóricos para diferentes tipos de vegetación. Sumado a lo anterior, se obtuvo información y metodología valiosa sobre las Respuestas Espectrales de las forestaciones de la región a partir de grandes volúmenes de datos disponibles en La Nube, de mediana a alta resolución, procesados de forma semi-automática, que pueden utilizarse de referencia para la región y ser contrastadas con otras colecciones de datos para mejorar la precisión de las estimaciones de una parcela de interés, identificar cambios y establecer sistemas de alerta temprana. Estos productos pueden ser empleados como herramientas de apoyo para la toma de decisiones por productores forestales y gestores para entender y monitorear los cambios en la vegetación y evaluar las consecuencias en el uso del suelo en un contexto de cambio climático.

Se observó una fuerte variación inter e intra-anual del NDVI para las tres especies, explicadas por los diferentes requisitos de las especies, sus características, fenología, y condiciones ambientales determinantes. La variación intra-anual tuvo un carácter marcadamente estacional, por lo que la respuesta se asocia a la estacionalidad de factores como la temperatura y el fotoperíodo.

Aproximadamente el 18% de los humedales del área estudiada en el Delta del Paraná están forestados 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, así como en el balance hídrico y el relieve local, lo que cobra particular interés en las zonas con mayor densidad poblacional (Zárate, Campana, Villa Paranacito). Por lo mencionado, la superficie forestada no se encuentra “disponible” desde el punto de vista de la conservación ambiental, al presentar características de sistema productivo forestal. De las especies estudiadas, *Populus* sp. es la más directamente asociada al riesgo ambiental.

La gran disponibilidad de datos de un periodo relativamente amplio de tiempo permitió conocer en detalle el patrón de respuesta de diferentes tipos de forestaciones, aportando información valiosa para la gestión ambiental.

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.

6. 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 tradicionales. 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. Temas de la biodiversidad del litoral fluvial argentino III, 17(2). 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. Actas XVI Simposio Internacional de la Sociedad Latinoamericana de Especialistas en Percepción Remota (SELPER). Colombia. 1-10 pp.

Alvares, C.A.; Munhoz, J.S.B.; Stape, J.L.; Stahl, J.; Andrade, L.; Santos, G.; Borba, K.T. 2013. Caracterização da dinâmica dos índices de vegetação NDVI e EVI em plantações de *Pinus* do Brasil. Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto-SBSR. Foz do Iguaçu, PR, Brasil.

Balzarini M.G.; González L.; Tablada M.; Casanoves F.; Di Rienzo J.A.; Robledo C.W. 2008. Manual del Usuario. Editorial Brujas, Córdoba, Argentina. 336 pp.

Benzaquén, L. (Ed.). 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. 381 pp.

Bianchi, A.R. y Cravero, S.A.C. 2010. Atlas Climático Digital de la República Argentina. INTA Ediciones. 55 pp.

Bó, R.F. y Quintana, R.D. 2013. Humedales del Delta del Paraná. En: Benzaquén, L. (Ed.). 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. 297-321 pp.

Bonfils, C. G. 1962. Los suelos del Delta del Río Paraná. Factores generadores, clasificación y uso. *Revista de Investigaciones Agrícolas*. 16(3): 257-370 pp.

Brandan, S.; Corinaldesi, L.; Frisa, L. 2009. Sector Forestal. Año 2008. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. 38 pp.

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

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 pp.

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. 1–5 pp.

Chen, B.; Xiao, X.; Li, X.; Pan, L.; Doughty, R.; Ma, J.; Giri, C. 2017. A mangrove forest map of China in 2015 : Analysis of time series Landsat 7 / 8 and Sentinel-1A imagery in Google Earth Engine cloud computing platform. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 131:104–120 pp.

Chuvieco Salinero, E. 2002. Teledetección Ambiental, la observación de la Tierra desde el espacio. Ariel Ciencia. 128 pp.

Coops, N. C. 2015. Characterizing forest growth and productivity using remotely sensed data. *Current Forestry Reports*. 1(3):195–205 pp.

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 pp.

Dirección Nacional de Desarrollo Foresto Industrial. 2019. Inventario nacional de plantaciones forestales por superficie. <https://datos.agroindustria.gob.ar/dataset/inventario-nacional-plantaciones-forestales-por-superficie> Consultada en Enero de 2019.

Fernández, M.A. 1996. Ciudades en riesgo: degradación ambiental, riesgos urbanos y desastres. Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina. 142 pp.

Galafassi, G. 2011. Sistemas productivos, actores sociales y manejo del ambiente en el Bajo Delta Insular del Río Paraná. En: Quintana, R.D., V. Villar, E.; Astrada, P. Saccone; S. Malzof (eds.): El Patrimonio natural y cultural del Bajo Delta Insular. Bases para su conservación y uso sustentable. Convención Internacional sobre los Humedales (Ramsar)/Aprendelta. Buenos Aires. 161-170 pp.

Golden Gate Weather Services. 2019. El Niño and La Niña Years and Intensities. <https://ggweather.com/enso/oni.htm> Consultado en junio de 2019.

González, S. H. y Acosta, J. H. C. 2013. Programas informáticos de uso libre y su aplicación en la enseñanza de la estadística. *Investigación Operacional*. 34(2).

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 pp.

Graser, A. y Olaya, V. 2015. Processing a python framework for the seamless integration of geoprocessing tools in QGIS. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 4(4):2219-2245 pp.

Hernández, H.J. y Montaner, D. 2009. Patrones de Respuesta Espectral. En: Mena, C. (Ed.) *Tecnologías Geoespaciales: Experiencias Aplicadas al Estudio y Gestión del Territorio*. Editorial Fuerza Aérea. 131 pp.

Instituto Nacional de Estadística y Censos. 2012. Censo nacional de población, hogares y viviendas 2010: censo del Bicentenario: resultados definitivos. Buenos Aires, INDEC. 1378 pp.

Jensen, J.R. 2007. *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective*. Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River.

Kalesnik, F. y 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 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 pp.

Kandus, P.; Quintana, R.D.; Bó, R.F. 2006. *Patrones de Paisaje y Biodiversidad del Bajo Delta del Río Paraná*. Mapa de Ambientes. Primera Edición. Grupo de Investigaciones en Ecología de Humedales (GIEH), FCEyN, UBA, Buenos Aires. 48 pp.

Kandus, P. y Minotti, P. 2010. Distribución de terraplenes y áreas endicadas en la región del Delta del Paraná. En: Blanco, D.E. y 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. 104 pp.

Kinyanjui, M. J. 2010. NDVI-based vegetation monitoring in Mau forest complex, Kenya. *African Journey of Ecology*. 49:165–174 pp.

Klein, T.; Nilsson, M.; Persson, A.; Hakansson, B. 2017. From open data to open analysis—new opportunities for environmental applications? *Environments*. 4:32 pp.

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 pp.

Lillesand, T.M.; Kiefer, R.W.; Chipman, J.W. 2004. Remote Sensing and Image Interpretation. John Wiley, New York.

Maire, G.I.; Marsden, C.; Nouvellon, Y.; Grinand, C.; Hakamada, R.; Stape, J.L.; Laclau, J.P. 2011. MODIS NDVI time-series allow the monitoring of *Eucalyptus* plantation biomass. *Remote Sensing of Environment*. 115 (10): 2613-2625 pp.

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. (Ed.) 2010. Estrategias Integradas de Mitigación y Adaptación a Cambios Globales. Red CYTED. 381-394 pp.

Morello, J.; Matteucci, S.; Rodríguez, A.; Silva, M. 2012. Ecorregiones y complejos ecosistémicos argentinos. Buenos Aires, Orientación Gráfica Editora. 752pp.

Natenzon C.E. y D. Ríos. 2015. Riesgos, catástrofes y vulnerabilidades. Aporte desde la geografía y otras ciencias sociales para casos argentinos. Ediciones Imago Mundi. Buenos Aires, Argentina. 200 pp.

Nosetto, M.; Brizuela, A.; Aceñolaza, P. 2003. Obtención de firmas espectrales en forestaciones a partir de imágenes Landsat. *CIT Información Tecnológica*. 83-89 pp.

Paruelo, J. M. 2008. La caracterización funcional de ecosistemas mediante sensores remotos. *Revista Ecosistemas*. 17(3).

Piedallu, C.; Chéret, V.; Denux, J.P.; Pérez, V.; Azcona, J.S.; Seynave, I.; Gégout, J. C. 2019. Science of the Total Environment Soil and climate differently impact NDVI patterns according to the season and the stand type. *Science of the Total Environment*. 651:2874–2885 pp.

Quintana, R.D. y Bó, R.F. 2010. Caracterización general de la región del Delta del Paraná. En: Blanco, D.E. y 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. 104 pp.

Quintana, R.D. y Bó, R.F. 2013. Humedales del complejo litoral del Paraná Inferior. En: Benzaquén, L. (Ed.). 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. 272-296 pp.

Ramonell, C. 2012. Evaluación de procesos hidro-geomorfológicos del Río Paraná entre los ejes del Arroyo Leyes y Santa Fe-Paraná. Final Rep. Sectei 21-18-10, Argentina: FICH-UNL, Santa Fe.

Scarpati, O.E. y Capriolo, A.D. 2013. Sequías e inundaciones en la provincia de Buenos Aires (Argentina) y su distribución espacio-temporal. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*. 82:38-51 pp.

SQLite. 2019. What Is SQLite? <https://www.sqlite.org/index.html> Consultado en abril de 2019.

Tucker, C.J. 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*. 8:127-150 pp.

USGS. 2017a. Landsat 8 Surface Reflectance Code (LASRC) Product. "Department of interior U.S. Geological Survey".

USGS. 2017b. Landsat 4–7 Climate Data Record (CDR) Surface Reflectance.

Viva, F.M.; Piani, V.A.; Zamboni, L.P.; Aceñolaza, P. y 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. Temuco, Chile.

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 pp.

Xi, Z.; Lu, D.; Liu, L.; Ge, H. 2016. Detection of drought-induced hickory disturbances in western Lin An county, China, using multitemporal Landsat imagery. *Remote Sensing*. 8(4): 345 pp.

Zamboni, L.P. 2017. Dinámica del fuego en el Complejo Litoral del Río Paraná, integrando información satelital y del terreno. Tesis Doctorado en Ciencias Biológicas. Universidad Nacional de Salta. Argentina. 98 pp.

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 pp.

Zhu, Z. y Woodcock, C.E. 2012. Object-based cloud and cloud shadow detection in Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*. 118:83-94 pp.