Caracterización del funcionamiento y la provisión de servicios ecosistémicos de los principales tipos de cobertura vegetal en la Cuenca alta del río Sauce Chico, Provincia de Buenos Aires

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

Adriana Catalina Guzmán Guaraca

Ingeniera en Biotecnología Ambiental - Escuela Superior Politécnica de Chimborazo - 2014

Lugar de Trabajo: Universidad Nacional de La Plata

FAUBA

Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano

Facultad de Agronomía - Universidad de Buenos Aires

TUTOR/ES

Tutor

María Eugenia Beget

Ingeniera Agrónoma (Universidad de Buenos Aires)

Magister en Recursos Naturales (Universidad de Buenos Aires)

JURADO DE TRABAJO FINAL

Jurado

Gervasio Piñeiro

Ingeniero Agrónomo (Universidad de la República)

Doctor en Ciencias Agropecuarias (Universidad de Buenos Aires)

Jurado

Marcos Texeira

Licenciado en Ciencias Biológicas (Universidad de la República)

Doctor en Ciencias Agropecuarias (Universidad de Buenos Aires)

Fecha de defensa del Trabajo Final: 11 de Junio de 2021

“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.”

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN. 1

2. OBJETIVOS 2

2.1. General: 2

2.2. Específicos: 2

3. MATERIALES Y MÉTODOS 2

3.1. Área de estudio 2

3.2. Principales tipos de cobertura 3

3.3. Precipitación 6

3.4. Base de datos 7

3.4.1.Series temporales de NDVI, Evapotranspiración y Albedo 9

3.5. Análisis Estadístico 10

4. RESULTADOS 11

4.1. Índice De Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) 11

4.2. Evapotranspiración (ET) 13

4.3. Albedo 15

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES 19

5. BIBLIOGRAFÍA: 22

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de la Cuenca del Arroyo Sauce Chico. 3
Figura 2. Ambientes terrestres y comunidades vegetales de Sierra de la Ventana 4
Figura 3. Avance de la frontera agrícola sobre la zona Peri-intraserrana de la cuenca alta del río Sauce Chico. Fuente: Reconocimiento a partir de imágenes satelitales de Google Earth (A y B) y fotografías tomadas el 11/04/2019 (C y D). 5
Figura 5. Precipitación anual acumulada correspondiente al periodo 2001-2017. 6
Figura 6. Precipitación media mensual desde 2001 a 2018. Las barras corresponden a +/-1 error estándar. 7
Figura 7. Puntos de campo. Imágenes LANDSAT 2017/12/18 RGB652. 8
Figura 8. Promedio mensual del índice espectral NDVI para cultivos y pastizal natural, dentro del período enero 2001 – diciembre 2017. Las barras corresponden a +/-1 error estándar. 12
Figura 9. NDVI promedio anual (NDVI-I) y $NDVI_{CV}$ en pastizal natural (—◆—) y cultivo (—●—), dentro del período enero 2001 – diciembre 2017. Las barras corresponden a +/-1 error estándar. 12
Figura 10. Correlación entre precipitación anual y NDVI promedio anual (NDVI-I) de pastizal natural (—◆—) y cultivo (—●—). 13
Figura 11. Evapotranspiración promedio mensual de pastizal natural (—◆—) y cultivo (—●—). Las barras corresponden a +/-1 error estándar. 14
Figura 12. Evapotranspiración acumulada anual de pastizal natural (—◆—) y cultivo (—●—). Las barras corresponden a +/-1 error estándar. 14
Figura 13. Correlación entre precipitación anual y evapotranspiración anual (NDVI-I) de pastizal natural (—◆—) y cultivo (—●—). 15
Figura 14. Albedo promedio mensual de pastizal natural (—◆—) y cultivo (—●—). Las barras corresponden a +/-1 error estándar. 16
Figura 15. Albedo promedio anual de pastizal natural (—◆—) y cultivo (—●—). Las barras corresponden a +/-1 error estándar. 16
Figura 16. Correlación entre precipitación anual y Albedo anual de pastizal natural (—◆—) y cultivo (—●—). 17
Figura 17. IPSE de pastizal natural (—◆—) y cultivo (—●—). 18
Figura 18. Correlación entre precipitación anual e IPSE de pastizal natural (—◆—) y cultivo (—●—). 18
Figura 19. Correlación entre evapotranspiración anual e IPSE de pastizal natural (—◆—) y cultivo (—●—). 19

RESUMEN:

En regiones de clima semiárido los cambios en la vegetación y/o uso de suelo sin ningún tipo de planificación pueden producir transformaciones hidrológicas y desencadenar procesos de degradación. Esto provocaría una disminución en la provisión de servicios ecosistémicos como la regulación del ciclo del agua y, en consecuencia, la disponibilidad de agua y la regulación de crecientes o inundaciones, entre otros. El objetivo del presente trabajo fue analizar diferencias en el funcionamiento y la provisión de servicios ecosistémicos de las principales coberturas de suelo en la cuenca alta del río Sauce Chico (cultivo agrícola y pastizal natural), durante el período 2001-2017. Las principales variables funcionales caracterizadas fueron la evapotranspiración (ET) del canopeo, el albedo y la estacionalidad de la vegetación a través del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI). Las mismas se obtuvieron de productos del sensor MODIS, a través de la plataforma Google Earth Engine. Además, se estimó el nivel de provisión de servicios ecosistémicos calculando el índice de provisión de servicios ecosistémicos (IPSE). Durante los años de estudio, en general, las diferencias de ET anual entre las dos coberturas fueron bajas, entre 8 y 33mm. Los valores de albedo de cielo blanco anual y mensual fueron más altos y variables en cultivos. Las coberturas analizadas presentaron patrones semejantes en la dinámica intra-anual del NDVI y sus descriptores (NDVImax – NDVImin) y sus fechas de ocurrencia. Las áreas correspondientes a pastizal natural presentaron máxima actividad fotosintética en períodos de mayor humedad del suelo (febrero – abril y septiembre – diciembre). Estas áreas tendrían mayor capacidad de provisión de servicios ecosistémicos (IPSE), ya que producirían mayor actividad fotosintética con menor estacionalidad, en comparación con los cultivos agrícolas que tienen periodos de siembra, cosecha, barbecho que aumentan su variación estacional. La metodología utilizada tiene ventajas sobre los enfoques tradicionales, ya que el uso de datos de teledetección posibilitó una primera caracterización, monitoreo y comparación entre usos de la tierra contrastantes.

Palabras clave: evapotranspiración, albedo, NDVI, IPSE, teledetección

ABSTRACT:

In regions of semi-arid climate changes in vegetation cover and/or land use without any planning can produce hydrological transformations and degradation processes. There would be a limitation in the provision of ecosystem services such as water cycle regulation and, consequently, water availability and flooding regulation, among others. The objective of this work was to analyze the differences in functioning and provision of ecosystem services of the main land covers in the Sauce Chico basin (agriculture vs grasslands), during the period 2001-2017. The main functional variables characterized were the evapotranspiration (ET) of canopy, albedo and seasonality of the vegetation through the normalized difference vegetation index (NDVI). They were obtained from products from the MODIS sensor, through the Google Earth Engine platform. In addition, the level of provision of ecosystem services was estimated by applying the provision of ecosystem services index (IPSE). During the years of study, in general, differences in annual ET between the two coverages were low, between 8 and 33mm. The annual and monthly white sky albedo were higher and variable in croplands. Both covers presented similar patterns in the intra-annual dynamics of the NDVI and its descriptors (NDVImax - NDVImin) and their dates of occurrence. The natural cover would have a maximum photosynthetic activity in higher soil moisture periods (February - April and September - December). Grasslands would have a higher capacity to provide ecosystem services (IPSE), since they produce more photosynthetic activity with less seasonality, in contrast to croplands that have higher seasonal dynamics. The methodology used has advantages over traditional methods, since the use of remote sensing data allows a first characterization, monitoring and comparison between land use coverages.

Keywords: evapotranspiration, albedo, NDVI, IPSE, remote sensing

1. INTRODUCCIÓN.

En regiones que presentan balances hídricos negativos (la evapotranspiración potencial mayor a la precipitación), las zonas escarpadas son importantes por el escurrimiento que generan (Viviroli & Weingartner, 2004). La cantidad de escurrimiento producido por unidad de área y en cierto intervalo de tiempo se conoce como rendimiento hídrico (l.s-1.km-2). La variación del rendimiento hídrico implica un aumento o disminución en la alimentación y permanencia de cursos hídricos tanto por escurrimiento superficial como por drenaje profundo, aún en climas áridos (Belesaca & Peláez, 2018; Jobbágy et al. 2013). El rendimiento hídrico en cuencas de topografía accidentada no sólo depende del clima y la topografía, sino también de la cobertura vegetal nativa que contribuye a la disminución de la pérdida de humedad del suelo, la absorción de la radiación solar y la captura el agua que ingresa al sistema (Cortés et al. 2014). Los cambios en la vegetación y/o uso de suelo pueden producir transformaciones hidrológicas. Estas transformaciones no solo afectan la provisión de agua para consumo humano, industrial y agrícola, sino también la regulación de crecientes e inundaciones (Jobbágy et al., 2013).

Los beneficios que la presencia de cobertura vegetal nativa aporta a la vida humana y al desarrollo de actividades productivas se conocen como servicios ecosistémicos (SE). Cuantificar, valorar y analizar la dinámica de los SE contribuye al ordenamiento territorial, a evaluaciones ambientales estratégicas, compensaciones por carbono y pago por servicios ambientales. Existen diversos marcos de análisis para su identificación, cuantificación y mapeo ligados al estudio de las diferentes coberturas/usos del suelo. Los más conocidos son InVEST (Valuación Integral de Servicios Ecosistémicos y Compensaciones) y ECOSER (Protocolo colaborativo de evaluación y mapeo de servicios ecosistémicos y vulnerabilidad socio-ecológica para el ordenamiento territorial) (Milkovic et al., 2016; Pacha et al., 2014). La desventaja del uso de InVEST y ECOSER radica en el tiempo de procesamiento, necesidad de amplias bases de datos ambiental-productivo, altos costos de operatividad y, además, no incorporan la representación espacial de los resultados (Milkovic et al., 2016; Pacha et al., 2014; Rositano & Ferraro, 2017). Paruelo et al. (2016) presentan un enfoque diferente para estimar y mapear SE relacionados con la dinámica del carbono y del agua a partir de datos de detección remota.

El presente trabajo busca establecer diferencias funcionales entre zonas de pastizal natural y cultivada en la cuenca alta del río Sauce Chico, en la provincia de Buenos Aires. Estas diferencias potenciales se caracterizaron a través de la capacidad evapotranspirativa del canopeo, el albedo y la estacionalidad de la fracción de radiación fotosintéticamente activa interceptada por la vegetación (fAPAR). Para ello se estimó el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), que además de caracterizar la fenología de la vegetación a lo largo del tiempo, permite calcular el nivel de provisión de SE. Asimismo se estimó el nivel de provisión de SE a través del, IPSE derivado de la dinámica intra anual del NDVI (Houspanossian, Nosetto & Jobbágy, 2013; Paruelo et al., 2016). A su vez y considerando que el área de estudio presenta sistemas agrícolas de secano, que se desarrollan bajo prolongados períodos de escasa precipitación (Torrero, 2009), se analizó la relación existente entre la dinámica pluvial y el funcionamiento ecosistémico de la cobertura vegetal.

2. OBJETIVOS

2.1. General:

- Analizar las diferencias en el funcionamiento de los principales tipos de cobertura de suelo (cultivos agrícolas vs. pastizal natural) predominantes en la cuenca alta del río Sauce Chico y la provisión de servicios ecosistémicos.

2.2. Específicos:

- Describir y analizar la variación inter e intra anual de la evapotranspiración, el albedo y el NDVI en los dos tipos de cobertura durante el periodo enero 2001-diciembre 2017 para establecer diferencias funcionales.
- Caracterizar los cambios de IPSE para establecer el nivel de provisión de SE.
- Relacionar la evapotranspiración, el albedo, NDVI y el IPSE de cada cobertura con la precipitación a lo largo del tiempo.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Área de estudio

La cuenca alta de río Sauce Chico está localizada en la región Pampeana, en el suroeste de la Provincia de Buenos Aires. Se extiende por los partidos de Saavedra, Tornquist y Coronel Suarez. Tiene una superficie de 365,61 km^2. La divisoria de aguas está determinada por las Sierras Australes de Ventania y el cierre de cuenca está dado por

la intersección del curso principal con la ruta provincial 33. Presenta elevaciones entre 254 a 1010 msnm, con valles y planicies que facilitan el transporte del escurrimiento generado en los cordones serranos Curamalal, Bravard y Ventania, a través de pequeños arroyos que conforman el río Sauce Chico (Albouy & Bonorino, 1997; Gaspari, 2007; Torrero, 2009).

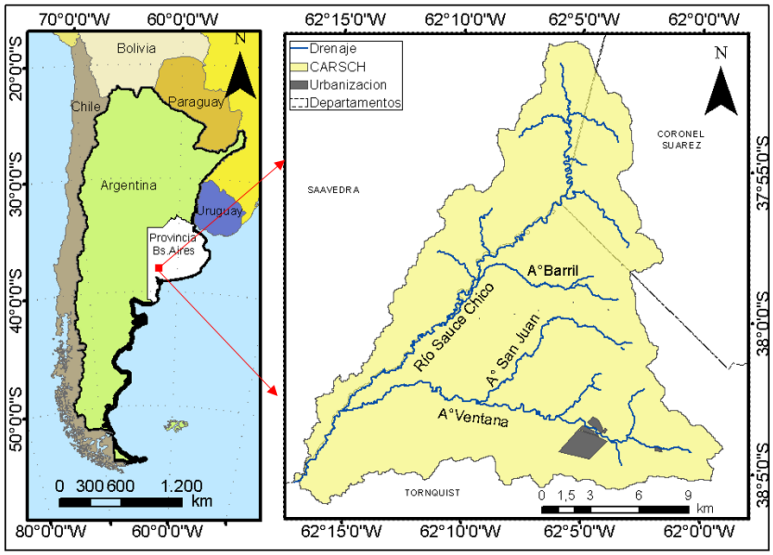


Figura 1. Ubicación de la Cuenca del Arroyo Sauce Chico (CARSH).

El clima del área es semiárido, varía entre templado y subhúmedo seco, con una temperatura media anual entre 14-16°C. Febrero se considera el mes más cálido (temperatura de hasta 38,4°C) y julio el más frío (valor máximo de 10° y mínimo de 2°). La ocurrencia de heladas es frecuente entre abril-septiembre, con valores inferiores a los 0°C. Los principales tipos de suelo presentes son argiudoles, hapludoles y haplustoles. La variabilidad pluvial interanual promedio es 739,1 mm, con máximos de 1100 mm y mínimos de 300 mm (Díaz Gómez et al., 2017).

3.2.Principales tipos de cobertura

La cobertura vegetal natural de Sierra de la Ventana presenta más de 400 taxones vegetales nativos con endemismos. Los diferentes complejos de vegetación natural se distribuyen en 3 ambientes geo-edafológicos (Figura 2) definidos por Frangi & Bottino, (1995) con base en la altitud, sustrato suelo-roca, orientación de ladera y pendiente.

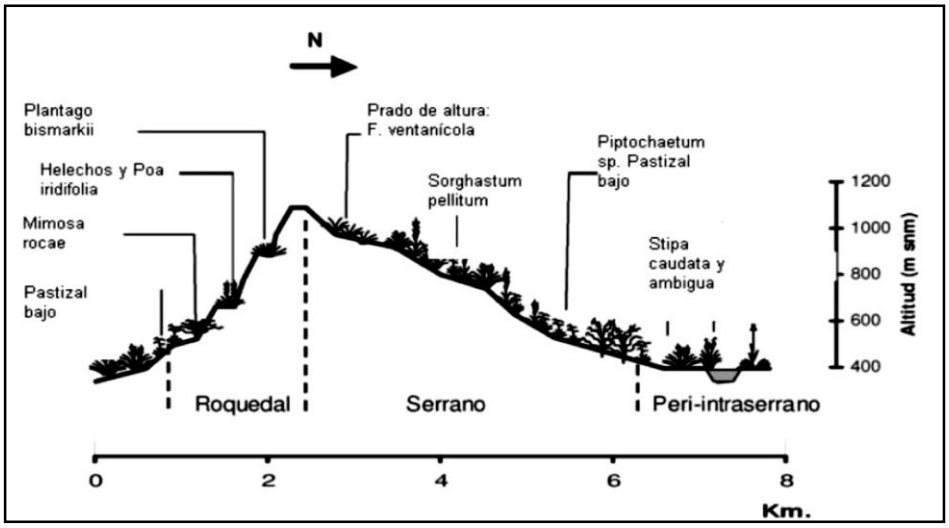


Figura 2. Ambientes terrestres y comunidades vegetales de Sierra de la Ventana
Fuente: Lizzi et al., (2007)

Los ambientes terrestres representados en la Figura 2, presentan las siguientes características:

- **Roquedal:** Se encuentran roquedales asoleados que miran hacia el sur en altitudes intermedias y con escaso suelo. Se puede hallar *Plantago bismarcki* (pino plateado) que es un arbusto sin parentesco con los pinos, y mejor llamado llantén. En la cima de los cerros la vegetación es muy pobre, conformada principalmente por *Poa lanígera* un tipo de gramínea endémica de las sierras.
- **Serrano:** Presenta pendientes más abruptas con *Festuca* pampeana y *Festuca ventanicola* como especies predominantes, que crecen en suelos húmedos con humus, poco insolados, no pedregosos o roquedales planos, y gramíneas de interés forrajero. En las mesetas serranas de pendientes suaves prosperan praderas de césped bajo y denso.
- **Peri-intraserrana:** Corresponde a las planicies y lomadas suaves. La vegetación está constituida por hierbas perennes xerófilas, donde predominan especies nativas de la estepa pampeana de genero *Stipa,* como *S.brachychaeta, S.dusenii, S.trichotoma, S. caudata* (pasto puna dulce) y *S. ambigua* (paja vizcachera); consideradas como pasto muy duro de poco valor forrajero; y *Sorghastrum pellitum* que es una gramínea C_4, perenne y nativa, apreciada por herbívoros y susceptible a pastoreo. Sobre los cursos de agua desde sus nacientes se observa una vegetación más higrófila (zonas de abundante agua), localizada en zonas de torrente y manantiales.

Los pastizales se extienden sobre todos los ambientes terrestres, pero principalmente están desarrollados en las zonas peri-intraserrana. Según Lizzi (2004), los pastizales presentan baja estacionalidad y al estar conformados por distintas especies de gramíneas, algunas de ellas importantes para el pastoreo, presentan valores mayores de NDVI en primavera con una leve caída en verano y otro pico en otoño. Las zonas no modificadas tienen una estacionalidad menos pronunciada con picos en octubre y otoño.

En la actualidad varias unidades de vegetación natural han sido modificadas por el pastoreo, fuego o ambos, provocando distintos grados de arbustización. En ciertos casos ha sido reemplazada por praderas implantadas, cultivos de granos o forestaciones con especies exóticas (Lizzi, 2004) (Figura 3). De acuerdo con Marini (2008) en el periodo 1998-2007 en el sistema de Ventania existió un incremento de la superficie agrícola principalmente por cultivos y verdeos de verano (maíz, girasol, soja), seguido por cultivos de invierno (trigo).

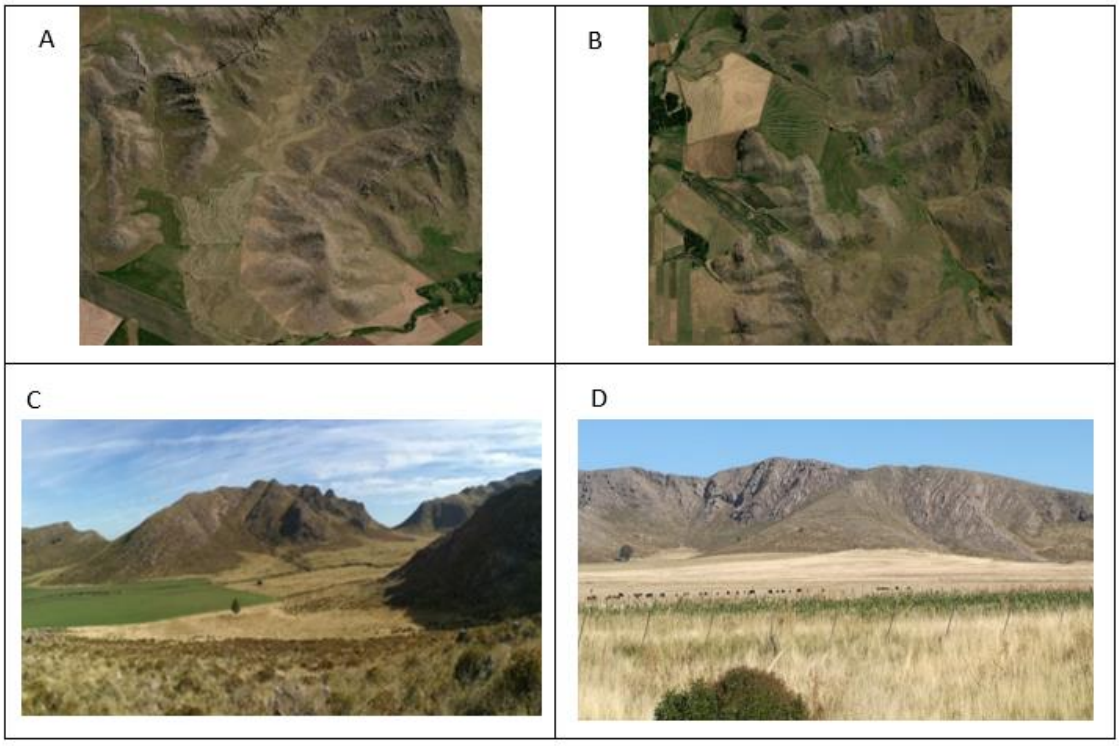


Figura 3. Avance de la frontera agrícola sobre la zona Peri-intraserrana de la cuenca alta del río Sauce Chico. Fuente: Reconocimiento a partir de imágenes satelitales de Google Earth (A y B) y fotografías tomadas el 11/04/2019 (C y D).

3.3.Precipitación

A 140 m del área de estudio se localiza la estación meteorológica del Servicio Meteorológico Nacional de Tornquist. La misma no dispone de datos completos de precipitación dentro del período de estudio, generando faltantes mensuales. Una alternativa para la medición de la precipitación es el uso de estimaciones de lluvias satelitales (SPEs), que permiten mejorar la comprensión espacio – temporal de los eventos de precipitación (Satgé et al. 2019) y que además son de libre acceso (Michaelides et al. 2009).

Para completar la serie mensual de precipitación de la estación meteorológica para el período 2001-2017, se utilizaron las estimaciones satelitales provenientes del satélite TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) y los datos mensuales de las estaciones meteorológicas vecinas a la cuenca en estudio (en un radio de aproximadamente 75 km) de las localidades de Coronel Pringles, Coronel Suárez y Bordenave, (Servicio Meteorológico Nacional, Bolsa de Cereales de Bahía Blanca, e Instituto de Clima y Agua de INTA (http://siga.inta.gob.ar/#/). La ecuación de ajuste aplicada para determinar la precipitación estimada fue: Precipitación estimada = $(-0{,}14 + 0{,}92 * \sqrt{\text{SPEs}})^2$; con un coeficiente de correlación de Pearson (r) de 0,9. En las Figuras 4 y 5 se presentan los datos logrados de precipitación media anual y mensual, respectivamente, de la estación de Tornquist.

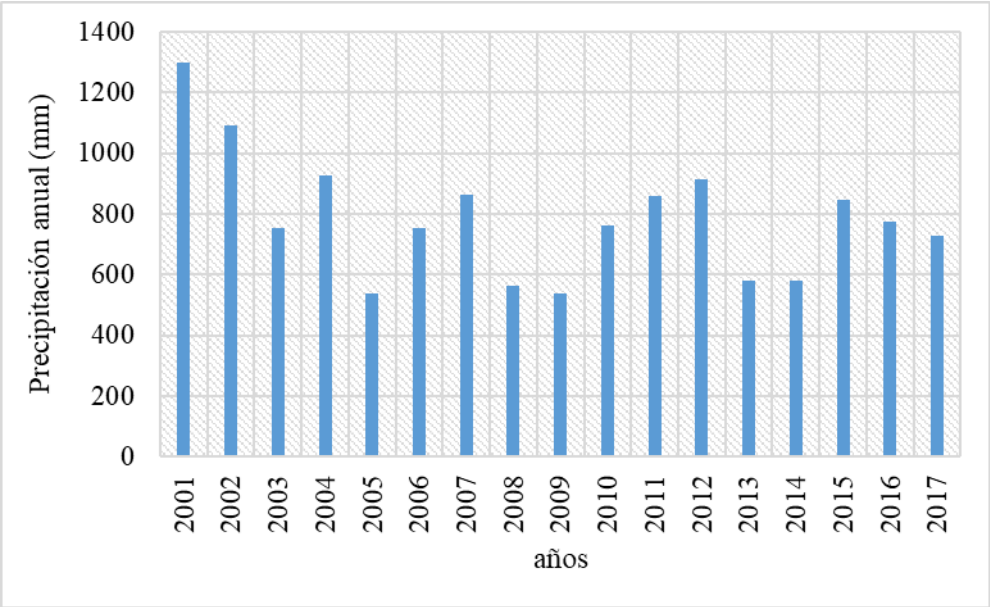


Figura 4. Precipitación anual acumulada correspondiente al periodo 2001-2017.

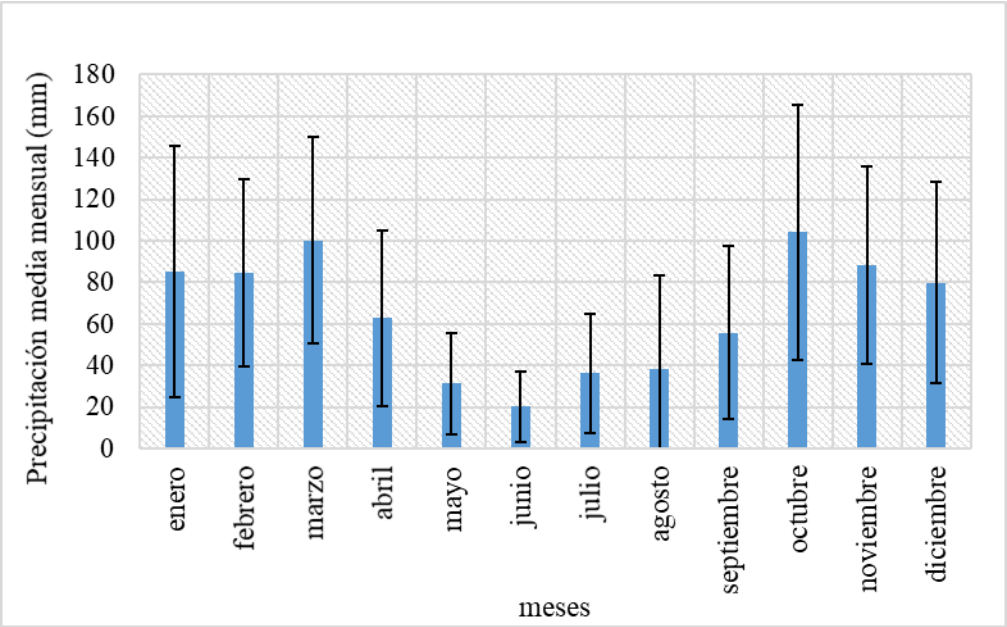


Figura 5. Precipitación media mensual desde 2001 a 2018. Las barras corresponden a +/-1 error estándar.

Durante el período de estudio la precipitación acumulada anual desde 2001 al 2017 presenta una tendencia decreciente no significativa (test no paramétrico de Man-Kendall y nivel de significancia del 5%), la media anual es de 786,83mm. Las precipitaciones mínimas acumuladas se corresponden al año 2005 y las máximas en el año 2001, con valores de 538,2mm y 1300,60 mm*año^{-1}, respectivamente (Figura 4). El período húmedo se extiende de septiembre – abril, y la fase seca o de menor precipitación entre mayo-agosto. Los meses de menor variabilidad interanual son mayo, junio y julio; mientras que los demás presentan una variación estándar entre 40-88mm (Figura 5). Estos registros de precipitación resultan claves para evaluar la dinámica funcional de las coberturas vegetales y su relación con los indicadores estudiados en este trabajo final, como ser la ET, albedo, NDVI e IPSE.

3.4. Base de datos

Para establecer los sitios de muestreo de cobertura vegetal y uso del suelo, en mayo de 2017, se relevaron a campo 35 puntos de control, con GPS. En estos puntos se estableció el tipo de cobertura/uso del suelo. En este relevamiento se tuvo en cuenta que los puntos de referencia se ubicaran en el centro de zonas con cobertura más o menos homogénea en un radio aproximado de 500m, de forma que los valores de las variables en análisis caractericen la cobertura de interés

En gabinete, se relacionó la información obtenida de campo con los valores de índice normalizado de vegetación (NDVI) a nivel mensual para cada punto en el período 2001-2017 Para definir los puntos representativos de cada cobertura en el tiempo, se confirmó la continuidad de la cobertura mediante interpretación visual de imágenes de alta resolución. Este paso permitió filtrar aquellos puntos de control que cambiaron a campo natural durante el período de estudio. Finalmente, se seleccionaron 12 sitios de vegetación natural y 12 de cultivo que se muestran en la figura 6.

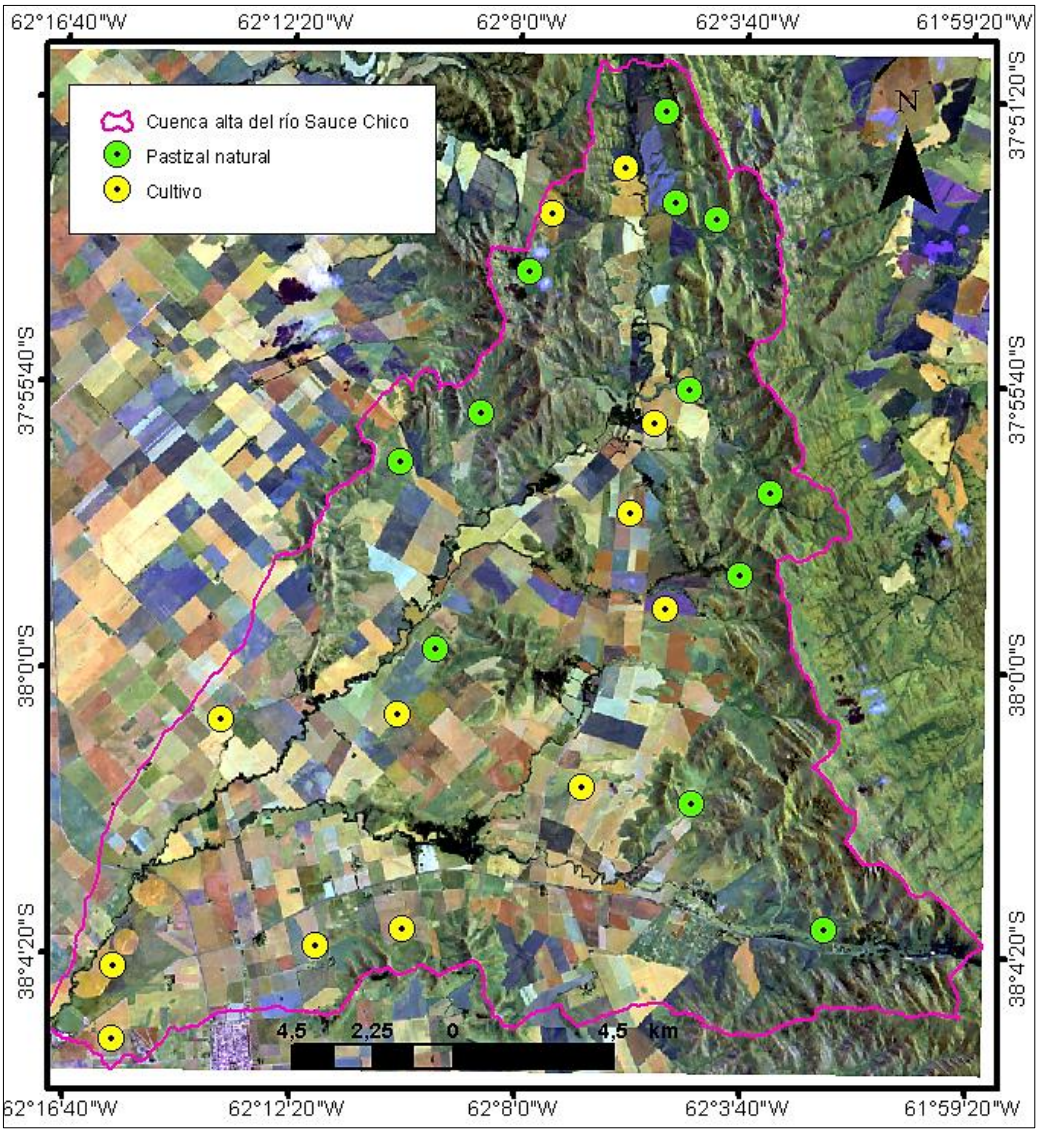


Figura 6. Sitios de estudio. Imagen proveniente de sensor LANDSAT8 2017/12/18 RGB652.

Debido al avance de la agricultura sobre zonas de pastizal natural, los puntos seleccionados se localizan en áreas peri-intraserranas, en altitudes comprendidas entre 365 y 556 msnm con pendientes de 1 a 29,4%; mientras que los puntos de cultivo están entre los 263 y 516 msnm y pendientes de 1 a 6%.

3.4.1. Series temporales de NDVI, Evapotranspiración y Albedo

El procesamiento de las series temporales de los productos del sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) permitió la conformación de bases de datos mensuales de NDVI, Evapotranspiración (ET) y albedo para el periodo enero 2001 – diciembre 2017, a través de la plataforma Google Earth Engine. Dicha plataforma permitió filtrar por fechas las colecciones de los productos y reducir la resolución temporal a compuestos mensuales mediante el promedio de los valores en el caso de NDVI y albedo, y la suma en el caso de la ET. De esta forma, se obtuvo un valor mensual de cada una de las variables, correspondientes al período estudiado. A continuación, se describe cada uno de los productos procesados.

- **NDVI (Índice De Vegetación de Diferencia Normalizada).** Es un índice espectral que estima la presencia y condición de la vegetación. Para ello se basa en dos aspectos claves del comportamiento espectral de los tejidos fotosintéticos que son 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).

  Los valores de NDVI se obtuvieron del producto MOD13Q1.006, proveniente de imágenes tomadas a bordo del satélite Terra, información compuesta de 16 días y resolución espacial de 250m. A partir de la curva anual o estacional de NDVI se calcularon los atributos funcionales indicadores de la productividad, estacionalidad y fenología de las coberturas analizadas según Paruelo (2008), por medio de:

  - NDVImax y NDVImin: que indican el máximo y mínimo valor de NDVI, respectivamente;
  - NDVI-I (integral): corresponde al promedio anual del NDVI y es un indicador de la productividad primaria neta aérea;
  - Rango relativo (Rrelativo): es un indicador de la estacionalidad y se calcula como el cociente entre el rango (NDVImax – NDVImin) y el NDVI-I;
  - NDVIcv: correspondiente al coeficiente de variación intra anual.

- **Evapotranspiración (ET).** Se determina a través del producto MOD16A2 versión 6, compuesto de 8 días de datos, con una resolución espacial de 500m. El producto MODIS está compuesto por cinco bandas, de las cuales se utilizó la evapotranspiración real expresada en mm*8días-1. El algoritmo utilizado para la recopilación de datos se basó en la ecuación de Penman-Monteith, que incluye entradas de datos de reanálisis meteorológico diarios, junto con datos derivados de teledetección, como las propiedades de la vegetación, y la cobertura del suelo.

- **Albedo.** Se cuantifica a través del producto MCD43A3 V6, que proporciona información cada 16 días, de resolución espacial de 500 m. En este caso se usó la banda correspondiente a "Albedo_WSA_shortwave", que proporciona valores de reflectancia bihemisférica (albedo de cielo blanco) de superficie, con un ancho de banda de onda corta.

- **Índice de Provisión de Servicios Ecosistémicos IPSE.** Los atributos funcionales de NDVI utilizados para definir el IPSE anual fueron el NDVI-I que es el indicador de la absorción de la energía fotosintéticamente activa absorbida por la cobertura vegetal, y el coeficiente de variación intra-anual del NDVI (NDVIcv) como descriptor de la variabilidad. Para su determinación se aplicó la ecuación 1.

$$IPSE = NDVI\text{-}I * (1 - NDVIcv) \qquad \text{(Ecuación 1)}$$

3.5. Análisis Estadístico

Mediante el programa STATGRAPHICS® se realizó un análisis de varianza ANOVA con un nivel del 95% de confianza para detectar diferencias estadísticas de la funcionalidad de las dos coberturas de suelo definidas por la ET, el albedo, el NDVI y sus atributos y el IPSE. Además, se realizó la correlación entre las distintas variables, para evaluar los patrones de asociación entre variables funcionales, tanto a nivel mensual como anual; para este caso se calcularon los siguientes estadísticos:

- Coeficiente de determinación (R^2), determina la calidad del modelo lineal e indica la proporción de variación de los resultados que pueden ser explicados por el modelo. El valor del coeficiente oscila entre 0 y 1, mientras más cerca de la unidad mayor es el ajuste del modelo a la variable de interés.

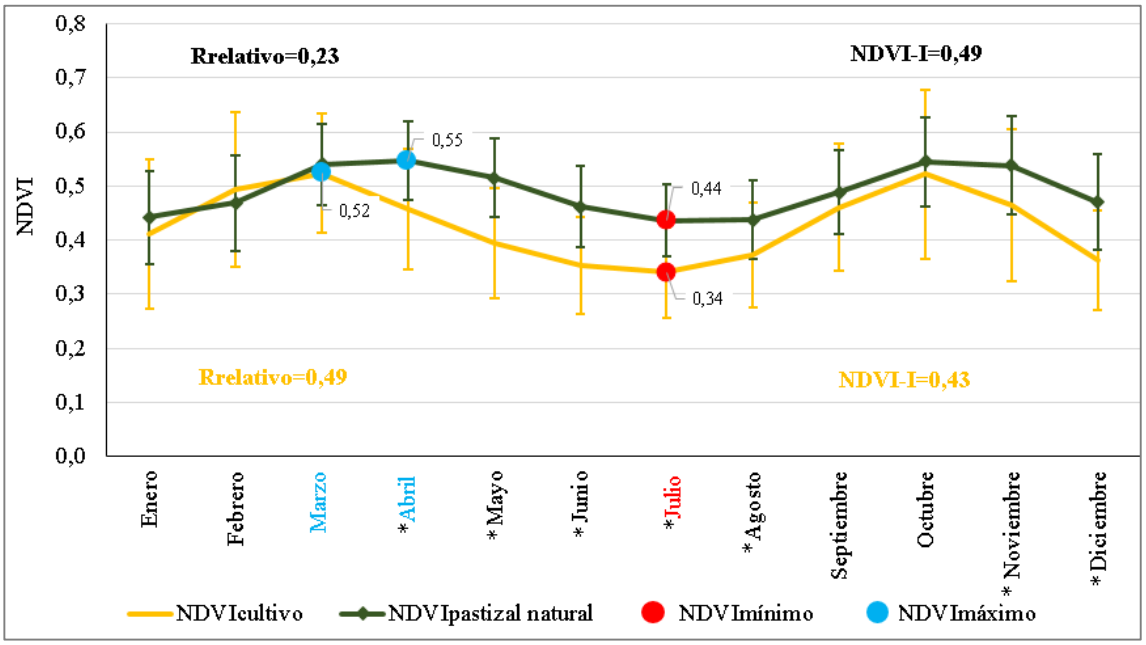
- Valor – P, determina el nivel de significancia de la relación entre las variables. Con un nivel del 95 % de confianza, lo cual significa que existe un riesgo de 5% de concluir que existe una relación entre las variables cuando no existe una real.

4. RESULTADOS

4.1. Índice De Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

A escala intra-anual, el NDVI promedio mensual del pastizal natural fue mayor al cultivo y presentó menor variación en rango y estacionalidad (Figura 7). Esta diferencia está dada por los descriptores conocidos como integral anual de NDVI (NDVI-I), rango relativo (Rrel) y coeficiente de variación (NDVIcv). En el caso del NDVI-I y Rrel esta diferencia se consideró significativa (valor de P = 0), a diferencia del NDVIcv (valor P=0,71).

Los sitios analizados, en promedio, mostraron variaciones de NDVI mensual entre 0,44 (NDVImin) y 0,55 (NDVImax) para pastizal natural y entre 0,34 (NDVImin) a 0,52 (NDVImax) para zonas de cultivo. Aunque el valor de NDVImax fue mayor en la primera cobertura esta diferencia no fue significativa (P = 0,29), contrario a lo que sucede con el NDVImin. A inicio de otoño y primavera se presentaron dos máximos relativos en las coberturas analizadas y el mínimo NDVI en invierno.



*Meses que presentan diferencias estadísticamente significativas.

Figura 7. Promedio mensual del índice espectral NDVI para cultivos y pastizal natural, dentro del período enero 2001 – diciembre 2017. Las barras corresponden a +/-1 error estándar.

En la Figura 8 se observa que el pastizal natural tuvo mayor actividad fotosintética y menor variabilidad entre los años de estudio respecto a los cultivos, esta diferencia fue estadísticamente significativa (P=0) tanto para NDVI-I como para NDVIcv. El NDVI-I varió entre 0,42 (2009) y 0,54 (2014) para pastizal natural y de 0,36 (2009) a 0,49 (2001) para cultivos. La variabilidad anual del NDVI expresada a partir del NDVIcv, presentó un valor mínimo de 0,08 en el año 2017 y un máximo de 0,26 en el 2008 para pastizal natural, mientras que en los cultivos estos valores fueron de 0,11 en el 2006 y 0,30 en el 2008. En el 2001, 2006 y 2017 se observó mayor NDVI-I en cultivos y menor NDVIcv en las dos coberturas, a la vez que la precipitación anual fue cercana y sobre el promedio. A excepción del año 2014 que fue de baja precipitación y el pastizal natural presentó su máximo NDVI-I.

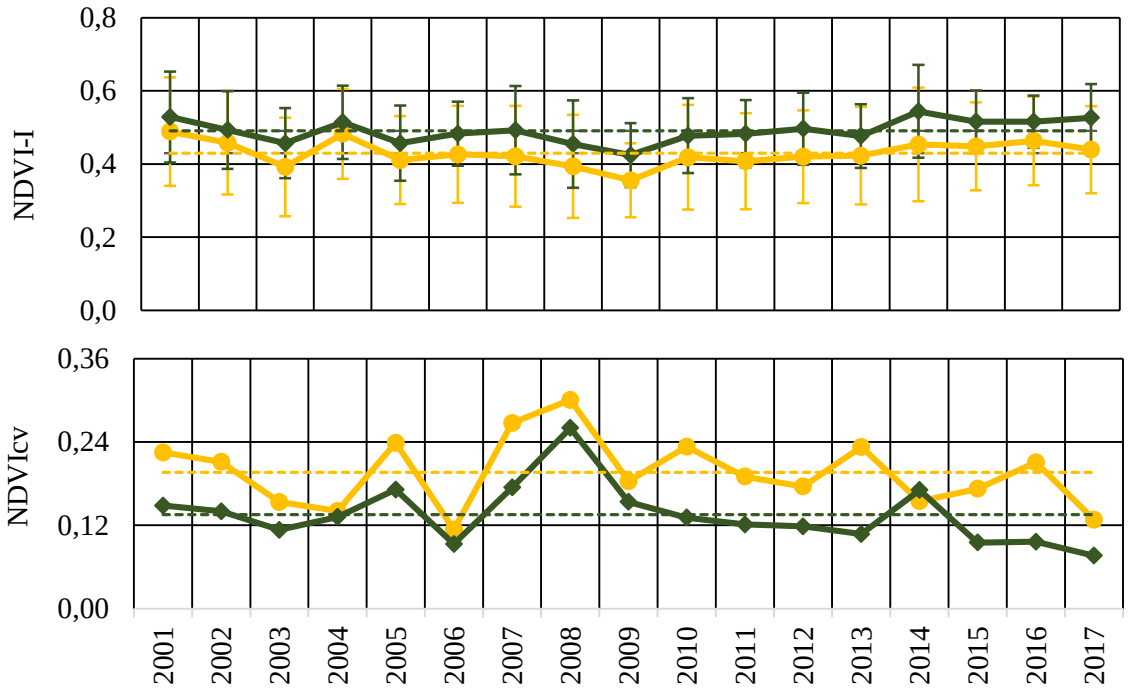


Figura 8. NDVI promedio anual (NDVI-I) y $NDVI_{CV}$ en pastizal natural (—◆—) y cultivo (—●—), dentro del período enero 2001 – diciembre 2017. Las barras corresponden a +/-1 error estándar.

Al relacionar la precipitación con la variabilidad del NDVI, se observó que tanto a escala mensual y anual la cobertura cultivo tiene buena correlación significativa, R^2 de

0,57 (valor-P de 0,0045) y 0,42 (valor-P de 0,005) respectivamente. Situación contraria presentó la cobertura de pastizal natural que en ambos casos presentó baja correlación, no significativa de 0,20 (valor-P de 0,15) y 0,23 (valor-P de 0,053) (Figura 9).

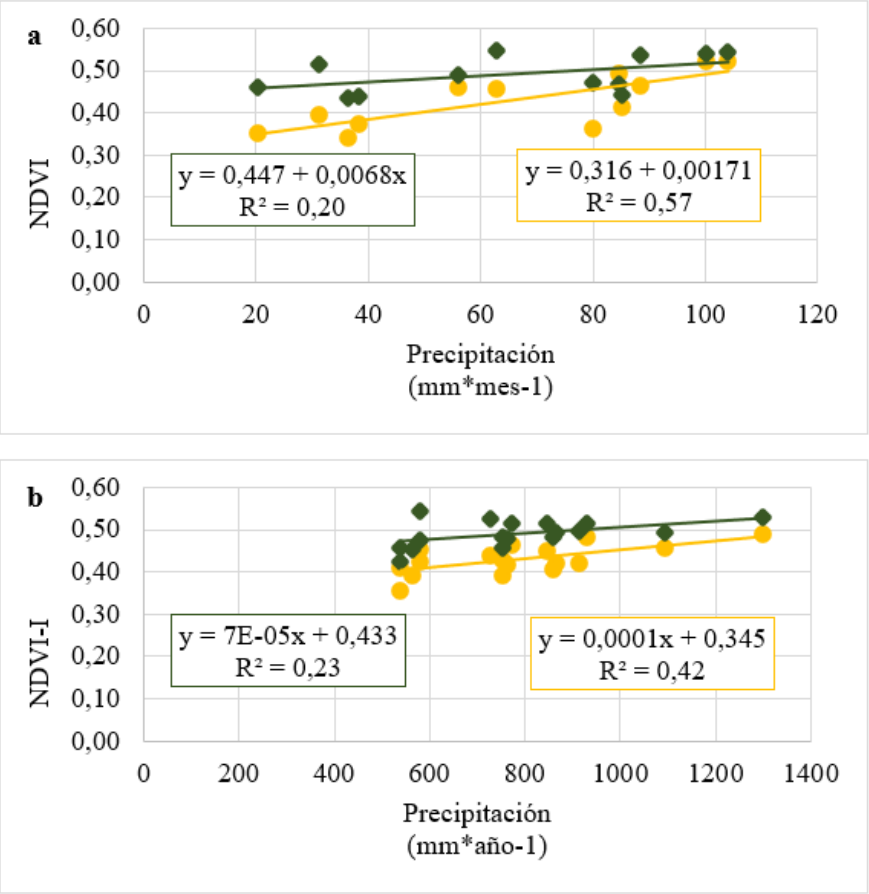


Figura 9. Correlación entre precipitación y NDVI de pastizal natural (◆) y cultivo (●). a) escala mensual; b) escala anual.

4.2.Evapotranspiración (ET)

La evapotranspiración promedio mensual de la cobertura pastizal natural superó a los cultivos (Figura 10). Esta diferencia no es significativa ya que presenta un valor P de 0,41. En verano existieron diferencias estadísticamente significativas entre las coberturas de análisis (P<0,05) y un incremento en sus valores. El resto del año estas variables disminuyeron principalmente en otoño e invierno. En febrero que es el mes más caluroso la evapotranspiración de los cultivos (49,15 mm) superó al pastizal natural (38,73 mm). En otoño e invierno sucedió lo opuesto, pero esta diferencia entre coberturas no fue significativa (P=0,3 - P=0,7) y varió entre 0,64 y 3,09 mm.

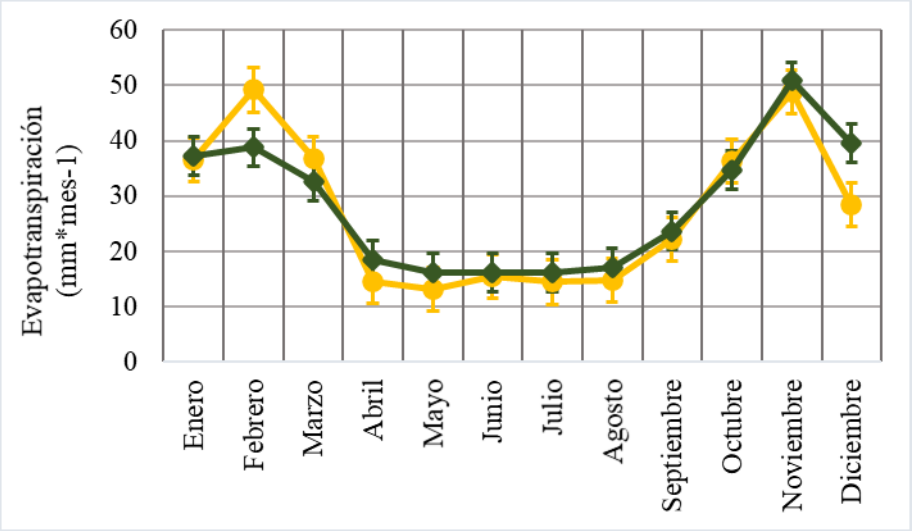


Figura 10. Evapotranspiración promedio mensual de pastizal natural (—◆—) y cultivo (—●—). Las barras corresponden a +/-1 error estándar.

La evapotranspiración anual fue mayor en el pastizal natural (341mm*año-1) versus cultivos que fue de 331 mm*año-1 (Figura 11). Estas diferencias entre las coberturas no fueron significativas ya que el valor P fue de 0,41. Durante los años de estudio las diferencias de ET anual entre las dos coberturas fueron bajas de 1 a 33 mm, con excepción del año 2017 en el que la diferencia de 43 mm fue estadísticamente significativa (P = 0,0230).

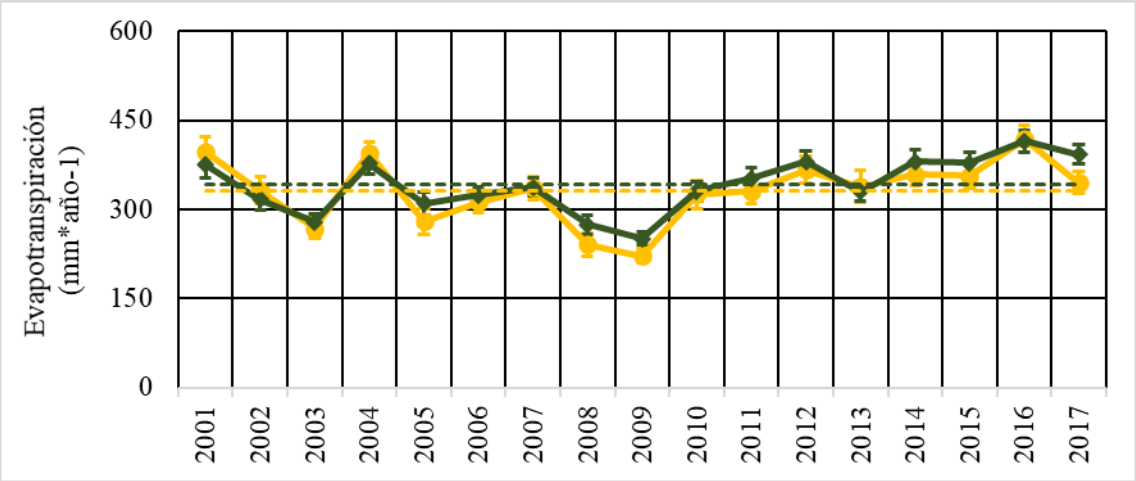


Figura 11. Evapotranspiración acumulada anual de pastizal natural (—◆—) y cultivo (—●—). Las barras corresponden a +/-1 error estándar.

A nivel mensual el 0,7 de la variabilidad de la evapotranspiración fue explicada significativamente (valor -P menor a 0,05) por la precipitación en las dos coberturas, mientras que a escala anual fue apenas el 0,16 en pastizal natural con un valor-P de 0,12

y en cultivos de 0,34, siendo en este caso estadísticamente significativo (valor-P de 0,014) (Figura 12).

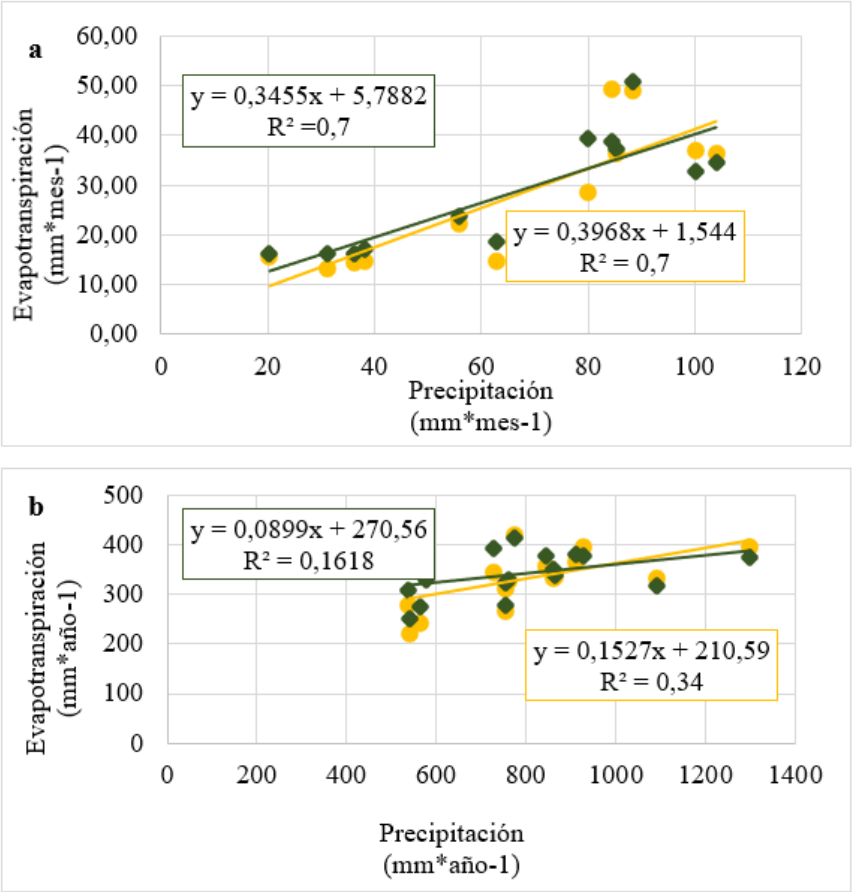


Figura 12. Correlación entre precipitación y evapotranspiración de pastizal natural (◆) y cultivo (●). a) escala mensual; b) escala anual.

4.3.Albedo

A escala mensual el albedo en cultivos fue significativamente superior al que presentó el pastizal natural (P= 0,006). Los valores de albedo promedio mensual presentaron diferencias visibles, significativas en primavera y verano, en otoño e invierno esta diferencia disminuyó. El máximo albedo de 0,19 para cultivo y 0,17 para pastizal se produjo en los meses de verano, mientras que el mínimo valor de albedo de 0,15 para las dos coberturas se presentó en julio.

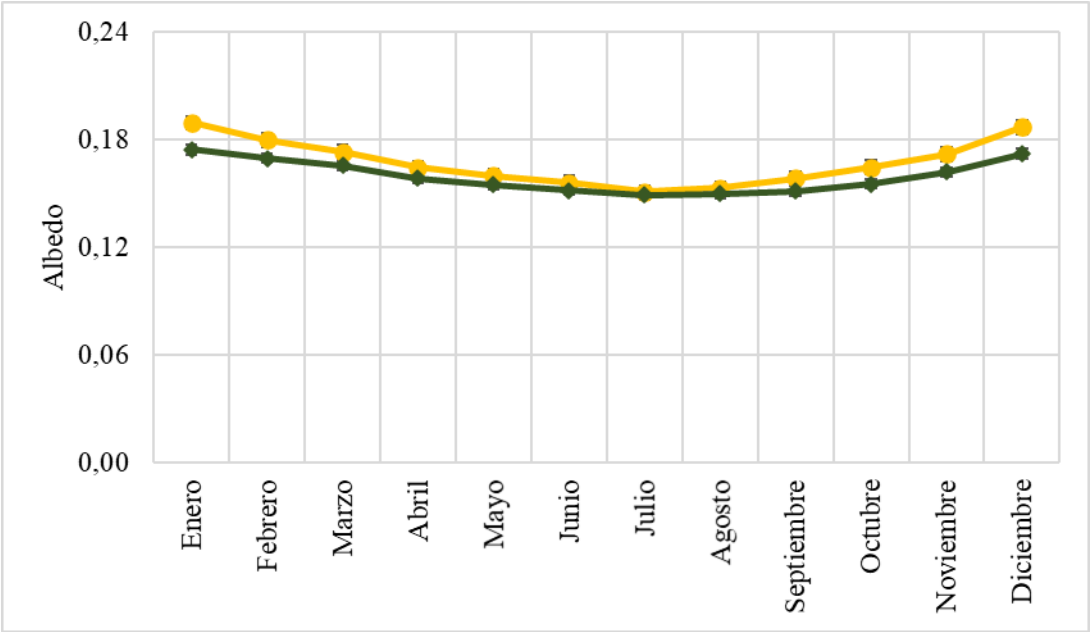


Figura 13. Albedo promedio mensual de pastizal natural (—◆—) y cultivo (—●—). Las barras corresponden a +/-1 error estándar.

El albedo promedio anual fue significativamente mayor en cultivos (valor P de 0,0002). Las áreas de pastizal natural presentaron un valor promedio anual de albedo expresado en el rango entre 0,157 y 0,169; mientras para cultivo fluctúa entre 0,168 y 0,178.

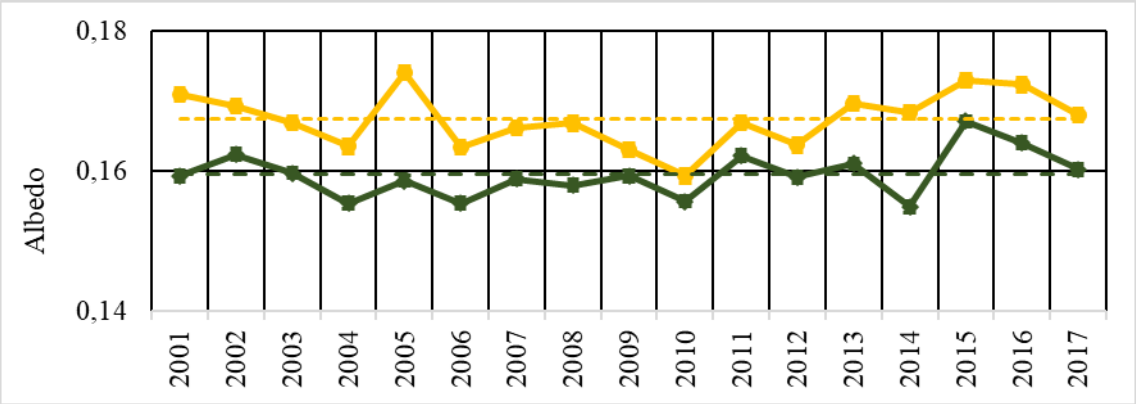


Figura 14. Albedo promedio anual de pastizal natural (—◆—) y cultivo (—●—). Las barras corresponden a +/-1 error estándar.

Al correlacionar el albedo con la precipitación los valores de R^2 a escala mensual son 0,45 (valor-P de 0,018) para pastizal natural y 0,5 para cultivos (valor-P de 0,009), en ambos casos la correlación lineal es significativa. A escala anual los valores de R^2 son

bajos y no significativos para las dos coberturas, lo que indica que no hay relación entre el albedo y la precipitación durante los años de estudio.

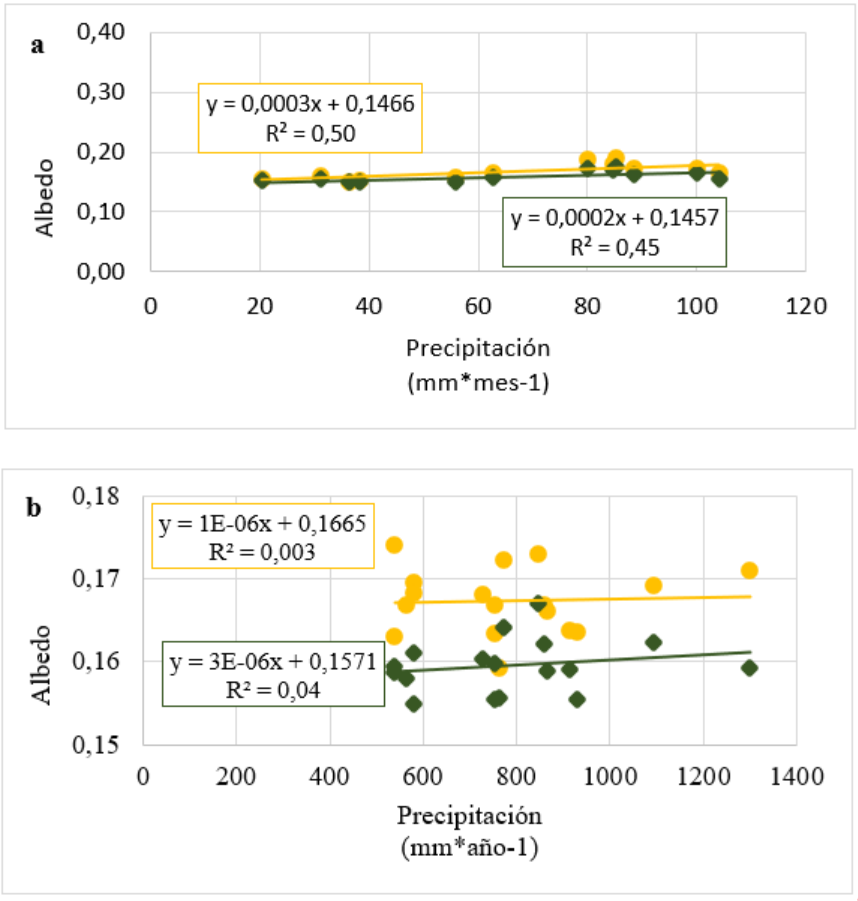


Figura 15. Correlación entre precipitación y Albedo de pastizal natural (◆) y cultivo (●). a) escala mensual; b) escala anual.

4.4.Índice de Provisión de Servicios Ecosistémicos IPSE

El IPSE anual varió entre 0,28 y 0,42 para cultivos y de 0,34 a 0,49 para cobertura natural. El valor máximo se registró en el año 2004 para cultivos y 2017 para pastizal natural, esos años la precipitación anual registra valores muy por encima de la media y el valor mínimo fue en el 2008 que tuvo baja pluviosidad.

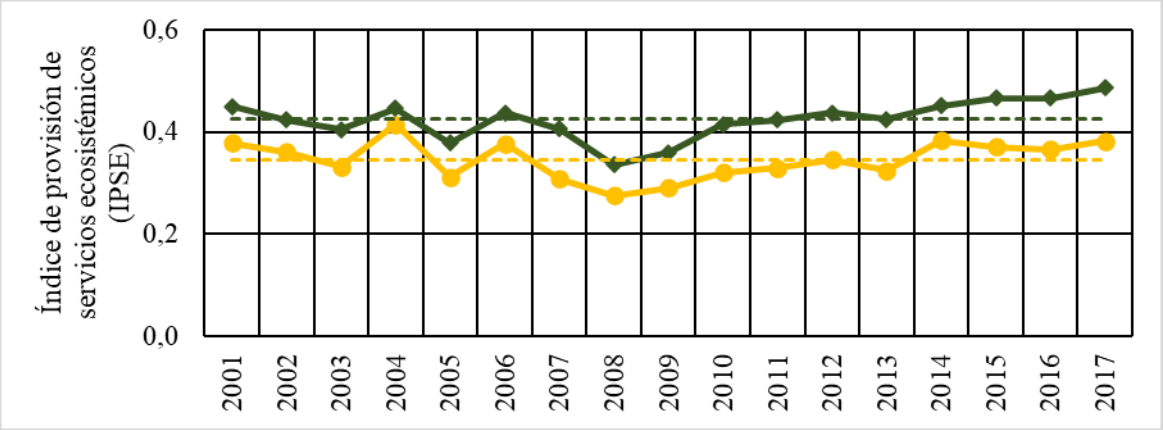


Figura 16. IPSE de pastizal natural (—◆—) y cultivo (—●—).

Al analizar la relación entre el IPSE y la precipitación acumulada anual, las dos coberturas presentaron un R^2 bajo, que indicó la falta de correlación entre los valores de IPSE y precipitación anual (Figura 17). Lo contrario se observó al correlacionar el IPSE con la evapotranspiración que además de presentar valores de R^2 de 0,58 y 0,78, la correlación fue significativa ($P<0.05$) (Figura 18).

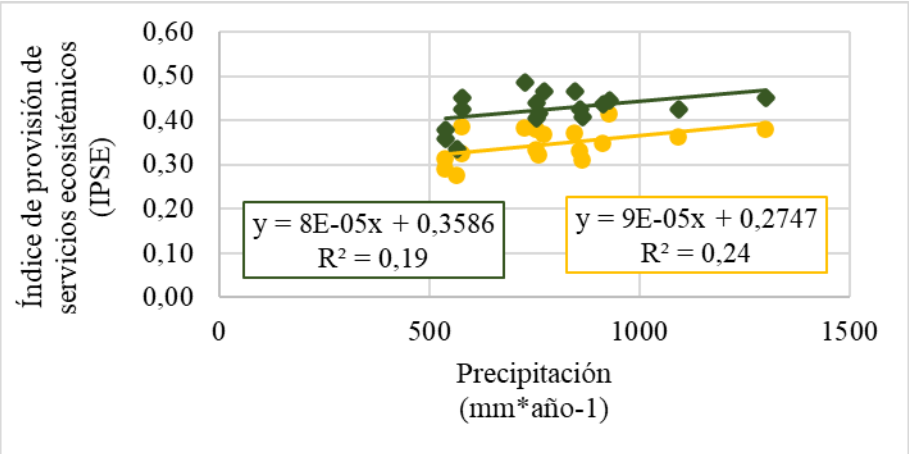


Figura 17. Correlación entre precipitación anual e IPSE de pastizal natural (◆) y cultivo (●).

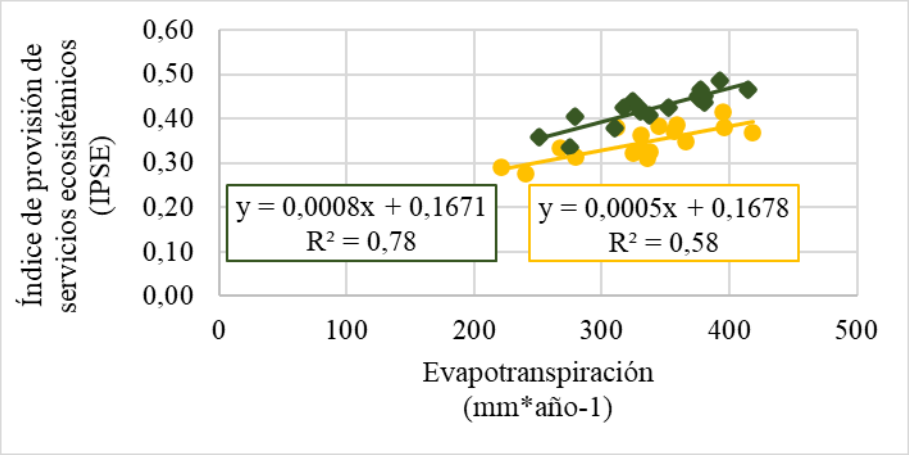


Figura 18. Correlación entre evapotranspiración anual e IPSE de pastizal natural (◆) y cultivo (●).

5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La variación intra-anual de los parámetros analizados presentaron una fuerte correlación con la precipitación, es así que en primavera y verano como consecuencia de importantes precipitaciones y temperaturas que promueven la transpiración y transferencia radiativa (Torrero, 2009), se produce la maduración y floración de los cultivos y de muchas especies presentes en el pastizal. En otoño e invierno que son periodos de sequía invernal con bajas temperaturas se produce el descenso importante en la actividad fotosintética y como consecuencia del NDVI, esto se debe a que los lotes de cultivo se encuentran laboreados o con rastrojo, mientras que en los pastizales existen especies que son resistentes a las condiciones de baja temperatura y precipitación disminuyendo la actividad fotosintética y evapotranspiración (Fundación Universidad Nacional del Sur, 2011). Esta dinámica es coincidente con la marcha estacional de NDVI representada por Lizzi (2004) para los principales pastizales de Sierra de la Ventana y por Marini (2008) en su caracterización de los principales cultivos que se realizan en el sistema serrano.

La estacionalidad de la respuesta espectral de las variables analizadas es similar en las dos coberturas. Esta coincidencia se debe a que el cultivo que se realiza es de secano y en el caso de las áreas de pastizal natural se debe a la variedad de especies, como el *S. pellitum* de crecimiento primavero-estival y el *S. caudata* de crecimiento otoño-invierno-primaveral. La estacionalidad marcada que se observa en las áreas de pastizal natural de

referencia, se debe a su accesibilidad al pastoreo que marca los picos y valles estivales (Lizzi, 2004).

El pastizal natural presenta una disminución de la evapotranspiración en meses y años de baja precipitación, respecto al balance de energía presenta menor albedo y contribuye en los microclimas resultantes de la topografía del lugar. En concordancia con los indicado por Pérez (1995), Torrero (2009) y Nosetto et al.(2012), la presencia de pastizal natural en las zonas de recarga tiene un rol importante en el balance hidrológico ya que su permanencia reduce la velocidad del agua, favoreciendo a la infiltración y disminuye el escurrimiento y generación de sedimentos. La situación ambiental descrita condiciona el desarrollo de la agricultura en áreas peri-intraserranas.

En referencia al balance de energía tomando como indicador el albedo, fue 2,41% más alto en cultivos a escala anual y 3,14% en primavera – verano. Estos resultados confirman los observado en otros trabajos llevados a cabo en la provincia de Córdoba (Houspanossian et al., 2013; Cabezas, 2015), en los que el pastizal presentó menor albedo que los cultivos. Los cambios en el albedo podrían inducir cambios significativos en el microclima según Wang & Davidson (2007). Considerando que lo microclimas en el área de estudio tienen mayor influencia sobre el ecosistema local que la variación climática regional (Frangi & Botitino, 1995; Lezzi et al., 2007; Marini 2008), el reemplazo y/o continua degradación del pastizal natural podría producir cambios en el balance energético de la superficie.

El Índice de provisión de servicios ecosistémicos (IPSE) es sensible a la funcionalidad de las coberturas analizadas. No solo por resultar de relacionar la absorción de la energía fotosintéticamente activa absorbida y su estacionalidad (Paruelo et al., 2016), sino por la correlación significativa que presenta con la evapotranspiración a escala mensual y anual. Los valores de IPSE fueron superiores en el pastizal natural que en los cultivos durante todo el periodo de estudio. Las áreas de pastizal natural tienen mayor capacidad de provisión de servicios ecosistémicos, ya que tienen baja estacionalidad, a diferencia de los cultivos que tienen periodos de siembra, cosecha, barbecho que inciden directamente en la dinámica de las ganancias de carbono

Los resultados mostrados en el presente trabajo se podrían considerar como preliminares, ya que los valores de las variables funcionales analizadas no son independientes entre sí, debido a la correlación que tienen en el tiempo. El uso de datos de teledetección posibilitó una primera caracterización, monitoreo y comparación relativa entre las coberturas, constituyendo así el primer trabajo de este tipo que se realiza en el área de estudio.

La metodología utilizada tiene ventajas sobre los enfoques tradicionales basados en características estructurales. La principal es que permite eliminar el problema de extrapolar datos puntuales a toda una región en base a patrones climáticos o sustrato sobre el cual crece la vegetación.

La principal limitante del presente trabajo fue al momento de seleccionar las áreas de referencia con características topográficas y edáficas similares que permitan realizar una comparación entre coberturas. Los cultivos se localizan en áreas de menor pendiente y suelos profundos, mientras que el pastizal natural ha quedado desplazado a suelos poco desarrollados en zonas de mayor pendiente entre las sierras con abundante roca expuesta. Estas condiciones incluso dificultaron la localización de pixeles completamente puros de pastizal natural. Por estas razones el presente trabajo muestra una comparación relativa del funcionamiento de las coberturas de cultivo y pastizal natural, y no una cuantificación de los efectos del cambio de uso en el suelo.

5. BIBLIOGRAFÍA:

Albouy, R., & Bonorino, G. (1997). Hidrogeología de la cuenca superior del río Sauce Chico, Sierras Australes, Provincia de Buenos Aires. *Asociación Geológica Argentina*, *52*. https://books.google.com.ar/books?id=R-A33RuUAiUC&pg=PA81&lpg=PA81&dq=albouy+sauces+chico&source=bl&ots=ZyYbi6jEr5&sig=ACfU3U1f6ga8sp_fIBhWHLUYzTQ83NlWcg&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwilkJ_k79LkAhUvIbkGHa4BDYQQ6AEwAHoECAkQAQ#v=onepage&q=albouy sauces chico&f=

Belesaca, K., & Peláez, K. (2018). *Análisis del rendimiento hídrico en cuencas de alta montaña en los Andes Ecuatorianos* [Universidad de Cuenca]. https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/31565/1/Trabajo de Titulación.pdf

Cabezas, L. (2015). *Efecto de los incendios sobre el funcionamiento de pastizales y forestaciones en las Sierras de Córdoba durante el período 2002-2015*. Universidad de Buenos Aires.

Cortés, S., Piovano, E., & Gurvich, D. (2014). Ecohidrología en cuencas de montaña sometidas a diferentes usos del suelo : presentación de un estudio que se está desarrollando en las Sierras de Córdoba. In INA (Ed.), *2do. Encuentro de Investigadores en Formaciòn de Recursos Hìdricos , 2014* (p. 9). https://www.ina.gob.ar/ifrh-2014/Eje3/3.12.pdf

Díaz Gómez, A., Gaspari, F., & Georgieff, S. (2017). *Aspectos morfométricos de cuencas subtropicales del Noroeste de Argentina*. *29*(1), 3–19.

Frangi, J., & Bottino, O. (1995). Comunidades Vegetales de Ventana, Provincia de Buenos Aires, Argentina. *Revista de La Facultad de Agronomía de La Plata*, *71*.

Fundación Universidad Nacional del Sur (FUNS). (2011). *Prefactibilidad de sistematizacion y aprovechamiento de la cuenca del rio Sauce Chico*.

Gaspari, F. (2007). *Plan de ordenamiento territorial en cuencas serranas degradadas utilizando sistemas de información geográfica (S.I.G.)* [Universidad Internacional de Andalucía sede Iberoamericana Santa María de la Rábida]. https://dspace.unia.es/bitstream/handle/10334/59/0031_Gaspari.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Houspanossian, J., Nosetto, M., & Jobbágy, E. G. (2013). Radiation budget changes with dry forest clearing in temperate Argentina. *Global Change Biology*, *19*(4), 1211–1222. https://doi.org/10.1111/gcb.12121

Jobbágy, E. G., Acosta, A. M., & Nosetto, M. D. (2013). Rendimiento hídrico en cuencas primarias bajo pastizales y plantaciones de pino de las sierras de Córdoba (Argentina). *Ecologia Austral*, *23*(2), 87–96.

Lizzi, José M., Garbulsky, M. F., Golluscio, R. A., & Deregibus, A. V. (2007). Mapeo indirecto de la vegetación de Sierra de la Ventana, provincia de Buenos Aires. *Ecologia Austral*, *17*(2), 217–230.

Lizzi, José Miguel. (2004). *Carcaterización regional de la estructura y funcionaiento de los pastizales de Sierra de la Ventana.* [Universidad de Buenos Aires]. https://www.agro.uba.ar/users/garbulsk/pdfs/JMLizzi_TESIS grado.pdf

Marini, M. F. (2008). El avance de la frontera agrícola en el área adyacente al sistema Sierras de la Ventana (Buenos Aires, Argentina). *Investigaciones Geográficas*, *47*(47), 111–121. https://doi.org/10.14198/ingeo2008.47.06

Michaelides, S., Tymvios, F., & Michaelidou, T. (2009). Spatial and temporal characteristics of the annual rainfall frequency distribution in Cyprus. *Atmospheric Research*, *94*(4), 606–615.

Milkovic, M., Michelson, A., Miñarro, F., Lanz, I., & Jaramillo, M. (2016). *LA SALUD DE NUESTRA TIERRA* (1a ed.). Vida silvestre Argentina. https://d2qv5f444n933g.cloudfront.net/downloads/doc_salud_tierra_baja.pdf

Nosetto, M., Ballesteros, S., Jobbágy, E., Collado, A., & Echeverría, J. (n.d.). *Valoración de la aptitud forestal de las sierras de San Luis-Argentina mediante percepción remota*.

Pacha, M., Maretti, C., Dias, A. S., Ortega, C., Suarez, C. F., Candelo, C., Alvarez, C., Torres, E. O., Riveros, J. C., Gutierrez, N., Tavares, A., & Mello, R. (2014). *Valoración de los servicios ecosistémicos como herramienta para la toma de decisiones: Bases conceptuales y lecciones aprendidas en la Amazonía* (1a ed.). Supernova. https://d2ouvy59p0dg6k.cloudfront.net/downloads/05_11_2014_wwf_ecosystems_esp_final_internet_150dpi__spread.pdf

Paruelo, J. M. (2008). Functional characterization of ecosystems using remote sensing. *Ecosistemas*, *17*(3), 4–22. http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?Id=575

Paruelo, José M, Texeira, M., Staiano, L., Mastrángelo, M., Amdan, L., & Gallego, F. (2016). An integrative index of Ecosystem Services provision based on remotely sensed data. *Ecological Indicators*, *71*, 145–154. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.06.054

Pérez, C. A. (1995). *Productividad en pastizales serranos a lo largo del gradiente altitudinal*. Universidad Nacional de la Plata.

Rositano, F., & Ferraro, D. O. (2017). Una nueva aproximación metodológica basada en redes conceptuales y redes probabilísticas para evaluar la provision de servicios de los ecosistemas. *Ecologia Austral*, *27*(1), 10–17. https://doi.org/10.25260/ea.17.27.1.0.130

Satgé, F., Ruelland, D., Bonnet, M. P., Molina, J., & Pillco, R. (2019). Consistency of satellite-based precipitation products in space and over time compared with gauge observations and snow- hydrological modelling in the Lake Titicaca region. *Hydrology and Earth System Sciences*, *23*(1), 595–619. https://doi.org/10.5194/hess-23-595-2019

Torrero, M. P. (2009). *Río Sauce Chico: estudio hidrográfico para un desarrollo sustentable*. Universidad Nacional del Sur.

Viviroli, D., & Weingartner, R. (2004). The hydrological significance of mountains: from regional to global scale. *Hydrological and Earth System Science*, *8*, 1016–1029.

Wang, S., & Davidson, A. (2007). Impact of climate variations on surface albedo of a temperate grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, *142*(2–4), 133–142.

https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.03.027