

# Conductores ambientales de la productividad de buffelgrass en el Chaco Arido de La Rioja (Argentina)

Luna Toledo, E. S. ; Figuerola, P. I. y Sancho, A. R.

## RESUMEN

El Chaco Árido se caracteriza por la producción ganadera extensiva, con prácticas de manejo inadecuadas que aumentaron la degradación. Debido a esto, la superficie de pasturas exóticas, principalmente buffelgrass, aumentó considerablemente. El objetivo de este trabajo fue evaluar los conductores ambientales de la PPNA de buffelgrass (temperaturas, precipitación y evapotranspiración real -ETr-), durante dos periodos de crecimiento: 2015-2016 y 2016-2017. Ambos periodos presentaron características térmicas similares, sin embargo, existió un fuerte contraste en las precipitaciones: el periodo 2015-2016 tuvo valores extraordinarios (~670 mm) y es denominado "año húmedo". Este periodo estuvo asociado a un evento de "El Niño" intenso. El periodo 2016-2017 tuvo precipitaciones acumuladas (PPac) menores a la normal (~380 mm) y es denominado "año seco". La ETr acumulada (ETRac) fue de 342 y 251 mm, mientras que la PPNA fue de 4046 y 3036 kg ha<sup>-1</sup> para el año húmedo y seco respectivamente. La comparación de índices de eficiencia entre año húmedo y seco fue: 1) PPNA/PPac: 7,97 vs 6,01 kg ha<sup>-1</sup> de forraje por mm de lluvia 2) PPNA/ETRac: 11,83 vs 12,09 kg ha<sup>-1</sup> de forraje por mm de evapotranspiración y 3) ETRac/PPac: 51% vs 66% de precipitación utilizada en evapotranspiración para año húmedo y seco, respectivamente.

**Palabras clave:** evapotranspiración real, Eddy Covariance, El Niño

Luna Toledo, E. S.; Figuerola, P. I. and Sancho, A. R., 2019. Environmental drivers of buffelgrass productivity in Chaco Arido of La Rioja (Argentina). RADA X: 59-70

## SUMMARY

The Arid Chaco is characterized by extensive production of livestock, with inadequate management practices that increased degradation. Due to this, the surface of exotic pastures, mainly buffelgrass, increased considerably. The objective of this work was to evaluate the environmental drivers of the buffelgrass ANPP (temperatures, precipitation and real evapotranspiration -ETr-), during two station of growth: 2015-2016 and 2016-2017. Both periods presented similar thermal characteristics, however, there was a strong contrast in rainfall: the 2015-2016 period had extraordinary values (~ 670 mm) and it was called "wet year". This period was associated with an intense "El Niño" event. The 2016-2017 period had accumulated rainfall (PPac) less than normal

(~ 380 mm) and it was called "dry year". The accumulated ETr (ETRac) was 342 and 251 mm, while the ANPP was 4046 and 3036 kg ha<sup>-1</sup> for the wet and dry year respectively. The efficiency index comparison between wet and dry year was: 1) ANPP / PPac: 7.97 vs. 6.01 kg ha<sup>-1</sup> of forage per mm of rain 2) ANPP / ETRac: 11.83 vs. 12.09 kg ha<sup>-1</sup> of forage per mm of evapotranspiration and 3) ETRac / PPac: 51% vs 66% of precipitation used in evapotranspiration for wet and dry year, respectively.

**Keywords:** real evapotranspiration, Eddy Covariance, El Niño.

*Luna Toledo, E. S. y Figuerola, P. I.: Instituto de Ambiente de Montaña y Regiones Áridas, IAMRA - Universidad Nacional de Chilecito, 9 de Julio 22, Chilecito, La Rioja. Sancho, A. R.: Estación Experimental Agropecuaria Ing. Juan Carlos Vera. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Correspondencia a: etoledo@undec.edu.ar*

## INTRODUCCIÓN

El Chaco Seco en la actualidad conserva cerca del 70% de su cobertura nativa (García *et al.*, 2017), sin embargo, las tasas de desmonte han tenido una velocidad dramática en las dos últimas décadas, siendo una de las más altas en el mundo (Hansen *et al.*, 2013; Vallejos *et al.*, 2015).

En el extremo más árido de esta región, conocido como Chaco Árido, la principal actividad económica es la ganadería extensiva bovina y caprina (Blanco *et al.*, 2005; Quiroga *et al.*, 2009). Al menos 1.000.000 de cabezas de ganado bovino y 200.000 cabras pastan en la región (Blanco *et al.*, 2008), con bajos índices de productividad ganadera (50% de terneros logrados), y de carne (5,5 kg ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup>), atribuidos al deterioro de los pastizales y a las prácticas de manejo inadecuadas (Diez *et al.*, 1991).

En este contexto, la implantación de pasturas exóticas, principalmente buffelgrass (*Cenchrus ciliaris* L.), han sido el mayor tipo de reemplazo de la vegetación leñosa nativa, con el objetivo de aumentar la producción ganadera. El buffelgrass es un pasto C4, perenne megatérmico, nativo del sur de África, India e Indonesia que fue introducido en muchas regiones áridas y semiáridas del mundo con el fin de recuperar áreas degradadas, y proporcionar forraje en cantidad y calidad al ganado (Bashaw, 1985; Cox *et al.*, 1988; Ward *et al.*, 2006). Esta pastura ha tenido una gran difusión entre los productores ganaderos de la región, debido a su tolerancia a la sequía, al pastoreo pesado y su resistencia al fuego (Hall, 2001; Jackson, 2004; Namur *et al.*, 2014). Se adapta a un amplio espectro de climas y suelos, y posee

un marcado crecimiento estival, comenzando a rebrotar con las primeras lluvias de la primavera y entrando en senescencia a finales del otoño cuando aparecen las primeras heladas (Ward *et al.*, 2006; Namur *et al.*, 2014). La productividad forrajera de esta pastura es altamente dependiente de las precipitaciones y produce entre 8 y 10 kg.mm<sup>-1</sup>ha<sup>-1</sup> (Ferrando *et al.*, 2005).

La tasa de expansión de esta pastura ha sido muy elevada en la región de los Llanos de La Rioja, que representa aproximadamente el 50% del Chaco Árido. La superficie implantada con buffelgrass hasta el año 2001 era de 13.337 hectáreas, mientras que al cabo de 10 años la superficie se incrementó a 74.305 hectáreas, siendo en nuestros días superior a las 120.000 ha (Mastorakis, 2014; Garay y Agüero, 2018). Este incremento no fue acompañado de un conocimiento acabado de los efectos de estos reemplazos en los atributos funcionales del ecosistema, en particular del dióxido de carbono y el agua.

La evapotranspiración y la productividad son dos de los atributos funcionales más importantes del ecosistema, fundamentales en la comprensión de las interacciones en el sistema suelo-planta-atmósfera (Zhang *et al.*, 2017), en los ciclos del agua, energía y carbono. La transpiración está estrechamente relacionada con los canopeos y con los intercambios de dióxido de carbono con la atmósfera, a través de la fotosíntesis y la respiración autotrófica (Zhang *et al.*, 2016). Los ciclos del agua y del carbono se encuentran íntimamente acoplados en los ecosistemas terrestres (Ito & Inatomi, 2012). Una forma frecuente de vincularlos es mediante la eficiencia en el uso del agua, que es interpretada como la relación entre los gramos

de materia seca producida y los milímetros de agua usados por la vegetación (Ej. Cociente entre la productividad primaria neta y la precipitación o evapotranspiración real).

Existe en la actualidad un consenso sobre el uso de la técnica de Eddy covariance, como protocolo de medición de los intercambios de materia y energía entre el ecosistema y la atmósfera. Este tipo de mediciones han permitido entender el funcionamiento de los ecosistemas alrededor del mundo (Sala y Austin, 2000), mejorando la comprensión sobre los ciclos de agua, carbono y energía en los ecosistemas durante los últimos 30 años (Baldocchi *et al.*, 2014). Algunas de las ventajas de este método son: i) mediciones directas de flujos turbulentos de masa y energía en la superficie de interés, ii) no perturba el ecosistema muestreado, iii) las mediciones representan un área de muestreo con una distancia (footprint) adecuada para la escala de ecosistema, iv) el muestreo con una alta frecuencia temporal (10-20 Hertz) proporciona información acerca de los flujos en escala horaria o sub-horaria (Sala y Austin, 2000; Baldocchi *et al.*, 2001; Campioli *et al.*, 2015; Foken, 2017).

El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), obtenido desde sensores remotos satelitales, es considerado un buen proxy de la productividad primaria (Pettorelli *et al.*, 2005, Paruelo 2008, Blanco *et al.*, 2008), ya que integra la relación de múltiples variables ambientales. Este índice se calcula a partir de las reflectancias de las bandas rojo e infrarrojo cercano.

El objetivo de este trabajo fue analizar los patrones estacionales de la temperatura, la precipitación y la evapotranspiración real, como conductores de la productividad de buffelgrass, y

en base a esta información, calcular los índices de eficiencia de uso de agua para un periodo seco y uno húmedo, en la porción del Chaco Árido de La Rioja.

## MATERIALES Y MÉTODOS

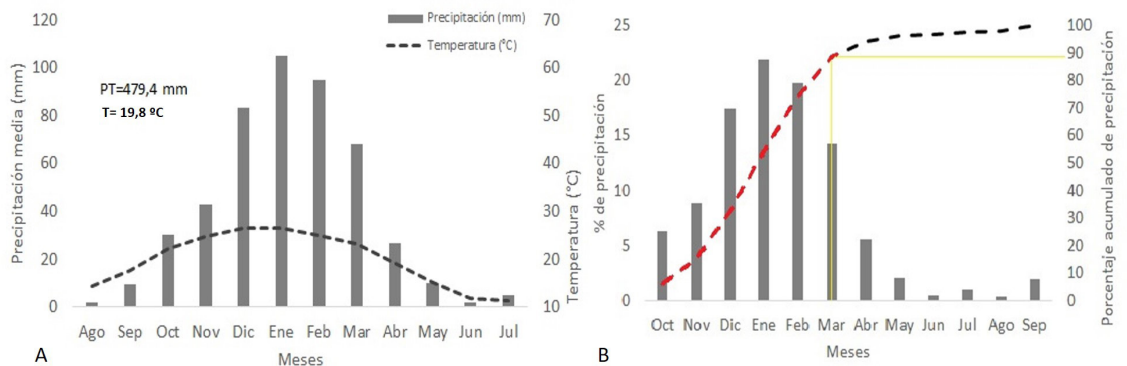
### Sitio de estudio

El sitio de estudio está ubicado en la Estación Experimental Agropecuaria "Juan Carlos Vera", de INTA La Rioja, y pertenece a la región del Chaco Árido, que abarca el oeste de Córdoba, este de La Rioja, sur de Catamarca, centro-norte de San Luis, este de San Juan y una pequeña área al suroeste de Santiago del Estero.

Su clima es subtropical, semiárido, con veranos calurosos e inviernos suaves. La Fig. 1 muestra la marcha anual de la temperatura y precipitación para la estación Aero-Chamical, dependiente del Servicio Meteorológico. La temperatura media anual es de 19,8°C. Enero y diciembre tienen la temperatura media más alta ~26°C, mientras que julio es el más frío 11,3°C, la precipitación acumulada en el año es de 479,4 mm (Fig. 1a), con una marcada estacionalidad, concentrando aproximadamente el 90% de la misma entre los meses de octubre y marzo (Fig. 1b).

Los suelos de la región son *aridisoles* y *entisoles*, predominantemente de textura gruesa, y con bajo contenido de materia orgánica (Gómez *et al.*, 1993; Quiroga *et al.*, 2010).

La vegetación actual del Chaco Árido se caracteriza por un mosaico altamente fragmentado (Zak *et al.*, 2004; Verón *et al.*, 2018), donde los arbustales subtropicales xerofíticos dominados



**Figura 1:** A) variación climática mensual (2001-2010) de la temperatura (°C) y la precipitación (mm) para AERO-Chamical. B) variación porcentual mensual (barra gris) y acumulada (línea punteada) de la precipitación media mensual de AERO Chamical (SMN 476, OMM 87320).

por los géneros *Larrea*, *Mimozyanthus*, *Senna* y *Capparis* constituyen la matriz continua de vegetación dominante, con parches aislados de árboles principalmente *Aspidosperma quebrachoblanco* y *Prosopis Spp* (Morello, 1985).

El estrato herbáceo está compuesto principalmente pastos perennes C4, del género *Trichloris*, *Chloris*, *Pappophorum*, *Aristida*, *Neobouteloua* y *Setaria* (Anderson *et al.*, 1980; Morello, 1985). Este estrato de vegetación, es el más afectado por el pastoreo del ganado, mostrando pérdidas de productividad debido al sobrepastoreo (Kunst *et al.*, 2006; Biurrun *et al.*, 2015).

### Variables ambientales

Todas las variables ambientales se midieron en una parcela experimental de 100 hectáreas continuas de buffelgrass en INTA-EEA-La Rioja, donde 13 hectáreas se excluyeron del pastoreo. Las mediciones se realizaron durante el periodo noviembre de 2015 a mayo de 2017. Se midieron variables como la precipitación (Pluviologger, Cavadevices), la temperatura del aire media, máxima y mínima (Scientific Campbell). La evapotranspiración real ( $ET_r$ ) fue medida usando el sistema de Eddy covariance (Scientific Campbell). La teoría del Eddy se basa en el transporte turbulento en la capa de superficie de la atmósfera (Montgomery, 1948; Swinbank, 1951; Obukhov, 1951), y se utiliza para calcular flujos escalares y de energía a partir de la covarianza entre mediciones de alta frecuencia (10 Hz en este trabajo) de la velocidad vertical del viento y la concentración de gas (vapor de agua) a una distancia determinada (footprints) por encima de la superficie (Sala y Austin, 2000).

La evapotranspiración se calculó siguiendo la siguiente ecuación Baldocchi *et al.*, 2001:

$$ET_r = \lambda \langle w' \rho_v' \rangle \quad (1)$$

donde  $w'$  ( $m s^{-1}$ ) es la variación instantánea de la velocidad vertical del viento,  $\rho_v'$  ( $kg m^{-3}$ ) es la variación instantánea de la densidad de vapor de agua,  $\langle \rangle$  indica promedio cada 30 minutos, y  $\lambda$  ( $joule kg^{-1}$ ) es el calor latente de vaporización.

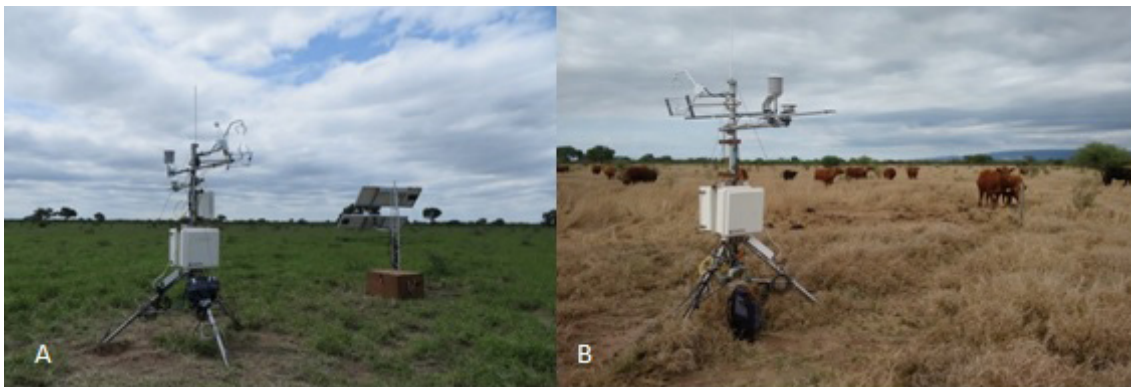
La altura a la que se colocó el instrumental fue de 1,90 m, para garantizar que se midan flujos homogéneos (Foken, 2017) provenientes de la superficie de interés.

El procesamiento de datos de flujos se efectuó usando el software EVEDDY (Ritcher, 2015) que realiza las siguientes funciones: i) verificación de la estacionalidad de los datos, ii) corrección espectral, iii) corrección por inclinación del anemómetro y iv) corrección por temperatura y humedad metodología de Webb-Pearman-Leuning (1980). Así mismo realiza una eliminación de aquellos casos en los cuales el valor de la velocidad de fricción  $u$ , fue igual o menor a  $0,15 m s^{-1}$  los cuales se asocian a situaciones de extrema estabilidad atmosférica.

El footprint o “huella de los flujos” que permite conocer el área de procedencia de los flujos (Hollinger *et al.*, 2004) fue determinado basado en los modelos de Hsieh *et al.* (2000) y Kljun *et al.* (2004).

La ecuación del balance de energía (2) se utiliza como un indicador de la calidad de los datos obtenidos usando Eddy covariance. El cierre de la misma indica buena calidad de las observaciones. La ecuación de balance de energía es definida como:

$$LE + H = Rn - G \quad (2)$$



**Figura 2:** Torre de intercambio de flujos “Eddy Covariance” instalada sobre una parcela de buffelgrass en Chamental, La Rioja. A) principio de la estación de crecimiento. B) fin de la estación de crecimiento.

donde LE y H son el flujo de calor latente y calor sensible respectivamente (ambos medidos con el Eddy covariance), y Rn es la radiación neta y G es el flujo de calor del suelo. En general, la ecuación (2) presenta problema de cierre, asociados a varias razones entre ellas la falta de consideración del calor almacenado en la cobertura vegetal o el suelo, y condiciones frecuentes de estabilidad, advección etc. (Wilson *et al.*, 2002). La calidad de los datos presentados en este trabajo, han sido evaluados previamente en Figuerola *et al.* (2018a, b) obteniendo una pendiente de 0,63, un coeficiente de determinación de 0,93, mientras que la relación de balance de energía (RBE) fue de 0,78. Estos valores se ubican en el rango de los encontrados en la literatura para torres de Eddy covariance alrededor del mundo (Wilson *et al.*, 2002).

La estacionalidad del índice de vegetación de diferencia normalizado (NDVI) se utilizó para caracterizar el periodo de estudio (Petorelli *et al.*, 2005), entre ellos: inicio y fin de fase de crecimiento, la duración de la estación de crecimiento, y máximos y mínimos de la serie de NDVI. Estos atributos fueron obtenidos usando el software TimeSat (Jönsson and Eklundh, 2004).

Utilizamos el NDVI de píxeles puros del centro de la parcela, correspondiente al producto MOD13Q1 (MODIS, 1999) del sensor MODIS a bordo del satélite TERRA. Este producto tiene una resolución espacial de 250 m. y una integración temporal de 16 días (23 imágenes por año). Los datos se descargaron de modo gratuito del Servicio Geológico de Estados Unidos (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) y fueron procesados utilizando los softwares R (2019), Package MODISTSP (Busetto & Ranghetti, 2016): <https://github.com/ropensci/MODISTsp> y ERDAS imagine (<https://www.hexagongeospatial.com>).

### Productividad de buffelgrass

La Productividad Primaria Neta Aérea (PPNA) se estimó mediante el método de cosecha, que consiste en cortes sucesivos de fitomasa a nivel del suelo durante la estación de crecimiento (Sala y Austin, 2000) en una parcela excluida del pastoreo. Los cortes fueron realizados con una frecuencia mensual durante el periodo noviembre/2015 a mayo/2017. Se usaron parcelas de corte de dimensiones conocidas 1,0 m x 0,5 m, y se muestreo en una transecta de 300 m, con 30 cortes cada 10 metros. El material cosechado fue secado en estufa de convección forzada a 80°C durante 48 horas, y pesado con una precisión de 0,1 gr (De Wysiecki y Sánchez, 1992).

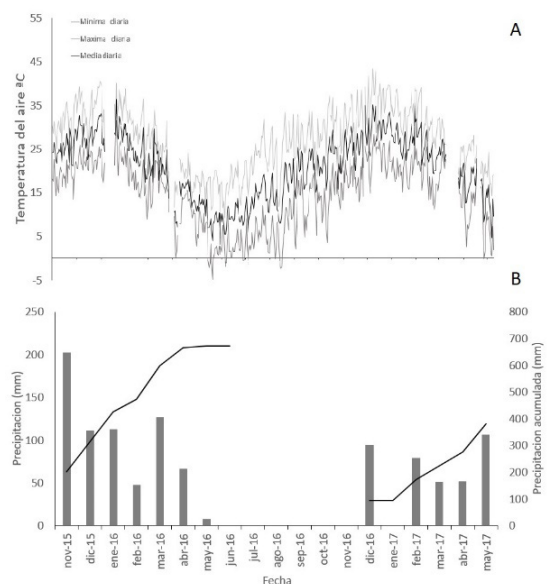
### Análisis estadístico de los datos

Los datos se analizaron mediante modelos de regresión lineal, y modelos lineales, generales y mixtos (MLGM), con nivel de significancia de 0,05. Para comparar medias se utilizó test de LSD de Fisher. Los análisis se realizaron utilizando el software estadístico Infostat (Di Rienzo *et al.*, 2011)

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Temperatura y precipitación

La Fig. 3 muestra la variación estacional de las condiciones ambientales durante el experimento (temperatura media, máxima y mínima del aire, precipitación, y precipitación acumulada). Durante las dos estaciones de crecimiento (noviembre a mayo) se registraron 6 días en donde las temperaturas máximas fueron mayores a 40°C, sin valores menores a cero grados. La máxima absoluta durante los dos periodos de crecimiento fue de 43,5°C y ocurrió el día 03/01/2017. La temperatura mínima absoluta fue de 0,07°C el 27/04/2016. La temperatura media diaria para los dos periodos fluctuó entre valores de 4,3°C y 37,5°C (Fig. 3a). La Tabla 1 muestra los valores medios de temperatura, siendo estos muy parecidos para ambos periodos. Las condiciones térmicas favorecieron el crecimiento y el desarrollo de la pastura en las



**Figura 3:** Variación de las condiciones ambientales: A) temperatura (media, máxima y mínima); B) precipitación (mensual y acumulada) sobre la parcela de buffelgrass durante el periodo noviembre/2015 a mayo/2017.

**Tabla 1:** Caracterización térmica de las dos estaciones de crecimiento (noviembre a mayo) consideradas: temperatura media (Tm); temperatura máxima media (Tmx<sub>m</sub>); temperatura mínima media (Tmn<sub>m</sub>), y temperatura máxima absoluta (Tmx<sub>abs</sub>)

	Tm (°C)	Tmx <sub>m</sub> (°C)	Tmn <sub>m</sub> (°C)	Tmx <sub>abs</sub> (°C)
2015-2016	25,1	30,8	19,4	40,5
2016-2017	25,7	31,9	18,8	43,4

dos estaciones de crecimiento. Buffelgrass es una pastura megatérmica que muestra valores óptimos de crecimiento y desarrollo con temperaturas altas (Cox *et al.*, 1988; Ward *et al.*, 2006).

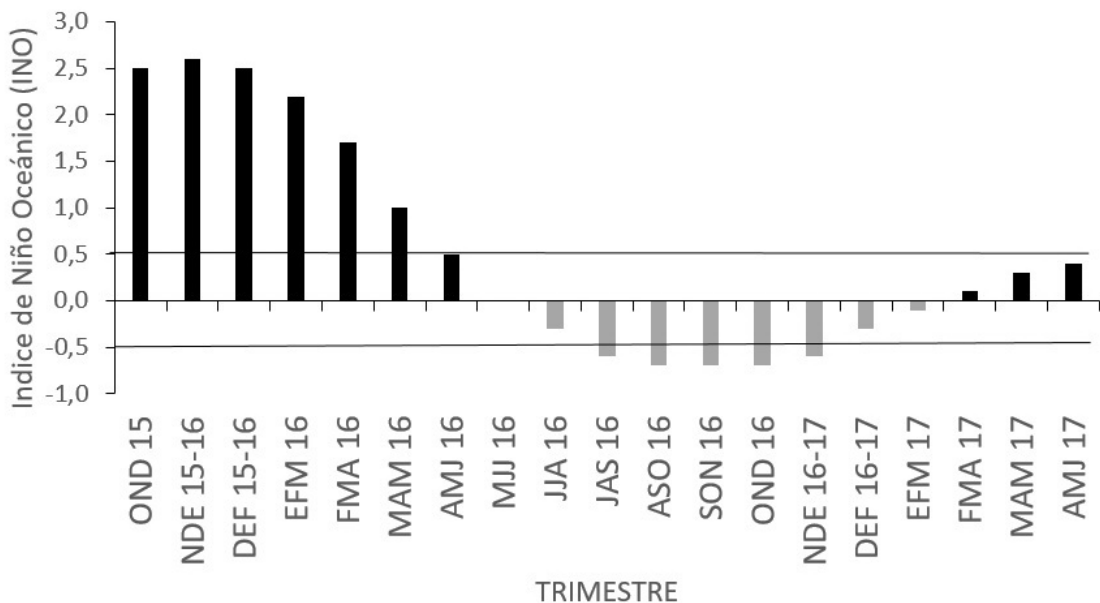
Existieron dos ciclos contrastantes de precipitaciones (Fig. 3b) durante todo el periodo estudiado. Un primer periodo 2015-2016 con precipitación acumulada en la etapa de crecimiento (noviembre-mayo) del buffelgrass de 672 mm, siendo muy superior al valor normal (430,9 mm: desde estadística 2001-2010) y que denominamos “año húmedo”, y un segundo periodo 2016-2017 con valores de precipitación que estuvieron por debajo (380 mm) del valor normal, y que denominamos “año seco”. Este comportamiento muestra una fuerte asociación con el Índice del Niño Oceánico (INO).

La Fig. 4 muestra la secuencia de valores del INO. Estos valores son calculados trimestralmente por el Climate Prediction Center de Estados Unidos

([https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ONI\\_v5.php](https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php)). Valores positivos del índice y superiores al umbral de 0,5 está asociado con el evento “El Niño”. Durante la primera estación de crecimiento (2015-2016) los valores de INO, indicado con barras de color negro en la Fig. 4, superan ampliamente el valor de 0,5, y explicarían la ocurrencia de valores de precipitación muy por encima de los valores normales en Chamental para este periodo. Debido a la intensidad del evento “El Niño” para el año 2015-2016 es que se lo ha denominado “Súper Niño” en la literatura reciente (Chen *et al.*, 2017; Zhu *et al.*, 2018). Valores negativos de INO menores al valor de -0,5 estarían asociados a un periodo frío de la Oscilación del Sur. La secuencia del índice durante el segundo año muestra valores negativos, por debajo del valor umbral, pero de menor intensidad. Esto podría explicar la ocurrencia de precipitaciones por debajo de la media para el segundo ciclo de crecimiento.

### Evapotranspiración de Buffelgrass

Los valores de LE (ecuación 2) fueron convertidos a lámina de agua por unidad de tiempo (mmd<sup>-1</sup>), obteniendo la evapotranspiración real del buffelgrass (ET<sub>r</sub>). La ET<sub>r</sub> mostró, en valores mensuales, una variación estacional muy marcada en la Fig. 5a. Debido a las



**Figura 4:** Índice de Niño Oceánico para el periodo de estudio (octubre/2015 a mayo/2017). Las líneas horizontales indican valores umbrales. Fuente: Prediction Climate Center (USA).

precipitaciones concentradas en los meses de verano, la ETr se concentra en los meses cuando ocurren las mayores entradas de agua al sistema y las temperaturas altas. Sin embargo, en invierno cuando la precipitación es casi nula, la ETr cae progresivamente hasta alcanzar su mínimo entre junio y agosto con un promedio de 5,5 mm en el mes. El valor acumulado de ETr en el periodo noviembre/2015 a mayo/2016 fue de 342 mm, mientras que en la temporada de crecimiento del año seco (noviembre/2016 a mayo/2017) la ETr acumulada fue de 251 mm (Tabla 2). Los meses de mayor contribución de ETr para el año húmedo fueron diciembre, enero y febrero, superando el 72% del total de la estación de crecimiento. Mientras que, para el año seco, la contribución de ETr para los mismos tres meses fue menor (55%), desplazándose un porcentaje importante hacia fines de la estación de crecimiento (las contribuciones de marzo, abril y mayo son superiores al 36%). Esto se debe al comienzo tardío de las precipitaciones en el periodo 2016-2017.

**Tabla 2:** Resumen de la Productividad Primaria Neta Aérea (PPNA), precipitación acumulada (PP), y la evapotranspiración real acumulada ( $E_{Tr_{ac}}$ ), en el periodo de crecimiento durante el año húmedo (2015-2016) y seco (2016-2017).

	PPNA ( $kg\ ha^{-1}$ )	PP <sub>ac</sub> (mm)	ETr <sub>ac</sub> (mm)
Año húmedo	4046	672	342
Año seco	3036	380	251

### Estacionalidad del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

En la Fig. 5b se muestra el patrón estacional del NDVI, durante los dos periodos de estudio. Una síntesis del comportamiento para el año húmedo y seco, se muestra en la Tabla 3. Para el año húmedo, los valores máximos de NDVI, como así también la longitud de la estación de crecimiento y la integral del NDVI fueron mayores que durante el año seco. Sin embargo, no se encontraron diferencias significativas en el análisis de la integral de NDVI entre año húmedo y seco (MLGM,  $p > 0.05$ ).

**Tabla 3:** Caracterización de la estación de crecimiento a partir datos de índice de vegetación de diferencia normalizado (NDVI), donde se indica la fecha de inicio y finalización del crecimiento, longitud en días del periodo de crecimiento valores mínimos y máximos de las series de NDVI para el año húmedo y seco.

Estación de crecimiento	Inicio	Fin	Longitud en días	NDVI	
				Mínimo/Máximo	Integral-NDVI (*)
Año húmedo	17/11/2015	25/05/2016	193	0,251 / 0,695	2.38
Año seco	17/01/2017	10/06/2017	145	0,284 / 0,618	1.75

\*Obtenidas desde Luna Toledo et al.; 2018 (Sin diferencias significativas  $p > 0.05$ ).

### Productividad Primaria Neta Aérea

La relación entre PPNA y la integral del NDVI fue analizada para este sitio y para ambos periodos por Luna Toledo *et al.*, (2018), encontrando una excelente relación entre ambas variables.

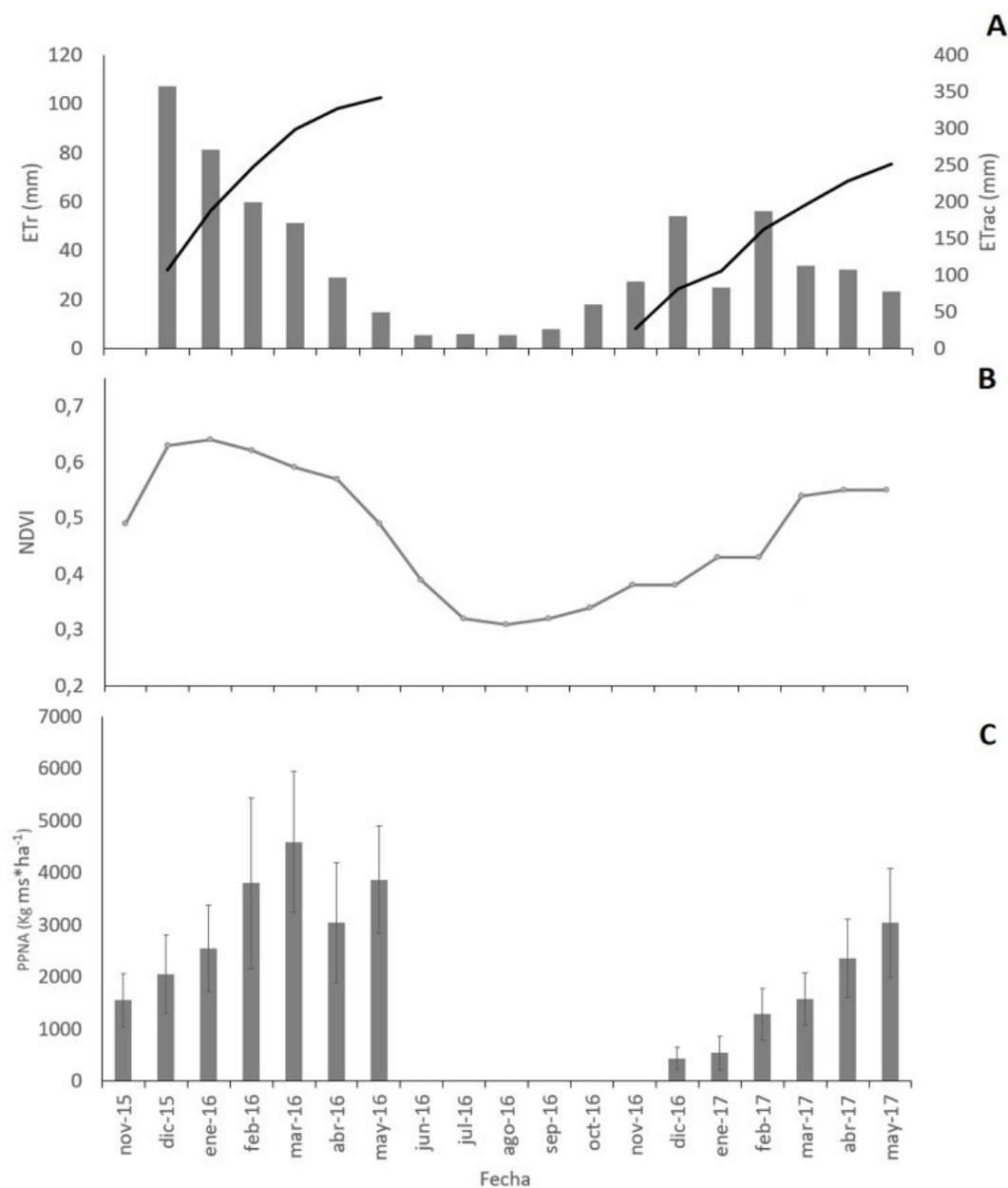
La variación estacional de la PPNA es mostrada en la Fig. 5c. La PPNA en el año seco fue un 25 % menor que en el año húmedo (Tabla 2), mientras que la diferencia de precipitación entre ambos periodos fue de 44 %. Namur *et al.* (2014) menciona que para la región de los Llanos de La Rioja la producción estaría en unos  $3500\ kg\ ha^{-1}$  para una precipitación media en la estación de crecimiento de 430 mm.

En concordancia con la ocurrencia de las precipitaciones, la PPNA en el año húmedo aumenta rápidamente en el verano (diciembre-enero-febrero de 2016), mientras que durante el año seco lo hace durante los meses de otoño (marzo, abril y mayo de 2017).

Hodgkinson *et al.* (1989), determinó el rango óptimo de temperatura para la fotosíntesis en buffelgrass entre  $25^{\circ}C$  y  $37^{\circ}C$ . A partir de los datos temperatura máxima y precipitación diaria, evaluamos si existe coincidencia entre la ocurrencia de las precipitaciones y las temperaturas óptimas para nuestro sitio. Así durante el año húmedo, el 70% de las precipitaciones ocurrieron entre noviembre y febrero. Para estos meses, el 72% de los días tuvieron temperaturas máximas óptimas. Mientras que, durante el año seco, el 70% de las precipitaciones fueron alcanzadas en otoño. Este retraso en la ocurrencia de las precipitaciones hace que las temperaturas bajen considerablemente. Así, los meses de abril y mayo de 2017, tuvieron solamente un 40% de días con rangos de temperaturas óptimas. La ocurrencia simultánea de precipitaciones y temperaturas óptimas, maximiza la PPNA de buffelgrass.

### Eficiencia de uso de agua

La eficiencia de uso de agua es la relación entre la producción de materia seca y la precipitación o la evapotranspiración. Este índice de eficiencia



**Figura 5:** Evolución mensual de: A) evapotranspiración real (ETr) y valor acumulado ETrac; B) NDVI, y C) Productividad Primaria Neta Aérea (PPNA) de buffelgrass (kg de masa seca ha<sup>-1</sup>) incluyendo la desviación estándar.

varía entre especies debido al metabolismo (C3 vs C4), composición de la biomasa y a características de uso de agua, y entre climas que condicionan la demanda atmosférica (Della Maggiora *et al.*, 2002).

En base a los valores obtenidos de precipitación acumulada ( $PP_{ac}$ ), evapotranspiración acumulada ( $ETr_{ac}$ ) y productividad primaria neta aérea (PPNA) al final de cada periodo, se calcularon los índices 1)  $PPNA/PP_{ac}$  (eficiencia en el uso de

la precipitación): nos indica la cantidad de pasto producido por milímetro de lluvia caída. 2)  $PPNA/ETr_{ac}$  (agua productiva): indica la cantidad de pasto producido por milímetro de agua evapotranspirada, y 3)  $ETr_{ac}/PP_{ac}$  (precipitación evaporada): indica la proporción de milímetros evaporados en relación a los milímetros de lluvia. Se calcularon índices de eficiencia para el año húmedo: 2015-2016, y seco: 2016-2017 (Tabla 4).



**Tabla 4:** índices de eficiencia de uso de precipitación (PPNA/PP<sub>ac</sub>) en kg ha<sup>-1</sup> mm<sup>-1</sup>; eficiencia de uso de agua (PPNA/ET<sub>r</sub>) en kg ha<sup>-1</sup> mm<sup>-1</sup>, y precipitación efectiva (ET<sub>r</sub>/PP<sub>ac</sub>).

Periodo	PPNA	PPNA	ET <sub>r</sub>
	PP <sub>ac</sub>	ET <sub>r</sub>	PP <sub>ac</sub>
Año húmedo	6,01	11,83	0,51
Año seco	7,97	12,09	0,66

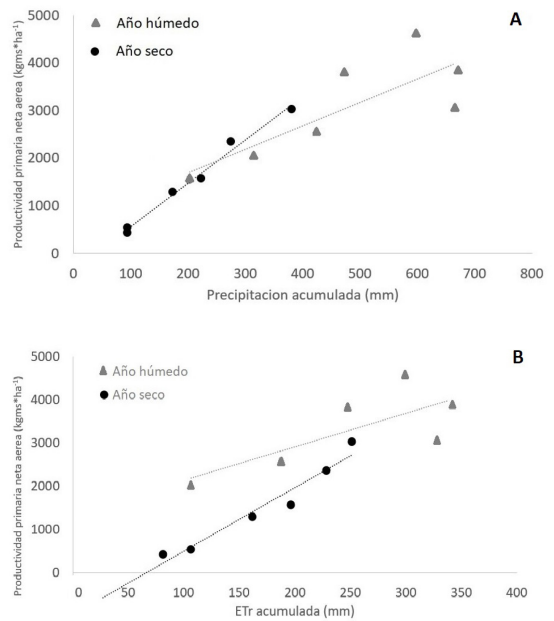
Los resultados (Tabla 4) indican que en el año seco el buffelgrass es mas eficiente en el uso de la precipitación ya que PPNA/PP<sub>ac</sub> dio 6,01 vs 7,97 kg de forraje por milimetro de lluvia por hectarea, en año humedo versus año seco. Cambios en la entrada de agua al sistema condiciona fuertemente la eficiencia de conversión de PP a PPNA.

El analisis de agua productiva (PPNA/ET<sub>r</sub>) muestra valores similares de conversión en año humedo y seco 11,83 vs 12,09 kg de forraje por hectarea por milímetros de agua evapotranspirada respectivamente, lo que podria indicar que en años con precipitación elevada existe una recarga en el suelo que no se da en el año seco. Los valores de precipitación evaporada (ET<sub>r</sub>/PP<sub>ac</sub>) refuerzan esta idea, ya que en el año humedo el 51% de la precipitación fue utilizada en evapotranspiración, mientras que en el año seco fue el 66%.

Huxman *et al.* (2014) han mostrado en diferentes biomas que la eficiencia de uso de la precipitación disminuye a medida que la precipitación anual aumenta. Este resultado concuerda con los resultados de este trabajo. Huxman *et al.*, (2014) también afirman, que en los años más secos existe una convergencia hacia una eficiencia máxima de uso de la precipitación siendo típico en ecosistemas áridos. En consecuencia, los años en que el agua es limitante, en desiertos, pastizales y bosques cada uno de ellos exhiben la misma tasa de producción de biomasa por unidad de lluvia a pesar de las diferencias de fisonomía y eficiencia a nivel del sito.

La Fig. 6 muestra la relacion lineal entre la PPNA con la entrada de agua al sistema (PP), y la salida por ET<sub>r</sub> (Fig. 6 a-b) durante la estacion de crecimiento, esta relacion tiene similitudes

con estudios hechos por Della Maggiora *et al.*, (2002), para cultivos pampeanos de secano. La precipitación en este tipo de sistemas es la única fuente de ingreso de agua, y por lo tanto condiciona fuertemente la PPNA. El efecto de las precipitaciones y la ET<sub>r</sub> fue diferente en el año húmedo que en el seco. Para explicar este patrón, nosotros usamos el coeficiente de correlación de Pearson y la pendiente de la recta como se muestra en la Tabla 5.



**Figura 6:** Relación entre la Productividad Primaria Neta Aérea (PPNA) mensual y la precipitación acumulada mensual A) y a la evapotranspiración real acumulada mensual B) para el año húmedo y seco. El mes de noviembre no tiene ETac.

Los valores del coeficiente de determinación entre PPNA con PP y con ET<sub>r</sub> son bajos para el año húmedo, y se observa que estos valores son más cercanos a uno en el caso del año seco. En relación a la pendiente, la proporción de agua usada fue mayor en el año húmedo (4,9 kg ha<sup>-1</sup> mm<sup>-1</sup>) que en el año seco (9,1 kg ha<sup>-1</sup> mm<sup>-1</sup>). Respecto a ET<sub>r</sub> (Tabla 5, Fig. 6b) a igual proporción

**Tabla 5:** Relación lineal entre productividad primaria neta aérea (PPNA) y precipitación (PP), entre PPNA y evapotranspiración real (ET<sub>r</sub>), y entre evapotranspiración real (ET<sub>r</sub>) y precipitación (PP). Se muestra el coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>), la pendiente de la recta (a) en kg ha<sup>-1</sup>mm<sup>-1</sup>, y la ordenada al origen (b).

	PPNA-PP			PPNA-ET <sub>r</sub>			ET <sub>r</sub> -PP		
	R <sup>2</sup>	a	b	R <sup>2</sup>	a	b	R <sup>2</sup>	a	b
Año húmedo	0,68	4,9	718,23	0,55	7,75	1366,2	0,97	1,569	-129,74
Año seco	0,98	9,1	-340,64	0,94	14,73	-976,87	0,92	1,588	-64,806

de PPNA ( $\sim 2000 \text{ kg ha}^{-1}$ ), la ETr en el año húmedo fue aproximadamente el doble ( $7,75 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ ) que en el año seco ( $14,73 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ ).

## CONCLUSIONES

Buffelgrass es una pastura exótica ampliamente utilizada por productores ganaderos de la región del Chaco Árido de Argentina. La PPNA de buffelgrass tiene una fuerte estacionalidad determinada por las ocurrencias de precipitaciones y por las altas temperaturas características de la época estival para la región. Cambios en las entradas de agua al sistema condicionan fuertemente la eficiencia de conversión de la precipitación en productividad. La precipitación (PP) acumulada durante el período de crecimiento de la pastura es la variable que más afecta a la productividad primaria neta aérea (PPNA). Durante el período 2015-2016 se produjo un evento El Niño resultando de alta productividad ( $4046 \text{ kg ha}^{-1}$ ).

Los resultados muestran valores más bajos de eficiencia en el uso de la precipitación en el período de crecimiento en el año húmedo ( $6 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ ), en comparación con el mismo período en el año seco (2016-2017) ( $7,97 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ ). Sin embargo, los valores de agua productiva son muy similares entre año húmedo y seco. Esto hace suponer que durante años húmedos, una porción importante del agua precipitada no se convierte en PPNA sino que pasa a formar parte del almacenamiento en el suelo.

## BIBLIOGRAFÍA

- Anderson, D.L., Del Aguila, J.A., Marchi, A., Vera, J.C., Oriente, E.L. & Bernardon, A.E. 1980. Manejo del pastizal natural y producción ganadera Parte I y II. Editorial INTA, Buenos Aires, AR.
- Baldocchi, D.; E. Falge, L. Gu, R. Olson, D. Hollinger, S. Running, J. Fuentes, 2001. FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82(11), 2415-2434.
- Baldocchi, D. 2014. Measuring fluxes of trace gases and energy between ecosystems and the atmosphere—the state and future of the eddy covariance method. *Global change biology*, 20(12), 3600-3609.
- Bashaw, E. C., 1985. Buffelgrass origins. In *Buffelgrass: Adaptation, management and forage quality symposium*. College Station, TX: Texas Agricultural Experiment Station MP-1575 pp. 6-8.
- Biurrun, F.; M. Cabido, L. Blanco, 2015. Consideraciones sobre la vegetación de la provincia de La Rioja y su estado de conservación. En: CASAS, R.; ALBARRACÍN, G. Eds. *El Deterioro del Suelo y del Ambiente de la Argentina*. Fundación para la Educación, la Ciencia y la Cultura –FECIC, Centro para la Promoción de la Conservación del Suelo y del Agua – PROSA. Tomo i, 485-503 pp
- Blanco, L. J.; C. A. Ferrando, F. N. Biurrun, E. L. Oriente, P. Namur, D. J. Recalde, G. D. Berone, 2005. Vegetation responses to roller chopping and buffelgrass seeding in Argentina. *Rangeland ecology & management*, 58(3), 219-224.
- Blanco, L.J.; M. O. Aguilera, J. M. Paruelo, F. N. Biurrun, 2008. Grazing effect on NDVI across an aridity gradient in Argentina. *Journal of Arid Environments* 72, 764–776.
- Busetto, L., & Ranghetti, L. 2016. MODISsp: An R package for automatic preprocessing of MODIS Land Products time series. *Computers & geosciences*, 97, 40-48.
- Campoli, M.; S. Vicca, S. Luysaert, J. Bilcke, E. Ceschia, F. S. Chapin, D. Olefeldt, 2015. Biomass production efficiency controlled by management in temperate and boreal ecosystems. *Nature Geoscience*, 8(11), 843.
- Chen, L.; T. Li, B. Wang, L. Wang, 2017. Formation mechanism for 2015/16 super El Niño. *Scientific reports*, 7(1), 2975.
- Climate National Center 2019. Oceanic Niño Index, USA [https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ONI\\_v5.php](https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php) (Consultada el 08-10-2019)
- Cox, J. R.; M. H. Martin, F. A. Ibarra, J. H. Fourie, N. F. G. Rethman, D. G. Wilcox, 1988. The influence of climate and soils on the distribution of four African grasses. *Rangeland Ecology & Management/Journal of Range Management Archives*, 41(2), 127-139.
- De Wysiecki, M. L.; N. E. Sánchez, 1992. Dieta y remoción de forraje de *Dichroplus pratensis* Orthoptera, Acrididae en un pastizal natural de la provincia de La Pampa, Argentina. *Ecología Austral*, 20(1), 019-027.
- Della Maggiora, A. I.; J. M. Gardiol, A. I. Irigoyen, 2002. Requerimientos hídricos. En libro: *Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja*, F. H. Andrade, V. O. Sadras, Ed. EEA INTA Balcarce-FCA UNMP. Pag.157-174
- Diez, H. A.; H. F. Calella, J. C. Pérez, G. Pignata, G. Bronstein, 1991. Acuerdo federal para el desarrollo rural del Chaco Árido. Documento Proyecto. Consejo Federal de Inversiones.
- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., González, L., Tablada, M., & Robledo, Y. C. (2011). *InfoStat* versión 2011. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www>.

- infostat. com. ar, 8, 195-199.
- ERDAS Imagine 2011. Programa para procesamiento de imágenes satelitales. <https://www.hexagongeoespacial.com>). (Consultado el 10/10/2019)
- Ferrando, C. A.; P. Namur, L. J. Blanco, G. D. Berone, T. A. Vera, 2005. Modulo experimental de cría, buffel grass-pastizal natural, en Los Llanos de La Rioja: índices productivos. Congreso Argentino de Producción Animal.
- Figuerola, P.; E. Luna Toledo, A. Sancho, 2018a. Método de Eddy covariance para medir flujos turbulentos. XVII Reunión Argentina de Agrometeorología. Asociación Argentina de Agrometeorología, Villa de Merlo, San Luis, Argentina.
- Figuerola, P.; E. Luna Toledo, A. Sancho, 2018b. Determinación de flujos turbulentos sobre cubiertas de olivos y buffelgrass por el método de covarianza de vórtices. VIII Congreso Nacional - IV Congreso del Mercosur sobre Manejo de Pastizales Naturales.
- Foken, T., 2017. Micrometeorology. Springer, 2da Edition. Berlín, Heidelberg. 361 pp.
- Garay, D.; J. Agüero, 2018 Determinación de áreas implantadas con buffel grass *Cenchrus ciliaris* L. en los Llanos de La Rioja. XVII Reunión Argentina de Agrometeorología.
- García, A. G.; C. M. Di Bella, J. Houspanossian, P. N. Magliano, E. G. Jobbágy, G. Posse, M. D. Nasetto, 2017. Patterns and controls of carbon dioxide and water vapor fluxes in a dry forest of central Argentina. Agricultural and Forest Meteorology, 247, 520-532.
- Gómez, J. C.; H. Calella, R. Corzo, A. Reynoso, 1993. Mapa de las subregiones de vegetación y suelo del Chaco de La Rioja. Desarrollo rural integral del área de Los Llanos. C.F.I. Gobierno de La Rioja. Universidad Provincial de La Rioja. Importancia en la producción agropecuaria y en el empleo Rioja. 186 pp.
- Hall T. J., 2001 History and development of buffel grass pasture lands in Queensland. In: Buffel Grass Symposium. Proceedings of Workshop Held at Theodore on 21–23 February 2000. Eds. J. Kyte, H. Lees, I. Loxton & B. Cook pp. 2–12. Department of Primary Industries, Brisbane.
- Hansen, M C; P. V. Potapov, R. Moore, M. Hancher, S. A. Turubanova, 2013. Supplementary Materials for High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. Science, p. 850.
- Hodgkinson, K. C., Ludlow, M. M., Mott, J. J., & Baruch, Z. (1989). Comparative responses of the savanna grasses *Cenchrus ciliaris* and *Themeda triandra* to defoliation. Oecologia, 79(1), 45-52.
- Hollinger, D. Y.; J. Aber, B. Dail, E. A. Davidson, S. M. Goltz, H. Hughes, N. A. Scott, 2004. Spatial and temporal variability in forest-atmosphere CO<sub>2</sub> exchange. Global Change Biology, 10(10), 1689-1706.
- Hsieh, C. I.; G. Katul, T. W. Chi, 2000. An approximate analytical model for footprint estimation of scalar fluxes in thermally stratified atmospheric flows. Advances in water Resources, 23(7), 765-772.
- Huxman, T. E.; M. D. Smith, P. A. Fay, A. K. Knapp, M. R. Shaw, M. E. Loik, S. D. Smith, D. T. Tissue, J. C. Zak, J. F. Weltzin, W. T. Pockman, O. E. Sala, B. M. Haddad, J. Harte, G. W. Koch, S. Schwinning, E. E. Small, D. G. Williams, 2014. Convergence across biomes to a common rain-use efficiency. NATURE, 429, 651-654, [www.nature.com/nature](http://www.nature.com/nature).
- Ito, A.; M. Inatomi, 2012. Water-use efficiency of the terrestrial biosphere: a model analysis focusing on interactions between the global carbon and water cycles. Journal of Hydrometeorology, 13(2), 681-694.
- Jackson, J.; 2004. Impacts and management of *Cenchrus ciliaris* buffel grass as an invasive species in northern Queensland. Doctoral dissertation, James Cook University.
- Kljun, N.; P. Calanca, M. W. Rotach, H. P. Schmid, 2004. A simple parameterisation for flux footprint predictions. Boundary-Layer Meteorology, 112(3), 503-523.
- Kunst, C.; E. Monti, H. Pérez, J. Godoy, 2006. Assessment of the rangelands of southwestern Santiago del Estero, Argentina, for grazing management and research. Journal of Environmental Management, 80(3), 248-265.
- Luna Toledo, E.S, P. Figuerola, A. R. Sancho, 2018. Productividad primaria de buffelgrass en un año seco y un año húmedo. XVII Reunión Argentina de Agrometeorología. Asociación Argentina de Agrometeorología, Villa de Merlo, San Luis, Argentina.
- Mastorakis, D., 2014. Distribución de las áreas implantadas con Buffel grass en los Llanos de La Rioja, en relación a factores ambientales. Tesis de grado. Universidad Nacional de La Rioja – Sede Chemical.
- MODIS. (1999). MODIS Vegetation Index (MOD 13): Algorithm Theoretical Basis Document Page 26 of 29 (version 3), <http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atb>
- Montgomery, R. B., 1948. Vertical eddy flux of heat in the atmosphere. Journal of Meteorology, 5(6), 265-274.
- Morello, J. A., 1985. Grandes ecosistemas de Sudamérica. Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo.
- Namur, P.; J. M. Tessi, R. E. Avila, H. A. Rettore, C. A. Ferrando, 2014. Buffel Grass: generalidades, implantación y manejo para recuperación de áreas degradadas. 1era Ed. Chamental, La Rioja. Ediciones INTA. 22 pp.

- Obukhov, A. M., 1951. Investigation of the microstructure of the wind in the near-surface layer of the atmosphere. *Izvestia AN SSSR, seria Geofizika*, 3, 49ff.
- Paruelo, J. M., 2008. La caracterización funcional de ecosistemas mediante sensores remotos. *Revista Ecosistemas*, 17(3).
- Paruelo, J.; D. Alcaraz-Segura, J. N. Volante, 2011. El seguimiento del nivel de provisión de los servicios ecosistémicos. *Valoración de Servicios Ecosistémicos. Conceptos, herramientas y aplicaciones para el ordenamiento territorial*. Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina, 141-162.
- 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(9), 503-510.
- Quiroga, E.; L. Blanco, E. Oriente, 2009. Evaluación de estrategias de rehabilitación de pastizales áridos. *Ecología Austral*, 192, 107-117.
- Quiroga, R. E.; R. A. Golluscio, L. J. Blanco, R. J. Fernández, 2010. Aridity and grazing as convergent selective forces: an experiment with an Arid Chaco bunchgrass. *Ecological Applications*, 207, 1876-1889.
- R Core Team (2019). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>. (Consultado el 10/10/2019)
- Ritcher, K., 2015. Procesamiento de datos medidos con sistema Eddy Covarianza, Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias 126 pp. [http://sepa.inta.gob.ar/gei/carbono/MANUAL\\_EVEDDY\\_V15.pdf](http://sepa.inta.gob.ar/gei/carbono/MANUAL_EVEDDY_V15.pdf)
- Sala, O. E.; A. T. Austin, 2000. Methods of estimating aboveground net primary productivity. In *Methods in ecosystem science* pp. 31-43. Springer, New York, NY.
- Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) 2019. (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) consultado el 10/10/2019.
- Swinbank, W. C., 1951. The measurement of vertical transfer of heat and water vapor by eddies in the lower atmosphere. *Journal of Meteorology*, 83, 135-145.
- Vallejos, M.; J. N. Volante, M. J. Mosciaro, L. M. Vale, M. L. Bustamante, J. M. Paruelo, 2015. Transformation dynamics of the natural cover in the Dry Chaco ecoregion: a plot level geo-database from 1976 to 2012. *Journal of Arid Environments*, 123, 3-11.
- Verón, S. R.; L. J. Blanco, M. A. Texeira, J. G. N. Irisarri, J. M. Paruelo, 2018. Desertification and ecosystem services supply: The case of the Arid Chaco of South America. *Journal of Arid Environments*, 159, 66-74.
- Ward, J. P.; S. E. Smith, M. P. McClaran, 2006. Water requirements for emergence of buffelgrass *Pennisetum ciliare*. *Weed Science*, 544, 720-725.
- Webb, E. K., Pearman, G. I., & Leuning, R. (1980). Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 106(447), 85-100.
- Wilson, K.; A. Goldstein, E. Falge, M. Aubinet, D. Baldocchi, P. Berbigier, A. Grelle, 2002. Energy balance closure at FLUXNET sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1131-4, 223-243.
- Zak, M. R.; M. Cabido, J. G. Hodgson, 2004. Do subtropical seasonal forests in the Gran Chaco, Argentina, have a future? *Biological conservation*, 1204, 589-598.
- Zhang, Y.; F. H. Chiew, J. Peña-Arancibia, F. Sun, H. Li, R. Leuning, 2017. Global variation of transpiration and soil evaporation and the role of their major climate drivers. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 12213, 6868-6881.
- Zhang, Y.; J. L. Peña-Arancibia, T. R. McVicar, F. H. Chiew, J. Vaze, C. Liu, D. G. Miralles, 2016. Multi-decadal trends in global terrestrial evapotranspiration and its components. *Scientific reports*, 6, 19124.
- Zhu, J.; M. Zhang, Y. Zhang, X. Zeng, X. Xiao, 2018. Response of tropical terrestrial gross primary production to the super El Niño event in 2015. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 123(10), 3193-3203.