

Evaluación de la productividad de pasturas implantadas luego del desmonte en el Chaco Seco de Formosa

Trabajo final presentado para optar al título de Especialista en Teledetección y Sistemas de Información Geográfica

Elisa Schneider

Licenciada en Ciencias Biológicas - Universidad de Buenos Aires - Año de egreso: 2011

Lugar de trabajo: Buenos Aires, Argentina



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

TUTOR

Tutor

Sebastián Andrés Torrella

Licenciado en Ciencias Biológicas (Universidad de Buenos Aires)

Doctor Ciencias Biológicas (Universidad de Buenos Aires)

JURADO DE TRABAJO FINAL

Tutor

Sebastián Andrés Torrella

Licenciado en Ciencias Biológicas (Universidad de Buenos Aires)

Doctor en Ciencias Biológicas (Universidad de Buenos Aires)

Jurado

Mariano Oyarzabal

Ingeniero Agrónomo (Universidad de Buenos Aires)

Doctor en Ciencias Agropecuarias (Universidad de Buenos Aires)

Jurado

Martín Oesterheld

Ingeniero Agrónomo (Universidad de Buenos Aires)

Doctor of Philosophy in Biology (Syracuse University)

Fecha de defensa del Trabajo Final: 19 de Diciembre de 2018

Agradecimientos

En primer lugar a Sebastián y a Rubén por tener siempre abiertas las puertas de su lugar de trabajo y por la calidad humana inmejorable. Estoy sinceramente muy agradecida por todas las oportunidades que me han dado. Es un lujo poder compartir con ellos. Luego, nuevamente a Sebastián por todo el tiempo dedicado al proyecto, a las discusiones, correcciones y sugerencias que hicieron posible el proceso y la conclusión de este trabajo final.

A Julieta, por su buenísima predisposición a colaborar con las gestiones.

A mis compañeras y compañeros de la camada 2016/2017. Especialmente a Clara, Jaquie, Lau, Leti y Martina.

A mis padres y a mis hermanes por ser la base de quien soy, que me ha llevado finalmente a elegir estos estudios.

Y por último a Martín, representante de la Real Academia Española. Mi compañero, presente e incondicional para darme el empujón y el aliento que necesito para llevar a buen puerto mis proyectos.

“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.”

Título

Evaluación de la productividad de pasturas implantadas luego del desmonte en el Chaco Seco de Formosa

Resumen

La ecorregión de Chaco Seco presenta una de las tasas de deforestación más altas a nivel mundial. Por ello existe una preocupación creciente respecto a los efectos de este proceso y de los nuevos usos de la tierra sobre los ecosistemas.

Este trabajo tuvo como objetivo evaluar los efectos de la implantación de pasturas sobre la productividad luego de la deforestación del bosque nativo en la porción formoseña de la ecorregión Chaco Seco. Para ello, se utilizó el índice EVI (Enhanced Vegetation Index) como estimador de la productividad. Con este objetivo, se ubicaron lotes deforestados en 2000, 2005 y 2010, en los que luego se hayan implantado pasturas para uso ganadero y se comparó la productividad de los mismos luego del 2011.

Se encontró que los lotes deforestados en los años 2005 y 2010 presentan un patrón estacional levemente bimodal que no se encontró en los lotes deforestados en el 2000. Se calcularon atributos funcionales del ecosistema derivados del EVI y se encontró que el EVI medio no difiere entre los grupos de lotes, mientras que sí lo hace el EVI máximo. Otros valores como el EVI mínimo, el rango relativo, la tasa de incremento y el coeficiente de variación interanual mostraron una tendencia consistente pero no significativa entre los lotes (el EVI mínimo muestra un decremento entre los grupos deforestados en el 2000, el 2005 y el 2010, mientras los otros índices un incremento). Esta tendencia podría ser un indicio de los procesos de degradación que ocurren en los ecosistemas luego de la implantación de pasturas.

Title

Changes in productivity of pastures after deforestation in Chaco Seco, Formosa Province

Abstract

Dry forests experience one of the highest deforestation rates on a global scale in the Eco-region of Chaco Seco in Argentina. Therefore, there is a growing concern regarding the consequences of deforestation and land use change in the region.

The aim of this project was to understand the effects of land use change on vegetation productivity after land clearing and its transformation into pastures. We focused on plots that were transformed in the years 2000, 2005 and 2010, located in the Chaco Seco Eco-region, in Formosa province. We used the enhanced vegetation index (EVI) as a surrogate of net primary productivity.

We found that those plots that were clear-cut during the years 2005 and 2010 showed a bimodal seasonal pattern. Plots clear-cut in 2000 did not present a bimodal seasonality. The EVI was used to calculate annual mean and maximum EVI as a surrogate of annual productivity. Annual mean EVI was not significantly different between the plots of land transformed in different years but annual maximum EVI did. We also calculated annual minimum EVI, the annual relative range and the rate of increase. Annual relative range and rate of increase were lower in plots that were clear-cut before. Minimum EVI was greater for plots transformed earlier. This consistency may denote degradation processes. However, neither of these trends were statistically significant.

Índice

I. Introducción	10
1. Chaco Seco	10
2. Motivaciones, transformación del territorio en el Chaco Seco	10
3. Sensoramiento remoto e índices espectrales como herramientas para el estudio de los ecosistemas	11
4. Objetivos del trabajo	12
II. Materiales y métodos	14
1. Área de estudio	14
2. Obtención de la información satelital	15
3. Aplicación de filtros a las series temporales	16
4. Cálculo de los atributos funcionales del índice EVI	18
III. Resultados	20
1. Variación temporal del EVI	20
2. Atributos funcionales del ecosistema derivados del índice EVI	21
IV. Discusión	25
V. Conclusiones generales	28

Índice de figuras

1. **Área de estudio.** Se muestra en gris la ecorregión del Chaco Seco y en negro los lotes seleccionados, dentro de la provincia de Formosa. Estos lotes son aquellos deforestados en los años 2000, 2005 y 2010. 15
2. **Ejemplos de la marcha temporal del EVI en dos lotes del área de estudio.** Las líneas muestran el resultado de la aplicación de los filtros *Savityky-Golay* (negro) y no paramétrico (color). Los puntos muestran los valores de los datos sin filtrar. 17
3. **Variación temporal del índice EVI.** Valores de EVI para cada lote en cada una de las fechas disponibles. Se muestran por separado los lotes deforestados en el año 2000, 2005 y 2010. Las líneas verticales indican la fecha de deforestación. 20
4. **Variación del EVI dentro de la estación de crecimiento.** EVI promedio de todos los lotes correspondientes al mes y desvío estándar correspondiente a la variación intranual (línea punteada) entre el 2011 y 2016, separados por año de deforestación del lote. 21
5. **Atributos funcionales derivados del EVI.** a, b y c: valor anual promedio y error estándar del mínimo, máximo y rango relativo respectivamente. Las líneas horizontales indican el momento en el que un grupo de lotes fue deforestado. D, e y f: box-plot de los atributos funcionales de EVI a partir de la estación de crecimiento 2011 inclusive. Las líneas punteadas unen los valores correspondientes a una misma estación de crecimiento. . . 22
6. **Coefficiente de variación interanual del EVI.** Frecuencia relativa de los valores de CV (%) interanual correspondiente a cada grupo de lotes. . . . 24

Índice de cuadros

1. **Resumen de los atributos funcionales derivados del EVI.** Se muestran los valores de todos los atributos funcionales calculados para cada grupo de lotes según el año de deforestación y el correspondiente error estándar (ES). El valor de p indica el resultado del test *ANOVA* realizado entre los grupos de lotes. Se incluyen las temporadas de crecimiento correspondientes al período 2011-2017. Rango rel. corresponde a rango relativo y tasa de inc. a tasa de incremento. 23

Parte I.

Introducción

1. Chaco Seco

El Gran Chaco americano constituye un mosaico de ambientes que contiene las masas boscosas más extensas del continente después de la Amazonía. Se extiende desde latitudes tropicales (18°S), hasta ambientes subtropicales (31°S). Presenta marcados gradientes climáticos, con elevadas temperaturas medias anuales entre 18 y 28°C. Esta gran región presenta un gradiente de precipitaciones siguiendo un eje Noreste-Suroeste en torno a los 1200 mm. La región presenta gran diversidad de ambientes, con extensas llanuras, sierras, grandes ríos que la atraviesan, sabanas secas e inundables, esteros, bañados, salitrales y una gran extensión y diversidad de bosques (Morello et al., 2012; TNC, 2005).

El Gran Chaco puede subdividirse en 2 ecorregiones, Chaco Húmedo y Chaco Seco. La ecorregión del Chaco Seco es en su mayor parte una vasta planicie con una suave pendiente hacia el Este, modelada esencialmente por la acción de los ríos que la atraviesan en sentido noroeste-sudeste, principalmente el Juramento-Salado, el Bermejo y el Pilcomayo. Esta ecorregión comprende el noroeste de Argentina, el oeste de Paraguay y el sudeste de Bolivia, en un territorio de aproximadamente 787.000 km² de extensión. De este, 62% se encuentra en la Argentina. La vegetación natural predominante es un bosque abierto xerófilo o espinal intercalado con pastizales que atraviesan la matriz boscosa (Morello et al., 2012).

2. Motivaciones, transformación del territorio en el Chaco Seco

La deforestación en los bosques del Chaco Seco, a través de la eliminación sistemática y a gran escala de vegetación leñosa, es un ejemplo representativo de la intensificación

de los cambios en el uso del suelo que está ocurriendo a escala global. Si bien una parte importante de la región chaqueña ha sido históricamente transformada en terrenos agropecuarios, el uso del territorio en esta ecorregión estuvo históricamente asociado a la utilización de pastizales naturales para ganadería extensiva y explotación forestal. Desde fines de la década del 90, el cultivo de soja impulsó la expansión de la frontera agrícola. Al mismo tiempo, la región recibió a buena parte de los emprendimientos ganaderos desplazados de la región pampeana por la mayor rentabilidad de la actividad agrícola. Esta combinación constituyó una fuerte presión sobre los bosques nativos, que terminó desencadenando un proceso de desmontes generalizado (Adámoli et al., 2011; Vallejos et al., 2015; Fehlenberg et al., 2017). La transformación del territorio ocurrido en los últimos 15 años ha cambiado el paisaje de manera drástica a través de la conversión de enormes extensiones de bosques en áreas de cultivos o pasturas lo cual ha convertido a esta región en uno de los *hot-spot* de deforestación a nivel global (Hansen et al., 2013).

Existe una preocupación creciente por los impactos negativos de este proceso, así como por la sustentabilidad de los sistemas productivos que se establecieron luego de la deforestación. Trabajos anteriores indican que la deforestación y la implantación de cultivos y pasturas podrían tener como consecuencias la erosión, la salinización o la alteración de la estructura y composición química del suelo (e.g. Torrella and Adámoli, 2005; Villarino et al., 2017).

3. Sensoramiento remoto e índices espectrales como herramientas para el estudio de los ecosistemas

Volante et al. (2012) han estudiado los efectos de la deforestación y la implantación de cultivos sobre el funcionamiento ecosistémico. En dicho trabajo se estimaron atributos funcionales del ecosistema a partir de imágenes satelitales para comprender las diferencias entre ambientes deforestados y no deforestados. Se encontró que los ambientes deforestados presentan mayor estacionalidad que la vegetación natural nativa. Los autores sugieren que esta mayor estacionalidad provoca a su vez, mayor exposición del suelo du-

rante determinados momentos del año. Esta mayor exposición podría ser causa directa de la erosión y degradación de los suelos cubiertos por cultivos.

Índices espectrales como el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) o el EVI (Enhanced Vegetation Index) son buenos estimadores de la productividad de los ecosistemas (Piñeiro et al., 2006; Gaitán et al., 2015), ya que son estimadores lineales de la radiación fotosintéticamente activa que es absorbida por la vegetación (Sellers et al., 1992). Por lo tanto, estos han sido ampliamente utilizados para estimar la productividad de diferentes ecosistemas, incluyendo pasturas y pastizales (e.g. Paruelo and Lauenroth, 1995; Fang et al., 2001; Posse et al., 2005). El índice EVI es un mejor estimador de la productividad ya que presenta menor saturación cuando la densidad de la vegetación es alta. Este índice reduce las influencias atmosféricas porque incorpora la banda azul en adición a la banda roja e infrarroja del espectro. Esto permite la separación de la señal proveniente de la vegetación y la influencia de la atmósfera (Huete et al., 2002). Diversos autores han estimado atributos fenológicos de la vegetación derivados de estos índices para realizar una caracterización de los ecosistemas (e.g. Pettorelli et al., 2005; Paruelo, 2008; Alcaraz-Segura et al., 2009).

4. Objetivos del trabajo

El objetivo general de este trabajo es investigar las consecuencias de la implantación de pasturas sobre la productividad -utilizando el EVI como indicador de la misma- y qué efectos tiene este uso sostenido en el tiempo durante los años inmediatamente posteriores a la deforestación dentro de la ecorregión del Chaco Seco. Se decidió analizar las pasturas ya que existe menos información respecto a su impacto en el Chaco Seco en comparación con las consecuencias de la implantación de cultivos agrícolas luego de la deforestación. Se seleccionó la porción de esta ecorregión comprendida por la provincia de Formosa ya que, en la misma, la mayor parte de los lotes deforestados se transforman en pasturas.

En función de este objetivo, se analiza la evolución del índice EVI como indicador de la productividad de pasturas inmediatamente después de su implantación posterior a la deforestación del bosque nativo en lotes ubicados en la provincia de Formosa. Los

objetivos específicos del trabajo son:

- Analizar la evolución temporal del EVI posterior a la deforestación.
- Comparar los atributos funcionales del ecosistema calculados a partir del índice EVI de lotes deforestados en distintos años como la productividad anual, la tasa de incremento de la productividad y la variación interanual de la productividad.

Parte II.

Materiales y métodos

1. Área de estudio

La provincia de Formosa se encuentra dentro de la región chaqueña. La zona oeste de la provincia corresponde al Chaco Seco, mientras que el este, más húmedo, al Chaco Húmedo. Este trabajo se centró sobre el sector oriental del Chaco Seco dentro de la provincia de Formosa, dado que no se encuentran lotes desmontados en el sector más occidental de la provincia.

La porción formoseña del Chaco Seco presenta un clima continental caracterizado por una fuerte estacionalidad con gran amplitud térmica. La temperatura media anual es de 23°C. Las precipitaciones medias en esta región de la provincia son de hasta 800 mm anuales. Los meses de mayor precipitación coinciden con los de más altas temperaturas por lo que la precipitación está sometida a alta evaporación (UPCA, 2017; Bianchi and Cravero, 2010).

Las formaciones vegetales naturales son bosques, sabanas, humedales y pastizales naturales. Los bosques se encuentran principalmente en zonas de ribera. Las especies arbóreas dominantes son el quebracho blanco (*Aspidosperma quebracho-blanco*), el quebracho colorado santiagueño (*Schinopsis lorenzii*) y chaqueño (*Schinopsis balansae*), los algarrobos (*Prosopis sp.*) y el palo santo (*Bulnesia sarmientoi*). Los pastizales y sabanas arboladas abiertas se encuentran sobre zonas anegables, los paleocauces colmatados.

Para detectar los lotes deforestados en la provincia de Formosa dentro de la ecorregión de Chaco Seco se utilizó la base de datos georreferenciada elaborada por Vallejos et al. (2015) que contiene los lotes deforestados entre el año 1976 y 2012 en toda la ecorregión. De dichos lotes se extrajeron aquellos pertenecientes a la provincia de Formosa y deforestados en los años 2000, 2005 y 2010 (Figura 1). Para esta selección se utilizó el programa QGis 2.16.

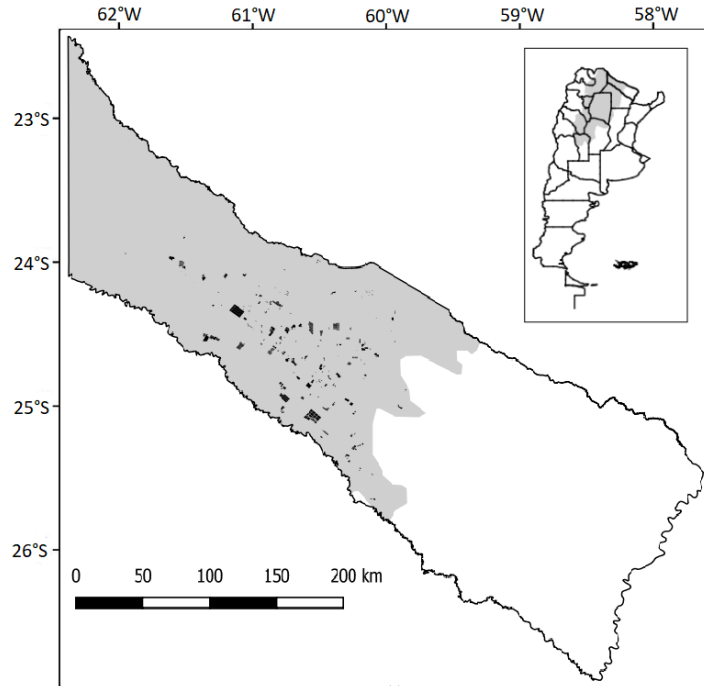


Figura 1: **Área de estudio.** Se muestra en gris la ecorregión del Chaco Seco y en negro los lotes seleccionados, dentro de la provincia de Formosa. Estos lotes son aquellos deforestados en los años 2000, 2005 y 2010.

2. Obtención de la información satelital

El índice EVI se obtuvo a partir del producto MODIS "MOD13Q1". Este producto tiene una resolución espacial de 250 m y temporal de 16 días. El valor de los píxeles de cada fecha corresponde al mejor valor de píxel disponible entre todas las adquisiciones del período de 16 días. Los criterios que utiliza el algoritmo para seleccionar el mejor valor dentro de la ventana temporal son:

- baja cobertura de nubes,
- ángulo de visión bajo,
- valor NDVI / EVI más alto.

Se utilizó la plataforma *Google Earth Engine* para obtener el valor de EVI del producto MODIS "MOD13Q1". Se descargó el valor de los píxeles incluidos dentro de los lotes.

Sólo aquellos píxeles cuya superficie intersecaba con la superficie del lote al menos en un 95 % (Dormann et al., 2007) fueron utilizados para el análisis.

Se descartaron aquellos lotes que contuviesen menos de 5 píxeles MODIS (Volante et al., 2012). Esto resultó en un total de 16 lotes seleccionados de aquellos deforestados en el año 2000, 22 lotes del año 2005 y 90 del 2010. El total de píxeles en cada grupo de lotes fue 865, 514 y 2527 respectivamente. Se promediaron los valores de EVI de los píxeles correspondientes a un mismo lote. Se utilizó este valor promedio como unidad de análisis.

A continuación, se graficó la marcha del EVI para cada lote a fin de detectar aquellos lotes en los cuales se implantaron pasturas luego de la deforestación. La Figura 2 muestra un ejemplo de un lote descartado por presentar dos picos muy marcados de EVI dentro de una misma estación de crecimiento (a) y de otro lote que sí fue incluido en el análisis (b).

3. Aplicación de filtros a las series temporales

El producto MODIS "MOD13Q1" entrega al usuario, para cada fecha de adquisición, el mejor valor obtenido dentro de la ventana temporal correspondiente. Sin embargo, diversos autores (Hird, 2009; de Carvalho Júnior et al., 2012; Borges and Sano, 2014) consideran que los valores de EVI o NDVI deben ser corregidos primero si luego han de ser utilizados para evaluar atributos funcionales derivados de estos índices.

Para filtrar las series temporales se utilizó el programa R. Se realizaron filtros implementados en el software TIMESAT (Jönsson and Eklundh, 2004; Eklundh and Jönsson, 2012) y aquellos propuestos en un trabajo del mismo grupo de investigación en el cual se estudia el uso de distintos filtros para la corrección de series temporales MODIS (Cai et al., 2017). Se evaluaron dos métodos de filtrado: el denominado *Savitzky-Golay* (Savitzky and Golay, 1964) y el método descrito por Cleveland llamado regresión local no paramétrica (Cleveland, 1979).

Para utilizar el filtro *Savitzky-Golay* se utilizaron las funciones de R denominadas *sgolay* y *filter* del paquete *signal* (Short et al., 2014). Este filtro consiste en ajustar varias funciones polinómicas a los valores observados usando el método de cuadrados mínimos.

El ajuste de la función polinómica no se realiza teniendo en cuenta todos los valores a la vez. Por el contrario, el algoritmo define una ventana temporal móvil dentro de la cual se ajustan sucesivas funciones polinómicas. El resultado es una serie temporal suavizada que minimiza el ruido y se adapta a los valores observados.

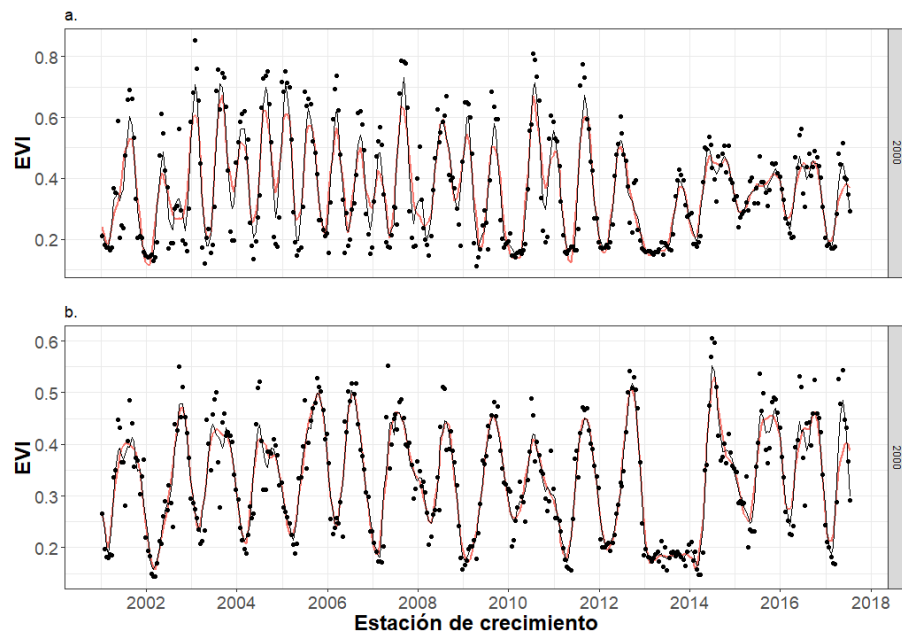


Figura 2: Ejemplos de la marcha temporal del EVI en dos lotes del área de estudio. Las líneas muestran el resultado de la aplicación de los filtros *Savitzky-Golay* (negro) y no paramétrico (color). Los puntos muestran los valores de los datos sin filtrar.

Para el filtro no paramétrico se utilizó la función *LOESS* incluida en los paquetes básicos del software R. Los filtros no paramétricos se denominan de esta forma ya que no ajustan una función determinada a los datos observados (como una función lineal, cuadrática o polinómica). En consecuencia, en este tipo de ajustes se realizan menos supuestos respecto a los datos. Este algoritmo realiza sucesivos ajustes utilizando una ventana temporal, al igual que el método anterior. En el primer ajuste los datos centrales de la ventana tienen más peso que los periféricos. En los siguientes, se le asigna más peso a aquellos datos con menor desvío respecto al valor previamente calculado. De esta forma, cada punto queda definido por los valores del mismo punto y los puntos vecinos de forma tal de minimizar la varianza de los residuos entre el modelo y los datos.

Finalmente se seleccionó el método de regresión local no paramétrica dado que se

observó mediante análisis visual un mejor ajuste a la serie temporal. Esta observación es además coincidente con los resultados obtenidos en el trabajo de Cai et al. (2017), citado anteriormente, en el cual se recomienda utilizar filtros no paramétricos ya que se ajustan más libremente (Figura 2).

4. Cálculo de los atributos funcionales del índice EVI

Se calcularon distintos atributos del índice EVI. Estos cálculos se realizaron según la metodología descrita en los trabajos de Volante et al. (2012); Paruelo (2008) y Pettorelli et al. (2005). Se definió la estación de crecimiento como el período transcurrido entre julio y junio. Se calcularon los siguientes atributos:

- EVI medio anual: EVI promedio de la estación de crecimiento para inferir la productividad anual;
- EVI mínimo anual: mínimo EVI registrado en la serie temporal en la estación de crecimiento para inferir mínima productividad de la estación de crecimiento;
- EVI máximo anual: máximo EVI registrado en la serie temporal dentro de la estación de crecimiento para inferir productividad anual;
- rango relativo: se subtrae el mínimo registrado en el período analizado al máximo valor registrado y se divide este valor por el valor medio correspondiente al período

$$(EVI_{max} - EVI_{min}) / EVI_{medio}$$

- tasa de incremento: pendiente entre valores de EVI en diferentes fechas (EVI/día). En este caso, con el objetivo de inferir la tasa de incremento de la productividad, se utilizaron las fechas 13 o 14 de septiembre (dependiendo del día de captación de la imagen en cada año) y 17 de enero. Estas fechas se seleccionaron ya que corresponden al inicio de la estación de crecimiento y al mes del primer máximo observado;

- coeficiente de variación (CV) interanual: coeficiente de variación de las mediciones entre años, el cual permite analizar las variaciones de productividad entre años.

Estos atributos se calcularon para todos los años analizados, desde la estación de crecimiento 2001 hasta 2017. Sin embargo, para la comparación de los grupos de lotes deforestados en distintos años se tuvo en cuenta el período entre las estaciones de crecimiento 2011 y 2017 en las cuales los tres grupos de lotes ya se encuentran cubiertos por pasturas. Para comparar los grupos de lotes se utilizó el test estadístico ANOVA.

El máximo EVI correspondiente a la estación de crecimiento del año 2014 es inferior respecto a los máximos de las otras estaciones analizadas. La estación de crecimiento del año 2014 fue particularmente seca (UPCA, 2017). Esto impactó en todos los lotes independientemente del año de deforestación. Por este motivo, esta campaña es considerada un *outlier* y no se incluyó en los box-plot, en los gráficos de densidad relativa ni en los análisis estadísticos.

Para estos cálculos se utilizó R en sus versiones 3.4.0 y 3.5.1.

Parte III.

Resultados

1. Variación temporal del EVI

En primer lugar, se observaron los valores crudos de EVI de todos los lotes a lo largo del período de tiempo analizado. El análisis visual de las series temporales de estos valores (Figura 3) muestra que luego de la fecha de deforestación la variabilidad entre los lotes aumenta. Es decir, para una misma fecha la dispersión de los valores de EVI es mayor. Antes de la deforestación se observa un patrón cíclico regular. Luego, es posible observar mayores variaciones entre estaciones de crecimiento. Se observa también que los valores máximos alcanzados luego de la deforestación son mayores. Sin embargo, mediante inspección visual no es posible observar diferencias entre los tres grupos de lotes analizados luego de la estación de crecimiento correspondiente al 2011, cuando se encuentran todos bajo un mismo tipo de manejo.

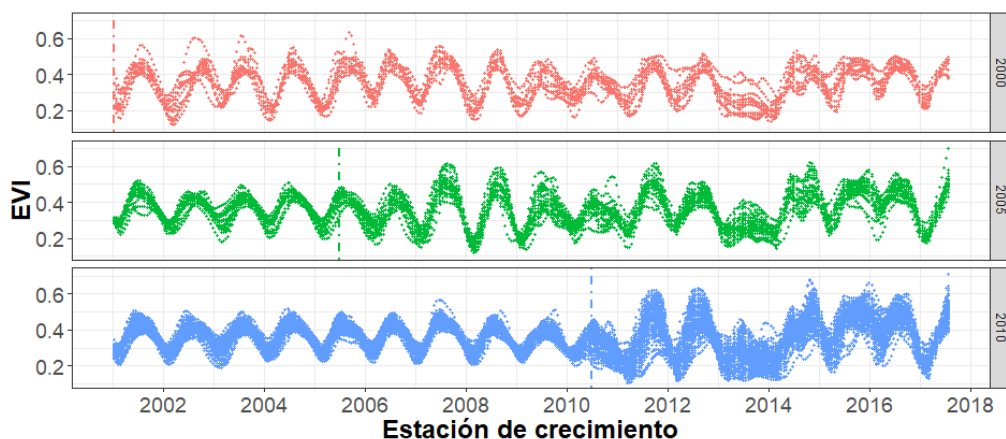


Figura 3: **Variación temporal del índice EVI.** Valores de EVI para cada lote en cada una de las fechas disponibles. Se muestran por separado los lotes deforestados en el año 2000, 2005 y 2010. Las líneas verticales indican la fecha de deforestación.

Luego, se analizó el patrón de estacionalidad de los lotes. Para este análisis se utilizaron únicamente las estaciones de crecimiento posteriores al 2011 (Figura 4). El EVI aumenta de forma constante entre los meses de agosto y enero. Especialmente en los lotes defo-

restados en el 2005 y 2010, se observa una leve disminución estival en febrero y un leve aumento a comienzos del otoño entre marzo y abril. En el grupo de lotes deforestados en el 2000 el valor se mantiene relativamente constante entre enero y abril. Luego, en los tres grupos, el EVI disminuye ente abril y agosto, cuando alcanza su mínimo.

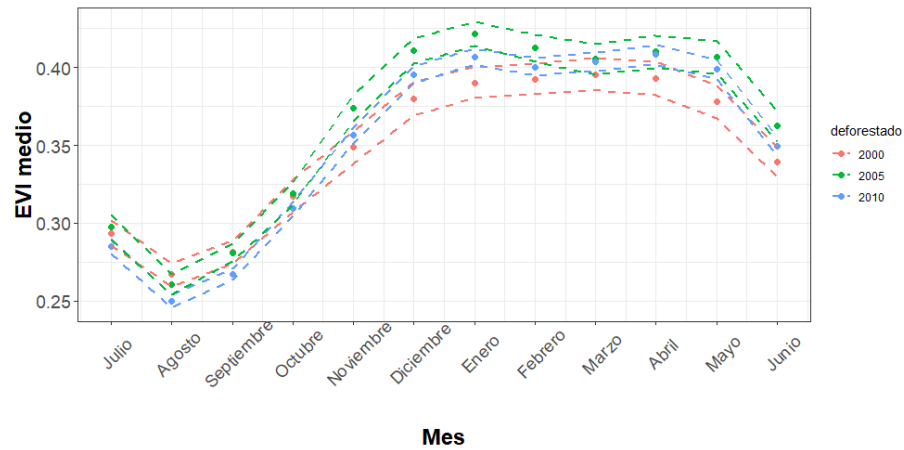


Figura 4: **Variación del EVI dentro de la estación de crecimiento.** EVI promedio de todos los lotes correspondientes al mes y desvío estándar correspondiente a la variación inetrannual (línea punteada) entre el 2011 y 2016, separados por año de deforestación del lote.

2. Atributos funcionales del ecosistema derivados del índice EVI

No se observan claras diferencias en los valores del EVI medio anual al comparar un mismo grupo de lotes antes y después de la deforestación (Figura 5 a). Por el contrario, el EVI máximo resultó mayor para los lotes deforestados respecto a los no deforestados dentro de una misma estación de crecimiento (Figura 5 b). El rango relativo, dentro de cada estación de crecimiento, es mayor en los lotes deforestados que en los que aún se encuentran con su cobertura de bosque (Figura 5 c). También en esta figura se observa que los lotes deforestados en el 2005 y 2010 presentan un rango relativo con bajas variaciones entre temporadas antes de la deforestación y mayores variaciones luego de la misma.

El EVI medio anual no mostró diferencias entre los tres grupos de lotes analizados (Figura 5 d, $p = 0,645$). Existen diferencias significativas entre los valores del máximo anual

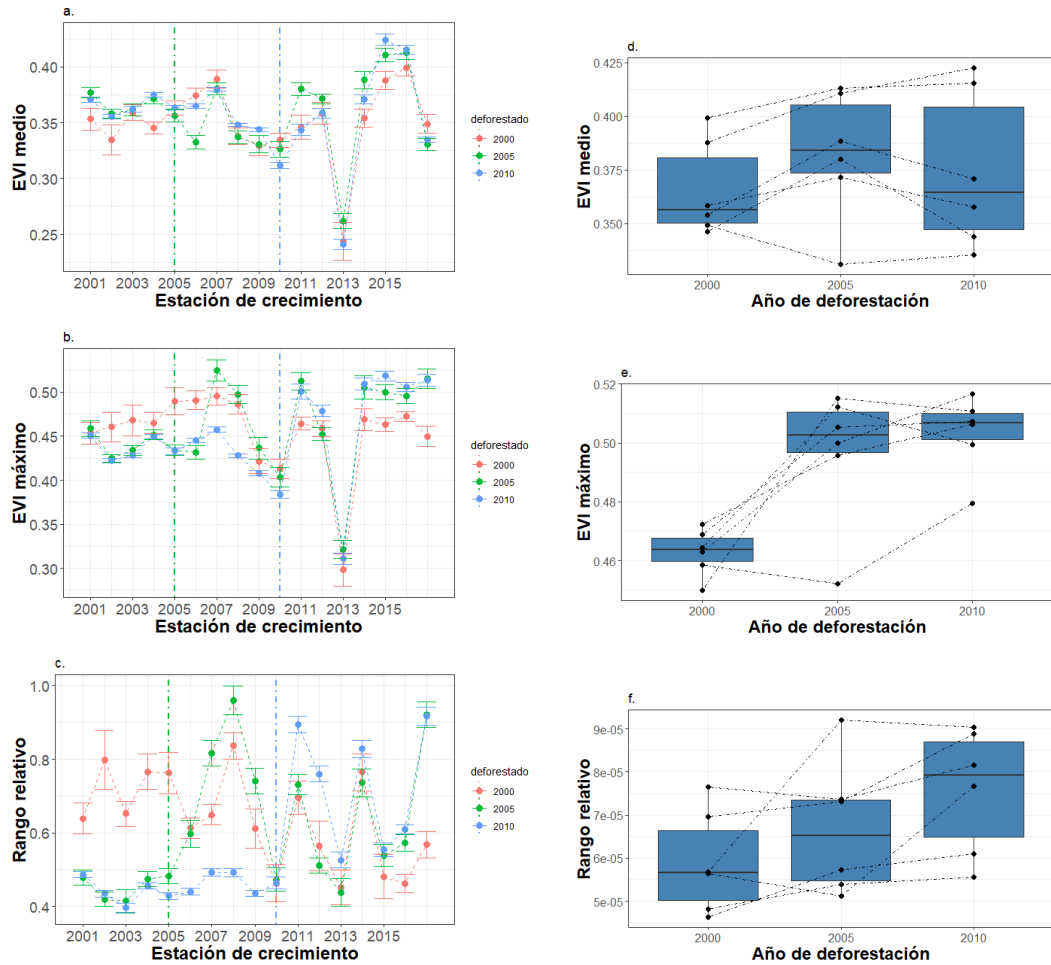


Figura 5: **Atributos funcionales derivados del EVI.** a, b y c: valor anual promedio y error estándar del mínimo, máximo y rango relativo respectivamente. Las líneas horizontales indican el momento en el que un grupo de lotes fue deforestado. D, e y f: box-plot de los atributos funcionales de EVI a partir de la estación de crecimiento 2011 inclusive. Las líneas punteadas unen los valores correspondientes a una misma estación de crecimiento.

entre los grupos de lotes luego de la deforestación (Figura 5 e, $p < 0,01$). El grupo correspondiente a los lotes deforestados en el 2000 presenta un máximo menor. Al comparar los lotes luego de la estación de crecimiento 2011, cuando los tres grupos se encuentran bajo el mismo manejo, los lotes deforestados con mayor antigüedad muestran una tendencia a tener valores menores de rango relativo (Figura 5 f). Sin embargo, la diferencia entre los tres grupos de lotes es marginalmente significativa ($p = 0,106$).

El Cuadro 1 muestra un resumen las medias de los resultados para todos los índices calculados. Si bien únicamente se encontraron diferencias significativas en el EVI máxi-

Cuadro 1: **Resumen de los atributos funcionales derivados del EVI.** Se muestran los valores de todos los atributos funcionales calculados para cada grupo de lotes según el año de deforestación y el correspondiente error estándar (ES). El valor de p indica el resultado del test *ANOVA* realizado entre los grupos de lotes. Se incluyen las temporadas de crecimiento correspondientes al período 2011-2017. Rango rel. corresponde a rango relativo y tasa de inc. a tasa de incremento.

Año	EVI med		EVI max		EVI min		Rango rel.		Tasa de inc.	
	media	ES	media	ES	media	ES	media	ES	media	ES
2000	0.366	0.022	0.463	0.008	0.252	0.034	0.589	0.119	11.5	0.543
2005	0.382	0.030	0.497	0.023	0.244	0.028	0.668	0.157	13.0	0.353
2010	0.374	0.039	0.503	0.013	0.225	0.037	0.757	0.145	13.7	0.222
p	0.645		0.001		0.361		0.106		0.192	

mo, tanto este índice como el rango relativo y la tasa de incremento muestran una misma tendencia entre los tres grupos de lotes. Estos índices muestran valores menores para el año 2000 y crecen de forma sucesiva para los grupos de lotes deforestados en el 2005 y 2010.

Se calculó el CV interanual como indicador de la variación de la productividad primaria entre temporadas de crecimiento (Figura 6). El CV interanual resultó mayor para los lotes deforestados en el 2010 y menor para los lotes en los cuales el cambio de uso ocurrió en el 2000. Los lotes deforestados en el 2010 presentan una mayor dispersión de valores respecto a los grupos del 2005 y 2000.

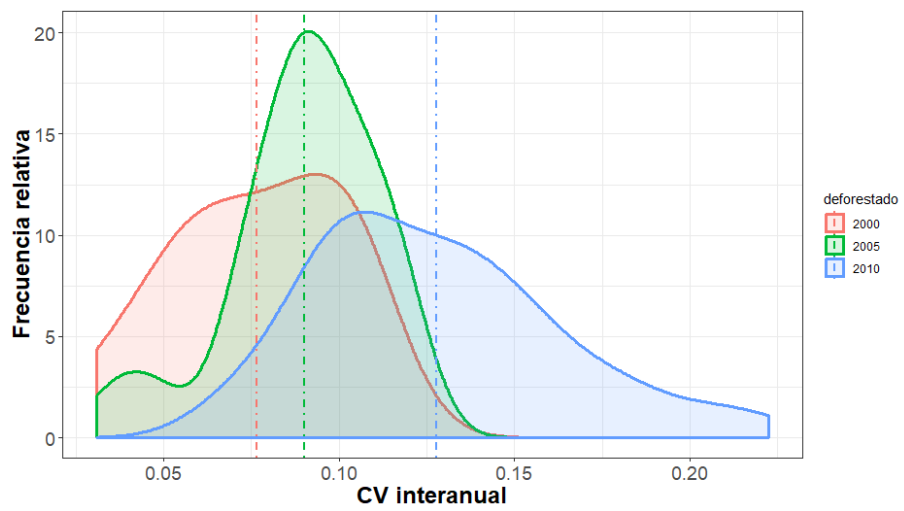


Figura 6: **Coefficiente de variación interanual del EVI.** Frecuencia relativa de los valores de CV (%) interanual correspondiente a cada grupo de lotes.

Parte IV.

Discusión

Se observó que los lotes deforestados en los años 2005 y 2010 presentan una estacionalidad levemente bimodal (Figura 4). La disponibilidad de agua podría limitar el crecimiento durante los meses de mayor demanda hídrica ya que, si bien los meses más húmedos son los de verano, durante estos las altas temperaturas producen una mayor evaporación de las precipitaciones (Morello et al., 2012). En los lotes deforestados en el año 2000, este patrón bimodal se encuentra suavizado. Esto podría explicarse teniendo en cuenta que, al presentar un valor máximo menor (Figura 5 e), los requerimientos hídricos de este grupo de lotes podrían ser menores. La eficiencia en el uso de la precipitación de este grupo también podría diferir, sin embargo trabajos anteriores mostraron que la eficiencia de uso de la precipitación es similar entre las pasturas, incluso entre diferentes zonas geográficas (McNaughton et al., 1993). Por otro lado, el menor valor del EVI durante el invierno coincide con la baja productividad durante esta época del año.

Los atributos funcionales derivados del EVI son similares entre los grupos de lotes antes de la deforestación. Luego de la deforestación, estos valores presentan mayor variabilidad (Figura 5, a, b y c), lo que coincide con lo observado por Volante et al. (2012).

El EVI medio puede ser indicativo de la productividad anual de la vegetación (Paruelo, 2008). En este trabajo no se encontraron diferencias significativas en el EVI medio entre los grupos de lotes con diferentes edades de uso. Sin embargo, se encontraron diferencias significativas entre los grupos de lotes de diferentes edades en el máximo EVI alcanzado por las pasturas. Este también es un indicador de la productividad anual de la vegetación según el mismo autor. Por ende, estos resultados no permiten aún pronunciar conclusiones definitivas.

Analizando en detalle los resultados, es posible observar que si bien el máximo anual del EVI resultó menor en los lotes deforestados en el año 2000 (Figura 4), los valores mínimos del EVI para este grupo de lotes es mayor (Cuadro 1). Los lotes deforestados en

los años 2005 y 2010 presentan máximos más altos y, a la vez, mínimos menores (si bien esta última diferencia no resulta estadísticamente significativa). El hecho de que estos últimos grupos de lotes presenten mayores máximos y mínimos menores, podría explicar que no se observen diferencias en los valores del EVI promedio respecto a los valores de los lotes deforestados en el 2000. Al mismo tiempo, esto explicaría que sí existan diferencias significativas en el EVI máximo anual. Como se mencionó anteriormente, no es posible concluir de forma certera si existe diferencia en la productividad anual entre los grupos de lotes. Para profundizar el análisis sería interesante analizar el área bajo la curva de la variación temporal del EVI, como sugiere Paruelo (2008).

El trabajo de Ferreira et al. (2013) resulta interesante a la luz de esta discusión ya que mostró que el EVI medio es mayor en pasturas sólo durante la estación húmeda, pero no así para la estación seca. Si bien con los resultados obtenidos no es posible determinar si lo que observaron los autores es el caso de este trabajo, cabe preguntarse si el EVI medio calculado de forma anual no oculta diferencias estacionales que sí es posible distinguir utilizando el índice EVI máximo. Este podría ser el caso ya que, el EVI promedio anual resume el comportamiento a lo largo de toda la estación de crecimiento, lo cual podría enmascarar diferencias que se observan solo en ciertos momentos del año. Por el contrario, el EVI máximo es un valor del índice que corresponde a un un momento determinado de la estación de crecimiento, el momento de mayor productividad. Por esto, el análisis propuesto por los autores, quienes calculan el promedio del índice EVI en distintos momentos de la temporada, resulta interesante como posible próximo paso en esta investigación.

Magliano et al. (2016) advierten que el establecimiento de pasturas en sitios originalmente cubiertos por bosques reduce la fracción de la precipitación potencialmente transpirable y aumenta el riesgo de erosión hídrica. Esto podría provocar que lotes más viejos presenten una menor productividad, en especial entre diciembre y abril. Esto es interesante para el presente trabajo ya que propone que las diferencias en productividad podrían observarse solo en ciertos momentos de la temporada de crecimiento. Si bien con el análisis realizado en este trabajo no es posible afirmar que esta sea la causa de la diferencia

entre los índices, es una posibilidad pertinente de ser analizada. Por otro lado, Aragón et al. (2011) también encontraron que pasturas menos degradadas presentan una mayor productividad.

El rango relativo y la tasa de incremento resultaron mayores en los lotes deforestados en los años 2005 y 2010 (Cuadro 1). Esto es coincidente con los mayores máximos encontrados para estos lotes y los mínimos que no difieren significativamente.

El coeficiente de variación interanual resultó menor en los lotes mas jóvenes. Autores como O'connor et al. (2001) y Aragón et al. (2011) encontraron que pastizales menos degradados presentan menor variabilidad debido a que la mayor diversidad y complementareidad de las especies permite una productividad más estable en años con distintas condiciones climáticas. Sin embargo, la mayor diversidad y complemetareidad de las especies no podría explicar los resultados de este trabajo, ya que se analizaron lotes con pasturas implantadas compuestas por una única especie, adaptadas a un tipo específico de condición climática, mientras que, en los trabajos citados anteriormente, el estudio se realizó sobre pastizales naturales.

Otros métodos posibles para seguir analizando estos datos serían evaluar los atributos funcionales para una momento determinado de la estación de crecimiento (Ferreira et al., 2013) o realizar análisis de tendencia sobre la variación de los atributos a lo largo de los años (de Jong et al., 2011; Neeti and Eastman, 2011). Sería de sumo interés incluir también en el análisis otros factores importantes que impactan sobre la productividad de la vegetación como el tipo de suelo presente, las especies implantadas y el manejo específico del lote.

Parte V.

Conclusiones generales

Este trabajo tuvo como objetivo comprender los efectos de la deforestación y la posterior implantación de pasturas sobre la productividad, utilizando el índice EVI como estimador de la misma. Se estudiaron lotes ubicados en la ecorregión de Chaco Seco dentro de la provincia de Formosa, durante los años inmediatamente posteriores a la deforestación. El trabajo pretende aportar elementos al debate actual sobre la sustentabilidad de las prácticas productivas hoy presentes en la región.

Los lotes deforestados en el 2000, a diferencia de los otros dos grupos, no presentan un patrón estacional bimodal. Esta diferencia, sin embargo, no puede atribuirse directamente a la antigüedad del uso para pastura. Sería interesante observar cuál era el patrón de estos lotes en los años inmediatamente posteriores a la deforestación (2001 al 2005.) El EVI medio y máximo de la estación de crecimiento, atributos funcionales derivados del EVI que dan cuenta de la productividad de los lotes, muestran resultados que si bien no son contradictorios, tampoco permiten concluir definitivamente sobre el efecto de la edad de los lotes en la productividad de los mismos.

Se observó una tendencia consistente en los valores de los índices funcionales derivados del EVI entre los lotes deforestados en el 2000, 2005 y 2010: el EVI máximo, el rango relativo, la tasa de incremento y el CV interanual aumentan sucesivamente entre los lotes deforestados en el 2000, 2005 y 2010 mientras que el EVI mínimo disminuye. Aunque esta diferencia resulta significativa sólo para el EVI máximo, la consistencia en la tendencia observada podría ser indicio de un proceso de degradación.

Si bien este trabajo puede ser ampliado y profundizado, aporta a entender las consecuencias de la deforestación a lo largo del tiempo, en especial a mediano plazo. Esto resulta relevante considerando que los procesos de erosión y degradación pueden ocurrir en diversas escalas temporales. Entender las consecuencias del cambio de uso del suelo en esta región resulta de sumo interés, dada la alta tasa de conversión de bosques en sistemas

productivos y el alto impacto que tiene este proceso sobre la conservación de la naturaleza y sobre las comunidades locales.

Referencias

- Adámoli, J., Ginzburg, R., and Torrella, S. (2011). Escenarios productivos y ambientales del chaco argentino: 1977-2010. *Buenos Aires: Facultad de Ciencias Exactas y Naturales-Universidad de Buenos Aires y Fundación Producir Conservando.*
- Alcaraz-Segura, D., Cabello, J., Paruelo, J. M., and Delibes, M. (2009). Use of descriptors of ecosystem functioning for monitoring a national park network: a remote sensing approach. *Environmental Management*, 43(1):38–48.
- Aragón, R., Oesterheld, M., Irisarri, G., and Texeira, M. (2011). Stability of ecosystem functioning and diversity of grasslands at the landscape scale. *Landscape Ecology*, 26(7):1011–1022.
- Bianchi, A. and Cravero, S. (2010). Atlas climático digital de la república argentina. *Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria*, URL: <http://inta.gob.ar/documentos/atlas-climatico-digital-de-la-republica-argentina>.
- Borges, E. F. and Sano, E. E. (2014). Séries temporais de evi do modis para o mapeamento de uso e cobertura vegetal do oeste da bahia. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 20(3):526–547.
- Cai, Z., Jönsson, P., Jin, H., and Eklundh, L. (2017). Performance of smoothing methods for reconstructing ndvi time-series and estimating vegetation phenology from modis data. *Remote Sensing*, 9(12):1271.
- Cleveland, W. S. (1979). Robust locally weighted regression and smoothing scatterplots. *Journal of the American statistical association*, 74(368):829–836.
- de Carvalho Júnior, O. A., da Silva, N. C., de Carvalho, A. P. F., Júnior, A. F. C., Silva, C. R., Shimabukuro, Y. E., Guimarães, R. F., and Gomes, R. A. T. (2012). Combining noise-adjusted principal components transform and median filter techniques for denoising modis temporal signatures. *Revista Brasileira de Geofísica*, 30(2):147–157.

- de Jong, R., de Bruin, S., de Wit, A., Schaepman, M. E., and Dent, D. L. (2011). Analysis of monotonic greening and browning trends from global ndvi time-series. *Remote Sensing of Environment*, 115(2):692–702.
- Dormann, C. F., McPherson, J. M., Araújo, M. B., Bivand, R., Bolliger, J., Carl, G., Davies, R. G., Hirzel, A., Jetz, W., Kissling, W. D., et al. (2007). Methods to account for spatial autocorrelation in the analysis of species distributional data: a review. *Ecography*, 30(5):609–628.
- Eklundh, L. and Jönsson, P. (2012). Timesat 3.2 with parallel processing-software manual. *Lund University*.
- Fang, J., Piao, S., Tang, Z., Peng, C., and Ji, W. (2001). Interannual variability in net primary production and precipitation. *Science*, 293(5536):1723–1723.
- Fehlenberg, V., Baumann, M., Gasparri, N. I., Piquer-Rodriguez, M., Gavier-Pizarro, G., and Kuemmerle, T. (2017). The role of soybean production as an underlying driver of deforestation in the south american chaco. *Global Environmental Change*, 45:24–34.
- Ferreira, L. G., Sano, E. E., Fernandez, L. E., and Araújo, F. M. (2013). Biophysical characteristics and fire occurrence of cultivated pastures in the brazilian savanna observed by moderate resolution satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 34(1):154–167.
- Gaitán, J., Donaldo Bran, D., and Azcona, C. (2015). Tendencia del ndvi en el período 2000-2014 como indicador de la degradación de tierras en argentina: ventajas y limitaciones. *Agriscientia*, 32(2):83–93.
- Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S., Tyukavina, A., Thau, D., Stehman, S., Goetz, S., Loveland, T., et al. (2013). High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science*, 342(6160):850–853.
- Hird, Jennifer N y McDermid, G. J. (2009). Noise reduction of ndvi time series: An empirical comparison of selected techniques. *Remote Sensing of Environment*, 113(1):248–258.

- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., and Ferreira, L. G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the modis vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83(1-2):195–213.
- Jönsson, P. and Eklundh, L. (2004). Timesat—a program for analyzing time-series of satellite sensor data. *Computers & Geosciences*, 30(8):833–845.
- Magliano, P. N., Fernández, R. J., Giménez, R., Marchesini, V. A., Páez, R. A., and Jobbágy, E. G. (2016). Cambios en la partición de flujos de agua en el chaco árido al reemplazar bosques por pasturas. *Ecología Austral*, 26(2):95–106.
- McNaughton, S. J., Sala, O. E., and Oesterheld, M. (1993). Comparative ecology of african and south american arid to subhumid ecosystems. *Biological Relationships between Africa and South America*, Yale University Press New Haven, Connecticut, USA:548–567.
- Morello, J., Matteucci, S. D., Rodriguez, A. F., Silva, M. E., Mesopotámica, P., Llana, P., Ondulada, P., Deprimida, P., Arenosa, P., Anegable, P. A., et al. (2012). *Ecorregiones y complejos Ecosistémicos de Argentina*. Orientación Gráfica Editora, Buenos Aires: 182–205.
- Neeti, N. and Eastman, J. R. (2011). A contextual mann-kendall approach for the assessment of trend significance in image time series. *Transactions in GIS*, 15(5):599–611.
- O’connor, T., Haines, L., and Snyman, H. (2001). Influence of precipitation and species composition on phytomass of a semi-arid african grassland. *Journal of Ecology*, 89(5):850–860.
- Paruelo, J. M. (2008). La caracterización funcional de ecosistemas mediante sensores remotos. *Revista Ecosistemas*, 17(3):4–22.
- Paruelo, J. M. and Lauenroth, W. K. (1995). Regional patterns of normalized difference vegetation index in north american shrublands and grasslands. *Ecology*, 76(6):1888–1898.

- Pettorelli, N., Vik, J. O., Mysterud, A., Gaillard, J.-M., Tucker, C. J., and Stenseth, N. C. (2005). Using the satellite-derived ndvi to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology & Evolution*, 20(9):503–510.
- Piñeiro, G., Oesterheld, M., and Paruelo, J. M. (2006). Seasonal variation in aboveground production and radiation-use efficiency of temperate rangelands estimated through remote sensing. *Ecosystems*, 9(3):357–373.
- Posse, G., Oesterheld, M., Bella, D., and Marcelo, C. (2005). Landscape, soil and meteorological influences on canopy dynamics of northern flooding pampa grasslands, argentina. *Applied Vegetation Science*, 8(1):49–56.
- Savitzky, A. and Golay, M. J. (1964). Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Analytical Chemistry*, 36(8):1627–1639.
- Sellers, P., Berry, J., Collatz, G., Field, C., and Hall, F. (1992). Canopy reflectance, photosynthesis, and transpiration. iii. a reanalysis using improved leaf models and a new canopy integration scheme. *Remote Sensing of Environment*, 42(3):187–216.
- Short, T., Kienzle, P., Schnackenberg, S., and Billingham, D. (2014). *R Package: Signal, Signal processing*.
- TNC (2005). Evaluación ecoregional del gran chaco. the nature. *Conservancy, South American Conservation Region, Buenos Aires*. [online], URL: <http://awsassets.wwf.panda.org/downloads/dossier.pdf>.
- Torrella, S. and Adámoli, J. (2005). Situación ambiental de la ecorregión del chaco seco. *La situación Ambiental Argentina*, 2005:73–75.
- UPCA (2017). Unidad provincial coordinadora del agua (upca). URL: <https://www.formosa.gob.ar/upca/mapas>.
- Vallejos, M., Volante, J. N., Mosciaro, M. J., Vale, L. M., Bustamante, M. L., and Paruelo, J. M. (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.

Villarino, S. H., Studdert, G. A., Baldassini, P., Cendoya, M. G., Ciuffoli, L., Mastrángelo, M., and Piñeiro, G. (2017). Deforestation impacts on soil organic carbon stocks in the semiarid chaco region, argentina. *Science of the Total Environment*, 575:1056–1065.

Volante, J., Alcaraz-Segura, D., Mosciaro, M., Viglizzo, E., and Paruelo, J. (2012). Ecosystem functional changes associated with land clearing in nw argentina. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 154:12–22.