

Efecto del reemplazo del arbustal por alfalfa bajo riego sobre el funcionamiento de la vegetación en el sudoeste de la provincia de La Pampa

*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*

Priscila Belén Cano

Ingeniera Agrónoma - UNNOBA - 2017

Lugar de trabajo: Becaria doctoral-Comisión de Investigaciones Científicas de la
provincia de Buenos Aires



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



TUTOR

Tutor
María Eugenia Beget
Ingeniera Agrónoma (UBA)
Magister, Área Recursos Naturales (UBA)

JURADO DE TRABAJO FINAL

Jurado
Gervasio Piñeiro
Ingeniero Agrónomo (Universidad de la República)
Doctor en Ciencias Agropecuarias (UBA)

Jurado
Marcos Texeira
Licenciado en Ciencias Biológicas (Universidad de la República)
Doctor en Ciencias Agropecuarias (UBA)

Fecha de defensa del Trabajo Final: 16 de octubre de 2020

Agradecimientos

A mi tutora María Eugenia Beget, quien me guio en el desarrollo de este trabajo
A los jurados Gervasio Piñeiro y Marcos Texeira, por ayudarme a mejorar el trabajo con sus devoluciones. A todos los docentes y compañeros de la cohorte 2018 quienes me permitieron, aprender muchas cosas nuevas y guardar en mi memoria muchos recuerdos de esta única y enriquecedora experiencia.
A Carolina Aumassanne por los datos aportados para esta investigación.
A Julieta Straschnoy, quien siempre estuvo atenta a responder cualquier inquietud.
A Silvina Cabrini por permitirme dedicarle tiempo a la especialización.

A todos ellos no me queda más que decir
Muchas gracias.

"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 ésta u otra institución."

Índice

Resumen	6
Abstract.....	7
1.Introducción.....	8
1.1 Objetivo general	9
2. Materiales y métodos.....	10
2.1 Área de estudio.....	10
2.2. Selección de los sitios de estudio.....	13
2.3 Información satelital.....	13
2.4 Análisis de los datos.....	14
3.Resultados y discusión	15
3.1 Efecto del cambio de uso del suelo sobre la dinámica del NDVI.....	15
3.2 Efecto del cambio de uso del suelo sobre la evapotranspiración.....	18
3.3 Efecto del cambio de uso del suelo sobre el albedo.....	22
4.Conclusión.....	24
5.Bibliografía.....	25

Resumen

El cambio de uso del suelo es un problema actual de la humanidad, ya que forma una parte importante del llamado cambio global, junto con las alteraciones climáticas y las modificaciones en la composición atmosférica. En las regiones semiáridas y áridas, la expansión de los cultivos es posible gracias a la implementación de sistemas de riego. Un ejemplo de lo antes mencionado ocurre en la localidad de 25 de Mayo, La Pampa, donde la superficie regada mediante sistemas por pivote central aumentó aproximadamente un 250% desde el 2002 hasta la actualidad. A través de la utilización de datos de teledetección y de Sistemas de Información Geográfica es posible conocer el funcionamiento de la vegetación ante cambios de uso del suelo. Utilizando estas herramientas, en este trabajo se propuso estudiar el efecto del reemplazo de la vegetación natural, arbustal, por el cultivo de alfalfa bajo riego en el sudoeste de la provincia de La Pampa. Se evaluaron 3 variables: el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), la evapotranspiración y el albedo, bajo dos situaciones contrastantes: sitios de alfalfa bajo riego y sitios de vegetación natural. Los resultados mostraron que no existieron diferencias significativas en el funcionamiento de los sitios de vegetación natural y los sitios de alfalfa bajo riego, previo a la incorporación de los sistemas de riego. Luego, los sitios de alfalfa bajo riego mostraron en los cuatro años posteriores a su incorporación, un aumento significativo con respecto a los sitios de vegetación natural de 110,5%, 186% y 19,7%, en el NDVI, la evapotranspiración y el albedo, respectivamente. El aumento en el albedo fue contrario a los resultados esperados, evidentemente el reemplazo del arbustal por cultivo tuvo mayor impacto que la incorporación de riego. Estos cambios pueden generar grandes modificaciones en el drenaje profundo y provocar fuertes impactos en la hidrología subterránea, así como también pueden tener impacto sobre el balance de energía. Ante futuros cambios en el uso de suelo, es fundamental conocer previamente los efectos ambientales que conllevan, para tratar de disminuir aquellos que sean negativos y lograr un desarrollo sostenible de la agricultura y del uso de los recursos hídricos.

Abstract

Land use change is a current problem of humanity, since it is an important part of the so-called global change, along with climatic alterations and changes in atmospheric composition. In semi-arid and arid regions, the expansion of crops is possible thanks to the implementation of irrigation systems. This has occurred in 25 de Mayo (La Pampa), where the area irrigated by central pivot systems increased approximately 250% from 2002 to the present. Through the use of remote sensing data and Geographic Information Systems it is possible to understand changes in ecosystem functioning in the face of changes in land use. Using these tools, this work studied the effect of the substitution of natural vegetation by irrigated alfalfa in the southwest of the province of La Pampa. Three variables were evaluated: the normalized difference vegetation index (NDVI), evapotranspiration and albedo, in two sites: irrigated and with natural vegetation. There were no significant differences in the functioning of sites with natural vegetation and those irrigated prior to the incorporation of irrigation systems. After irrigation started, and during the first four years, we observed an increase in NDVI, evapotranspiration and albedo of 110.5%, 186% and 19.7%, respectively. Increase in albedo was contrary to the expected results, evidently the replacement of the shrubland by crop had a greater impact than the incorporation of irrigation. These changes can generate major changes in deep drainage and cause strong impacts on underground hydrology, as well as having an impact on the energy balance. In the face of future changes in land use, it is essential to previously know the environmental effects that they entail, to try to reduce those that are negative and achieve sustainable development of agriculture and the use of water resources.

1.Introducción

Las regiones semiáridas y áridas sólo permiten explotación ganadera rudimentaria con muy baja receptividad. En esas áreas, la expansión de los cultivos es posible gracias a la implementación de sistemas de riego (Reynolds *et al.*, 2007; Abrahao *et al.*, 2011). En Argentina se están realizando importantes procesos de cambio de uso del suelo, debido a la expansión de la frontera agropecuaria e intensificación de la agricultura (Jobbágy *et al.*, 2006). Una de las áreas afectadas por este proceso es la correspondiente al sudoeste de la provincia de La Pampa (Masseroni *et al.*, 2018). En la localidad de 25 de Mayo, la superficie regada mediante sistemas por pivote central aumentó aproximadamente un 250% desde 2002 hasta la actualidad (Aumassanne, 2019).

Los cambios en la cobertura vegetal conllevan modificaciones en diversos factores que generan alteraciones en el intercambio de energía, agua y carbono entre la atmósfera y la superficie continental (Claussen *et al.*, 2001, Twine, 2004, Cunha *et al.*, 2013). La vegetación ejerce un control importante en la regulación del balance hídrico de los ecosistemas terrestres (Wainwright *et al.*, 2002; Seyfried *et al.*, 2005). En regiones semiáridas y áridas, un componente fundamental del balance de agua es la evapotranspiración. La mayor parte de las pérdidas del agua precipitada en superficie se deben a la evapotranspiración, con valores superiores al 95% de la precipitación (Wilcox *et al.*, 2003), mientras que el drenaje puede considerarse prácticamente nulo (Scanlon *et al.*, 2005). Como consecuencia, pequeños cambios en la evapotranspiración pueden generar grandes modificaciones en el drenaje profundo y provocar fuertes impactos en la hidrología subterránea (Noy Meir, 1973; Scanlon *et al.*, 2007; Abrahao *et al.*, 2011; Pérez *et al.*, 2011; Gabriel *et al.*, 2012).

El cambio de la cobertura vegetal también genera modificaciones de las propiedades físicas relacionadas a la misma, tales como el albedo (Twine, 2004). El albedo, junto a la emisividad, son parámetros clave para determinar la temperatura de superficie. La temperatura de superficie tiende a disminuir con un mayor albedo (Webster, 1994). Varios estudios muestran evidencias a escala mundial de los impactos sobre el balance de energía por cambios en el albedo (Chaney *et al.*, 1977; Benítez *et al.*, 2002; Cristóbal *et al.*, 2008; Franch y Sobrino, 2013; Pryor y Sullivan, 2016). Por ejemplo, Pryor y Sullivan (2016), compararon diferentes cultivos con y sin riego en

distintas regiones de Estados Unidos determinando que la presencia de riego generalmente se asocia con un menor albedo.

Los datos de teledetección y la utilización de Sistemas de Información Geográfica (SIG) permiten conocer el funcionamiento de la vegetación ante cambios de uso del suelo. El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por su sigla en inglés) (Rouse *et al.*, 1974) es uno de los índices más utilizados para el estudio de coberturas vegetales, dado que integra dos aspectos claves del comportamiento espectral de los tejidos fotosintéticos y es un indicador del área foliar y la productividad primaria neta aérea (Vázquez *et al.*, 2006; Paruelo *et al.*, 2012). Los datos de teledetección permiten a su vez estudiar variables como la evapotranspiración y el albedo mediante productos obtenidos de diferentes algoritmos. Dado que el cambio del uso del suelo es un problema actual de la humanidad, el estudio de dichas variables proporcionaría la base para conocer las tendencias de los procesos en una región determinada.

1.1 Objetivo general

Evaluar mediante la teledetección los impactos del cambio del uso del suelo en el funcionamiento de la vegetación en el sudoeste de la provincia de La Pampa. Específicamente, se evaluarán las diferencias en el funcionamiento de sitios de vegetación natural y sitios de alfalfa bajo riego, a partir de la dinámica temporal de 3 variables: el NDVI, la evapotranspiración y el albedo.

2. Materiales y métodos

2.1 Área de estudio

El área de estudio se encuentra ubicada en la localidad de 25 de Mayo, provincia de La Pampa sobre la cuenca del río Colorado. La misma, corresponde al Sistema de Aprovechamiento Múltiple (SAM) del río Colorado, en el sudoeste de la provincia. La región comprende dos tipos principales de suelos: Torripsament lítico con rodados y Torripsament típico (Beget, et al. 2018). Se seleccionaron sitios de vegetación natural y sitios cultivo de alfalfa bajo riego por pivote central (Figura 1).

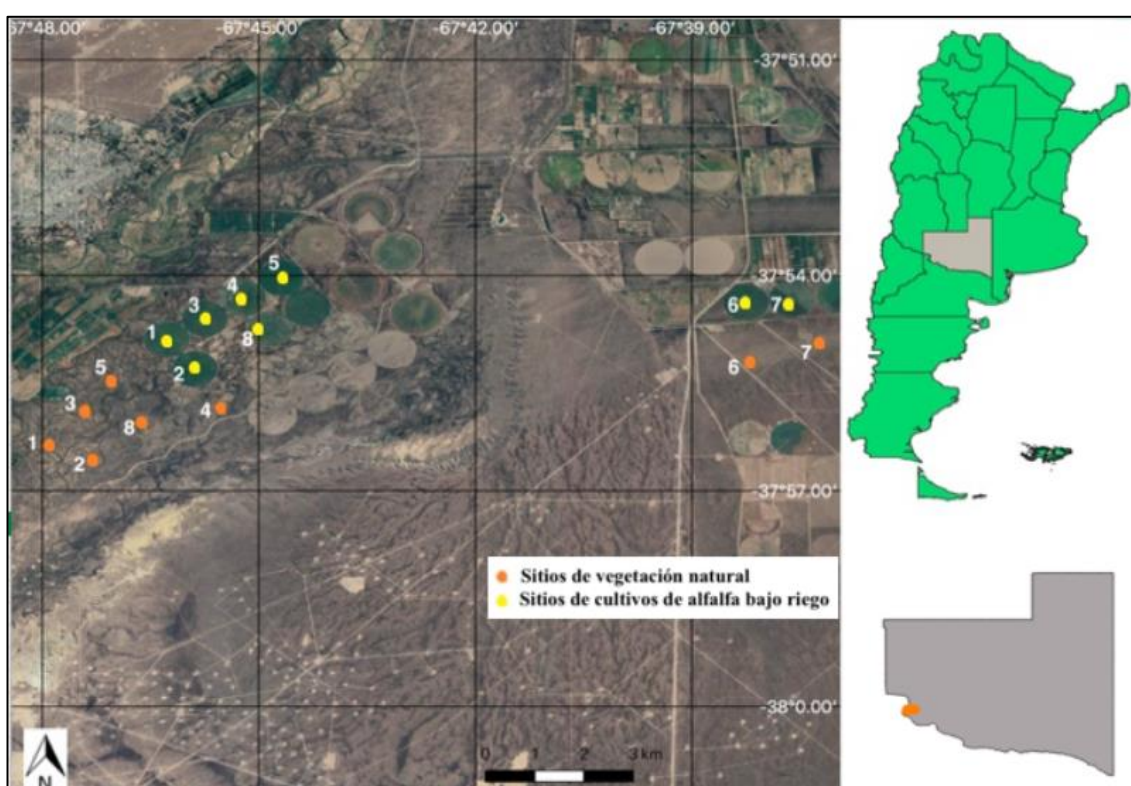


Figura 1. Área de estudio sudoeste de la provincia de La Pampa y localización de los sitios de estudio.

La zona agrícola del sudoeste pampeano presenta características climáticas áridas, con marcada continentalidad (temperaturas bajas en invierno y altas en verano) y una temperatura media anual de 15°C, aunque se registran amplitudes térmicas diarias y anuales elevadas. El promedio de precipitaciones oscila en 250 mm, siendo los meses más lluviosos los de octubre a marzo (Masseroni *et al.*, 2018). Las precipitaciones anuales desde 2001 a 2018 presentan gran variabilidad interanual. Las mismas presentaron una

tendencia significativa decreciente desde el año 2001 (test no paramétrico Mann-Kendall y nivel de significancia del 5%). Las precipitaciones acumuladas mínimas tuvieron lugar en el año 2009 y las máximas en el año 2016, con valores de 68,5 y 405,4 mm año⁻¹, respectivamente (Figura 2). En el mismo periodo, los meses de abril y octubre presentaron el mayor promedio de precipitaciones mensuales, con valores de 28,56 y 26,48 mm respectivamente, y el menor promedio de precipitaciones mensuales los meses de junio y julio, con valores de 11,43 y 12,15 mm, respectivamente (Figura 3).

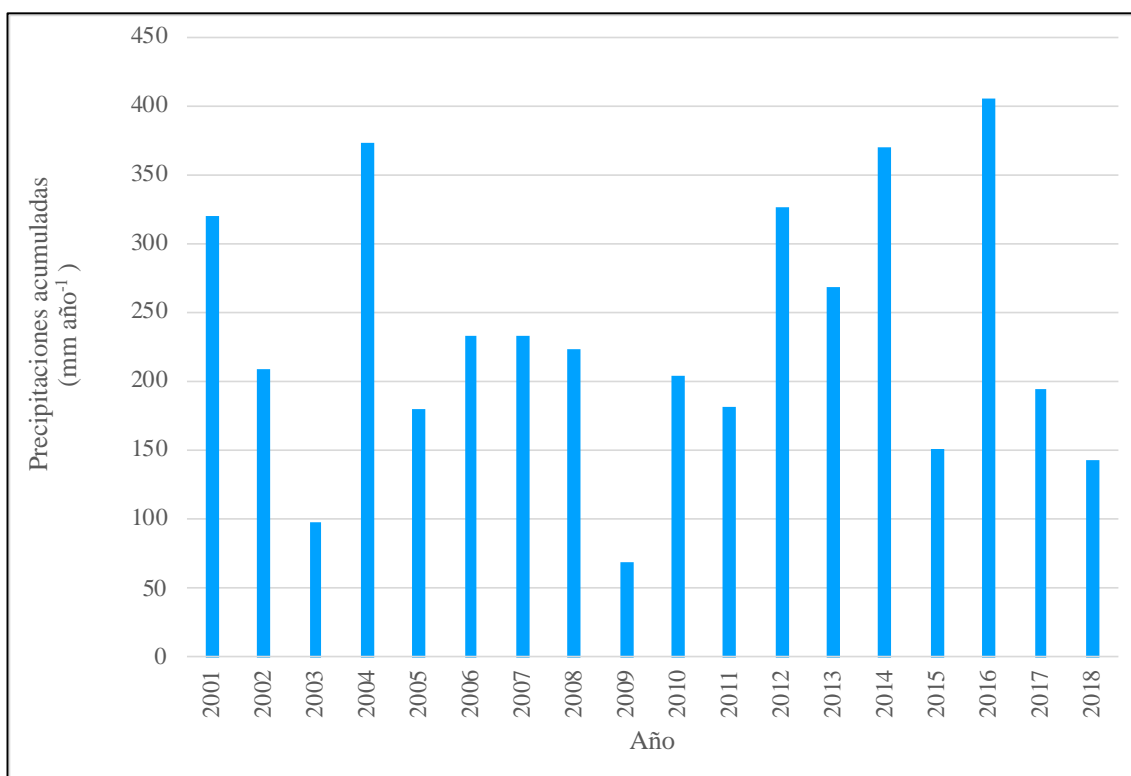


Figura 2. Precipitaciones anuales registradas en la Estación Meteorológica Catriel. Fuente: Departamento Provincial de Aguas.

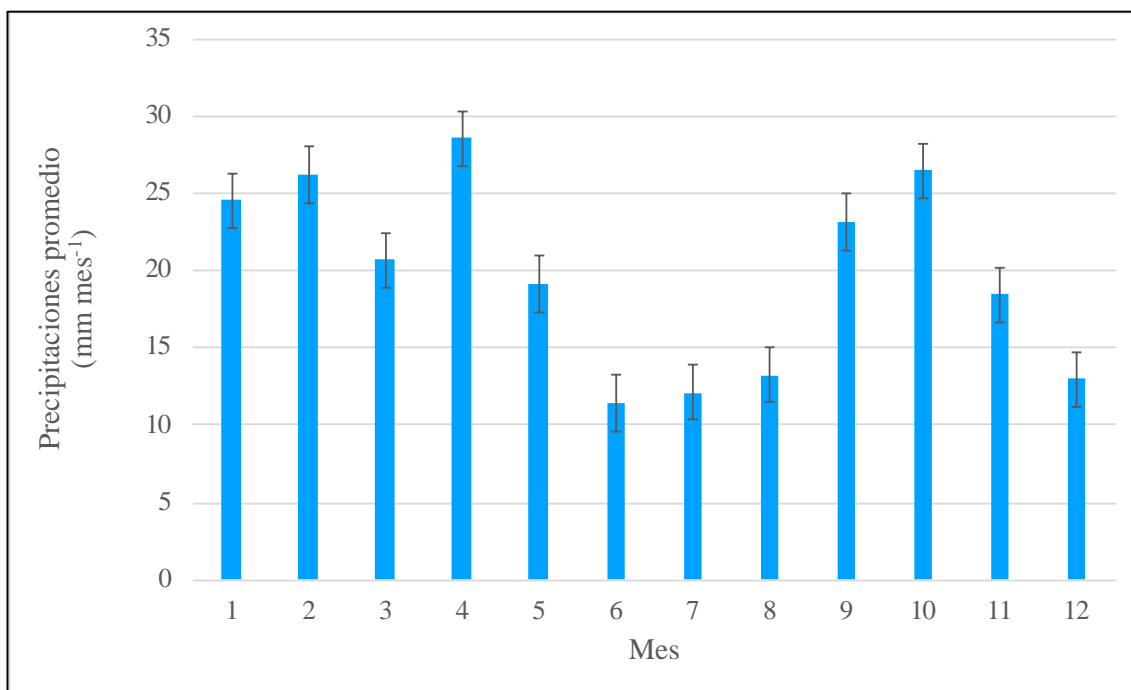


Figura 3. Precipitaciones promedio mensuales desde 2001 a 2018 registradas en la Estación Meteorológica Catriel. Las barras corresponden a +/-1 error estándar. Fuente: Departamento Provincial de Aguas.

La vegetación natural de la zona de estudio corresponde a un arbustal muy abierto, bajo, de follaje siempre verde, con matas y gramíneas bajas perennes y anuales. Las herbáceas anuales o perennes son escasas. La estructura vertical es casi regular cuando domina *Larrea cuneifolia* e irregular cuando codominan otros arbustos (*Monttea aphylla*, *Atriplex lampa*, *Lycium chilense*, *Bougainvillea spinosa*, *Acantholippia seriphioides*; Casagrande *et al.*, 1980).

Debido a su condición de aridez, la actividad agrícola del sudoeste pampeano se desarrolla mediante riego integral, con el aporte de agua proveniente del río Colorado (Zamora *et al.*, 2016; Masseroni *et al.*, 2018). El SAM cuenta con obras e infraestructura para regar 82.000 has, según el programa de habilitación de áreas de riego y distribución de caudales del río Colorado. En el sudoeste de la provincia de La Pampa, se han alcanzado 5000 has de producción agrícola bajo riego, siendo el cultivo principal la alfalfa, y en menor proporción, el maíz (Masseroni *et al.*, 2018). Los sistemas de riego usados son gravitacional o presurizado, y en los últimos años se ha expandido la instalación de equipos de riego presurizado, por pivote central, sobre tierras vírgenes o en reemplazo del gravitacional (Masseroni *et al.*, 2018).

2.2. Selección de los sitios de estudio

En la región del SAM los primeros sistemas de riego por pivote central comenzaron a funcionar en el año 2002. Debido a la disponibilidad de imágenes MODIS (espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada) desde el año 2001, se empezaron a seleccionar sitios incorporados al riego desde el año 2005. Considerando un análisis temporal de los datos de al menos 4 años previos y 4 años posteriores al inicio del riego, se tomó como periodo de análisis desde el año 2001 al 2017.

A partir de fotointerpretación de imágenes de alta resolución de la plataforma Google Earth, se detectaron lotes bajo riego presurizado por pivot central ubicados en el área de estudio. De estos lotes se seleccionaron 8 sitios correspondientes al cultivo de alfalfa, según lo informado por Aumassanne (2019) y comunicado personalmente por ella misma, como técnica del INTA local (Carolina Aumassanne, comunicación personal, febrero de 2019). De los ocho sitios regados, tres comenzaron a regarse en 2005, tres en 2012 y dos en 2013. Se seleccionaron la misma cantidad de sitios de vegetación natural. Estos últimos se seleccionaron al azar utilizando una grilla de distribución de píxeles MODIS y teniendo en cuenta la cercanía a los sitios de alfalfa bajo riego (Figura 1).

2.3. Información satelital

De cada uno de los 16 sitios se extrajo la serie temporal de valores de NDVI, evapotranspiración y albedo, tomando píxeles puros de cada cobertura. De cada píxel se tomaron valores desde el año en el que empezaron a ser regados, cuatro años antes y cuatro años después.

Los valores de NDVI, evapotranspiración y albedo se obtuvieron a partir de productos de globales de MODIS de la plataforma de Google Earth Engine. El NDVI se obtuvo del producto MOD13Q1. El mismo tiene una resolución temporal de 16 días y una resolución espacial de 250m. Se calcula a partir de la reflectancia en el rojo (R) y el infrarrojo cercano (NIR), $NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$.

Los datos de evapotranspiración utilizados fueron obtenidos del producto MOD16_A2. El mismo posee una resolución espacial de 500m y una resolución temporal de 8 días. Está compuesto por cinco bandas, de las cuales dos son de evapotranspiración (real y potencial en $mm\ 8días^{-1}$), con factor de corrección de 0,1, otras dos de calor latente (real y potencial en $J\ m^{-2}\ 8días^{-1}$) y por último la banda de calidad. El algoritmo utilizado para la recopilación de productos de datos MOD16 se basa en la lógica de la ecuación de Penman-Monteith. Este algoritmo incluye entradas de datos de re-análisis meteorológicos

diarios, y productos MODIS tales como dinámica de propiedades de la vegetación, albedo y cobertura del suelo.

Los datos de albedo fueron obtenidos del producto MCD43A3. El mismo tiene una resolución espacial de 500m y una resolución temporal de 16 días. El MCD43A3 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 y las bandas del visible, infrarroja cercana (NIR) y de onda corta. En este trabajo se utilizó el albedo de cielo blanco (reflectancia bihemisférica).

El NDVI, la evapotranspiración y el albedo fueron llevados a valores mensuales para facilitar el análisis de los datos. En el caso de la evapotranspiración se sumaron los valores obtenidos, mientras que para el albedo y el NDVI los valores fueron promediados.

2.4 Análisis de los datos

El análisis de los datos se realizó considerando como año 0 el año en el que se empezó a regar, ya que los sitios de estudio comenzaron a regarse en diferentes años. Se evaluaron 4 años antes y 4 años después del año 0. El período de análisis fue para los sitios 1, 2 y 3 de 2012 a 2016, para los sitios 4, 5 y 8 de 2005 a 2009 y para los sitios 6 y 7 de 2013 a 2017.

A partir de los datos de NDVI, se obtuvieron dos atributos: la integral y el rango relativo. La integral se calcula como el promedio de valores en un periodo de tiempo. El rango relativo se calcula como el valor máximo menos el valor mínimo, dividido la integral. La integral del NDVI (NDVI-I) es un indicador de la productividad anual de la vegetación (Tucker *et al.*, 1985) y el rango relativo del NDVI es un indicador de la variabilidad intra-anual de la productividad (Guerschman *et al.*, 2003).

Los resultados se analizaron estadísticamente con un diseño en bloque por tipo de suelo. Doce sitios de estudio se encuentran sobre el suelo Torripsament típico (6 sitios de alfalfa bajo riego y 6 sitios de vegetación natural) y 4 sitios en el suelo Torripsament lítico con rodados (2 sitios de alfalfa bajo riego y 2 sitios de vegetación natural). Se analizó la significancia estadística de las comparaciones con un análisis ANOVA y un nivel de significancia del 5%.

3.Resultados y discusión

3.1 Efecto del cambio de uso del suelo sobre la dinámica del NDVI

Los 16 sitios de estudio analizados no presentaron diferencias significativas en el NDVI durante los años previos a la instalación del sistema de riego (valor $p = 0,51$) (Figura 4). Sí se encontraron diferencias significativas entre los bloques (valor $p = 0,01$). En los sitios bajo riego, cuando comenzó a instalarse el sistema de riego (año de riego 0), los niveles de NDVI alcanzaron valores promedio aún menores que la vegetación natural (0,16). Esto se produce debido a la destrucción de la vegetación natural como consecuencia del rolado para la instalación del sistema de riego.

Desde el año de riego 1 al año de riego 4, los sitios de alfalfa tuvieron en promedio un incremento estadísticamente significativo (valor $p < 0,0001$) del NDVI del 110,5% con respecto a los sitios con vegetación natural. No hubo diferencias en esta variable entre bloques (valor $p = 0,99$). En los sitios de alfalfa bajo riego, el NDVI-I anual de los años de riego 1, 2, 3 y 4 tomó valores entre 0,32 y 0,64, mientras que en los sitios de vegetación natural tomó valores entre 0,24 y 0,27. Estos resultados demuestran que los sitios de alfalfa bajo riego tuvieron mayor productividad anual que la vegetación natural (Figura 4).

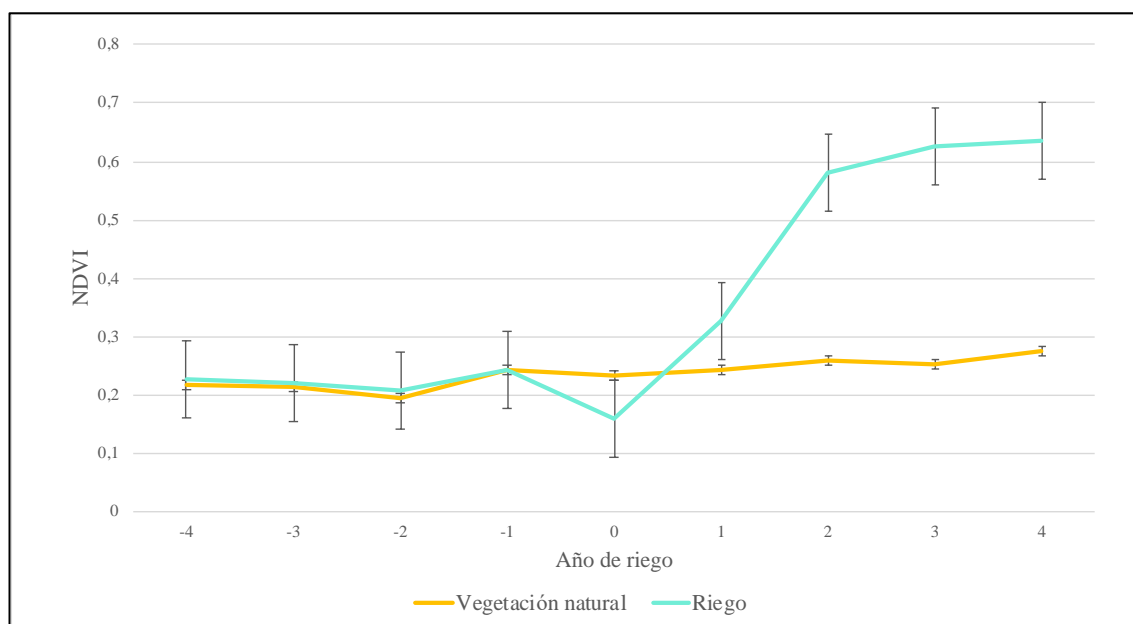


Figura 4. NDVI promedio anual de los años de riego para los sitios de vegetación natural y alfalfa bajo riego. Las barras corresponden a +/-1 error estándar.

El rango relativo anual de los años de riego 1, 2, 3, y 4 para los sitios de alfalfa bajo riego tomó valores entre 0,75 y 1,18, mientras que en los sitios con vegetación natural tomó valores entre 0,46 y 0,49, indicando que los sitios con vegetación natural tuvieron menor variabilidad intra-anual. Como lo demuestra el rango relativo, los cultivos de alfalfa bajo riego tuvieron una marcada estacionalidad entre meses. Esto se explica debido a que la alfalfa es un cultivo perenne con un ciclo de 4 años, que sufre cortes en diferentes momentos. Los valores mínimo y máximo de NDVI se obtuvieron en los meses de invierno y primavera con valores promedio de 0,43 y 0,65, respectivamente. En otoño y verano el valor promedio de NDVI respectivo fue de 0,53 y 0,55. Los sitios regados comparados mensualmente con los sitios de vegetación natural presentaron diferencias significativas de NDVI (valor $p < 0,0001$) (Figura 5).

Sólo un 0,33% de la variabilidad anual del NDVI en la vegetación natural está explicada por las precipitaciones anuales. En los sitios de alfalfa bajo riego no hay correlación entre las precipitaciones y el NDVI (Figura 6).

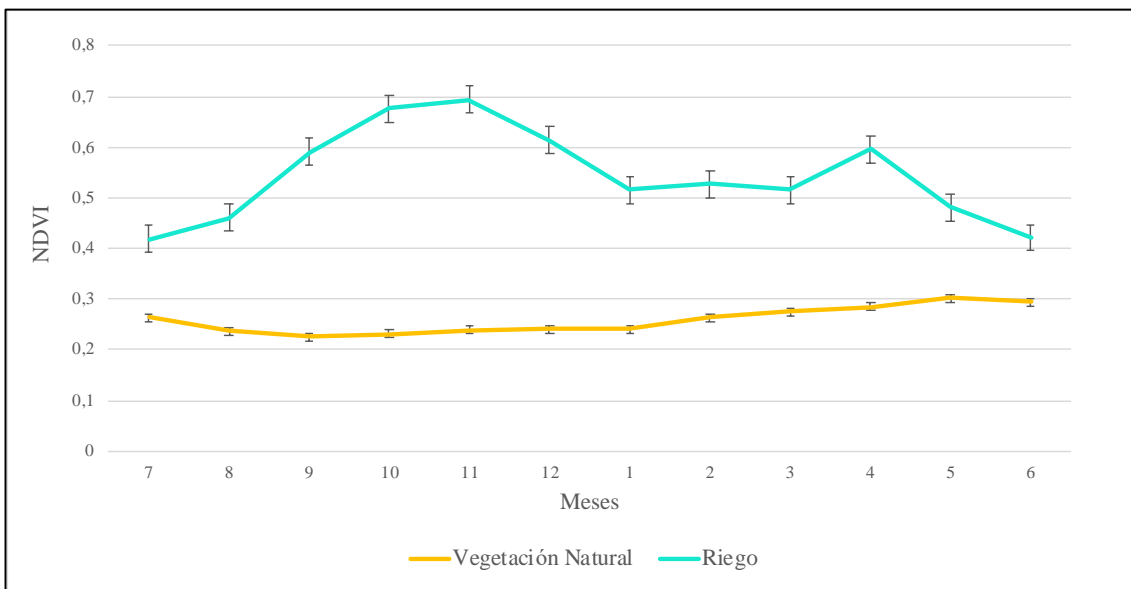


Figura 5. NDVI mensual promedio de los años de riego 1, 2, 3 y 4 para los sitios de vegetación natural y alfalfa bajo riego. Las barras corresponden al error estándar.

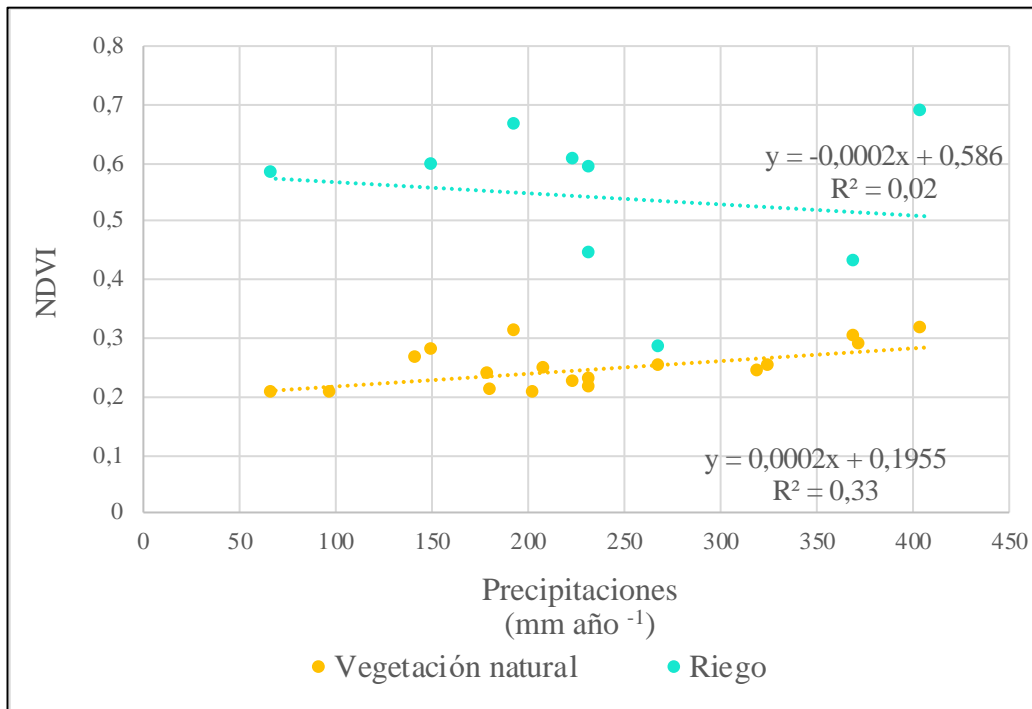


Figura 6. Correlación entre precipitaciones anuales y NDVI promedio anual de los sitios con vegetación natural (naranja) y sitios de alfalfa bajo riego (celeste).

En el periodo de análisis desde 2001 a 2018, el NDVI toma valores entre 0,15 y 0,36 en el caso de la vegetación natural, y entre 0,11 y 0,72 en alfalfa bajo riego. Los promedios anuales más bajos de NDVI en la vegetación natural se obtuvieron en los años 2003 y 2010 (0,2), y los promedios anuales más elevados en los años 2016 y 2017 (0,31). En la alfalfa bajo riego los promedios anuales de NDVI toman valores entre 0,19 en 2003 y 0,65 en 2018. Desde 2001 a 2018, en la vegetación natural los valores de NDVI promedio más bajos 0,21 se obtuvieron en los sitios 6 y 7 y los valores de NDVI más altos 0,28 se obtuvieron en los sitios 4, 5 y 8 (Figura 7). Los sitios 6 y 7 en comparación a los otros sitios tuvieron valores de NDVI más bajos previo a la incorporación del sistema de riego, estas diferencias fueron significativas (valor p: 0,01) y pueden deberse a que estos sitios se ubican en la sección I del SAM y el resto de los sitios en la sección V. Dichas secciones al encontrarse distanciadas geográficamente, presentan diferencias edáficas con mayor o menor influencia del río. Mientras que en la sección I los suelos son Torripsament líticos con rodados, en la V corresponden a Torripsament típicos (Vázquez, 2014).

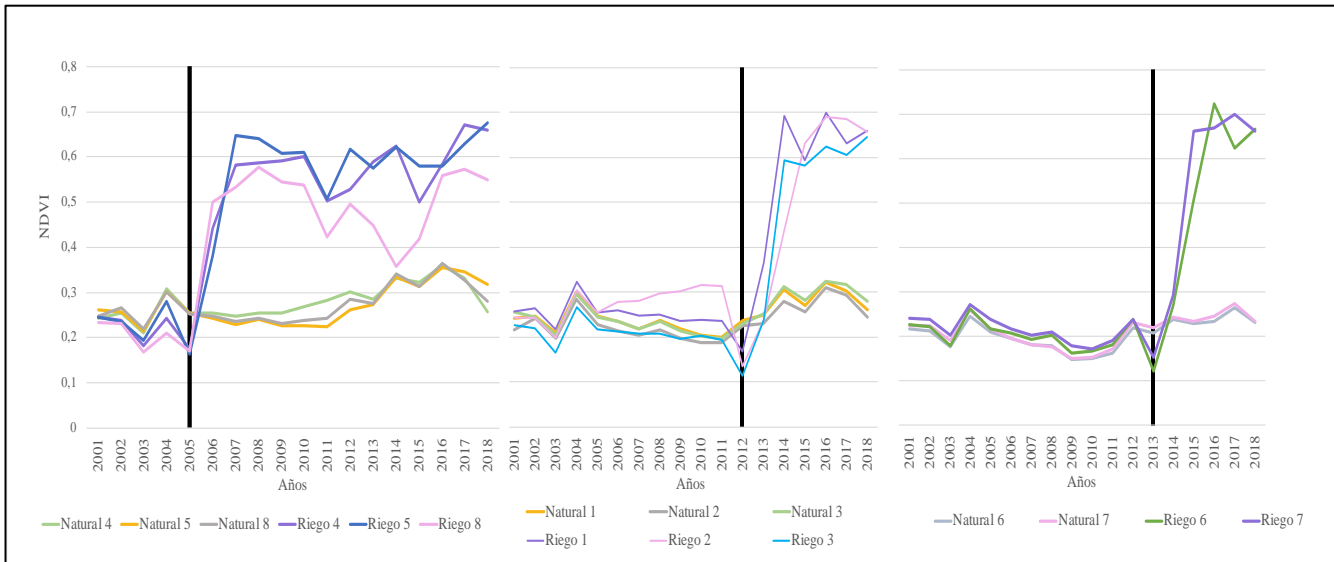


Figura 7. NDVI promedio de los años 2001 a 2018 para los sitios de vegetación natural (Natural) y alfalfa bajo riego (Riego). Cada línea vertical muestra el año en el que comenzaron a regarse los sitios.

3.2 Efecto del cambio de uso del suelo sobre la evapotranspiración

La evapotranspiración presentó un comportamiento similar al NDVI. En los sitios de alfalfa bajo riego para los años de riego 1, 2, 3, y 4 se produjo un aumento estadísticamente significativo (valor $p < 0,0001$) de la evapotranspiración de un 186% con respecto a la vegetación natural. No hubo diferencias significativas entre bloques (Figura 8).

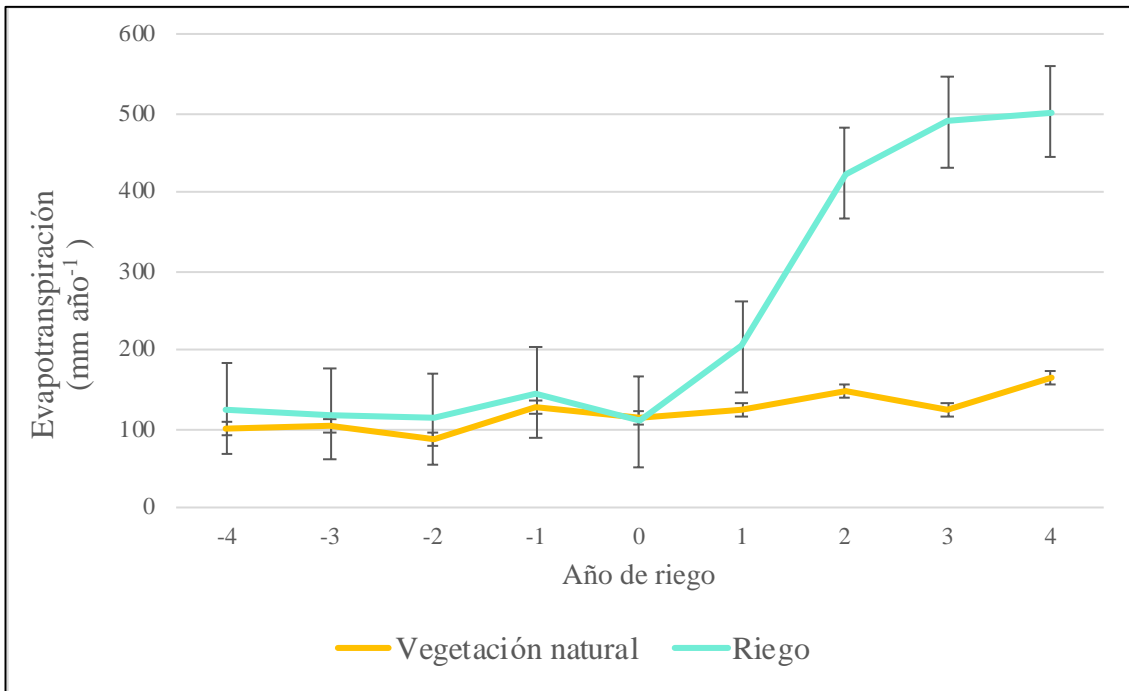


Figura 8. Evapotranspiración promedio anual de los años de riego 1, 2, 3 y 4 para los sitios para los sitios de vegetación natural y alfalfa bajo riego. Las barras corresponden a +/- 1 error estándar.

Los sitios regados comparados mensualmente con los sitios de vegetación natural presentaron diferencias significativas de evapotranspiración (valor $p < 0,0001$). La vegetación natural toma valores mensuales promedio de evapotranspiración entre $32,01 \text{ mm mes}^{-1}$, en marzo y $61,26 \text{ mm mes}^{-1}$, en julio. En los sitios regados, la evapotranspiración promedio mensual máxima ocurrió en el mes de noviembre con un valor de $230,4 \text{ mm mes}^{-1}$ y la mínima ocurrió en el mes de junio con un valor de $69,38 \text{ mm mes}^{-1}$ (Figura 9).

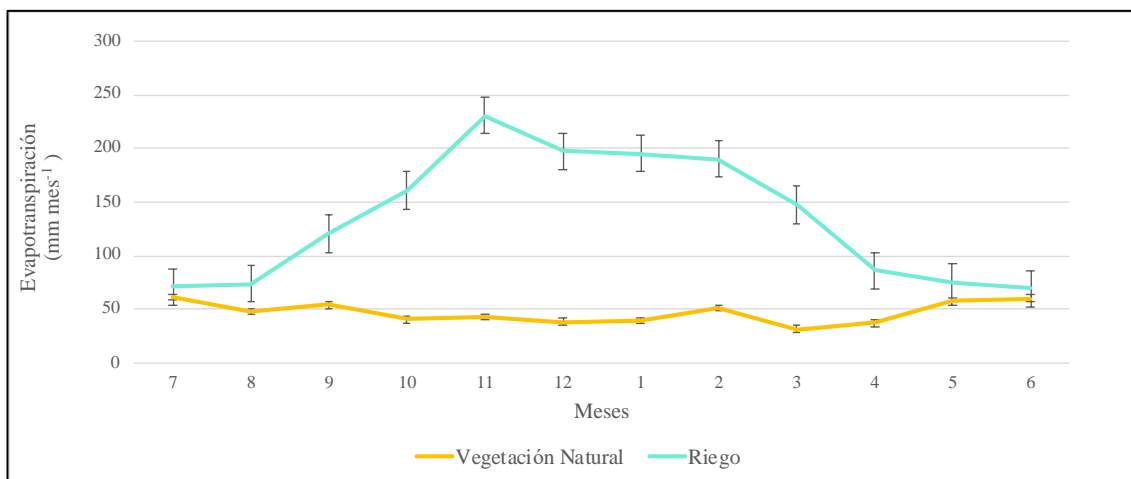


Figura 9. Evapotranspiración promedio mensual de los años de riego 1,2,3 y 4 para los sitios de vegetación natural y alfalfa bajo riego. Las barras corresponden al error estándar.

La evapotranspiración diaria del cultivo de alfalfa toma un valor máximo de $7,68 \text{ mm día}^{-1}$. Estos resultados son similares a los resultados encontrados por Aumassanne (2019), donde el valor máximo de evapotranspiración diaria es de $8,9 \text{ mm día}^{-1}$. Asimismo, los resultados de evapotranspiración para todo el ciclo de la alfalfa presentados en Fontanella y Aumassanne (2015) de 1481 mm , son comparables con los valores de evapotranspiración de los sitios con riego desde el primer al cuarto año de riego $1617,77 \text{ mm}$. Al igual que los resultados encontrados por Aumassanne (2019), los meses de primavera-verano presentaron la máxima demanda evaporativa, coincidiendo con el período de riego de los cultivos. En los meses de otoño-invierno no se riega, por eso disminuye la demanda evaporativa.

La evapotranspiración toma valores entre $239,3$ y $58,1 \text{ mm año}^{-1}$ en el caso de la vegetación natural y valores entre $632,1$ y $63,7 \text{ mm año}^{-1}$ en el de la alfalfa bajo riego. La vegetación natural tuvo el promedio anual de evapotranspiración más bajo con un valor de $76,67 \text{ mm año}^{-1}$, en el año 2011; y más alto con valor de $204,67 \text{ mm año}^{-1}$, en el año 2016. Desde 2001 a 2018, el sitio 6 de vegetación natural obtuvo el valor de evapotranspiración promedio más bajo $111,83 \text{ mm año}^{-1}$ y el valor máximo en el sitio 4, $157,2 \text{ mm año}^{-1}$. En el mismo periodo, el sitio regado 7 obtuvo la evapotranspiración promedio más baja $227,35 \text{ mm año}^{-1}$ y el valor máximo en el sitio 5, $389,8 \text{ mm año}^{-1}$ (Figura 10).

Un $0,34\%$ de la variabilidad anual de la evapotranspiración en la vegetación natural está explicado por las precipitaciones anuales. En cambio, en los sitios de alfalfa

bajo riego no hay correlación entre las precipitaciones y la evapotranspiración (Figura 11).

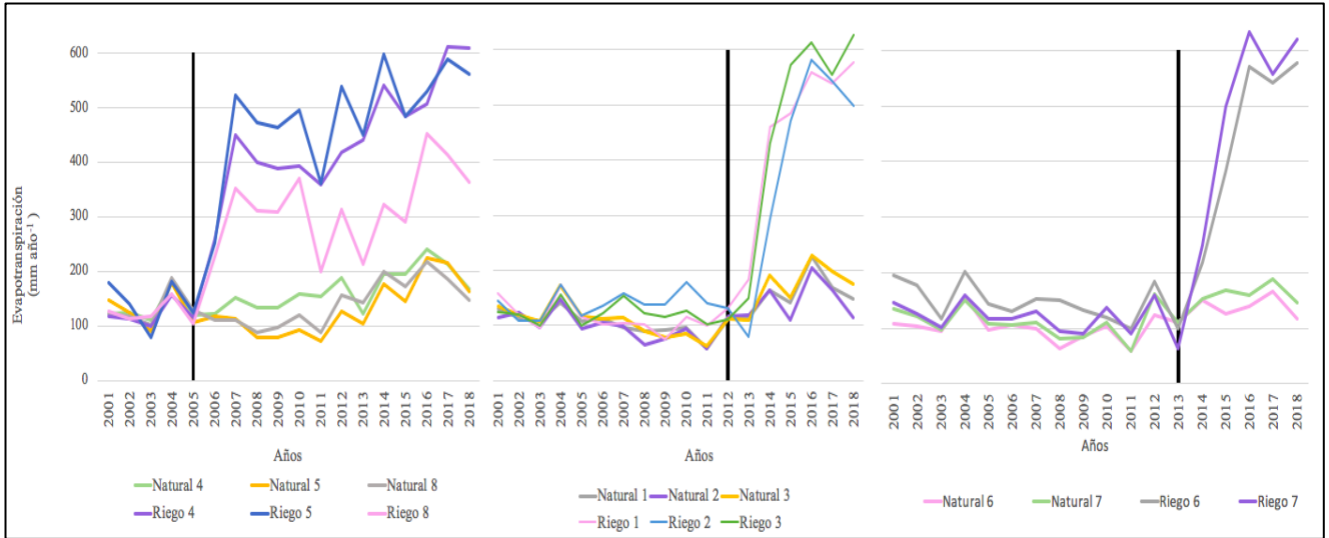


Figura 10. Evapotranspiración anual promedio de los años 2001 a 2018 para los sitios de vegetación natural y alfalfa bajo riego. Cada línea muestra el promedio de los sitios que comenzaron a regarse el mismo año.

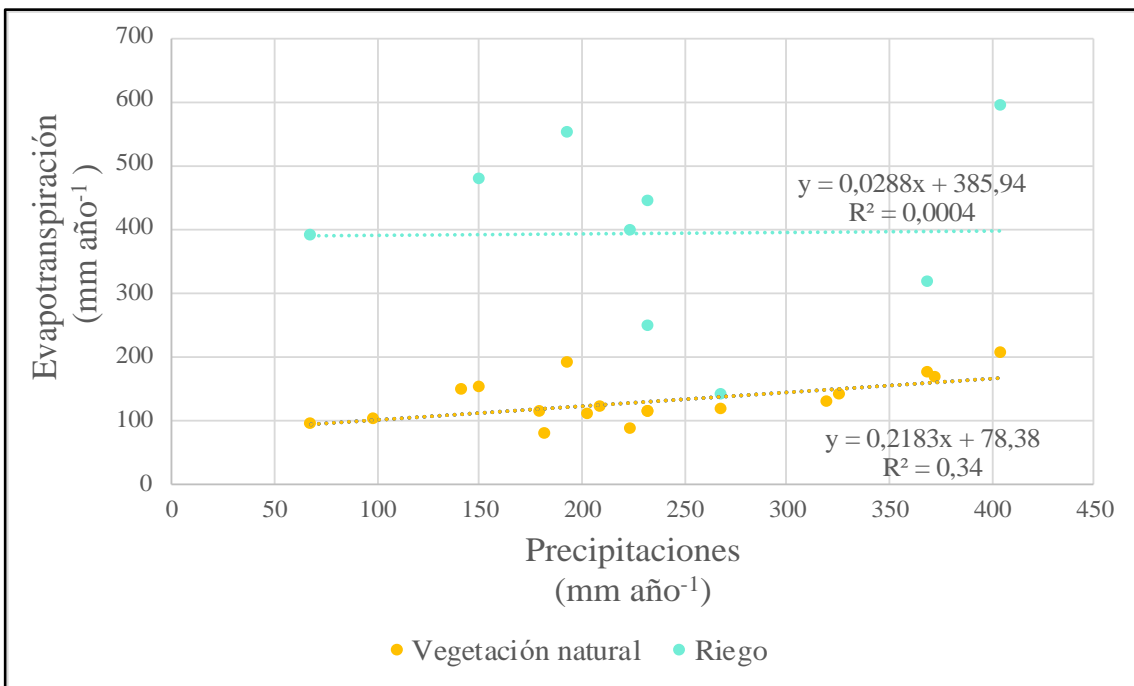


Figura 11. Correlación entre precipitaciones anuales y NDVI promedio anual de los sitios con vegetación natural (naranja) y sitios de alfalfa bajo riego (celestes).

3.3 Efecto del cambio de uso del suelo sobre el albedo

Previo al inicio del riego no se encontraron diferencias significativas en el albedo entre los sitios regados de alfalfa y los sitios con vegetación natural (valor $p = 0,38$). Tampoco hubo diferencias significativas entre bloques (valor $p = 0,76$). El albedo promedio anual en los años de riego, para los sitios regados fue de 0,16, con valores máximos de 0,17 y mínimos de 0,14. En los sitios con vegetación natural el albedo promedio para el mismo periodo fue de 0,14, con valores máximos de 0,15 y mínimos de 0,13. En el periodo bajo riego, en cambio, las diferencias en el albedo fueron estadísticamente significativas (valor $p < 0,0001$) y un 19,7% mayor en los sitios regados. También se encontraron diferencias significativas entre bloques (valor $p = 0,02$) (Figura 13).

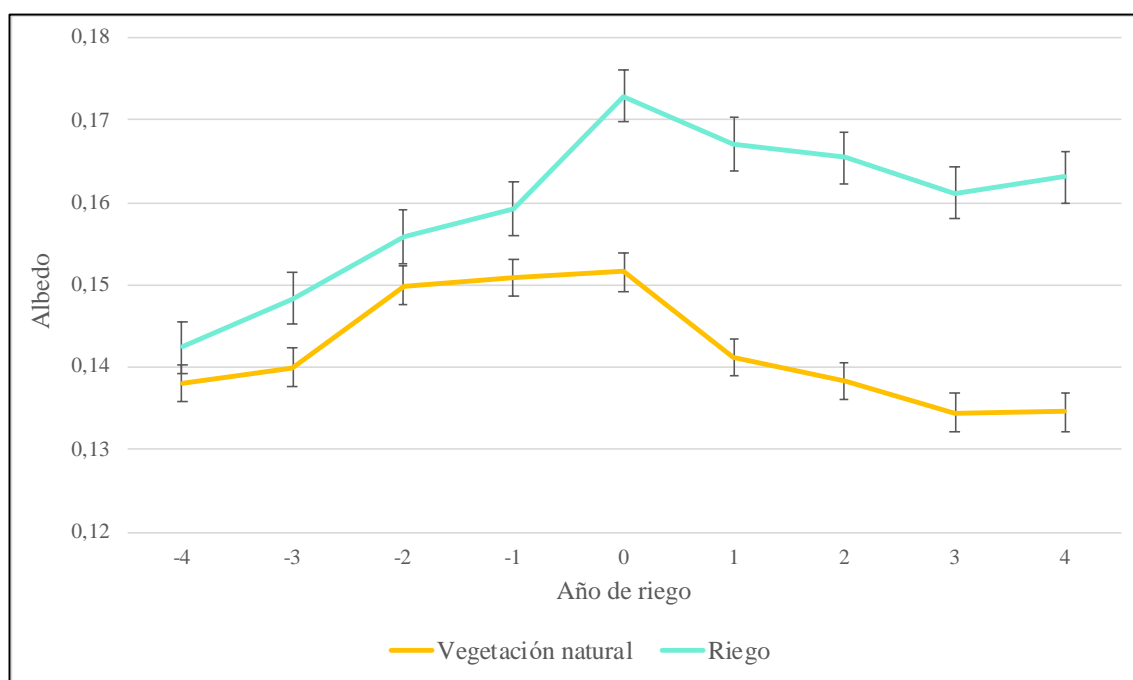


Figura 13. Albedo promedio anual para los sitios de vegetación natural y alfalfa bajo riego. Las barras corresponden al error estándar.

A escala mensual, las dos coberturas comparadas también presentaron diferencias significativas en el albedo (valor $p < 0,0001$). En los sitios regados el albedo promedio mensual fue superior en aproximadamente 0,03 para todos los meses con respecto a la vegetación natural. Julio tuvo el mínimo albedo con valores de 0,11 y 0,14 para la vegetación natural y los sitios regados, respectivamente (Figura 14). El albedo anual toma

valores promedio entre 0,12 y 0,18 en el caso de la vegetación natural, y valores entre 0,13 y 0,19 en el de la alfalfa bajo riego (Figura 15).

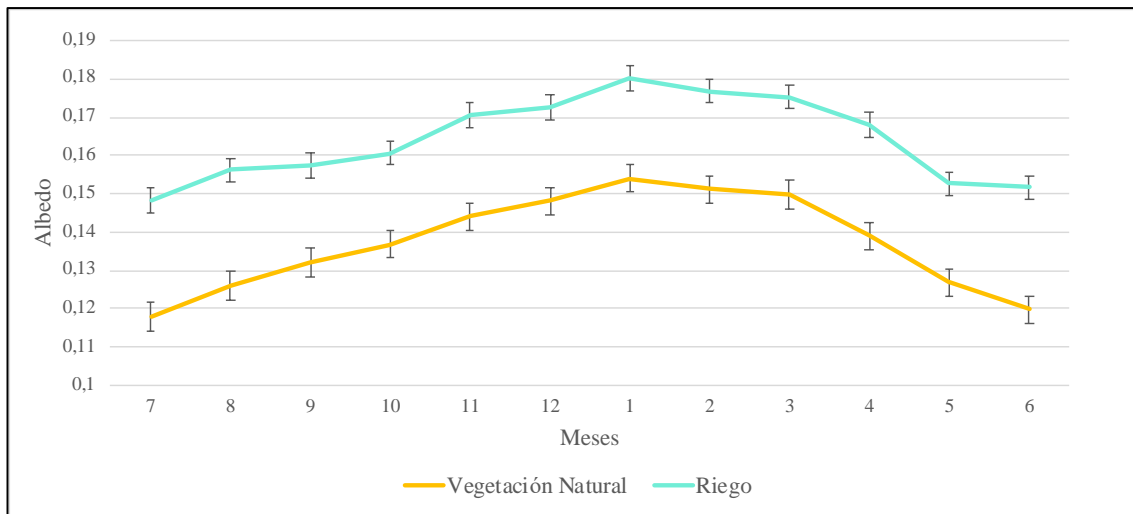


Figura 14. Albedo promedio mensual de los años de riego 1,2,3 y 4 para los sitios de vegetación natural y alfalfa bajo riego. Las barras corresponden al error estándar.

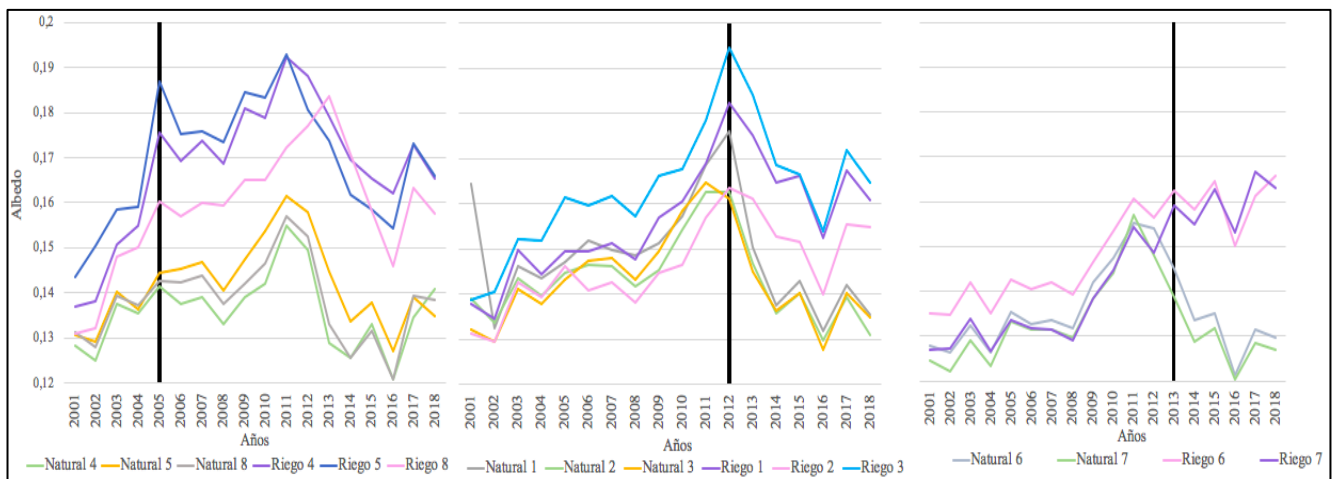


Figura 15. Albedo promedio de los años 2001 a 2018 para los sitios de vegetación natural y alfalfa bajo riego. Cada línea muestra el promedio de los sitios que comenzaron a regarse el mismo año.

Existe gran variabilidad en el albedo de diferentes tipos de superficies, y la diferencia debido al riego es una función compleja del cultivo, las propiedades del suelo (p. ej., contenido o textura de carbono orgánico), la rugosidad de la superficie y el contenido de humedad (Cierniewski *et al.*, 2014). Los valores típicos de albedo para suelos ásperos húmedos de color oscuro son en el rango de 0,05 a 0,10, para cultivos 0,15-0,25 y aquellos para suelos secos planos de color claro son con frecuencia en el rango de 0,35 a 0,40 (Dobos, 2006). Pryor y Sullivan (2016) y Leitão y Oliveira (2000) compararon en un mismo cultivo el albedo con y sin riego y encontraron que la presencia de riego se

asociaba con valores de albedo más bajos. Contrariamente, los resultados de este trabajo final muestran valores más altos de albedo en los cultivos de alfalfa bajo riego en relación con la vegetación natural. Esta diferencia puede deberse a que no sólo se compara el albedo en sitios con riego contra seco, sino que también las coberturas son diferentes. El efecto del reemplazo de los arbustales naturales por cultivo, tuvo mayor incidencia que el factor riego generando un incremento en el albedo tal como lo demuestran Bracalenti et al. (2017) cuando comparan el reemplazo de bosques por cultivos.

4. Conclusión

La incorporación del riego y el remplazo del arbustal por cultivos de alfalfa provocó, en los 4 años posteriores, un aumento del NDVI de 110,5% con respecto a la vegetación natural. Además, en los años posteriores a la instalación del sistema de riego y la siembra de alfalfa, la evapotranspiración aumentó en promedio 186% con respecto a la vegetación natural. Este gran aumento podría generar importantes modificaciones en el drenaje profundo y provocar fuertes impactos en la hidrología subterránea. Otro factor que se modificó fue el albedo, contrariamente a lo esperado, se observó un aumento del mismo en los sitios regados. Este aumento, llegó a ser en el cuarto año hasta un 19,7% mayor que los sitios con arbustal natural, pudiendo generar consecuencias importantes sobre el balance de energía.

Los principales procesos de cambio originados por la actividad humana son el cambio de uso del suelo. Estos cambios tienen efectos importantes en el funcionamiento de los ecosistemas, como quedó demostrado con estos resultados, para el caso concreto de remplazo del arbustal natural por cultivos de alfalfa regados. Ante futuros cambios en el uso de suelo es fundamental conocer previamente los efectos ambientales que conllevan, para intentar disminuir aquellos que sean negativos y lograr un desarrollo sostenible de la agricultura y del uso de los recursos hídricos.

5. Bibliografía

Abrahamo, R., Causapé, J., García-Garizábal, I. y Merchán, D. (2011). "Implementing Irrigation: Water Balances and Irrigation Quality in the Lerma Basin (Spain)". *Agricultural Water Management* 102: 97-104.

Aumassanne, C. (2019). "Impacto de los Cambios en el Uso y la Cobertura de la Tierra y de la Variación del Clima, sobre los Principales Componentes del Balance de Agua en la Cuenca del Río Colorado, Argentina". (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de La Plata).

Benítez, J.A.C., Nikolskii, I.G., Navarro, L.A.A., Ramírez, R.A., Maurice, M.E., y Reynoso, D.S.F. (2002). "Pronóstico del Cambio en Algunas Propiedades de los Suelos Agrícolas al Modificarse las Condiciones Microclimáticas". *Agrociencia*, 36(3), 267-277.

Beget, M.E., Di Bella, C., Aumassanne, C., Fontanella, D., Fernández, R., y Sartor, P. (2018). "Zonificación Ambiental en la Región del Sistema de Aprovechamiento Múltiple del Río Colorado". XXVIII Reunión Argentina de Ecología. 29 de octubre al 2 de noviembre de 2018. Mar del Plata, Argentina.

Bracalenti, A., Müller, O., y Berbery, E. (2017). "Efectos remotos del cambio de uso de suelo en el clima del sudeste de Sudamérica". In XXVIII Reunión Científica de la AAGG y III Simposio sobre Inversión y Procesamiento de Señales en Exploración Sísmica (La Plata, 2017).

Casagrande, G., Conti, H., Plaza, J.S.L., Zubiato, C.P., Pinedo, D.M., Martínez, H., ... y Fernández, B. (1980). "Inventario Integrado de los Recursos Naturales de la Provincia de La Pampa: Clima, Geomorfología, Suelo y Vegetación". Provincia de La Pampa-Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria-Universidad Nacional de La Pampa, Buenos Aires, Argentina.

Chaney, J.; Quirk, W. J., Chow, S. H. y Kornfeld, J. (1977). "A Comparative Study of the Effect of Albedo Change on Drought in Semi-arid Regions". *Journal of the Atmospheric Science*. 34:1366-1385.

Cierniewski, J., A. Karnieli, C. Ka_zmierowski, and J. Ceglarek, (2014) "A Tool for Predicting Diurnal Soil Albedo Variation in Poland and Israel". *EARSel eProc.*, 13, 36–40, doi:10.12760/02-2014-1-07.

Claussen, M., Brovkin, V., y Ganapolski, A. (2001). "Biogeophysical versus Biogeochemical Feedbacks of Large-scale Land Cover". *Geophysical Research Letters*, v.28, n.6, p. 1011-1014

Cristóbal, J., Montecinos, S., y Maldonado, A. (2008). "Características Climáticas de la Región de Atacama". Libro rojo de la flora nativa y de los sitios prioritarios para su conservación: Región de Atacama, p. 25-42.

Cunha, A.P.M.D.A., Alvalá, R.C.D.S., y Oliveira, G.S.D. (2013). "Impactos das Mudanças de Cobertura Vegetal nos Processos de Superfície na Região Semiárida do Brasil". *Revista Brasileira de Meteorologia*, 28(2), 139-152.

Dobos, E., 2006: Albedo. Encyclopedia of Soil Science, R. Lal, Ed., CRC Press, 64–66.

Fontanella, D.R y Aumassane, C.M. (2015). “Evapotranspiración de Maíz, Alfalfa y Vid Bajo Riego, en la Cuenca Media del Río Colorado”.

<https://inta.gob.ar/documentos/evapotranspiracion-de-maiz-alfalfa-y-vid-bajo-riego-en-la-cuenca-media-del-rio-colorado>

Franch, B., y Sobrino, J. A. (2013). “Evolución del Albedo en Europa e Influencia en la Temperatura”. *Revista de Teledetección*, 39, 22-33.

Gabriel, J. L., Almendros, P., Hontoria, C., Quemada, M. (2012). “The Role of Cover Crops in Irrigated Systems: Soil Salinity and Salt Leaching”. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 158: 200-207 p.

Guerschman, J.P., Paruelo, J.M. y Burke, I.C (2003) "Land Use Impacts on the Normalized Difference Vegetation Index in Temperate Argentina." *Ecological applications* 13.3: 616-628.

Jobbágy, E. G., Noretto, M., Paruelo, J. M., y Piñeiro, G. (2006). “Las Forestaciones Rioplatenses y el Agua”. *Ciencia Hoy*, 16(95), 12-21.

Leitão, Mário de Miranda VBR, and Gertrudes Macario de Oliveira (2000). "Influence of Irrigation on Albedo". *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 4.2: 214-218.

Masseroni, M. L., Aumassane, C. M., Sartor, P. D., Zamora, C. D., y Fontanella, D. R. (2018). “Calidad del Agua para Riego: Situación Histórica y Actual del Río Colorado (comunicación breve)”. *Boletín Geográfico*, 2(40), 44-53.

Noy-Meir, I. (1973). “Desert Ecosystems: Environment and Producers”. *Annual review of ecology and systematics*, 4(1), 25-51.

Paruelo J. M. y Caride C. (2012). “Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica: Sus Aplicaciones en Agronomía y Ciencias Ambientales”. Cap. 9.

Pérez, A. J., Abrahao, R., Causape, J., Cirpka, O. A., Burger, C.M. (2011). “Simulating the Transition of a Semi-arid Rainfed Catchment Towards Irrigation Agriculture”. *Journal of Hydrology* 409: 663-681.

Reynolds, J. F., Stafford Smith, D. M., Lambin, E. F., Turner II, B. L., Mortimore, M., Butterbury, S. P. J., Dowlatabadi, H., y Fernández, R. J. (2007). “Global Desertification: Building a Science for Dryland Development”. *Science* 316, 847-851.

Rouse Jr, J., Haas, R. H., Schell, J. A., y Deering, D. W. (1974). “Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS”.

Scanlon, B. R., Reedy, R. C., Stonestrom, D. A., Prudic, D. E., y Dennehy, K. F. (2005). “Impact of Land Use and Land Cover Change on Groundwater Recharge and Quality in the Southwestern US”. *Global Change Biology*, 11(10), 1577-1593.

Scanlon, B. R., Jolly, I., Sophocleous, M., Zhang, L. (2007). "Global Impacts of Conversions from Natural to Agricultural Ecosystems on Water Resources: Quantity versus Quality." *Water resources research* 43: 1-18.

Seyfried, M. S., Schwinning, S., Walvoord, M. A., Pockman, W. T., Newman, B. D., Jackson, R. B., y Phillips, F. M. (2005). "Ecohydrological Control of Deep Drainage in Arid and Semiarid Regions". *Ecology*, 86(2), 277-287.

Tucker, Compton J., John RG Townshend, and Thomas E. Goff. (1985). "African Land-cover Classification Using Satellite Data". *Science* 227.4685: 369-375

Twine, T. E. (2004). "Effects of Land Cover Change on the Energy and Water Balance of the Mississippi River Basin". *Journal of Hydrometeorology*. v. 5, p. 640-655.

Pryor, S. C., R. C. Sullivan, and T. Wright. (2016). "Quantifying the Roles of Changing Albedo, Emissivity, and Energy Partitioning in the Impact of Irrigation on Atmospheric Heat Content". *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 55.8: 1699-1706.

Vázquez, P. (2014). "La ecuación suelo-paisaje, los sensores remotos y la actualización de la cartografía edáfica de la provincia de La Pampa". *Publicación técnica n°98*. Ediciones INTA. ISSN 0325-2132.

Vázquez P., Masuelli S. y Platzeck G. (2006). "Determinación de Patrones Espectrales para Distintos Usos del Suelo en Ambientes Heterogéneos". *Publicación técnica n°1*. Ediciones INTA. ISSN 1850-6496. 34 pp.

Wainwright, J., Parsons, A. J., Schlesinger, W. H., y Abrahams, A. D. (2002). "Hydrology-Vegetation Interactions in Areas of Discontinuous Flow on a Semi-arid Bajada, Southern New Mexico". *Journal of Arid Environments*, 51(3), 319-338.

Webster, P. J. (1994). "The Role of Hydrological Processes in Ocean-atmosphere Interactions". *Reviews of Geophysics* 32:422-476.

Wilcox, B. P., Seyfried, M. S., Breshears, D. D., Stewart, B., y Howell, T. (2003). "The Water Balance on Rangelands". *Encyclopedia of water science*, 791-794.

Zamora, C. D., Sartor, P. D., Fontanella, D. R., Aumassanne, C. M., Fontana, L. M. C., y Ruiz, M. D. L. A. (2016). "Evaluación de la Producción de Materia Seca en Variedades de Alfalfa (*Medicago sativa*) de Diferentes Grados de Reposo Invernal, en el Área Bajo Riego de La Pampa". 39° Congreso Argentino de Producción Animal, Tandil, Buenos Aires, 19 y el 21 de octubre de 2016.