

Análisis del funcionamiento de forestaciones y pastizales naturales de la región de
Tacuarembó y Rivera (Uruguay)

*Trabajo final presentado para optar al título de
Especialista en Teledetección y Sistemas de Información Geográfica aplicados al estudio
de los recursos naturales y la producción agropecuaria*

Rossana Victoria Rodas Alonso

Ingeniera Agrónoma - UNLZ - 2016.

Lugar de trabajo: Centro de Educación Agraria N°4



Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano
Facultad de Agronomía - Universidad de Buenos Aires

TUTORA

María Eugenia Beget

Ingeniera Agrónoma – Universidad de Buenos Aires

Magister en Recursos Naturales - Universidad de Buenos Aires

JURADO DE TRABAJO FINAL

Jurado

Pablo Baldassini

Licenciado en Ciencias Ambientales, Facultad de Agronomía – UBA

Doctor en Ciencias Agropecuarias. -UBA.

Jurado

Marcelo Daniel Nosetto

Ingeniero Agrónomo: Facultad de Ciencias Agropecuarias (Universidad Nacional de Entre Ríos).

Doctor en Ciencias. Agropecuarias. (UBA).

Fecha de defensa del Trabajo Final: 20 de octubre de 2025.

"Declaro que el material incluido en esta tesis es, a mi mejor saber y entender, original, producto de mi propio trabajo (salvo en la medida en que se identifique explícitamente las contribuciones de otros) y que este material no ha sido presentado, en forma parcial o total, como una tesis en esta u otra institución."

Agradecimientos

A mi tutora, Mg. María Eugenia Beget, por su dedicación y acompañamiento durante el desarrollo de este trabajo.

A Julieta Straschnoy, por su valioso apoyo emocional y por estar presente en cada etapa.

A los docentes, por su aporte y por contribuir de manera significativa a mi formación.

A mi familia —mi esposo y mi hijo— y a mis amigos, por su ayuda y acompañamiento constante, siempre brindándome su apoyo de la manera más generosa.

A mi madre, por haberme transmitido valores que me permitieron mantener la constancia y el compromiso necesarios para alcanzar este objetivo.

Finalmente, expreso mi más sincero agradecimiento a todas las personas que me acompañaron, cuyo apoyo resultó fundamental para la concreción de este trabajo.

Resumen

En Uruguay, la superficie forestada alcanzó 1,2 millones de hectáreas hasta 2023 y se proyecta su expansión sobre 4 millones de hectáreas consideradas prioritarias para forestación. En la región centro-norte del país, particularmente en los departamentos de Rivera y Tacuarembó, se identificaron contrastes funcionales entre áreas forestadas y pastizales naturales, en relación con el comportamiento del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), la evapotranspiración (ET) y el albedo. El objetivo de este trabajo fue analizar la variación temporal de los atributos funcionales del NDVI, la ET y el albedo en dos tipos de cobertura —forestación y pastizal— y evaluar su relación con el régimen de precipitaciones durante el período 2001–2019. Se utilizaron productos satelitales MODIS procesados en la plataforma Google Earth Engine (GEE) y la clasificación de los años se basó en el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI12), que permitió diferenciar entre años secos, normales y húmedos. Los resultados indicaron que el NDVI promedio anual fue 18 % mayor en las forestaciones. Estas presentaron mayor productividad primaria anual y escasa estacionalidad, mientras que los pastizales evidenciaron una alta estacionalidad, especialmente en primavera y una fuerte correlación con los años clasificados por SPI12. La ET fue 34 % mayor en forestaciones y el albedo, 36 % mayor en pastizales. En ambas variables, el pastizal mostró una mayor sensibilidad a la precipitación anual según el SPI12. En síntesis, las forestaciones exhibieron una dinámica funcional más estable, mientras que los pastizales respondieron con mayor intensidad a las condiciones hídricas interanuales. Estos hallazgos aportan insumos relevantes para la toma de decisiones sobre el uso del suelo, especialmente en contextos de expansión forestal y variabilidad climática.

Abstract

In Uruguay, forested land reached 1.2 million hectares by 2023, and its expansion is projected over approximately 4 million hectares designated as priority forestry areas. In the central-northern region—particularly in the departments of Rivera and Tacuarembó—marked functional contrasts have been observed between forest plantations and natural grasslands in the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), evapotranspiration (ET), and surface albedo. This study analyzed the temporal variation in NDVI, ET, and albedo for two land-cover types—forest plantations and natural grasslands—and assessed their relationship with precipitation patterns during 2001–2019. MODIS satellite products were processed in Google Earth Engine (GEE), and the Standardized Precipitation Index (SPI-12) was used to classify years as dry, normal or wet. Results show that the mean annual NDVI was 18 % higher in forested areas. Forest plantations exhibited greater annual primary productivity and low seasonality, whereas grasslands showed pronounced seasonality—particularly in spring—and a strong correlation with SPI12. ET was 34 % higher in plantations, while albedo was 36 % higher in grasslands; in both variables, grasslands were more sensitive to annual precipitation variability. In summary, forest plantations displayed more stable functional dynamics, whereas natural grasslands responded more strongly to interannual differences in water availability. These findings provide relevant inputs for land-use decision-making, especially in contexts of forest expansion and climate variability.

Índice general	
Introducción	10
2. Objetivos	12
2.1 Objetivo general	12
2.2 Objetivos específicos	12
3. Materiales y métodos	12
3.1 Área de estudio.....	12
3.2 Selección de los sitios de estudio.....	15
3.3 Información satelital	17
3.4 Análisis estadístico de los datos.....	19
4.Resultados y discusión.....	20
4.1 Patrones de variación de los atributos del NDVI en tipos de coberturas	20
4.2 Patrones de variación de la ET en 2 tipos de coberturas.....	25
4.3 Patrones de variación del albedo.....	29
4.4 Influencia de años secos y años húmedos en los patrones de comportamiento de las variables en estudio.....	32
5. Conclusión	33
6. Bibliografía.	35

Índice de figuras

Figura 1: Área de estudio, departamentos Tacuarembó y Rivera. Uruguay.....	13
Figura 2: Precipitación anual acumulada en mm/año, período 2001 - 2019. Fuente: TRMM pp.....	14
Figura 3: Localización de los sitios de estudio correspondientes a coberturas forestales y pastizales en los departamentos Rivera y Tacuarembó, centro-norte de Uruguay.....	16
Figura 4: NDVI promedio anual de los sitios forestados, agrupados de acuerdo a la edad en que se estableció cada sitio (año 1), en el caso del pastizal el año 1 es 2001.....	21
Figura 5: Variación intraanual del promedio del NDVI de forestación y pastizal en el periodo 2001–2020. Las barras corresponden a 1 desvío estándar.....	22
Figura 6: Relación entre la variación de la precipitación acumulada anual y el patrón de variación interanual del NDVI de sitios forestados y pastizal.....	23
Figura 7: Correlación entre la precipitación promedio mensual y el patrón de NDVI de 7-1: forestación y 7-2: pastizal.....	24
Figura 8: Evapotranspiración promedio anual (mm/año) de los años en que la forestación se encuentra establecida y del pastizal. Las barras +/- 1 corresponden a 1 desvío estándar....	25
Figura 9: Evapotranspiración promedio mensual (mm/mes) de los sitios forestados y del pastizal. Las barras corresponden a +/-1 desvío estándar.....	26
Figura 10: Evapotranspiración anual de sitios forestados, pastizal y precipitación acumulada anual en el periodo de estudio.....	27
Figura 11: Correlación entre la precipitación promedio mensual y el patrón de NDVI de 11-1: forestación y 11-2: pastizal.....	28
Figura 12: Albedo promedio anual de los años en que la forestación se encontraba establecida y del pastizal en el periodo 2001-2020. Las barras corresponden a +/- 1 desvío estándar.....	29
Figura 13: Albedo promedio mensual de los sitios forestados y del pastizal en el periodo de 2001-2020. Las barras corresponden a +/- 1 desvío estándar.....	30
Figura 14: Correlación entre la precipitación promedio mensual y el patrón de Albedo de 14-1: forestación y 14-2: pastizal.....	31

Indice de tablas

Tabla 1: Agrupación de forestaciones o sitios de estudio de acuerdo al año en que se estableció la forestación, con valores de $NDVI \geq 0,68$	16
Tabla 2: Escala del índice de precipitación estandarizado SPI12.....	18
Tabla 3: Índice de precipitación estandarizado (SPI12) para el periodo de estudio (2001-2019)	20

Introducción

En la República Oriental del Uruguay la producción forestal es una de las principales actividades económicas del país. A partir del régimen de promoción e inversión, la superficie forestada ha mostrado una expansión sostenida, pasando de 148.164 ha en el período 1975–1981 a 1.108.371 ha en 2021, lo que representa aproximadamente el 6 % del territorio nacional (Dirección General Forestal – MGAP, 2022; CERES, 2023). Los departamentos de Rivera y Tacuarembó concentran la mayor superficie implantada y constituyen regiones clave para analizar los efectos funcionales de esta transformación del uso del suelo.

La forestación con especies leñosas genera cambios significativos en el funcionamiento ecosistémico en comparación con los pastizales naturales, cobertura predominante antes del proceso de expansión forestal. Diversos estudios han documentado que las forestaciones incrementan la productividad primaria, pero también alteran el ciclo hidrológico: aumentan la evapotranspiración (ET), reducen la escorrentía y modifican el almacenamiento de agua en el suelo debido a su estructura radicular profunda (Jobbágy et al., 2006; Nosetto et al., 2005, 2011; Mercau et al., 2016). Asimismo, se ha demostrado que el albedo superficial en pastizales es significativamente mayor que en forestaciones, lo que implica una mayor capacidad de estas últimas para absorber radiación solar (Lee et al., 2013; Marchesini et al., 2015).

El uso de índices funcionales derivados de sensores remotos, como el NDVI, permite caracterizar diferencias entre tipos de cobertura en términos de productividad, estacionalidad y fenología. Las forestaciones tienden a mostrar valores más altos de NDVI promedio anual, con escasa variabilidad intraanual, mientras que los pastizales presentan una marcada estacionalidad asociada a la dinámica de las lluvias y menor productividad relativa (Nosetto et al., 2005; Pettorelli et al., 2005). Los atributos derivados del NDVI, como la integral anual, el rango relativo (RREL) y el NDVI máximo, permiten analizar con mayor detalle el comportamiento funcional de la vegetación (Paruelo, 2008; Alcaraz-Segura, 2008; Baeza et al., 2006).

El albedo y la ET, al igual que el NDVI, son variables sensibles a la cobertura y a las condiciones climáticas. Estudios previos han evidenciado que las forestaciones presentan menor albedo y una ET más constante en el tiempo, mientras que los pastizales responden de forma más marcada a los cambios en la precipitación (Gaitán et al., 2015; Loarie et al., 2011; Magliano et al., 2016). Dado que las diferencias en el régimen hídrico pueden influir sustancialmente en la dinámica funcional de la vegetación, resulta relevante incluir una medida cuantitativa de la variabilidad climática.

En este sentido, el Índice de Precipitación Estandarizado (Standardized Precipitation Index, SPI12) constituye una herramienta adecuada para clasificar los años del período de estudio como secos, normales o húmedos, con base en desviaciones respecto al promedio histórico de precipitación acumulada en una escala de 12 meses (Organización Meteorológica Mundial - OMM 2012). Este índice se calcula a partir de la distribución estadística de los valores de precipitación, permitiendo comparar distintas regiones o periodos de forma normalizada. Su inclusión en este trabajo permite incorporar una medida objetiva de la variabilidad climática interanual y evaluar cómo responden las variables funcionales de la vegetación en distintos tipos de cobertura ante contextos climáticos contrastantes.

Finalmente, el uso de productos satelitales provenientes del sensor *MODIS* y su procesamiento mediante la plataforma *Google Earth Engine* (GEE) ofrece una herramienta eficaz para el monitoreo de variables funcionales a escala regional. La teledetección permite calcular índices biofísicos como el NDVI, la ET y el albedo a partir del comportamiento espectral de las coberturas, sin necesidad de observaciones de campo intensivas (Paruelo, 2008; Liang, 2000; Di Bella & Beget, 2014). Estos enfoques permiten avanzar en la comprensión del funcionamiento diferencial entre forestaciones y pastizales en áreas de expansión forestal como el norte de Uruguay.

Considerando la expansión sostenida de las plantaciones forestales en Uruguay y los contrastes funcionales reportados en la literatura respecto a los pastizales naturales, se plantea la necesidad de avanzar en una caracterización comparativa que permita comprender las implicancias ecosistémicas de dichos cambios de cobertura. En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo analizar y comparar el comportamiento temporal del NDVI, la

ET y el albedo en áreas forestadas y en pastizales naturales del norte de Uruguay, así como su relación con la variabilidad interanual de la precipitación. Este abordaje busca aportar evidencia cuantitativa que contribuya a la evaluación funcional de los paisajes forestales y a la toma de decisiones en el ordenamiento territorial y la planificación ambiental.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Evaluar la variación temporal de los atributos del NDVI, la evapotranspiración y el albedo en dos tipos de coberturas: forestación y pastizal natural, así como la influencia que tiene la precipitación en los patrones de comportamiento de dichas variables, en los departamentos Rivera y Tacuarembó ubicados en la región centro norte de Uruguay.

2.2 Objetivos específicos

1. Analizar la dinámica temporal intraanual e interanual del NDVI y sus atributos funcionales, de la evapotranspiración y del albedo de sitios de forestación y pastizal natural.
2. Comparar las variaciones de la evapotranspiración, el albedo y la dinámica del NDVI de la vegetación a través de sus atributos funcionales en periodos de años secos con periodos de años húmedos.

3. Materiales y métodos

3.1 Área de estudio

El área de estudio se encuentra en la región centro norte de Uruguay correspondiente a los departamentos Rivera y Tacuarembó. Dichos departamentos tienen una superficie plantada de aproximadamente 280 mil ha, lo que representa cerca de un tercio del total forestado en el país (Barrenechea, P., et al. 2012). En la actualidad la superficie forestada acumulada del año 2021 representa el 6,21 % de la superficie del territorio nacional (Boscana, M., & Boragno, L. 2018). Del total plantado el 85 % corresponde a eucaliptus y 15 % a pinos. Ambos departamentos se encuentran localizados en las denominadas áreas forestadas y áreas de suelos de prioridad forestal, donde las condiciones del suelo y el clima aseguran un buen nivel de producción forestal (Paruelo et al 2006). Se extienden a lo largo del Río Tacuarembó

Grande, afluente a su vez del Río Negro y en la parte superior, del Río Tacuarembó Chico (Figura 1).

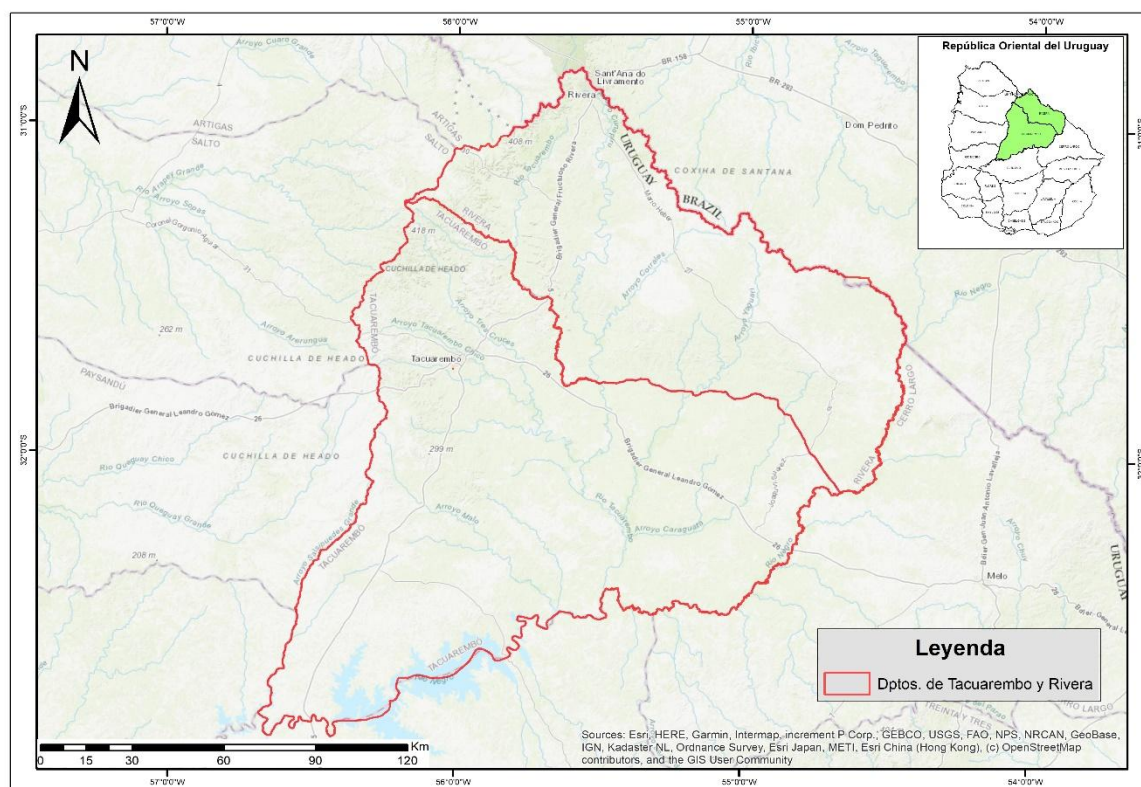


Figura 1: Área de estudio, departamentos Tacuarembó y Rivera, Uruguay.

El 75 % de las plantaciones se realizan sobre suelos de prioridad forestal. Los suelos donde se encuentran las forestaciones son principalmente suelos de menor fertilidad, bajo contenido de materia orgánica y arcillas y de pH ácidos, que originalmente eran tierras de pastoreo, cubiertos de pastizales (Dirección General Forestal – MGAP 2022). Son suelos saturados lixiviados, Luvisoles y Acrisoles, muy meteorizados siempre con horizonte argilúvico, baja saturación de bases, sobre todo en el horizonte B, pH ácido, presencia de (Al) intercambiable, baja materia orgánica (Pérez, 2007). Los del pastizal natural son suelos melánicos, Brunosoles, siempre con horizonte melánico, horizontes subsuperficiales de saturación de bases > 50 %, y sin exceso de Al+++ ni de Na+ (Durán, 2007). En ambos casos la capacidad de uso está definido como Pastoril agrícola de baja a alta. Y en los pastizales también hay zonas definidas como pastoril arrozables (Achkar, s.f.).

Los departamentos de Tacuarembó y Rivera, ubicados en el norte de Uruguay, se encuentran en la franja de transición entre el clima templado y el subtropical. Su localización geográfica y la influencia de la circulación atmosférica regional determinan un régimen climático con particularidades respecto al resto del país. En esta región, la temperatura media anual ronda los 19 °C, con veranos cálidos que alcanzan medias cercanas a 27 °C en enero e inviernos moderados con promedios de 14 °C en julio. La amplitud térmica anual se mantiene en torno a los 13 °C, lo que refleja una marcada diferencia estacional.

En cuanto a las precipitaciones, Tacuarembó y Rivera se ubican en la zona más húmeda del territorio nacional, con registros que oscilan entre **1200 y 1300 mm anuales**. A diferencia de otras regiones, las lluvias no presentan una marcada estacionalidad: el promedio mensual se acerca a los **100 mm**, aunque se alcanzan picos de **110 a 140 mm** en determinados meses, lo que asegura una distribución relativamente homogénea durante todo el año (*Tropical Rainfall Measuring Mission TRMM*, Figura 2).

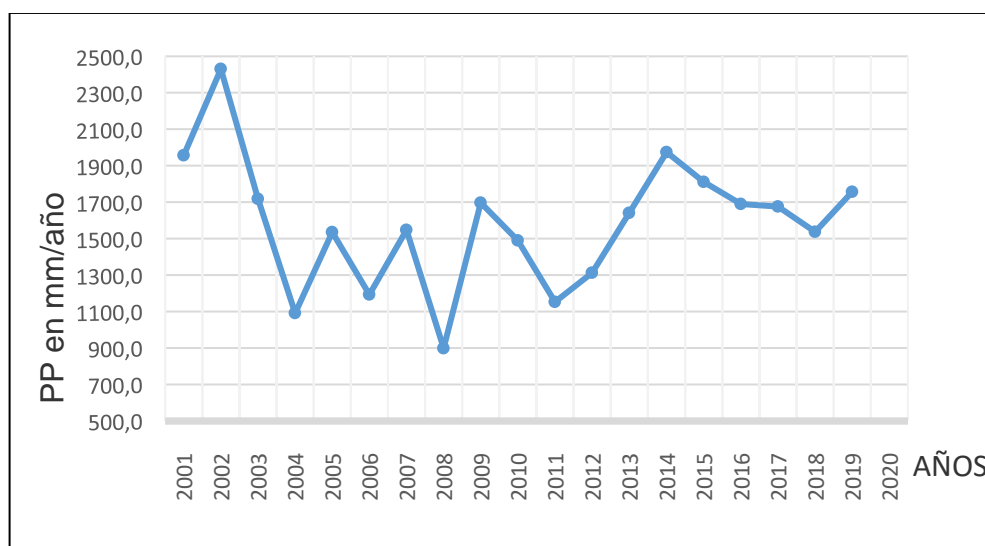


Figura 2: Precipitación anual acumulada de los departamentos Tacuarembó y Rivera en mm/año, período 2001 - 2019. Fuente: TRMM pp.

Los tipos de vegetación natural se clasifican a partir de su fisonomía (monte ribereño, monte serrano, monte de parque, praderas, etc.) o de la presencia de ciertas especies dominantes (Bennadji, 2003).

El monte ribereño presenta una estructura vegetal en franjas según la humedad, con especies desde hidrófilas como el sauce criollo hasta xerófilas como el molle rastrero. El monte de quebradas, sobre suelos aluviales, alberga vegetación semiselvática con árboles de hasta 25 m y rica diversidad de sotobosque y epífitas. En el monte de parque, en transición hacia la pradera, predominan especies herbáceas. En general, el 86 % de la cobertura corresponde a praderas naturales y pasturas mejoradas, el 5 % a bosques nativos y el 2–3 % a áreas degradadas.

3.2 Selección de los sitios de estudio

Para determinar los sitios de estudio, se utilizaron imágenes de alta resolución espacial de la plataforma *Google Earth*. A partir de la interpretación visual de las imágenes y de las series temporales de NDVI se establecieron 24 sitios de estudio. Para la selección de las forestaciones ya establecidas, se tomó como criterio el valor de $NDVI \geq 0,68$ (Beltrán Hernández, 2017) en base al análisis de una serie temporal del NDVI a través de la plataforma SatVeg (*Sistema de Monitoramento da Vegetação por Satélite*. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Figura 3). Se consideró para el análisis temporal el periodo de años en los cuales la forestación permaneció estable, abarcando los años 2001-2020. Se identificaron zonas con forestación establecida en el área de estudio, de las cuales se seleccionaron 12 sitios correspondientes a forestación, en 5 sitios se observó que la forestación se estableció en 2001, en 4 sitios en 2003, en 1 sitio en 2005, en 1 sitio en 2007 y en 1 sitio en 2008. Se seleccionó la misma cantidad de sitios de pastizal natural. Estos últimos se seleccionaron al azar y teniendo en cuenta que se encontraran dentro del área de estudio.

Los sitios correspondientes a forestaciones se agruparon de acuerdo con el año en el cual cada una se estableció, considerando los criterios que definen forestación establecida en este trabajo. Para el análisis estadístico posterior se consideró cada grupo como una unidad de superficie forestada (Tabla 1).

Año	Forestación (F)	Sitios de estudio N°
2001	F 1	1-3-5-6-8
2003	F 2	2-10-11-12
2005	F 3	9
2007	F 4	4
2008	F 5	7

Tabla 1: Agrupación de forestaciones o sitios de estudio de acuerdo con el año en que se estableció la forestación, con valores de NDVI \geq a 0,68.

Si bien los sitios forestados se encuentran sobre suelos desaturados, lixiviados: Luvisoles y Acrisoles, mientras que los pastizales en suelos melánicos, para los análisis planteados en el presente trabajo, no se consideró la influencia del tipo de suelo en los parámetros estudiados. Solamente se realizó un análisis de la variación temporal, según el tipo de cobertura.

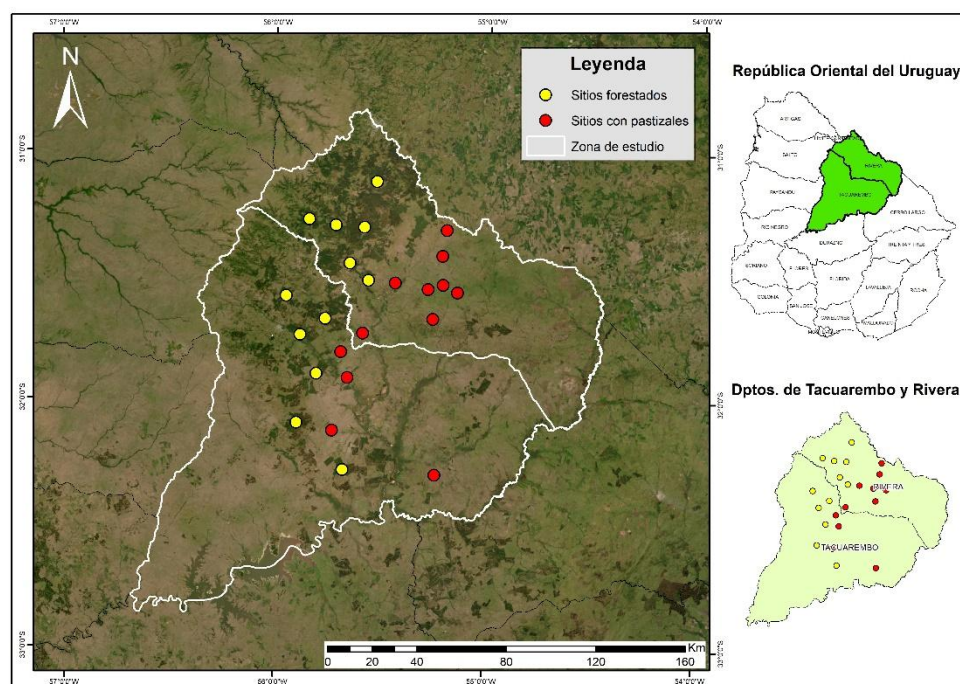


Figura 3: Localización de los sitios de estudio correspondientes a coberturas forestales y pastizales en los departamentos Rivera y Tacuarembó, centro-norte de Uruguay

3.3 Información satelital

De cada uno de los 12 sitios se utilizaron series temporales de datos de NDVI, albedo y evapotranspiración. Dichos valores se obtuvieron a partir de productos globales de MODIS descargados de la plataforma de *Google Earth Engine*.

El NDVI se obtuvo del producto MOD13Q1, cuya resolución temporal es de 16 días y la resolución espacial de 250 m, con un tamaño de píxel de 6,25 ha. El índice se calcula a partir de la reflectancia en el rojo (R) y el infrarrojo cercano (NIR), $NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$. A partir del NDVI se calcularon los atributos funcionales indicadores de la productividad, estacionalidad y fenología de las coberturas analizadas según Paruelo (2008), por medio del NDVI-I (integral), Rango relativo (R Rel) y el NDVI máx. y NDVI min, respectivamente.

Para estudiar el albedo se tomó la serie temporal del producto MCD43A3 cuya resolución espacial es de 500 m y la resolución temporal de 16 días. Dicho producto proporciona datos de albedo de cielo negro (reflectancia hemisférica direccional) y albedo de cielo blanco (reflectancia bihemisférica) al mediodía solar local para las bandas MODIS 1 a 7. Así como tres bandas de amplio espectro (visible, infrarrojo cercano y de onda corta). También proporciona una banda de calidad para cada una de las 10 bandas de albedo, denominada Albedo_Quality, que indica el nivel de confiabilidad de los datos. En este trabajo se utilizó el albedo de cielo blanco (reflectancia bihemisférica).

Para estudiar la evapotranspiración se tomó la serie de datos del producto MOD16_A2, cuya resolución espacial es de 500 m. y la resolución temporal de 8 días. Para la obtención de este producto se utilizan datos de reflectancia de superficie de MODIS, junto con datos meteorológicos y de clasificación de cobertura terrestre, para calcular la evapotranspiración mediante el algoritmo de Penman-Monteith. Los datos de reflectancia de superficie que alimentan el algoritmo de MOD16_A2 provienen de las bandas 1 a 7 de MODIS, con factor de corrección de 0,1 (Banda1: 620-670 nm (rojo), banda 2: 841-876 nm (infrarrojo cercano), banda 3: 459-479 nm (azul), banda 4: 545-565 nm (verde), banda 5: 1230-1250 nm (infrarrojo de onda corta), banda 6: 1628-1652 nm (infrarrojo de onda corta), banda 7: 2105-2155 nm (infrarrojo de onda corta). La banda principal utilizada para el análisis es la de ET

(Evapotranspiration) y sus valores se expresan en kilogramos por metro cuadrado por cada 8 días ($\text{kg/m}^2/8$ días), equivalente a milímetros de agua evaporada.

Para complementar el análisis se utilizaron los datos de precipitación mensual del periodo 2001-2019 a partir de información satelital de la plataforma TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*) con una resolución espacial de aproximadamente 27,75 km y una resolución temporal mensual (Obando, 2015). Para clasificar un año como “húmedo” o “seco”, a partir del Índice de Precipitación Estandarizado (equivalente al SPI12 en la bibliografía internacional) se consideró el criterio empleado por el Instituto Uruguayo de Meteorología (INUMET). Para evaluar la relación entre las variables estudiadas (NDVI, evapotranspiración y albedo) y la disponibilidad hídrica interanual, se utilizó el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI12), el cual clasifica los años según su desviación respecto a la media histórica de precipitaciones. Este índice permitió distinguir entre años extremadamente húmedos ($\text{SPI12} > 2$), moderadamente secos (SPI12 entre -1 y -1.5) y muy secos ($\text{SPI12} < -1.5$) Tabla 2. En la evolución interanual del SPI12 en el sitio de estudio se observan las variaciones en la disponibilidad hídrica durante el período analizado. Esta información fue utilizada para evaluar la relación entre las variables estudiadas (NDVI, evapotranspiración y albedo) y los distintos contextos hídricos (Tabla 3).

Valor del Índice	Clasificación
2,0 y más	Extremadamente húmedo
1,5 a 1,99	Muy húmedo
1,0 a 1,49	Moderadamente húmedo
-0,99 a 0,99	Normal o aproximadamente normal
-1,0 a -1,49	Moderadamente seco
-1,5 a -1,99	Severamente seco
-2 y menos	Extremadamente seco

Tabla 2: Escala del índice de precipitación estandarizado SPI12.

Año	SPI12	Categoría
2001	0,95	Normal
2002	2,17	Extremadamente húmedo
2003	0,56	Normal
2004	-1,42	Moderadamente seco
2005	-0,23	Normal
2006	-1,12	Moderadamente seco
2007	0,16	Normal
2008	-1,75	Muy seco
2009	0,35	Normal
2010	-0,37	Normal
2011	-0,98	Normal
2012	-0,28	Normal
2013	-0,33	Normal
2014	0,88	Normal
2015	0,74	Normal
2016	0,28	Normal
2017	0,66	Normal
2018	-0,01	Normal
2019	0,46	Normal

Tabla 3: Índice de precipitación estandarizado (SPI12) para el periodo de estudio (2001-2019).

El NDVI, la evapotranspiración y el albedo fueron llevados a valores mensuales para el análisis de los datos. En el caso de la evapotranspiración se sumaron los valores obtenidos a escala temporal y luego se promedió entre los sitios cuya cobertura era forestación y los sitios cuya cobertura era pastizal. Mientras que para el albedo y el NDVI los valores fueron promediados tanto a escala temporal como entre sitios de estudio forestación y pastizal.

3.4 Análisis estadístico de los datos

Por un lado, se realizó un análisis de la variación temporal del NDVI por medio de sus atributos funcionales. Además, se analizó la correlación entre NDVI y la precipitación (PP).

Por otro lado, se llevó a cabo un análisis comparativo de los datos del albedo y la evapotranspiración, en los dos tipos de coberturas, durante el periodo de estudio que abarcó desde el año 2001 a 2020. Por último, se analizaron los años secos y los húmedos considerando el SPI12 y cómo la PP anual influyó en el funcionamiento de ambos tipos de coberturas.

Los resultados se analizaron estadísticamente con un diseño al azar completamente aleatorizado. Se realizó el estudio comparativo con una ANOVA con nivel de significancia al 5 % (InfoStat).

4.Resultados y discusión

4.1 Patrones de variación de los atributos del NDVI en tipos de coberturas

Durante el período 2001–2020, los sitios forestados mostraron valores consistentemente superiores de NDVI en comparación con los pastizales naturales. En promedio, el NDVI anual fue un 18 % mayor en las forestaciones ($p < 0,0001$), con valores que en todos los casos se mantuvieron por encima de 0,6, lo cual indica una alta productividad primaria aparente sostenida en el tiempo. El NDVI promedio anual agrupado por año de establecimiento de la forestación (2001, 2003, 2005, 2007, 2008), comparado con los valores correspondientes a pastizales que se toman como referencia desde 2001, refleja que, una vez alcanzado el establecimiento, las forestaciones mantienen niveles superiores de productividad aparente de forma sostenida en el tiempo. (Figura 4).

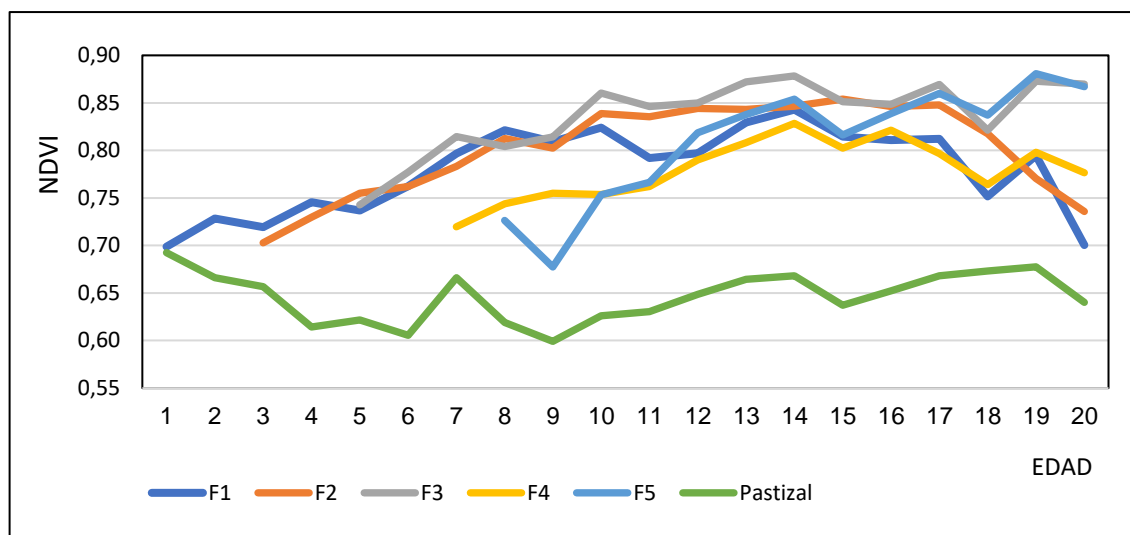


Figura 4: NDVI promedio anual de los sitios forestados, agrupados de acuerdo con la edad en que se estableció cada sitio (año 1), en el caso del pastizal el año 1 es 2001

Independientemente de la edad de la plantación, los valores de NDVI en las forestaciones se mantienen elevados desde que alcanzan el establecimiento. Esta estabilización funcional sugiere que, una vez implantado el dosel arbóreo y alcanzada una cobertura densa y persistente, supera en forma sostenida a los pastizales. Incluso los sitios más recientemente establecidos (como los de F5 - año 2008) evidencian una productividad superior. Este patrón coincide con estudios que demuestran cómo el cambio en el tipo funcional del ecosistema — de herbáceo a leñoso— implica aumentos sustanciales en la biomasa aérea y una menor dependencia de las condiciones estacionales (Paruelo, 2008; Alcaraz-Segura *et al.*, 2013).

Los valores extremos del NDVI profundizan esta diferencia. En las forestaciones, el NDVI máximo alcanzó 0,82 y tuvo un mínimo de 0,68, mientras que en los pastizales los valores fueron de 0,70 y 0,59, respectivamente. Esta diferencia se interpreta como una mayor estabilidad funcional en las forestaciones, reflejo de una estructura vertical más compleja, una mayor biomasa perenne y una actividad fotosintética sostenida incluso en las estaciones menos favorables (Baeza *et al.*, 2006; Paruelo, 2008).

La variabilidad intraanual del NDVI en pastizales experimenta picos marcados durante la primavera y el verano, en respuesta a la estacionalidad climática (Figura 5). En cambio, el NDVI en forestaciones se mantiene relativamente estable a lo largo del año, indicando una menor estacionalidad funcional. Esta estabilidad estacional es coherente con la fisiología de las especies leñosas y con su capacidad para acceder a reservas hídricas más profundas (Bemhaja y Berretta, 2004; Pettorelli et al, 2005).

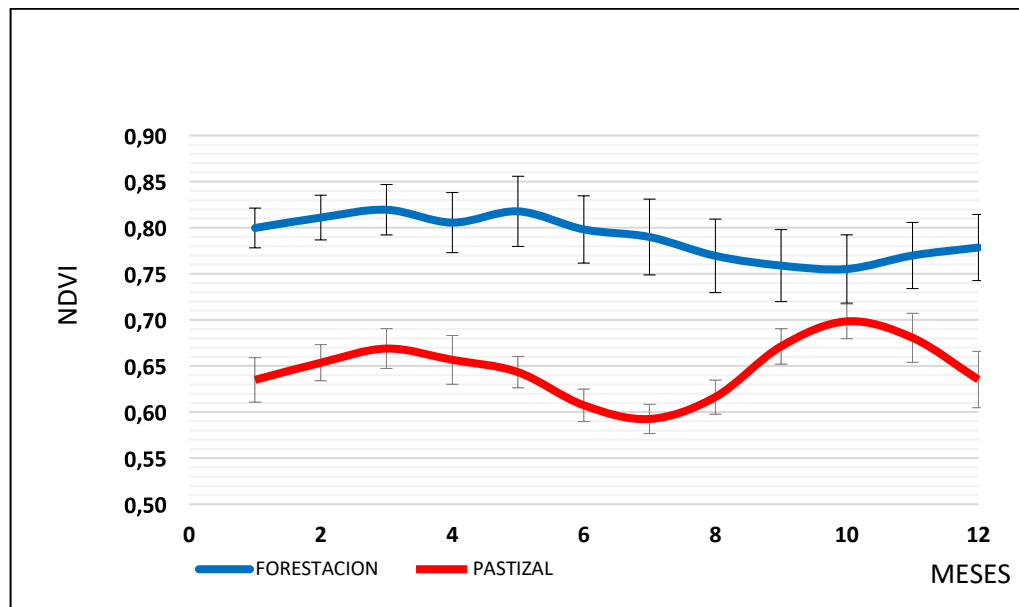


Figura 5: Variación intraanual del promedio del NDVI de forestación y pastizal en el periodo 2001–2020. Las barras corresponden a ± 1 desvío estándar.

A escala interanual, las diferencias se vuelven más evidentes (Figura 6). Existe una relación directa y significativa entre el NDVI anual y la precipitación acumulada anual en los pastizales, mientras que dicha relación es débil en las forestaciones. Esta diferencia es atribuible a la correlación entre el NDVI mensual y la precipitación, que alcanza un R^2 de 0,70 para pastizales y sólo 0,045 para forestaciones (Figura 7-1 y 7-2). Es decir, el NDVI de los pastizales responde fuertemente a las condiciones hídricas del año, en concordancia con lo documentado en otros trabajos (Nosetto et al., 2005; Pettorelli et al., 2005), mientras que

el de las forestaciones se mantiene funcionalmente desacoplado del régimen de precipitaciones.

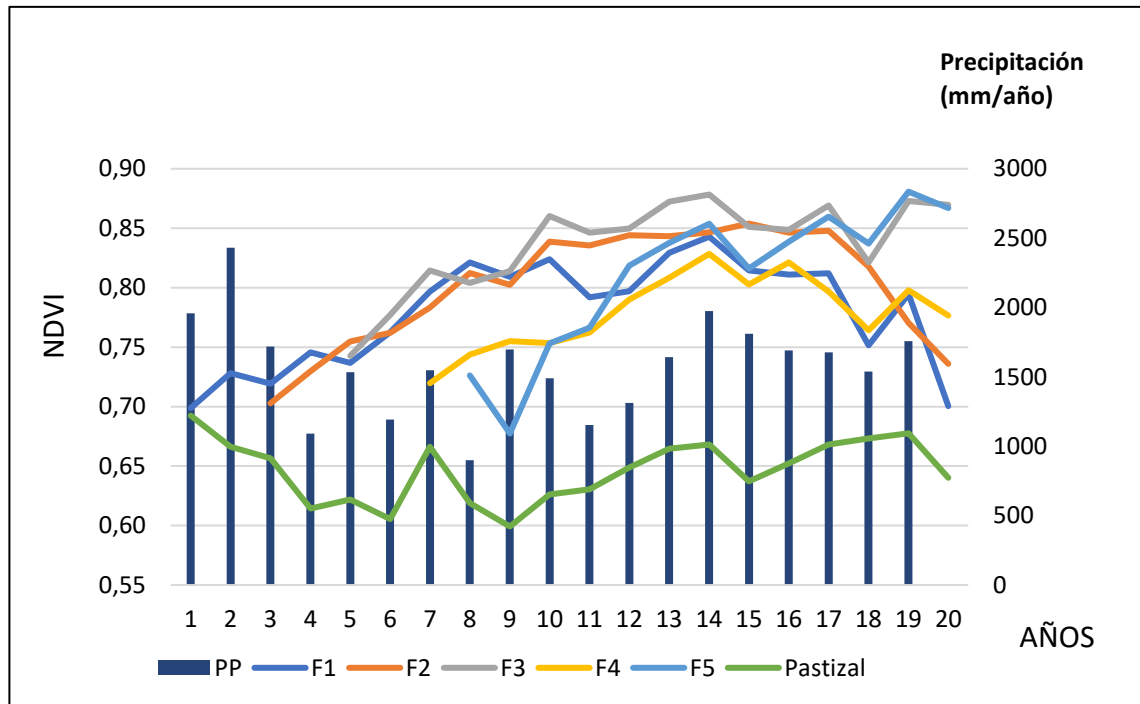


Figura 6: Relación entre la variación de la precipitación acumulada anual y el patrón de variación interanual del NDVI de sitios forestados y pastizal.

Este desacople funcional ha sido ampliamente documentado en la literatura. En sistemas forestados, la amortiguación de la variabilidad hidrológica está relacionada con la profundidad radicular, la persistencia foliar y la capacidad de almacenar agua a nivel de ecosistema (Nosetto, 2005). Esta estabilidad funcional puede interpretarse como una forma de resiliencia productiva. Las forestaciones mantienen niveles relativamente constantes de actividad vegetativa incluso durante años secos, lo que representa una ventaja desde el punto de vista productivo. Sin embargo, este comportamiento también implica un uso sostenido del agua, lo que podría afectar los flujos hídricos regionales, especialmente en áreas con suelos de baja capacidad de retención (Jobbágy, 2011).

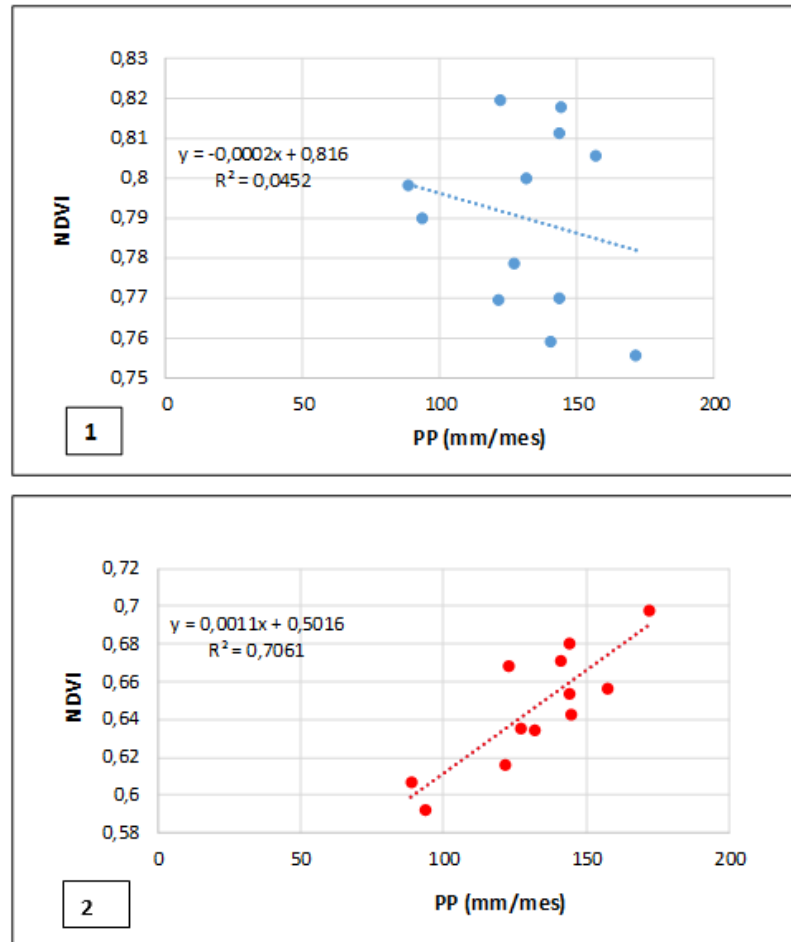


Figura 7: Correlación entre la precipitación promedio mensual y el patrón de NDVI de **7-1**: forestación y **7-2**: pastizal.

Finalmente, este cambio en la respuesta funcional ante la variabilidad climática, sumado al aumento de la productividad primaria, representa un cambio de régimen ecosistémico que puede alterar significativamente los servicios ecosistémicos asociados, incluyendo el balance hídrico, la retención de carbono y la regulación climática local (Lee, 2013). En este sentido, entender la interacción entre el tipo de cobertura, la funcionalidad de la vegetación y la precipitación resulta esencial para diseñar estrategias de manejo sostenible en regiones con creciente presión sobre el recurso hídrico.

4.2 Patrones de variación de la ET en 2 tipos de coberturas

Los patrones de evapotranspiración (ET) entre pastizales naturales y forestaciones mostraron diferencias estructurales acentuadas, tanto a escala anual como intraanual (Figura 8). En promedio, la evapotranspiración (ET) anual de los sitios forestados superó en un 34 % la de los pastizales ($p < 0,0001$; Figura 9). Esta diferencia está directamente vinculada con el tipo funcional de la vegetación: las plantaciones forestales presentan una arquitectura foliar densa y persistente, que mantiene elevados niveles de transpiración a lo largo del año (Paruelo, 2008; Jobbágy et al., 2006). La mayor biomasa aérea y profundidad radicular de los árboles permite un acceso más eficiente y continuo a las reservas de agua edáfica, lo que incrementa el consumo hídrico del sistema incluso en condiciones de estrés hídrico superficial (Nosetto et al., 2005).

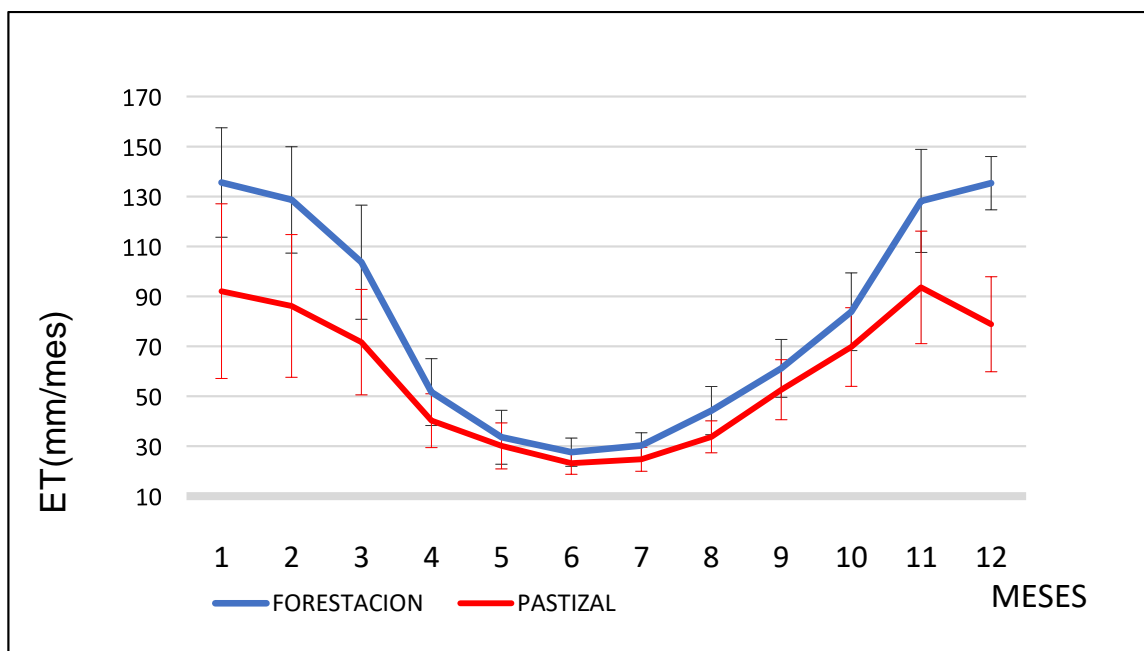


Figura 8: Evapotranspiración promedio mensual (mm/mes) de los sitios forestados y del pastizal. Las barras corresponden a ± 1 desvío estándar.

A nivel mensual, la evapotranspiración de forestaciones y pastizales presenta un patrón estacional. En los sitios forestados, los valores oscilaron entre 135,5 mm en enero y 27,6 mm en julio, mientras que en los pastizales los máximos fueron menores (93,5 mm) y los mínimos

similares (23,2 mm). Esto indica que las forestaciones alcanzan valores más altos en verano, generando una mayor amplitud anual, aunque en invierno las diferencias entre coberturas se reducen. Sin embargo, aun en los meses secos las forestaciones mantienen niveles de transpiración relativamente más estables que los pastizales, lo que coincide con lo señalado por Magliano et al. (2016) y Mercau et al. (2016) respecto a la mayor continuidad en los flujos de agua bajo cobertura leñosa en la región Chaco-Pampeana.

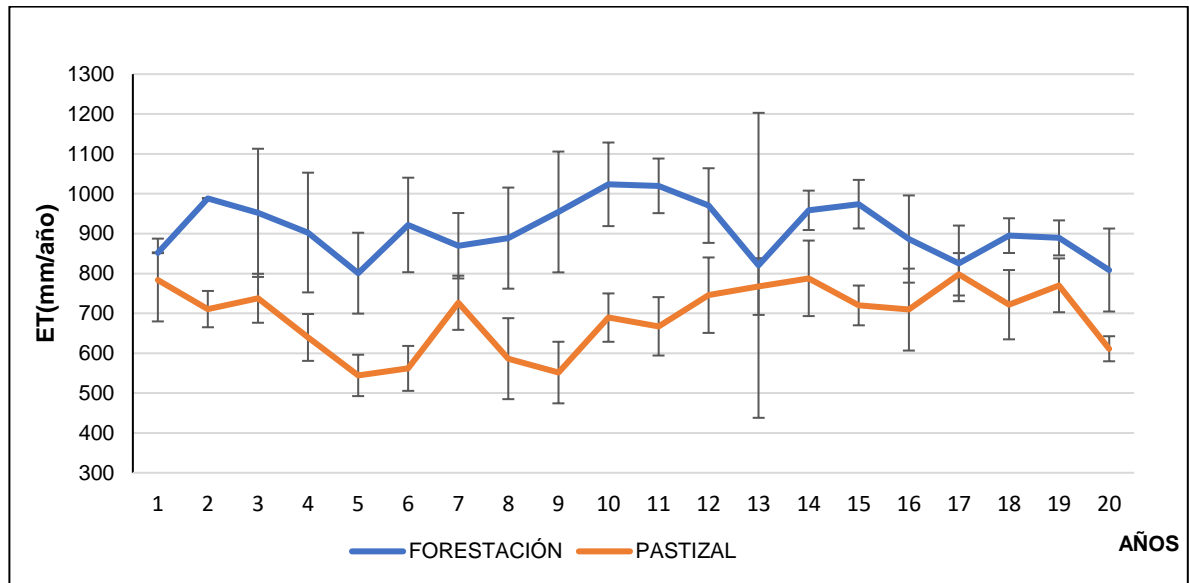


Figura 9: Evapotranspiración promedio anual (mm/año) de los 12 sitios con forestación establecida y del pastizal. Las barras corresponden a ± 1 desvío estándar.

En relación con la precipitación, los patrones también fueron divergentes. En los años secos la ET en los pastizales disminuyó visiblemente, mientras que en las forestaciones el descenso fue apenas perceptible (Figura 10). Este desacople funcional entre ET y precipitación se debe, principalmente, a que las forestaciones acceden a recursos hídricos más profundos, regulan su microclima y mantienen su actividad fotosintética aún bajo condiciones de déficit hídrico (Nosetto et al., 2005; Jobbágy et al., 2011). En este sentido, la forestación genera un "efecto esponja" que reduce las oscilaciones de corto plazo, pero puede impactar negativamente en el balance hídrico a escala de cuenca si el sistema no se reabastece por otras vías (Jobbágy et al., 2013).

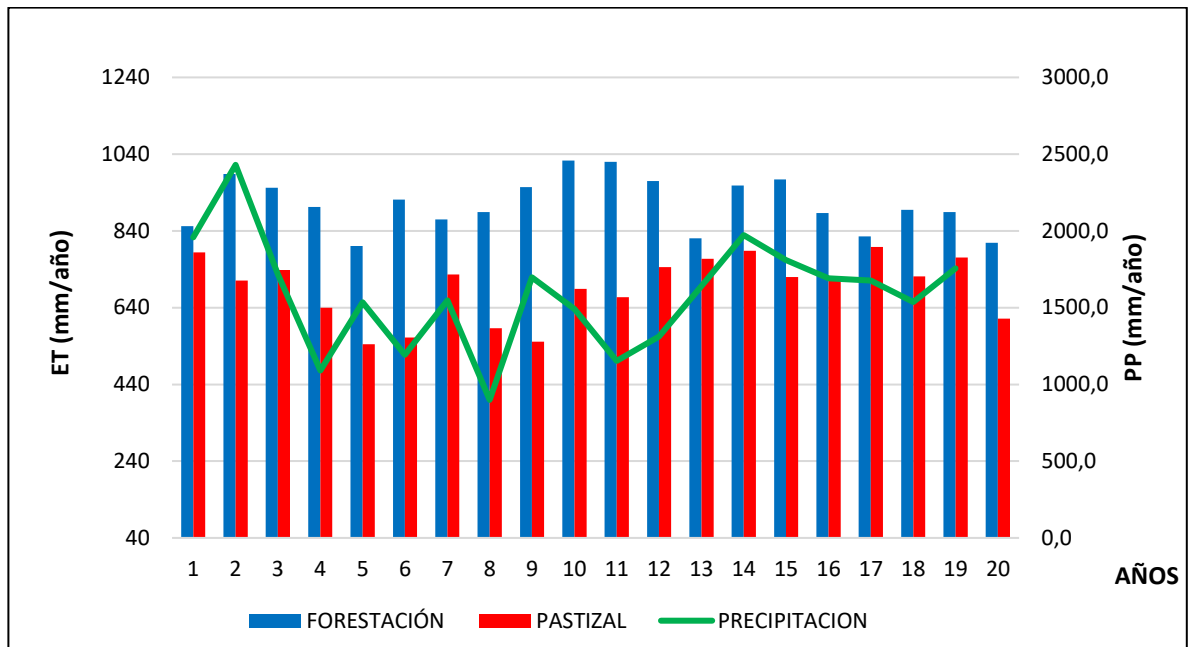


Figura 10: Evapotranspiración anual acumulada de sitios forestados, pastizal y precipitación acumulada anual en el periodo de estudio.

El análisis estadístico está en concordancia con lo mencionado: en los pastizales, un 24 % de la variabilidad anual de la ET fue explicada por la precipitación, lo que evidencia una alta sensibilidad climática. En contraste, en las forestaciones, en la cual no hay correlación con un coeficiente de 0,15% (valor $P < 0.0001$) (Figuras 11-1 y 11-2). Este resultado concuerda con estudios de Jobbágy *et al.* (2006, 2013), quienes señalaron que la forestación en ecosistemas herbáceos puede implicar una reconfiguración de los flujos hídricos verticales y horizontales, con posibles efectos sobre la reposición de acuíferos y la dinámica de escorrentía.

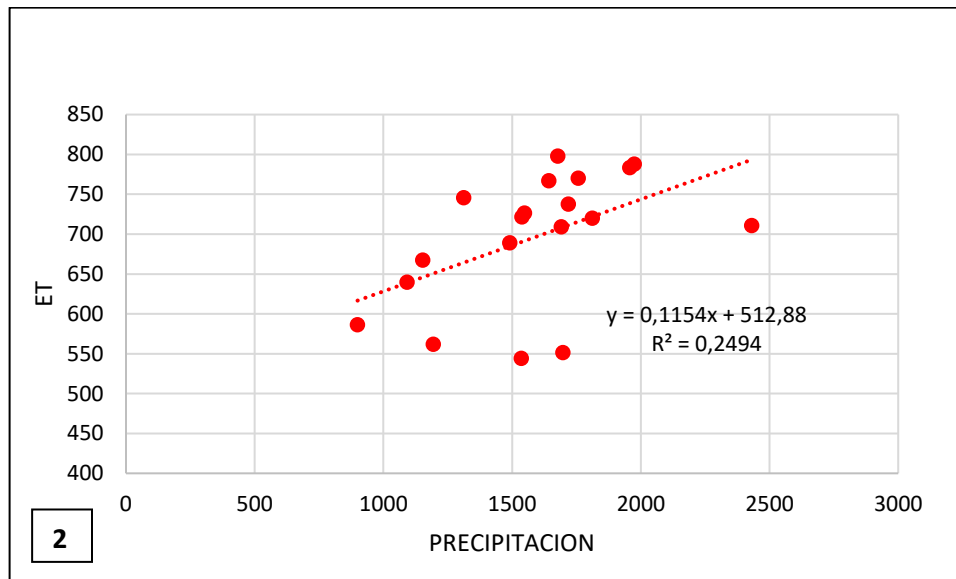
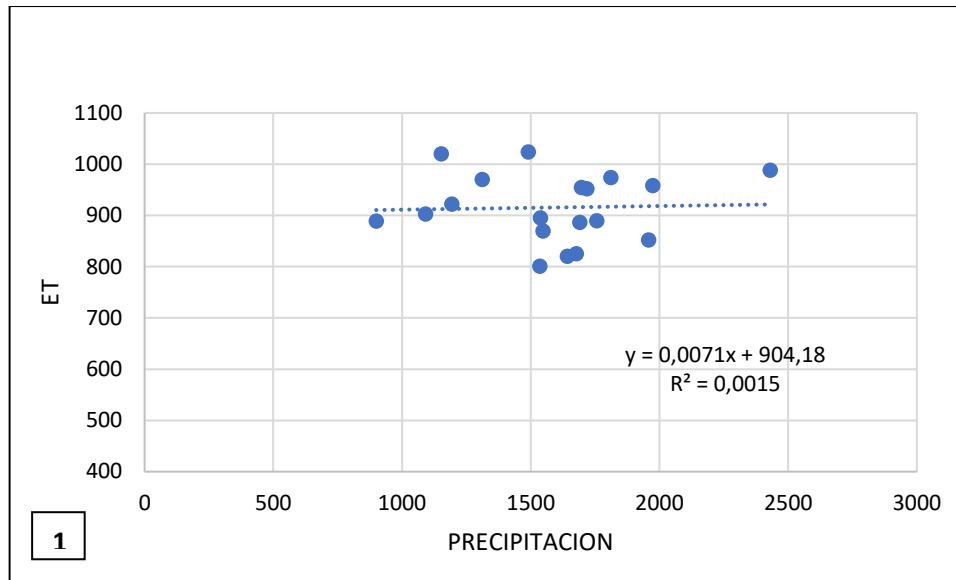


Figura 11: Correlación entre la precipitación promedio anual y el patrón de ET de **11-1**: forestación y **11-2**: pastizal.

Desde una perspectiva eco-hidrológica, esta estabilidad funcional en la ET puede parecer positiva —por ejemplo, en contextos productivos o para mantener condiciones micro climáticas favorables—, pero también introduce costos ecológicos. Las forestaciones consumen grandes volúmenes de agua de manera persistente, lo que reduce la disponibilidad hídrica para otros usos ecosistémicos o sociales, particularmente en regiones con estaciones

secas prolongadas o donde el agua superficial es limitada (Jobbágy *et al.*, 2011; Noretto *et al.*, 2011; Marchesini *et al.*, 2015). Aunque las forestaciones aumentan la ET absoluta, reducen su sensibilidad climática y modifican los flujos de agua en el paisaje.

4.3 Patrones de variación del albedo.

El albedo, entendido como la fracción de radiación solar reflejada por la superficie terrestre, presentó diferencias marcadas entre los sitios forestados y los pastizales. En promedio, el albedo anual de los pastizales fue un 36 % mayor que el de las forestaciones ($p < 0,0001$) (Figura 12). Esta diferencia responde a las propiedades estructurales de cada tipo de cobertura: los pastizales, con menor densidad y altura de vegetación, reflejan más radiación solar, mientras que las forestaciones, con un dosel más denso y pigmentación oscura, absorben más radiación (Baldi *et al.*, 2008; Bonan, 2008).

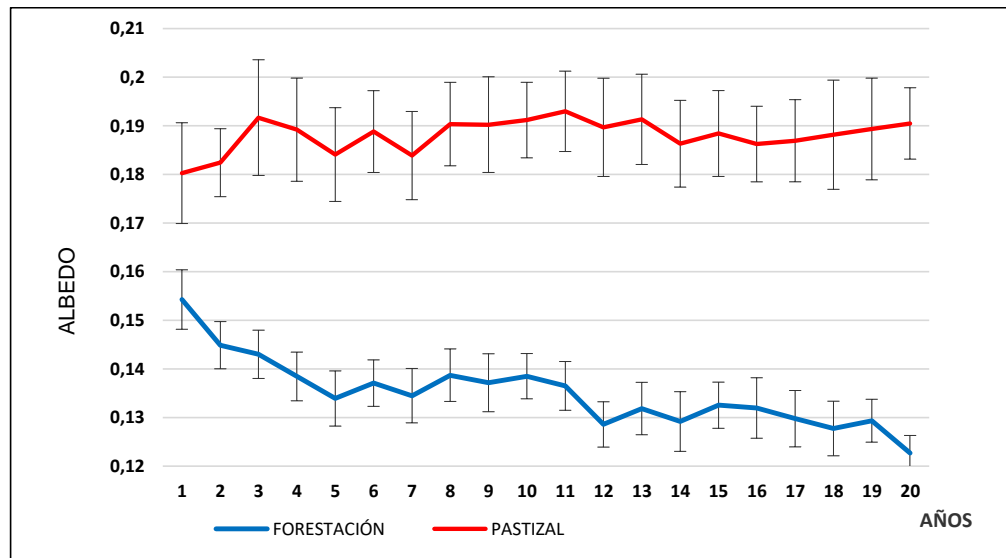


Figura 12: Albedo promedio anual de los años en que la forestación se encontraba establecida y del pastizal en el periodo 2001-2020. Las barras corresponden a ± 1 desvío estándar.

Este patrón se mantuvo a lo largo del año. El albedo mensual promedio de los pastizales fue superior en 5,5 % en comparación con las forestaciones (Figura 13). Los valores máximos en pastizales se dieron durante los meses de verano (hasta 0,196 en diciembre–febrero), mientras que en las forestaciones el máximo alcanzó 0,146, con valores mínimos de 0,128 en invierno. Estas diferencias mensuales indican una mayor variabilidad estacional del albedo en los pastizales, probablemente asociada al crecimiento estacional de la biomasa (Pettorelli *et al.*, 2005).

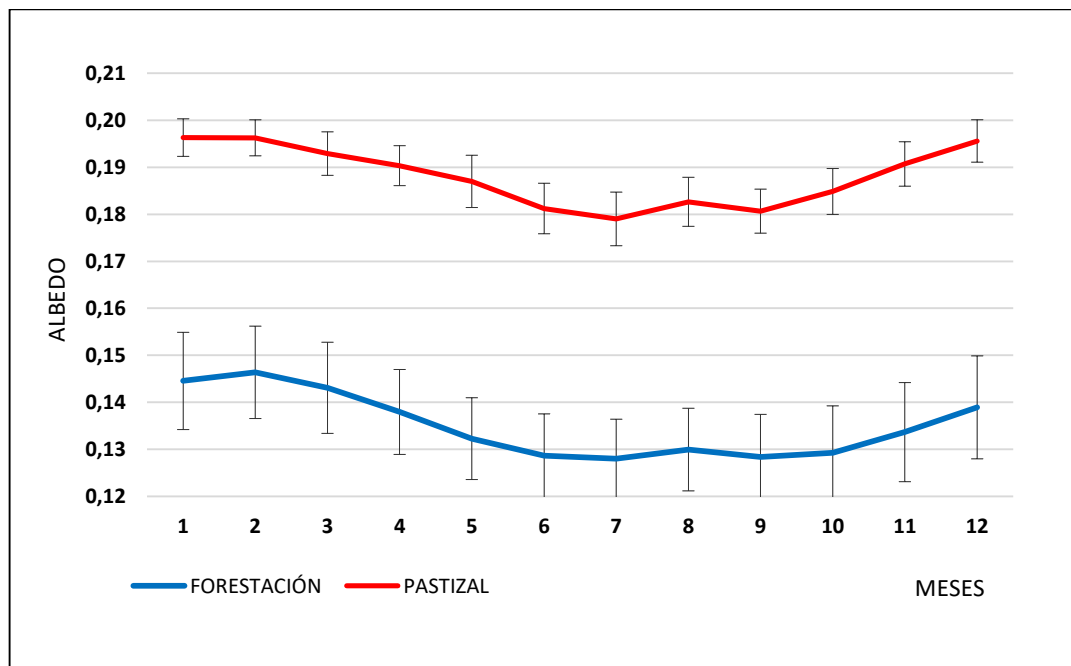


Figura 13: Albedo promedio mensual de los sitios forestados y del pastizal en el periodo de 2001-2020. Las barras corresponden a ± 1 desvío estándar.

La relación con la precipitación también difiere entre coberturas: en pastizales, el 32% de la variabilidad anual del albedo se explicó por la precipitación, mientras que en forestaciones la correlación fue muy baja (3,7%) (Figura 14-1 y 14-2). Esto refleja que el albedo en pastizales está más influenciado por la cobertura vegetal activa, la cual responde directamente a la disponibilidad hídrica, mientras que en forestaciones el albedo permanece más constante, independientemente de las variaciones pluviométricas (Loarie *et al.*, 2011).

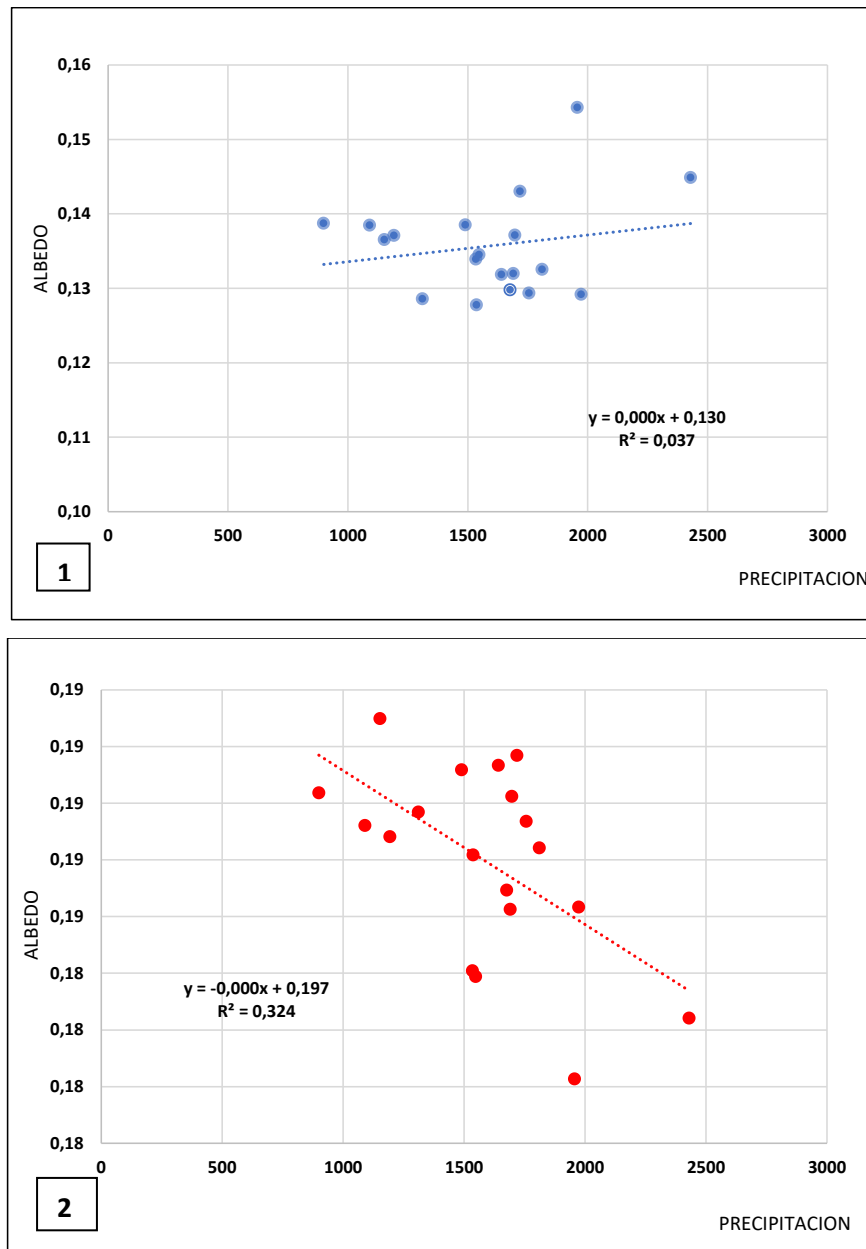


Figura 14: Correlación entre la precipitación promedio mensual y el patrón de Albedo de **14-1**: forestación y **14-2**: pastizal.

4.4 Influencia de años secos y años húmedos en los patrones de comportamiento de las variables en estudio.

El NDVI del pastizal presentó una clara disminución durante los años clasificados como secos (por ejemplo, 2004, 2006, 2008), lo que indica una alta dependencia de la productividad primaria con respecto a la disponibilidad de agua. Esta relación fue consistente con lo observado en otras regiones templado-subtropicales, donde el NDVI responde directamente a la precipitación anual acumulada (*Gaitán et al., 2015; Alcaraz-Segura et al., 2013*). En contraste, en los sitios forestados no se evidenció una respuesta significativa del NDVI frente a los valores del SPI12, lo cual sugiere una menor sensibilidad interanual.

En lo que respecta a la evapotranspiración (ET), el pastizal mostró una reducción notable en años con SPI12 negativo, como 2004–2008 y 2010–2012. Esta variación estuvo respaldada por un coeficiente de determinación del 27 % entre el SPI12 y la ET anual en pastizales, mientras que en forestaciones la relación fue muy baja. Este resultado es coherente con el hecho de que las especies herbáceas ajustan rápidamente su transpiración a la oferta hídrica, mientras que las forestaciones, al tener acceso a capas profundas del suelo, mantienen valores de ET más estables (*Nosetto et al., 2005; Jobbágy et al., 2006*).

El albedo presentó un patrón similar. En los pastizales, el albedo tendió a disminuir levemente en los años con SPI12 más negativo, posiblemente como consecuencia de una menor cobertura vegetal durante sequías, lo cual expone mayor superficie de suelo oscuro. Se observó una correlación del 24 % entre el SPI12 y el albedo en pastizales, mientras que en las forestaciones la correlación fue prácticamente nula. Esto reafirma que el albedo en sistemas leñosos se mantiene más constante, al depender menos de la variabilidad de la biomasa superficial.

En síntesis, el análisis basado en el SPI12 revela que los pastizales presentan una respuesta funcional significativa frente a condiciones climáticas anuales secas, reflejada tanto en la productividad como en los flujos de agua y energía. Las forestaciones, en cambio, tienden a mantener sus valores funcionales estables, independientemente del año, evidenciando un comportamiento más amortiguado frente a variaciones interanuales de precipitación.

Desde una perspectiva regional, los resultados encontrados coinciden con los procesos de desacople hídrico descritos por Jackson et al. (2000), donde la mayor profundidad radicular de los árboles incrementa la transpiración aún bajo estrés hídrico. Del mismo modo, el presupuesto global de carbono actualizado por Friedlingstein et al. (2022) indica que la expansión forestal podría incrementar la captura neta de CO₂, aunque dicho beneficio puede verse contrarrestado por la reducción del albedo y el consecuente forzamiento radiativo (Houspanossian et al 2013).

5. Conclusión

El análisis del NDVI y sus atributos funcionales, junto con las variables de evapotranspiración (ET) y albedo, permitió caracterizar diferencias marcadas en el funcionamiento de los pastizales naturales y las forestaciones durante el período 2001–2020. Las forestaciones presentaron una mayor productividad anual, baja estacionalidad, menor albedo y mayores tasas de ET, con escasa sensibilidad a la precipitación. Por el contrario, los pastizales mostraron una alta sensibilidad climática, reflejada en sus variaciones intraanuales e interanuales, con una estrecha relación entre la productividad, la evaporación y la precipitación.

El uso del Índice de Precipitación Estandarizado (SPI12) permitió identificar con claridad los años secos y húmedos y observar cómo estas condiciones afectaron diferencialmente a cada tipo de cobertura. Mientras que el NDVI, la ET y el albedo en los pastizales respondieron significativamente a los valores del SPI12, las forestaciones se mantuvieron funcionalmente más estables, posiblemente debido a su estructura leñosa y profundidad radicular.

En resumen, los resultados obtenidos permiten comprender con mayor profundidad cómo varían los procesos funcionales de vegetación en función del tipo de cobertura y su interacción con la disponibilidad hídrica. El enfoque adoptado, basado en el análisis de indicadores satelitales a lo largo de series temporales, demostró ser eficaz para identificar diferencias claras entre coberturas, sin necesidad de recurrir a datos de campo intensivos. Esta aproximación permite fortalecer el análisis comparativo de vegetación y ofrece una base objetiva para interpretar el funcionamiento ecosistémico en el área de estudio.

Los resultados obtenidos refuerzan la necesidad de incorporar criterios ecohidrológicos en las políticas de expansión forestal, particularmente en regiones con marcada estacionalidad hídrica. La mayor estabilidad funcional de las plantaciones frente a la variabilidad climática podría representar una ventaja en términos de productividad, pero también implica una mayor extracción de agua en años secos. En este sentido, las decisiones de ordenamiento territorial deberían considerar no sólo el potencial productivo de las coberturas, sino también sus impactos sobre el balance hídrico regional y la provisión de servicios ecosistémicos, como la regulación climática y la conservación del agua. Asimismo, estas conclusiones respaldan la importancia de integrar evaluaciones de balance hídrico y de carbono a escala de cuenca para maximizar los beneficios climáticos sin comprometer la disponibilidad de agua (Jackson et al., 2000; Friedlingstein et al., 2022).

6. Bibliografía.

Alcaraz-Segura, D., Paruelo, J. M., Epstein, H. E., & Cabello, J. (2013). Environmental and Human Controls of Ecosystem Functional Diversity in Temperate South America. *Remote Sensing*, 5, 127-154.

Alcaraz-Segura, D., Baldi, G., Durante, P., & Garbulsky, M. F. (2008). Análisis de la dinámica temporal del NDVI en áreas protegidas: Tres casos de estudio a distintas escalas espaciales, temporales y de gestión.

Achkar, M. (s.f.) Ecoregiones de Uruguay¹. Laboratorio de Desarrollo Sustentable y Gestión Ambiental del Territorio – Geografía. Instituto de Ecología y Ciencias Ambientales. Facultad de Ciencias. Universidad de la República.

Baeza, S., Paruelo, J. M., & Altesor, A. (2006).² Caracterización funcional de la vegetación del Uruguay mediante el uso de sensores remotos¹. *Interciencia*, 31, 1-8.

Barrenechea, P., Rodríguez-Miranda, A., & Troncoso, C. (2012). La cadena forestal maderera y su impacto en términos de desarrollo territorial: las economías de Tacuarembó y Rivera. *Anuario OPYPA 2012*, 349-364.

Baldi, G., Noretto, M. D., & Jobbágy, E. G. (2008). El efecto de las plantaciones forestales sobre el funcionamiento de los ecosistemas sudamericanos. *Ambiência*, 4(Esp), 23-34.

Bemhaja, M., & Berretta, E. J. (2004). 30 años de investigación en suelos de areniscas: Comunidades herbáceas de campo natural. INIA Tacuarembó.

Beltrán Hernández, D. H. (2017). Aplicación de índices de vegetación para evaluar procesos de restauración ecológica en el Parque Forestal Embalse del Neusa (Trabajo de grado, Universidad Militar Nueva Granada).

Bennadji, Z. (2003). Principales características ecológicas de la región sobre areniscas dedicada a la forestación en Tacuarembó y Rivera. En *Seminario de actualización en tecnologías forestales para areniscas de Tacuarembó y Rivera* (pp. 1–36). INIA Tacuarembó.

- Boscana, M., & Boragno, L. (2018). Actualidad del sector forestal. Anuario OPYPA, 229-39.
- Bonan, G. B. (2008). Forests and Climate Change: Forcings, Feedbacks, and the Climate Benefits of Forests. *Science*, 320(5882), 1444-1449.
- CERES. (2023) La producción forestal en Uruguay: Un sector líder y sostenible. Informe especial, noviembre 2023.
- Di Bella, C. M., & Beget, M. E. (2014). Ecosystem services related to energy balance: A case study of wetlands reflected energy. In *Earth Observation of Ecosystem Services* (pp. 379-395). National Institute of Agricultural Technology (INTA), Argentina.
- Durán, A. (2007). Carta de Reconocimiento de los Suelos del Uruguay. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA)
- Dirección General Forestal - MGAP. (2022). Superficie Forestal del Uruguay 2022 (Bosques Plantados). División Evaluación e Información. Uruguay.
- Friedlingstein, P., et al. (2022). Global Carbon Budget 2022. *Earth System Science Data*, 14, 4811-4900.
- Gaitán, J. J., Donaldo Bran, D. E., & Azcona, C. (2015). Tendencia del NDVI en el período 2000-2014 como indicador de la degradación de tierras en Argentina: ventajas y limitaciones. *Agri Scientia*, 32(2), 83-93.
- Houspanossian, J., Nosetto, M., & Jobbágy, E. (2013). Radiation budget changes with dry forest clearing in temperate Argentina. *Global Change Biology*, 19(4), 1211-1222
- Instituto Uruguayo de Meteorología. (2023). *Sequía 2020 al 2023: Uruguay*. Área de Meteorología y Clima para la Sociedad, División de Servicios Climáticos.
- Jobbágy, E. G., Pascual, M., Bianchi, M. P., Piñeiro, M., García S., L., Oyarzabal, J., Cingolani, G., Carranza, A., Díaz, B. G., & Villagra, P. E. (2021). Representación espacial de la oferta y la demanda de los servicios ecosistémicos vinculados al agua. *Ecología Austral*, 31, xxx-xxx. Asociación Argentina de Ecología.

- Jobbágy, E. G., Acosta, A. M., & Noretto, M. D. (2013). Plantaciones de pino y agua en Córdoba: Rendimiento hídrico en cuencas primarias bajo pastizales y plantaciones de pino de las sierras de Córdoba (Argentina). *Ecología Austral*, 23, 77-142.
- Jobbágy, E. G., Noretto, M. D., Villagra, P. E., & Jackson, R. B. (2011). Water subsidies from mountains to deserts: Their role in sustaining groundwater-fed oases in a sandy landscape *Ecological Applications*, 678-694
- Jobbágy, E. G.; Vasallo, M.; Farley, K. A.; Piñeiro, G.; Garbulsky, M. F., Noretto, M. D.; Jackson, R.B.; Paruelo, J. M. (2006) Forestación en pastizales: Hacia una visión integral de sus oportunidades y costos ecológicos”. *Revista: Agrociencia*. (2006) Vol. X N° 2 pág. 109 – 124.
- Jackson, R. B., et al. (2000). Ecohydrology of trees and grasses in savannas. *Trends in Ecology & Evolution*, 15, 193-199.
- Lee, S.-J., Berbery, E. H., & Alcaraz-Segura, D. (2013). The impact of ecosystem functional type changes on the La Plata Basin climate. *Advances in Atmospheric Sciences*, 30(5), 1387–1405.
- Liang, S. (2000). Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I: Algorithms. *Remote Sensing of Environment*, 213-238.
- Loarie, S. R., Lobell, D. B., Asner, G. P., & Field, C. B. (2011). Land-cover and surface water change drive large albedo increases in South America. *Earth Interactions*, 15, 1-14
- Magliano, P. N., Fernández, R. J., Golluscio, R., Manzoni, V. A., Paz, R. A., & Jobbágy, E. G. (2016). Cambios en la partición de flujos de agua en el Chaco Árido al reemplazar bosques por pasturas. *Ecología Austral*, 26, 95-106. Asociación Argentina de Ecología.
- Mercau, J. L., Noretto, M. D., Bert, F., Giménez, R., & Jobbágy, E. G. (2016). Shallow groundwater dynamics in the Pampas: Climate, landscape and crop choice effects. *Agricultural Water Management*, 163, 159-168.

- Marchesini, V. A., Fernández, R. J., Reynolds, J. F., Sobrino, J. A., & Di Bella, C. M. (2015). Changes in evapotranspiration and phenology as consequences of shrub removal in dry forests of central Argentina. *Ecohydrology*, 8, 1304-13113.
- Nosetto, M. D., Jobbágy, E. G., & Paruelo, J. M. (2005). Cambio de uso del suelo y pérdidas de agua: el caso de forestación de pastizales a través de un gradiente de textura del suelo en el centro de Argentina. *Global Change Biology*, 11, 1101-1117.
- Nosetto, M.D., Jobbágy, E.G., Brizuela, A.B., & Jackson, R.B. (2011). The hydrologic consequences of land cover change in central Argentina¹. *Agriculture, Ecosystems and Environment*.
- Obando, O. F., Risco Sence, E., & Sosa Sarmiento, J. (2015). *Guía sintética para la elaboración de los mapas diarios de escurrimiento superficial a nivel nacional: Basado en productos satelitales – TRMM-ESCOR*. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI).
- Organización Meteorológica Mundial. (2012). *Guía del usuario sobre el Índice normalizado de precipitación (OMM-No 1090)* (M. Svoboda, M. Hayes & D. Wood, Eds.). Ginebra, Suiza: Organización Meteorológica Mundial.
- Paruelo, J. M., Guerschman, J. P., Piñeiro, G., Jobbágy, E. G., Verón, S. R., Baldi, G., & Baeza, S. (2006). Cambios en el uso de la tierra en Argentina y Uruguay: marcos conceptuales para su análisis. *Agrociencia*, 10(2), 47–62.
- Paruelo, J. M. (2008). La caracterización funcional de ecosistemas mediante sensores remotos. *Ecosistemas*, 17, 4-22.
- Pérez Gomar, E., & Califra, A. (2007). Breve descripción de las principales características que definen los suelos de la región de areniscas. En *30 años de investigación en suelos de areniscas* (pp. 9–13). INIA Tacuarembó.
- Pettorelli, N., Vik, J. O., Mysterud, A., Gaillard, J.-M., Tucker, C. J., & Stenseth, N. C. (2005). Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology & Evolution*, 20, 503-510. ISSN 0169-5347

Páginas web consultadas:

<http://agriculturadeprecisionparaeldesarrollo.com>: Acceso: 15/06/2022

<https://www.satveg.cnptia.embrapa.br/satveg/login.html>: Acceso: 20/07/2021

<https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.05.011>: Acceso: 10/08/2021

<https://catalogodatos.gub.uy/dataset/mgap-bosque-nativo#>: Acceso: 28/09/2021

[https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/documentos/noticias/Sector%20Forestal%202023%20\(1\).pdf](https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/documentos/noticias/Sector%20Forestal%202023%20(1).pdf)

Acceso: 10/03/2025

<https://www.inumet.gub.uy>. Acceso 10/03/2025