

**Cambios en el nivel de provisión de servicios ecosistémicos en el Noroeste
Argentino en el periodo 2005-2015**

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

Elcy Johana Palacios Sánchez

Profesional en Ciencias Ambientales - Universidad de Ciencias Aplicadas y
Ambientales (U.D.C.A) - 2014



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

TUTOR

José Norberto Volante

Lic. en Recursos Naturales (Universidad Nacional de Salta)

Dr. en Ciencias Agropecuarias (EPG - FAUBA)

JURADO DE TRABAJO FINAL

Tutor

José Norberto Volante

Lic. en Recursos Naturales (Universidad Nacional de Salta)

Dr. en Ciencias Agropecuarias (EPG - FAUBA)

Jurado

Gervasio Piñeiro

Ing. Agrónomo (Universidad de la República Oriental del Uruguay)

Dr. en Ciencias Agropecuarias (EPG - FAUBA)

Jurado

Mariano Oyarzabal

Ing. Agrónomo (Universidad de Buenos Aires)

Dr. en Ciencias Agropecuarias (EPG - FAUBA)

Fecha de defensa del Trabajo Final: 18 de septiembre de 2017

A mi mami.
A mis hermanos.

Agradecimientos

Solo tengo palabras y gestos de agradecimientos con mi mami y mis hermanos, quienes con su apoyo y credibilidad en mí, hicieron posible que sacara adelante este proyecto. De igual forma doy gracias infinitas a mi profesor y tutor José Norberto Volante, quien pese a las distancias y a mis falencias académicas, me guio haciendo de mí una mejor profesional y persona, ayudándome a enfrentar cada uno de los obstáculos que se me presentaron en el proceso, enseñándome que el mejor aprendizaje es el que se logra por sí mismo.

Agradezco la EPG por abrirme las puertas como estudiante extranjera, a Julieta Straschnoy por el acompañamiento, empeño y su continua colaboración. A todas las personas que de una u otra manera me apoyaron en este aprendizaje continuo. A mi jurado, Dr. Gervasio Piñeiro y el Dr. Mariano Oyarzabal, por tomarse el tiempo y la dedicación para evaluar mí proyecto.

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

Índice general

Índice de figuras	7
Índice de tablas	8
Índice de ecuaciones	8
Resumen	9
Summary	10
1. Introducción	11
2. Materiales y métodos	13
2.1. Área de estudio.....	13
2.2. Base de datos.....	13
2.3. Esquema general del trabajo	16
2.4. Pre-procesamiento de imágenes	17
2.5. Cálculo del índice de provisión de servicios ecosistémicos (ipse)	20
2.6. Estimación de la tendencia de ipse.....	21
2.7. Relación entre las tendencias del ipse y los cambios en el uso del suelo por deforestación.....	21
3. Resultados	23
3.1. Discusión y conclusiones	34
4. Bibliografía	36

Índice de figuras

Figura 1. Clasificación de servicios ecosistémicos desde dos conceptos: el sistema adoptado por mea (2005) y el desarrollado por Fisher <i>et al.</i> (2009). Las flechas negras indican la relación entre las diferentes categorías de servicios ecosistémicos y la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas. Dicha relación se define en términos de funciones de producción (círculos) o sea de relaciones matemáticas formales entre el funcionamiento ecosistémico y servicios ecosistémicos. Las líneas punteadas representan la relación entre las categorías de se. Las líneas discontinuas representan la influencia de las necesidades, intereses y valores humanos en la definición de beneficios y se, en los dos esquemas de clasificación. Tomado de volante <i>et al.</i> (2012).....	11
Figura 2. Área de estudio. Provincias de Jujuy, Salta, Tucumán, Santiago del Estéreo y Catamarca	15
Figura 3. Esquema general del trabajo.....	16
Figura 4. Representación gráfica de algunos de los parámetros de estacionalidad generados en TIMESAT 3.0; los puntos (a) y (b) se refieren al inicio y el final de la estación respectivamente. (c) duración de temporada, (d) valor de base, (e) tiempo de media temporada, (f) valor máximo, (g) amplitud, (h) valor de la integral pequeña, (h + i) son integrales que muestran el efecto acumulado de la vegetación durante el periodo (Eklundih y Jönsson, 2009).....	18
Figura 5. Secuencia de trabajo, tomado y adaptado de Eklund & Jonsson, 2015.....	19
Figura 6. Modelo para el cálculo del IPSE desarrollado con en el programa ERDAS IMAGINE 2010.	20
Figura 7. Modelo para calcular el coeficiente de correlación de Pearson.....	22
Figura 8. Porcentajes del NDVI _{cv} de las imágenes presentes en el periodo de estudio (2005-2015).	23
Figura 9. Porcentajes del NDVI \bar{X} para las áreas agropecuarias y sin deforestar,	24
Figura 11. Valores máximos y mínimos del NDVI promedio presentes en el periodo analizado (2005-2015).	26
Figura 12. Secuencia anual del NDVI promedio en el periodo 2005-2015.....	27
Figura 13. Porcentajes del NDVI \bar{X} para las áreas agropecuarias y sin deforestar, en el periodo de 2005 – 2015.	28
Figura 14. Valores máximos y mínimos del IPSE presentes en el periodo de estudio (2005-2015).	29
Figura 15. Secuencia anual del IPSE en el Noroeste Argentino en el periodo de 10 años (2005-2015).	30

Figura 16. Comparación de valores promedios del IPSE versus el promedio del coeficiente de variación del NDVI durante el periodo del análisis.	31
Figura 17. Porcentajes de las tendencias del IPSE, negativa (1), sin cambios (2) y positiva (3) para las áreas agropecuarias y sin deforestar, en el periodo de 2005 – 2015.	32
Figura 18. Mapa de tendencias (negativa, positiva y nula) del IPSE en el periodo 2005-2015 en el NOA; en naranja se encuentra la tendencia negativa, en amarillo la tendencia positiva y en verde las áreas sin cambio.....	33

Índice de tablas

Tabla 1. Clasificación simplificada de los datos de pixeles que describen la calidad general. Tomada y adaptada de (Didan <i>et al.</i> , 2015).....	14
---	----

Índice de ecuaciones

Ecuación 1	20
Ecuación 2	21

Título

Cambios en el nivel de provisión de servicios ecosistémicos en el Noroeste Argentino en el periodo 2005-2015

Resumen

En el Noroeste de Argentina (NOA), donde existe la mayor diversidad ambiental del país, ha ocurrido en las últimas décadas un abrupto proceso de transformación en el paisaje impulsado por la incorporación de tierras naturales a la producción agropecuaria. La conversión de áreas naturales en tierras de cultivo tiene efectos directos sobre el nivel de provisión de Servicios Ecosistémicos (SE); los que a su vez, se encuentran regulados por factores estructurales (por ej., biodiversidad) y funcionales (por ej. la dinámica del agua y el carbono, C). Para el análisis de la dinámica del nivel de provisión de los SE intermedios y finales, Paruelo y colaboradores han propuesto un índice denominado IPSE (Índice de Provisión de Servicios Ecosistémicos), estimado a partir de información provista por sensores remotos, basado en atributos de la dinámica estacional de la captura del C. El objetivo de este trabajo es analizar los cambios ocurridos en el nivel de provisión de SE relativos a la dinámica de captura del C en la región Chaqueña del NOA, ocurridos en los últimos 10 años (2005 -2015). Como resultado se obtuvieron mapas de IPSE, de sus componentes ($NDVI_{\bar{x}}$ y $NDVI_{cv}$) y se estimó su tendencia. El 37% del área de estudio se destina a actividades agropecuarias y el 63% restante corresponde a zonas naturales (sin deforestar) y otros tipos de usos y coberturas de suelo. En las áreas agropecuarias el índice presentó tendencias negativas en el 46% de su superficie mientras que a diferencia de las áreas no-agropecuarias en las cuales sólo el 16% presentó tendencia negativa. Esta diferencia podría atribuirse al impacto de las actividades antrópicas. Por otra parte, la tendencia positiva en las áreas agropecuarias fue del 22%, mientras que en las áreas sin deforestar el 26% indicando un aumento. El IPSE y su tendencia, se mostró como un indicador sensible a los cambios de uso de suelo.

Palabras Clave: Cambios en el uso y cobertura del suelo, IPSE, sensores remotos.

Summary

In the Northwest of Argentina (NOA), where there is the greatest environmental diversity of the country, in recent decades there has been an abrupt process of transformation in the landscape driven by the incorporation of natural lands to agricultural production. The conversion of natural areas to arable land has direct effects on the level of provision of Ecosystem Services (SE); which in turn are governed by structural (eg, biodiversity) and functional factors (eg, water and carbon dynamics, C). For the analysis of the dynamics of the level of provision of the intermediate and final SEs, Paruelo and collaborators have proposed an index called IPSE (Ecosystem Services Index), estimated from information provided by remote sensors, based on attributes of the seasonal dynamics of C catch. The objective of this work is to analyze the changes occurred in the level of SE provision related to the catch dynamics of the C in the NOA Chaqueña region, occurring in the last 10 years (2005-2015). As a result IPSE maps of its components (NDVI_g and NDVI_{cv}) were obtained and its trend was estimated. 37% of the study area is devoted to agricultural activities and the remaining 63% corresponds to natural areas (without deforestation) and other types of land uses and coverages. In the agricultural areas, the index presented negative trends in 46% of its area, while unlike non-agricultural areas, in which only 16% showed a negative trend. This difference could be attributed to the impact of anthropic activities. On the other hand, the positive trend in the agricultural areas was 22%, while in the areas without deforesting 26% indicating an increase. The IPSE and its trend, was shown as a sensitive indicator to changes in land use.

Keywords: Changes in land use and coverage, ESPI, remote sensing.

1. Introducción

En el Noroeste de Argentina (NOA) existe la mayor diversidad ambiental del país, presentando en las últimas décadas un abrupto proceso de transformación en el paisaje impulsado por la incorporación de tierras naturales a la producción agropecuaria (Volante, 2014). En esta región se transformaron hasta el presente más de 4,5 millones de hectáreas de bosques nativos para la producción agropecuaria. El 53% del área fue desmontada durante el período 1997-2007, siendo éste cambio un 33% superior al ocurrido en las dos décadas precedentes (Volante et al., 2005; Volante, 2014).

El término “cobertura del suelo” es empleado para describir el tipo de cubierta biofísica observada en la superficie de la tierra. Así mismo, se le denomina “uso de suelo” al conjunto de actividades que la sociedad realiza en un territorio, para producir, modificar o conservar su estado (Di Gregorio y Jansen, 2005; Geist *et al.*, 2006). Los cambios en la cobertura y/o uso del suelo tienen importantes consecuencias ecológicas y económicas, siendo actualmente uno de los principales controles del cambio global el cual se puede apreciar a diferentes escalas de estudio (Duarte et al., 2006). La conversión de áreas naturales en tierras de cultivo tiene efectos directos sobre el nivel de provisión de Servicios Ecosistémicos (SE; Dirzo y Raven, 2003; MEA, 2005); los que a su vez, se encuentran regulados por factores estructurales (por ej., la PPN) y funcionales (por ej. la regulación hídrica y el carbono, C) (Guerschman et al., 2003; Guerschman, 2005; Jackson *et al.*, 2005; Noretto *et al.*, 2005; Fisher *et al.*, 2009).



Figura 1. Clasificación de Servicios Ecosistémicos desde dos conceptos: el sistema adoptado por MEA (2005) y el desarrollado por Fisher *et al.* (2009). Las flechas negras indican la relación entre las diferentes categorías de Servicios Ecosistémicos y la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas. Dicha relación se define en términos de funciones de producción (círculos) o sea de relaciones matemáticas formales entre el Funcionamiento Ecosistémico y Servicios Ecosistémicos. Las líneas punteadas representan la relación entre las categorías de SE. Las líneas discontinuas representan la influencia de las necesidades, intereses y valores humanos en la definición de beneficios y SE, en los dos esquemas de clasificación. Tomado de Volante *et al.* (2012).

De acuerdo a las distintas definiciones y clasificaciones de SE, se tiene por un lado, el concepto de Millennium Ecosystem Assessment (MEA, 2005) el cual define a los SE como los "beneficios" que la sociedad obtiene de los ecosistemas; y los clasifica en SE de aprovisionamiento, SE de regulación, SE culturales y SE de soporte. Por otro lado, Boyd y Banzhaf (2007) se refieren a los SE, como los componentes ecológicos directamente consumidos y/o aprovechados para generar bienestar humano, omitiendo el contexto subjetivo y cultural. Desde esta perspectiva, Fisher *et al.* (2009) define a los SE como los componentes y funciones de los ecosistemas, utilizados (activa o pasivamente) para producir el bienestar humano. El análisis realizado en este trabajo está basado en esta definición. Fisher *et al.* (2009) propusieron un esquema de clasificación de SE donde consideran a la estructura y al funcionamiento del ecosistema como "SE Intermedios", los que a su vez determinan "SE Finales". Varios "Servicios Intermedios" (por ejemplo, dinámica de la fotosíntesis y la estructura o la composición de especies) pueden determinar el nivel de provisión de "Servicios Finales" (por ejemplo, la producción de forraje o el secuestro de C).

Haines-Young y Potschin (2010) demostraron que existe una cascada de procesos que va desde las estructuras básicas y funciones de los ecosistemas hasta los beneficios. El vínculo entre estructura y funcionamiento ecosistémico (servicios intermedios) y los Servicios Finales se definen por medio de "funciones de producción". Para el análisis de la dinámica del nivel de provisión de los SE intermedios y finales, Paruelo *et al.* (2016) han propuesto un índice denominado IPSE (Índice de Provisión de Servicios Ecosistémicos). El IPSE, estimado a partir de información provista por sensores remotos, está basado en atributos de la dinámica estacional de la captura del C cuantificados a través del índice de vegetación normalizado (NDVI). Estos atributos son, el promedio anual del NDVI, indicador de la absorción de la energía lumínica absorbida por la cobertura vegetal; y el coeficiente de variación intra-anual del NDVI, descriptor de la estacionalidad. En términos matemáticos el IPSE se expresa de la siguiente manera como $NDVI_{\bar{x}} * (1-NDVI_{cv})$; siendo $NDVI_{\bar{x}}$ el promedio anual del NDVI; y $NDVI_{cv}$, el coeficiente de variación intra anual. El índice IPSE proporciona información importante sobre los cambios espaciales y temporales de la provisión de los SE, y es particularmente sensible a los cambios en el uso del suelo.

El objetivo de este trabajo es analizar los cambios ocurridos en el nivel de provisión de SE intermedios relativos a la dinámica de la captura del C en la región Chaqueña del NOA, ocurridos en los últimos 10 años (2005 -2015); estimar la variación inter-anual y su tendencia.

Para ello se ha utilizado el Índice de Provisión de Servicios Ecosistémicos (IPSE) y se elaboraron algunas hipótesis direccionadas a la explicación de la variación espacial y temporal del IPSE y su vinculación con el uso/cobertura del suelo en la región.

2. Materiales y Métodos

2.1. Área de Estudio

El área de estudio se sitúa en la región chaqueña del Noroeste del territorio Argentino, el cual abarca parte de las provincias de Jujuy, Salta, Tucumán, Santiago del Estéreo y Catamarca (Figura 2). Esta zona posee la mayor biodiversidad del país contando con 10 millones de hectáreas naturales, parte de las cuales han sido transformadas para una intensa actividad agropecuaria, zonificada con criterios agroecológicos y económicos (Bravo *et al.*, 1998). La actividad económica de la región se destaca por su agricultura subtropical como la caña de azúcar, el tabaco, horticultura y frutas tropicales. En cuanto a la orogenia del NOA es caracterizada por su heterogeneidad, compuesta de zonas de llanura, montañas y ríos caudalosos.

2.2. Base de datos

Como fuente primaria de información se utilizaron las series temporales de los productos sintéticos denominados MOD13Q1, elaborados a partir de imágenes MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) a bordo del satélite Terra – MODIS, siendo un instrumento multiespectral capaz de discriminar 36 canales ubicados entre el dominio óptico y térmico del espectro electromagnético (Paruelo, Dibella y Milkovic, 2014). Las imágenes MOD13Q1 (Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m), se encuentran disponibles en los servidores de libre acceso de la NASA (<http://reverb.echo.nasa.gov>) desde el año 2000 con una frecuencia de 16 días (23 imágenes al año). Este producto se presenta con una resolución espacial de 250m (5.4 Ha aproximadamente), y se calcula a partir de la reflectancia roja e infrarroja de la superficie, generando un compuesto de máximo valor (CMV), creado a partir de la selección de píxeles de mayor calidad (dependientes de las condiciones atmosféricas en el momento de la captura de la imagen) y de valores más elevados en el período de 16 días. Como resultado se obtiene una imagen compuesta que posee correcciones radiométricas y atmosféricas (Justice *et al.*, 1998; Huete *et al.*, 2002). El producto MOD13Q1 cuenta con información sobre la calidad de los píxeles en la banda 12 (reliability band), utilizando descriptores cuyo significado se muestra en la tabla 1. Esta información fue utilizada para generar series de tiempo corregidas y ajustadas a partir de los valores de mayor calidad.

Tabla 1. Clasificación simplificada de los datos de pixeles que describen la calidad general. Tomada y adaptada de (Didan *et al.*, 2015)

VALOR	RESUMEN DE CALIDAD	DESCRIPCIÓN
-1	No dato	No procesado
0	Buenos datos	Use con confianza
1	Datos marginales	Útil, pero observar otra información de QA
2	Nieve o hielo	Objetivo cubierto de nieve /hielo
3	Nubes	Objetivo no visible, cubierto con nubes

La zona de estudio se ubica en el recorte de la escena h12v11, cuenta con unas dimensiones de 3500 filas y 2500 columnas, de las 4800 filas *4800 columnas originales, para un periodo de 10 años, haciendo un total de 230 imágenes. Dicho periodo comprende de agosto de 2005 a julio de 2015, escogido de tal forma que se sincronizara con el ciclo hidrológico anual de la vegetación para observar el comportamiento fenológico (del Val, 2011), debido a que la fenología estudia los cambios ontogénicos de las plantas en un ciclo anual, teniendo en cuenta los cambios naturales como la brotación foliar, la senescencia y caída de las hojas, la floración y la fructificación; denominadas fenofases, las cuales pueden estar relacionadas con cambios climáticos y microclimáticos periódicos. Los fenómenos observados en las diferentes fases fenológicas se repiten con regularidad de la misma manera para cada especie (Valero *et al.*, 2006). Estos cambios son de gran importancia en este estudio ya que se quiere analizar la fluctuación o variación del IPSE en el transcurso del tiempo de análisis y ver la relación que tiene con el uso y cambio en la cobertura terrestre.

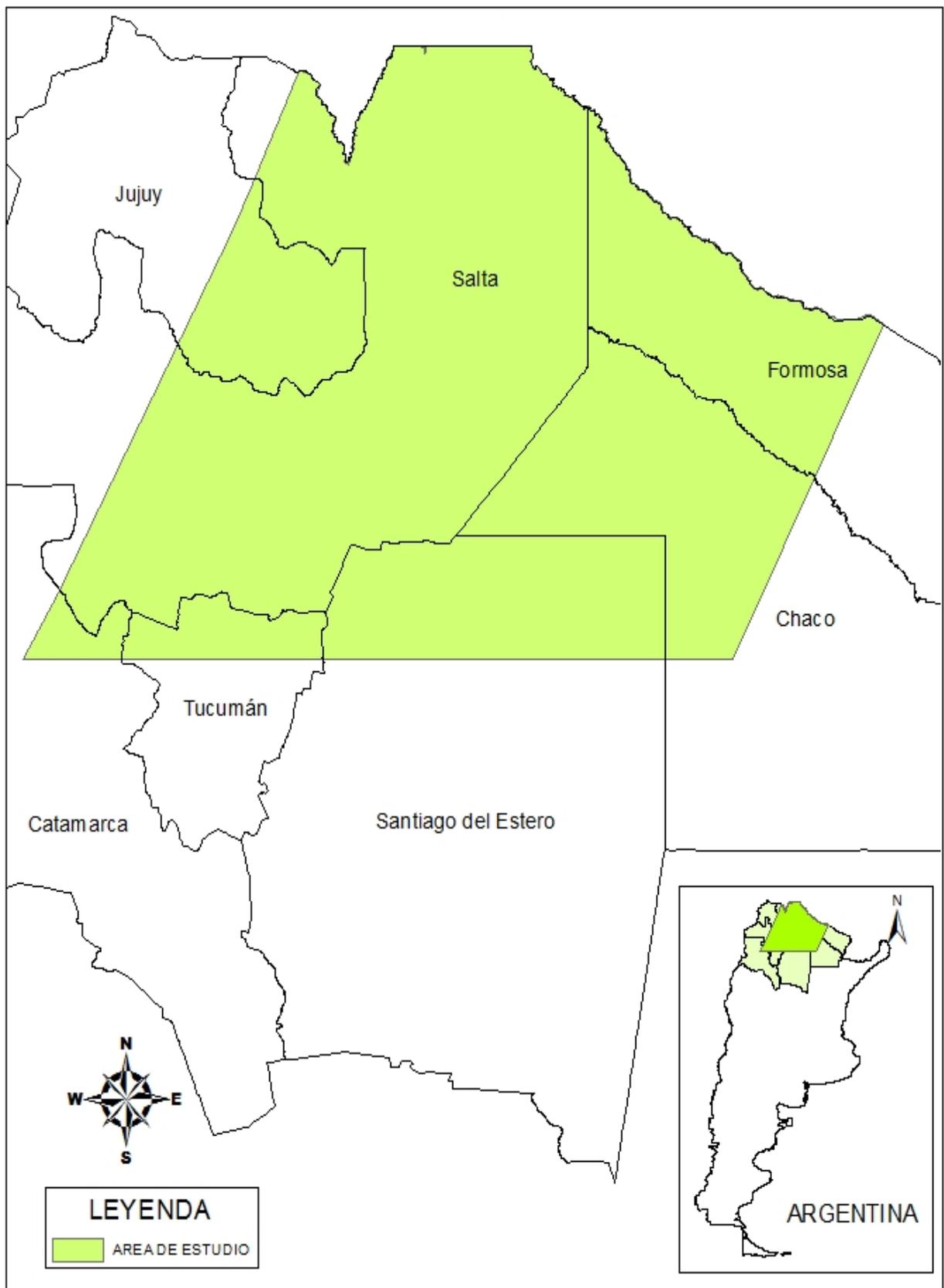


Figura 2. Área de estudio. Provincias de Jujuy, Salta, Tucumán, Santiago del Estéreo y Catamarca

2.3. Esquema general del trabajo

En cuanto al esquema general de la ejecución del trabajo, se le dio inicio con la obtención de las imágenes satelitales MODIS, el producto MOD13Q1, seguido de esto con el programa TIMESAT 3.0 se ajustaron, quitando los datos espurios de las imágenes. Luego por medio del programa ERDAS, se realizaron diferentes cálculos con el fin de hallar el NDVI promedio y el coeficiente de variación del NDVI, para calcular el IPSE con estos resultados y sacar como productos mapas del IPSE anual, mapa de variabilidad y tendencia del IPSE durante los 10 años como lo muestra la figura 3.

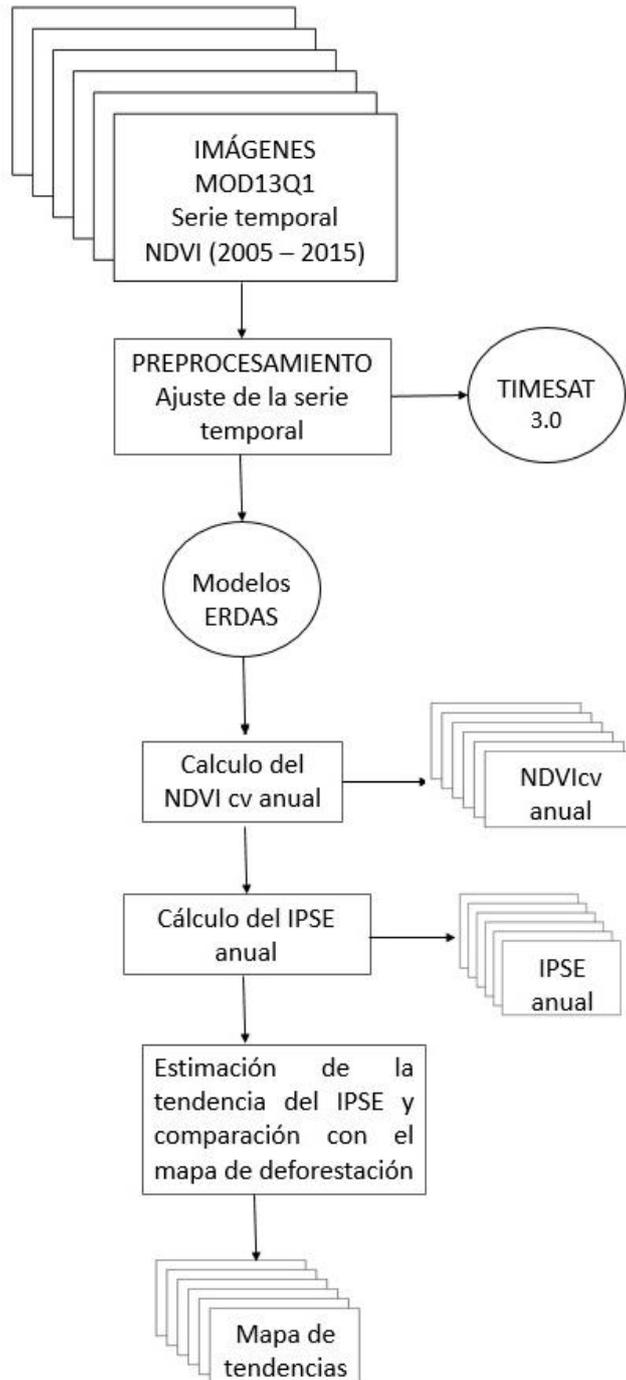


Figura 3. Esquema general del trabajo.

2.4. Pre-procesamiento de imágenes

En el pre-procesamiento de las imágenes se corrigieron o eliminaron aquellos datos espurios o ruidos de la serie temporal, producidos en su gran mayoría por la presencia de aerosoles o nubes en el momento de adquisición de las imágenes, actuando como fuente de error en la etapa de clasificación, (Volante, et al 2015). Para ello se utilizó el software libre TIMESAT 3.0, desarrollado por Jönsson y Eklundh (2004), diseñado para suavizar series temporales de datos “crudos”; y extraer parámetros de estacionalidad, tales como el inicio, la duración y el final del ciclo de crecimiento. Para descartar errores se realizan una serie de comprobaciones sobre la consistencia de los parámetros, ya que la importancia de éstos radica en la marcación de los cambios temporales o espaciales en la cobertura vegetal debido a cambios climáticos y/ o de uso del suelo (Jönsson y Eklundh, 2004).

Los parámetros de estacionalidad se explican de la siguiente forma según Jönsson y Eklundh (2015):

1. **Inicio de la estación:** Rango de tiempo estimado para el inicio de la estación, definido por el usuario (a).
2. **Final de la estación:** Rango de tiempo al final de la curva de estacionalidad, al igual que el inicio, es definido por el usuario (b).
3. **Longitud de la estación:** es la medición de tiempo desde el inicio hasta el final de la temporada (c).
4. **Nivel de base:** Es el promedio de los valores mínimos de izquierdo y derecho (inicio y final de la temporada, respectivamente) (d).
5. **Mitad de la estación:** Es el cálculo del valor medio de los tiempos para los cuales, respectivamente, el borde izquierdo (inicio de temporada) ha aumentado al nivel del 80% y el borde derecho (final de temporada) ha disminuido al nivel del 80% (e).
6. **Máximo valor:** Es el valor máximo de los datos para la función ajustada durante la temporada, puede ocurrir en un momento diferente en comparación con la mitad de la estación (f).
7. **Amplitud estacional:** Diferencia entre el máximo valor y el nivel base (g).
8. **Tasa de aumento al inicio de la estación:** Calculado como la relación de la diferencia entre los niveles de izquierda (inicio de temporada) 20% y 80% y el tiempo de diferencia correspondiente.
9. **Tasa de disminución al final de la estación:** calculado como el valor absoluto de la relación de la diferencia entre el derecho (fin de la temporada) 20% y 80% los niveles y la diferencia de tiempo correspondiente. La tasa de disminución se da así como una cantidad positiva.
10. **Integral estacional pequeña:** Integral de la diferencia entre la función que describe la temporada y el nivel base desde el inicio de la temporada hasta el final de la temporada (h).
11. **Integral estacional grande:** representa el área debajo de la curva comprendida desde el inicio de crecimiento de la vegetación hasta el final de la estación (i).

Este software hace uso de tres modelos de ajuste basados en mínimos cuadrados (filtro adaptado Savitzky-Golay, función gaussiana asimétrica y función doble logística)

(Eklundh & Jönsson, 2015). En este trabajo se escogió el filtro Savitzky-Golay debido a que permite ajustar bien las pequeñas fluctuaciones en los datos, siendo también el más sensible al ruido (Tan et al., 2011). Como resultado del proceso se obtiene la imagen del NDVI ajustado con las once variables correspondientes a los atributos estacionales de la serie temporal, homologables con los atributos fenológicos de la cubierta vegetal y se generan para cada pixel de la serie del NDVI.

La secuencia de trabajo realizada para ajustar las series temporales fue la siguiente:

1. Visualizar las imágenes binarias.
2. Observar las curvas estacionales y elegir un modelo de ajuste y los parámetros de estacionalidad.
3. Crear un archivo de configuración (.set), para guardar los parámetros establecidos.
4. Ejecutar el conjunto de datos completo.
5. Extraer imágenes binarias.
6. Finalmente importar al ERDAS IMAGINE 2010 (figura 5).

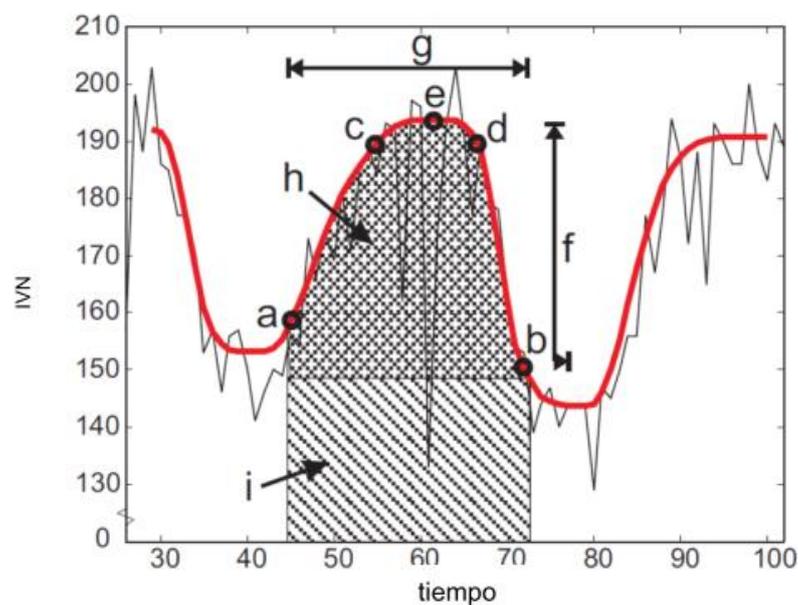


Figura 4. Representación gráfica de algunos de los parámetros de estacionalidad generados en TIMESAT 3.0; los puntos (a) y (b) se refieren al inicio y el final de la estación respectivamente. (c) duración de temporada, (d) valor de base, (e) tiempo de media temporada, (f) valor máximo, (g) amplitud, (h + i) son integrales que muestran el efecto acumulado de la vegetación durante el periodo (Eklundh y Jönsson, 2009).

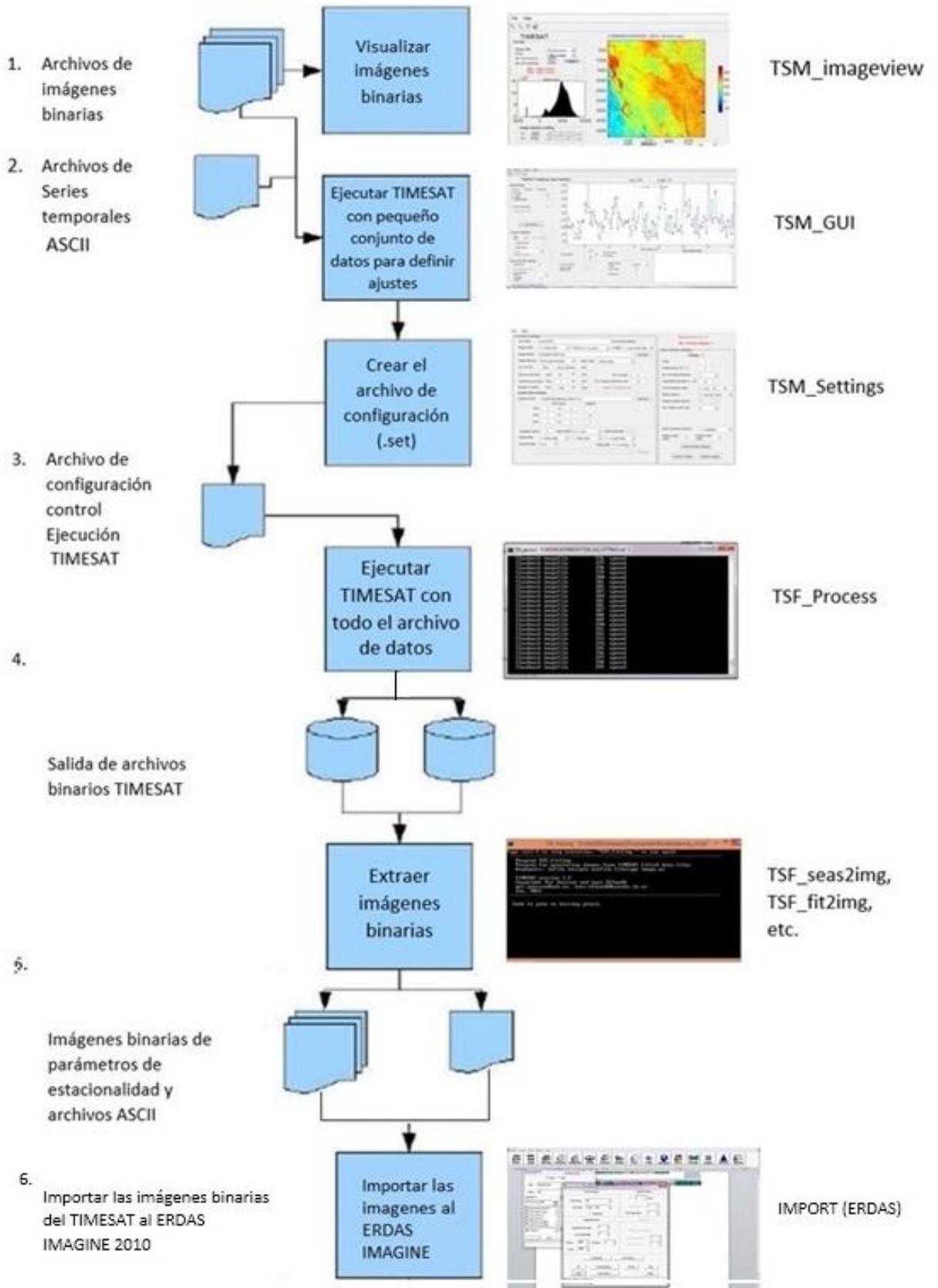


Figura 5. Secuencia del pre – procesamiento de las imágenes, tomado y adaptado de Eklund & Jonsson, 2015.

2.5. Cálculo del Índice de Provisión de Servicios Ecosistémicos (IPSE)

Para el cálculo del IPSE anual, se compilaron las imágenes del NDVI anual (23 imágenes por año) de los 10 años de estudio (2005-2015), en una sola imagen (stack), a esta imagen se le calculó el NDVI promedio (\bar{x}) y la desviación estándar o típica (σ) del NDVI, teniendo como resultado dos imágenes independientes ($NDVI_{\bar{x}}$ y $NDVI_{\sigma}$) (figura 5). Estas imágenes resultantes son necesarias para el cálculo del coeficiente de variación (CV) del NDVI, el cual es el cociente entre el $NDVI_{\sigma}$ sobre el $NDVI_{\bar{x}}$; Por último para hallar el Índice de Provisión de Servicios Ecosistémicos se aplicó la fórmula matemática:

Ecuación 1

$$IPSE = NDVI_{\bar{x}} * (1 - NDVI_{cv})$$

Para la elaboración de estos cálculos se diseñó y ejecutó un modelo de procesos (figura 6), desarrollados por medio de la herramienta “model” del software ERDAS Imagine 2010.

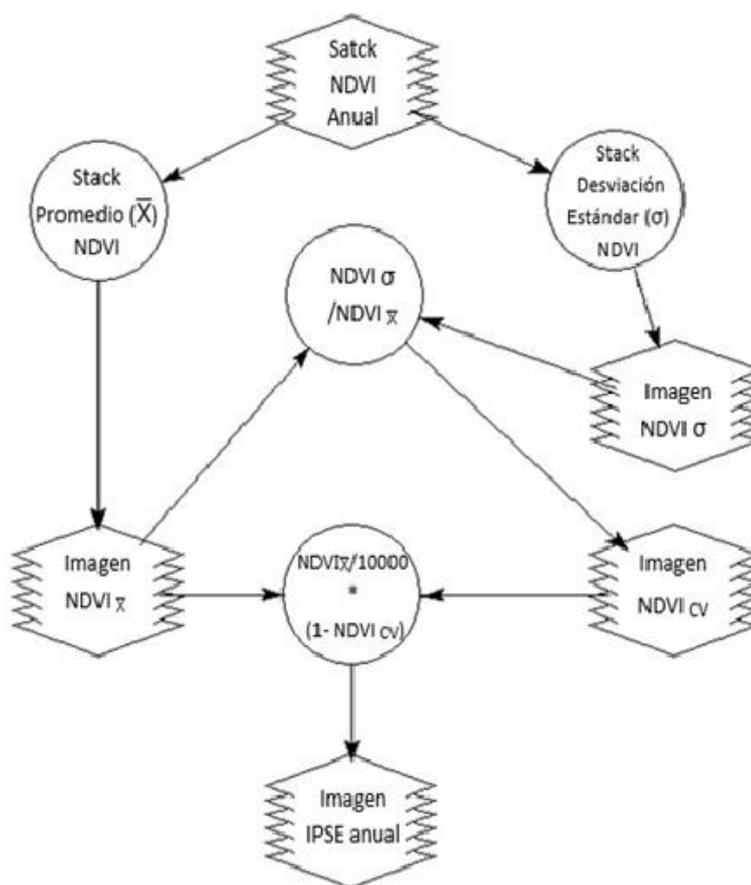


Figura 6. Modelo para el cálculo del IPSE desarrollado con en el programa ERDAS IMAGINE 2010.

2.6. Estimación de la tendencia de IPSE

Para estimar la tendencia de los valores de IPSE en el período de estudio se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson entre las variables “tiempo” (de 2005 hasta el 2015) y el IPSE de cada año. Este coeficiente indica el grado de asociación entre las variables (1).

Ecuación 2

$$r_{xy} = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \sqrt{n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}}$$

Siendo “ r_{xy} ” el coeficiente de correlación de Pearson; “ x_i ” el año de observación; e “ y_i ” el IPSE del año i . Para analizar los cambios del IPSE a través del tiempo (tendencia), se calculó el coeficiente de correlación de Pearson para cada pixel del área de estudio, para una prueba con 8 grados de libertad ($n-2$) y un nivel de confianza de 97,5%. Valores positivos de r indican una correlación positiva o sea una tendencia de IPSE en aumento; si r es negativo, existe una tendencia a la disminución. Dado que n es igual a 10, el valor crítico del r de Pearson es 0,632 con un nivel de confianza e 97,5%.

Una vez obtenido el mapa de valores de r , se recodificaron los valores de acuerdo a la siguiente regla “si el coeficiente de variación es menor a $-0,632 = 1$, si no hay cambio=2 y si es mayor a $0,632 = 3$, obteniendo como resultado final un mapa de tendencias de ISPE (fig. 7).

2.7. Relación entre las tendencias del IPSE y los cambios en el uso del suelo por deforestación

Los resultados de las tendencias del IPSE (positiva, negativa o nula) representados en un mapa que sintetiza el resultado de los 10 años de estudio, se superpusieron al mapa de deforestación de Vallejos *et al.*, (2014), con el fin de evaluar si los resultados de IPSE tienen relación con la actividad agropecuaria. Para la construcción del mapa de deforestación Vallejos y colaboradores (2014), analizaron 44 escenas de Landsat, incluyendo parte de Argentina, Paraguay y Bolivia, basando el estudio en el seguimiento de las parcelas transformadas individuales de toda la región del Chaco seco durante más de tres décadas (1976 a 2012) usando el mismo protocolo, llegando a la conclusión que hasta finales de 2012 15,8 millones de ha de los hábitats originales del Chaco se transformaron en tierras de cultivo o pastizales. La información de este mapa de deforestación se actualizó con la capa del LCCS.

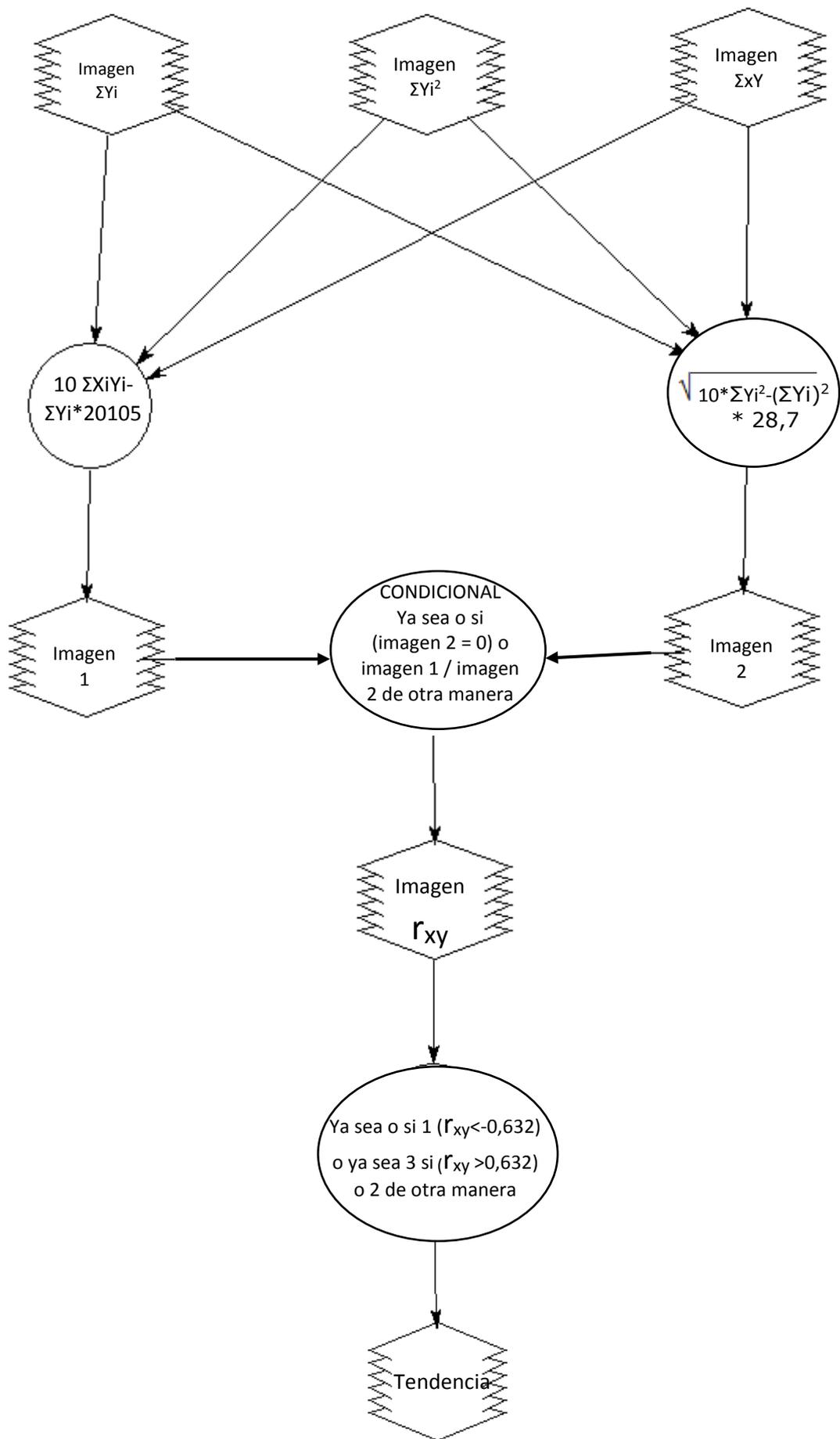


Figura 7. Modelo para calcular el coeficiente de correlación de Pearson

3. Resultados

El coeficiente de variación del NDVI (NDVcv) durante el periodo de estudio (2005-2015), presentó valores máximos de 1,754 y mínimos de 0,015, en promedio. Estos valores se distribuyeron sobre la imagen de la siguiente forma: en un 98.41% fueron valores en el rango de 0,01 a 0,49, seguidos por el 1,57% de los valores que oscilan entre 0,50 a 0,99 y por último los valores de 1,004 a 1,754 representan el 0,01% de la imagen (Fig.8). De lo anterior se infiere que el CV presentó valores extremos que sobrepasan las medidas de los parámetros normales para la interpretación de datos, representando el 0,01% de la imagen. Estos valores fueron observados en pixeles presentes en la ribera de los cuerpos de agua, con vegetación “inestable” o inundable la cual probablemente se encuentre en estadios diferentes en fechas sucesivas, repercutiendo así en la variabilidad de los valores del NDVI. Por otro lado, en las zonas donde el CV del NDVI fue de 0,01 a 0,49, la vegetación es estable con una regularidad en su crecimiento con bajos cambios entre registros sucesivos.

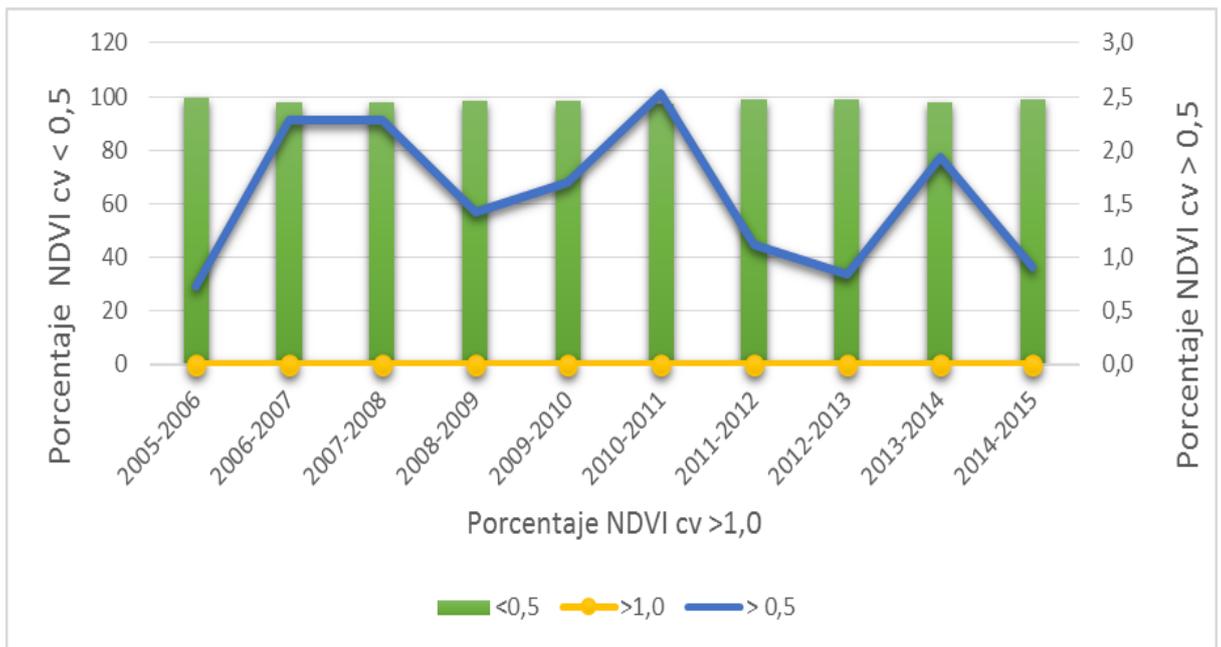


Figura 8. Porcentajes del NDVIcv de las imágenes presentes en el periodo de estudio (2005-2015).

Para comparar el comportamiento de los valores del NDVI_{cv} en las áreas agropecuarias y no-agropecuarias (sin deforestar), se separaron los valores en tres rangos: resultados entre (0 a 0,33) bajo; moderado (0,34 a 0,66) y alto (0,67 a 1 +). Obteniéndose que en las áreas agropecuarias 33,6% tuvieron un comportamiento alto, 54,9% moderado y 11,5% bajo. En cuanto a las áreas sin deforestar el 10,7% alto, 50,2% moderado y por último el 39,1% bajo (Fig. 9).

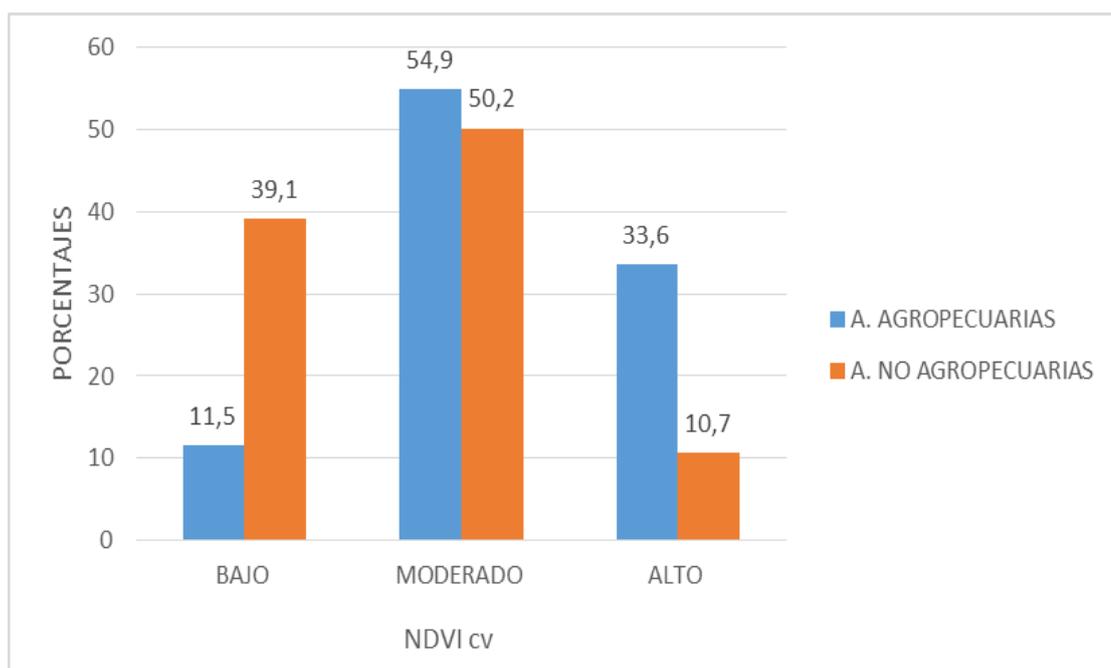


Figura 9. Porcentajes del NDVI_{cv} para las áreas agropecuarias y sin deforestar, en el periodo de 2005 – 2015.

En la representación espacial del NDVI_{cv} durante el periodo de estudio de 10 años (Fig. 10), se aprecia que la zona donde hubo mayor variabilidad fue el centro de la provincia de Salta correspondiente con áreas agropecuarias de gran tamaño; y el occidente de la imagen que comprende a los pastizales de altura de las provincias de Jujuy, Catamarca y Tucumán. Así mismo las zonas valores medios moderados a altos en el NDVI_{cv} fue la parte oriental de la imagen que abarca parte de las provincias de Formosa, Chaco y Santiago del Estero, Por último el área con el NDVI_{cv} más bajo es la franja de la cordillera oriental que atraviesa las provincias de Salta y Jujuy coincidente con la selva de Las Yungas.

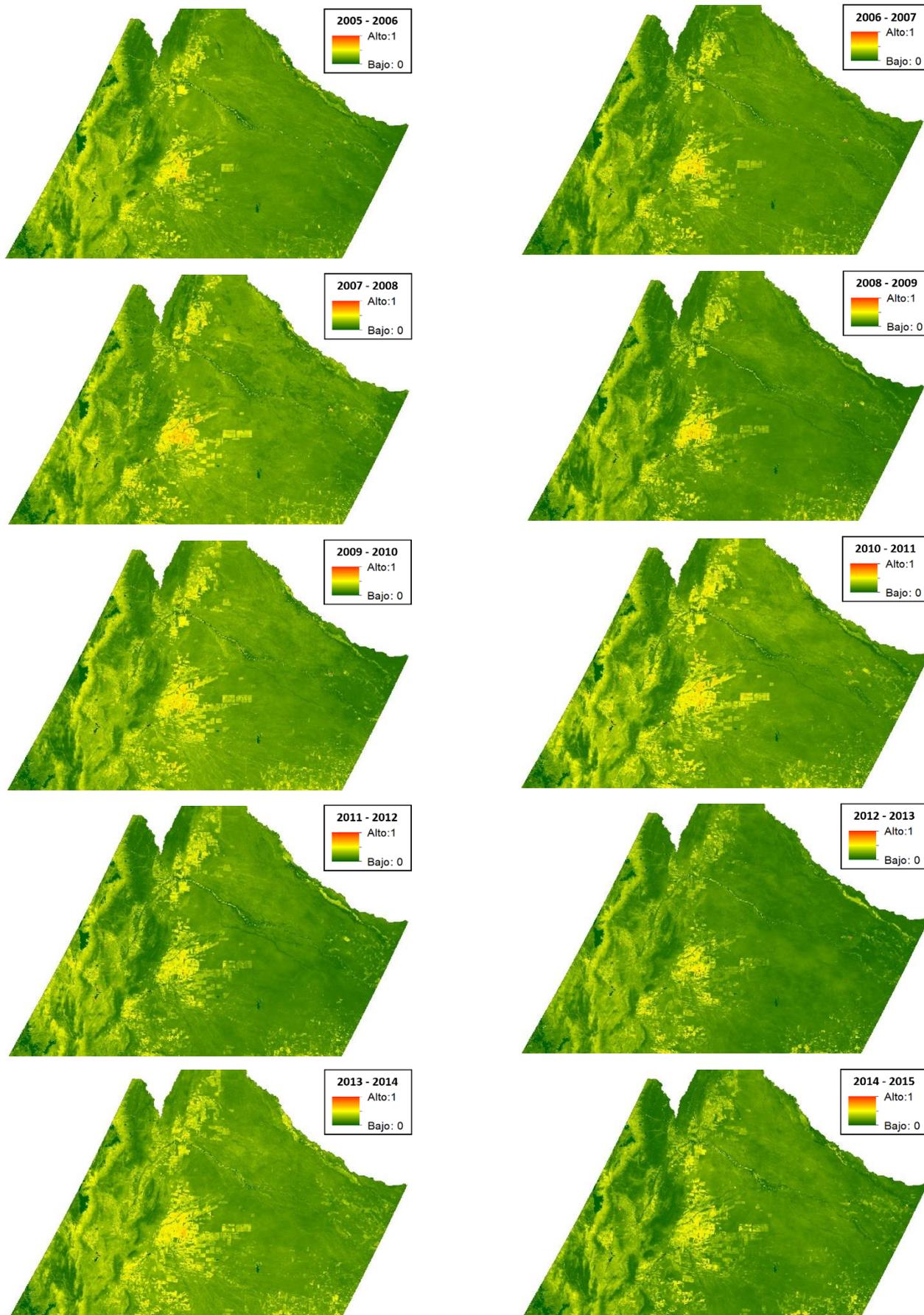


Figura 10. Secuencia anual del coeficiente de variación del NDVI en el periodo 2005 – 2015.

El promedio del NDVI del periodo de estudio, osciló entre el máximo 0,9016 al mínimo 0,0072, encontrándose en el año 2010-2011 el del valor más bajo y el 2014-2015 con el valor más alto (Fig. 11).

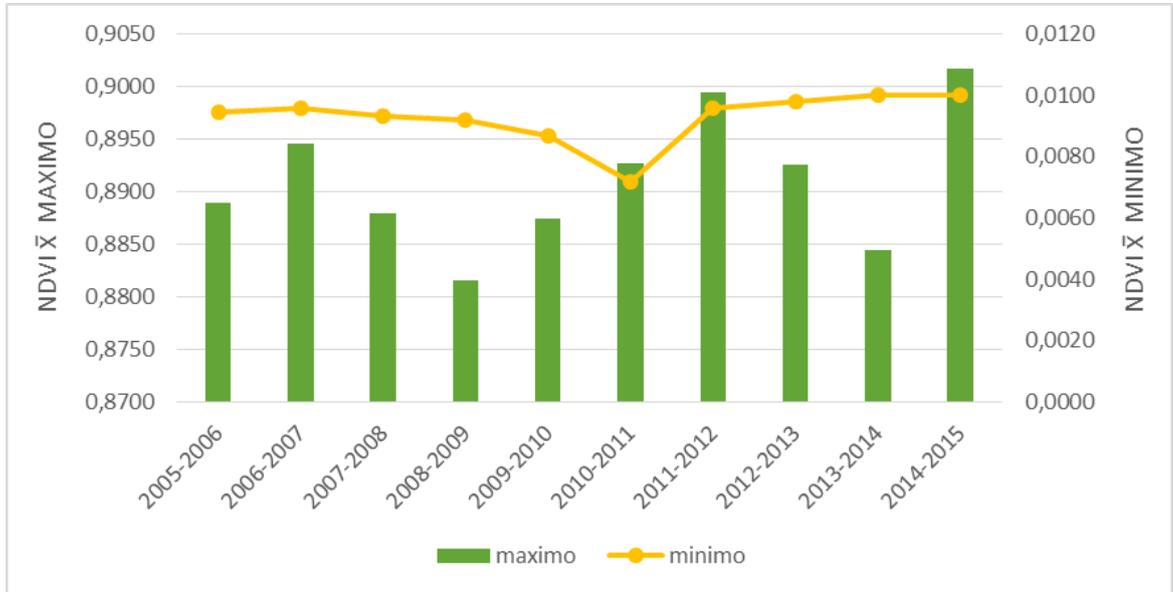


Figura 11. Los valores máximos representados por el eje de ordenadas de la izquierda y los valores mínimos en el eje de las ordenadas de la derecha del NDVI promedio presentes en el periodo analizado (2005-2015).

En los mapas del $NDVI_{\bar{x}}$ durante el periodo de análisis (Fig. 12) se observan en color morado los valores bajos localizados al occidente de la imagen, correspondientes con el ecosistema de La Puna y Valles Áridos la cual ocupa parte de las provincias de Jujuy, Salta, Catamarca y Tucumán. En cuanto al $NDVI_{\bar{x}}$ con valores altos, se observa en las provincias de Salta, Jujuy y Tucumán, correspondiente a la zona de las Yungas, representado por el color verde. Este ecosistema perteneciente a la Cordillera Oriental, está compuesto por selvas que tienen un crecimiento continuo y con cierta regularidad en el tiempo y espacio. La zona del lado oriental de la imagen que posee la gama de colores de verde a amarillo (valores medios del $NDVI_{\bar{x}}$), en los mapas se ve como en el transcurso del tiempo las áreas centrales de los mismos, va cambiando los valores medios a los valores bajos, la cual es paulatina remarcándose en el año 2012-2013 en adelante, indicando así una caída del índice.

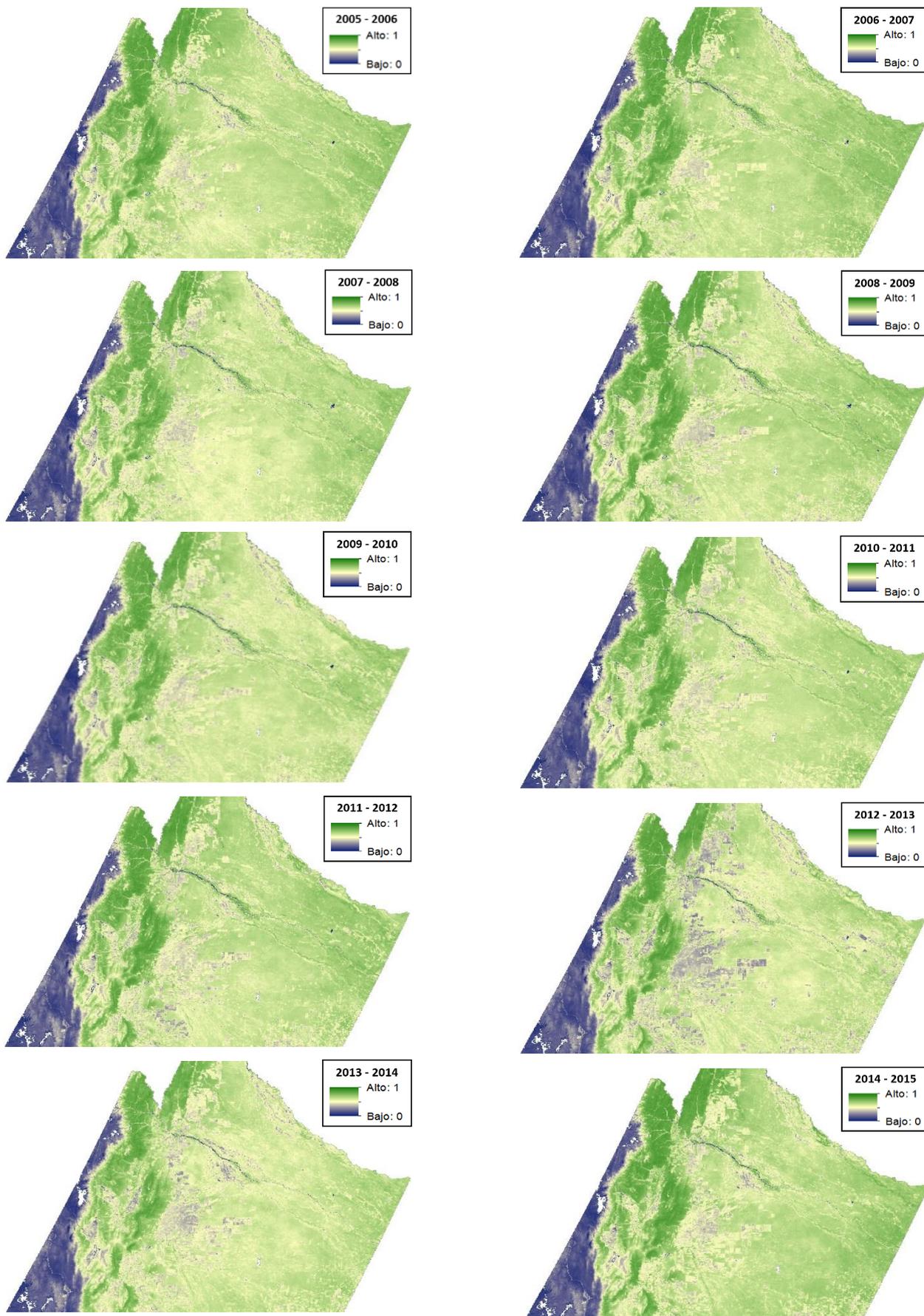


Figura12. Secuencia anual del NDVI promedio en el periodo 2005-2015.

El análisis realizado para durante el periodo de estudio en las áreas que fueron destinadas a actividades agropecuarias desde el año 1976 hasta el 2015 y las áreas sin deforestar, se dividieron los valores de la variable $NDVI_{\bar{x}}$ en tres rangos: bajo (0 a 0.33), moderado (0.34 a 0.66) y alto (0,67 a 1). Los valores de $NDVI_{\bar{x}}$ en zonas agropecuarias y no agropecuarias fueron muy diferentes: en zonas no-agropecuarias, el 40,8% del $NDVI_{\bar{x}}$ fue alto, seguido del 55% moderado y 4,2% bajo. Mientras que en las áreas agropecuarias el 15,9 % fue alto, el 83,8% moderado y por último el 0,3% fue bajo (Fig. 13).

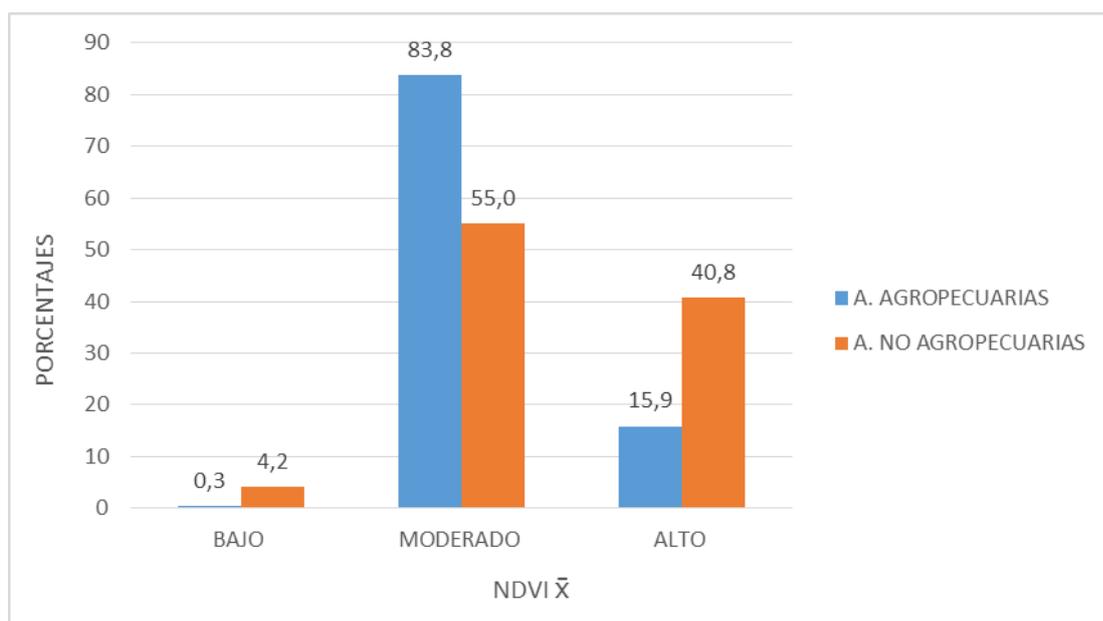


Figura 103. Porcentajes del $NDVI_{\bar{x}}$ para las áreas agropecuarias y no-agropecuarias en el periodo de 2005 – 2015.

En cuanto a los resultados obtenidos del IPSE anual, se encontró que los valores máximos y mínimos presentaron una gran variación entre años. Los valores máximos oscilaron entre 0.844 (2014-2015) el valor más alto a 0.751 (2007-2008) el valor más bajo, y los valores mínimos fluctuaron de 0,007 (2012-2013) a -0.021 (2006-2007) el valor más pequeño (Fig. 14.).

En la gráfica (Fig. 14) se observa como los valores del índice presentan una alteración en el comportamiento de los datos, siendo que algunos años poseen una regularidad con el año anterior en los valores mínimos y máximos. En el año 2007-2008 se muestra que el máximo del IPSE se dio a la caída, pero su mínimo continuó con el similar a los años pasados, a diferencia del 2012-2013, que presentó un alza en los valores mínimos y una continuidad regular en los valores máximos, haciendo una marcación profunda en el grafico ya que para el año 2013-2014, el valor del IPSE se estableció como venía en los años anteriores.

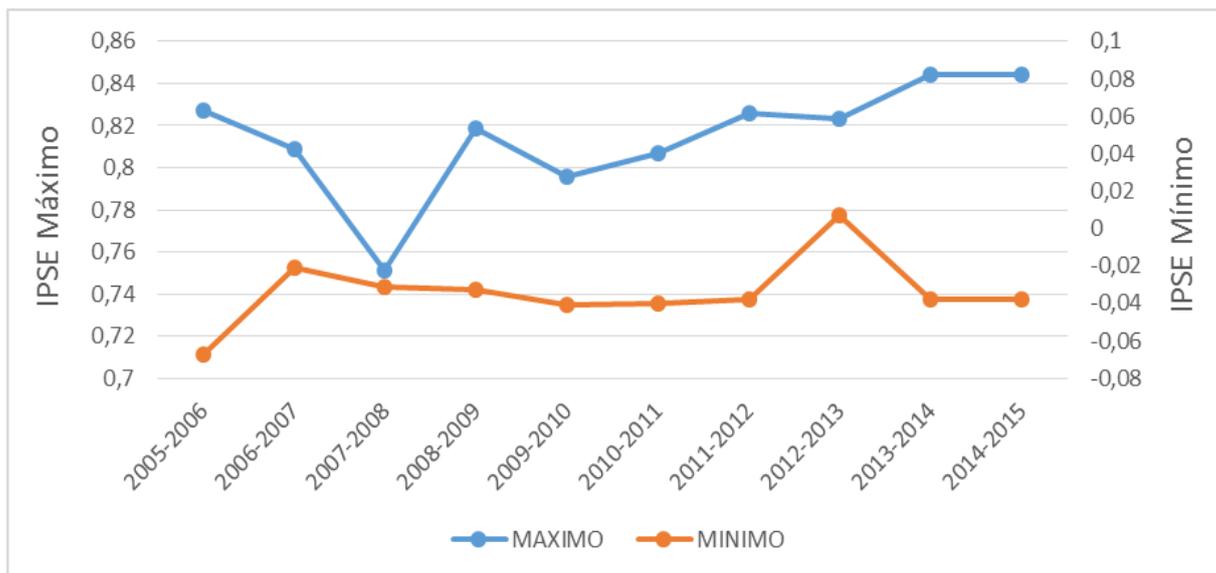


Figura 114. Valores máximos representado en el eje de las ordenadas a la izquierda y los valores mínimos del IPSE en el eje de las ordenadas a la derecha, presentes en el periodo de estudio (2005-2015).

En los mapas de la Figura 15 se muestra el comportamiento espacial y temporal del IPSE anual para el periodo 2005-15. Como patrón general puede advertirse que en las provincias de Salta y Jujuy donde se encuentran Las Yungas en la Cordillera Oriental, se observan los valores más altos de IPSE, ya que son áreas con vegetación selvática, las cuales durante los análisis presentaron datos altos y estables en el tiempo y el espacio. En cambio, el área central que atraviesa Salta de norte a sur presenta valores bajos e inestables, ya que esta zona ha sido modificada a través del tiempo, para fines agropecuarios. Visualmente se aprecia como esta franja con el transcurso del tiempo sufre varias transformaciones, lo cual repercute de la misma manera directamente en el comportamiento del IPSE, mostrando los valores altos en tonos cálidos en la gama del terracota, pasando por el amarillo y verde los valores medios, matizándose por los tonos fríos como los azules para llegar a los valores bajos, indicando la caída del IPSE y los SE de la zona.

Puede apreciarse además que los valores de IPSE más bajos se localizan en los ecosistemas de La Puna; y que existe un gradiente creciente en el valor de IPSE desde la zona central hacia el Este. Es probable que este gradiente esté condicionado por la precipitación.

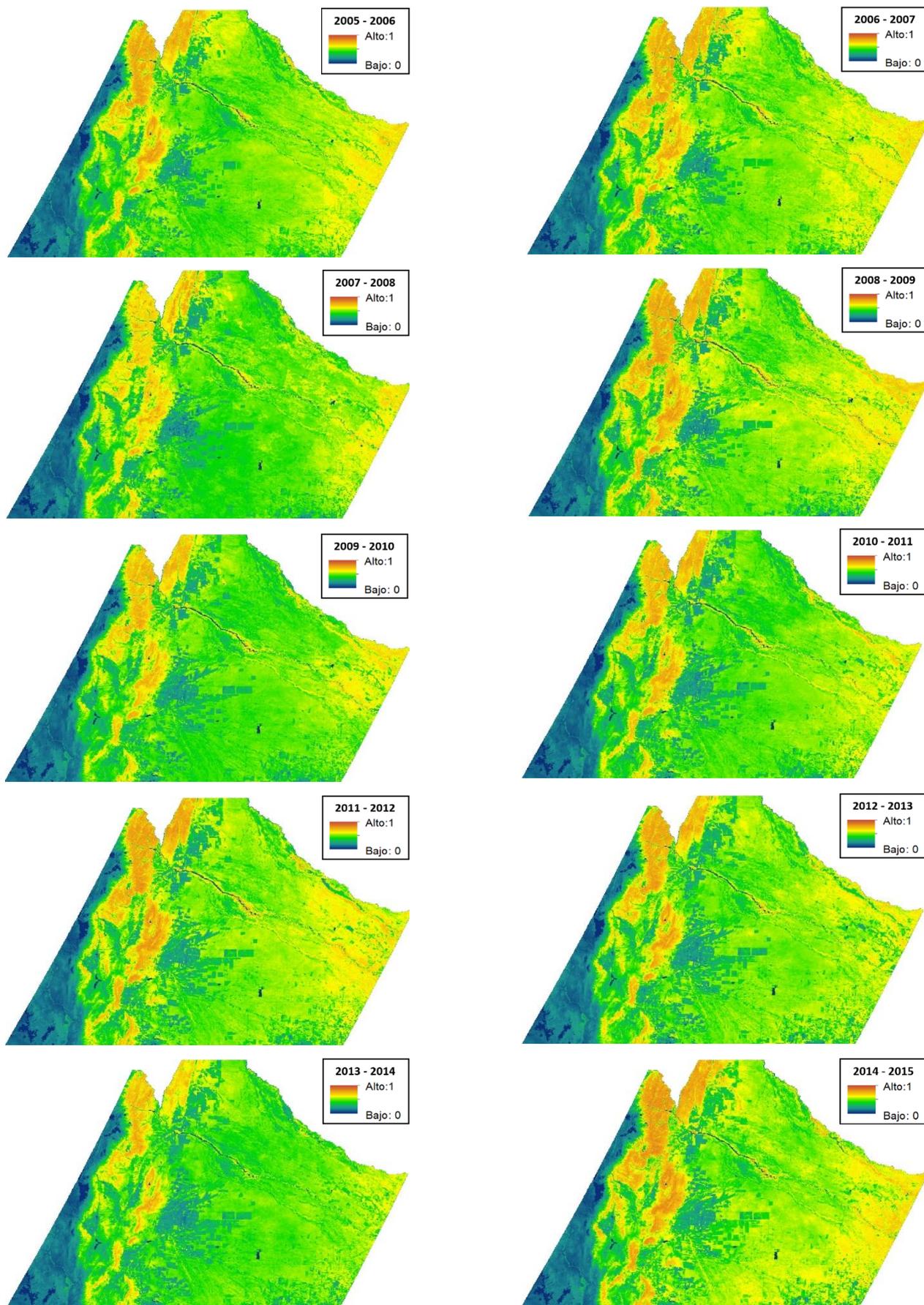


Figura 125. Secuencia anual del IPSE en el Noroeste Argentino en el periodo de 10 años (2005-2015).

Respecto a la comparación de los valores promedios del IPSE frente a los valores promedios NDVIcv durante la serie temporal analizada, se obtuvo que estas dos variables se encuentran inversamente relacionadas, siendo que si el NDVIcv disminuye el IPSE aumenta. Estos datos se interpretan de la siguiente forma, el CV entre más cercano a cero más estables son los datos en el tiempo de estudio. En cuanto a la estimación del IPSE está basado en el comportamiento del NDVI y sus valores se expresan en una escala de -1 a 1, en cuanto mayor es el número, más significativo es el resultado (Fig.14).

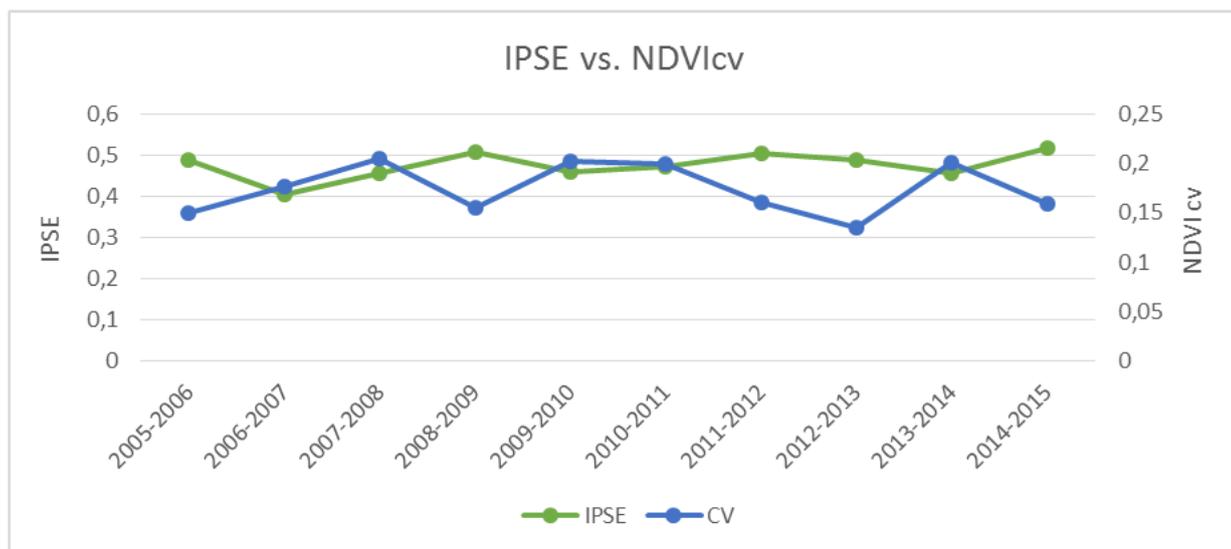


Figura 16. Comparación de valores promedios del IPSE, ubicados a la izquierda del grafico versus el promedio del coeficiente de variación del NDVI durante el periodo del análisis, ubicado a la derecha en el eje de las ordenadas.

Para evaluar cambios interanuales se evaluaron tendencias durante los 10 años de estudio. La tendencia se la categorizó en tres clases: negativa, sin cambios y positiva, (clases 1, 2 y 3, respectivamente). Luego de calcular las tendencias y realizar su categorización, se sobrepuso el mapa de deforestación (<http://monitoreodesmonte.com.ar/>) para el área analizada.

Las áreas destinadas a las actividades agropecuarias ocupan el 37% del área de estudio mientras que las áreas no-agropecuarias el 63% restante. En las áreas agropecuarias el índice de provisión de servicios ecosistémicos presentó en el 46% de la superficie una tendencia negativa, a diferencia de las áreas no-agropecuarias que fue de sólo el 16%. Esto puede estar indicando que la intervención antrópica (deforestación y agricultura) tiene un efecto diferencial y negativo a lo que ocurre en otras zonas.. La tendencia positiva se presentó de forma similar y proporcional en los dos tipos analizados. En las áreas agropecuarias existió una tendencia positiva en el 22%; mientras que en las áreas no-agropecuarias del 26% indicando un aumento en la provisión de servicios ecosistémicos. El aumento del IPSE en estas zonas podría interpretarse como resiliencia ecológica en áreas afectadas anteriormente por diversos agentes (antrópicos o naturales), y se han recuperado de forma funcional y posiblemente estructural, haciendo que los servicios intermedios y finales presenten un alza en el

registro. Por último el porcentaje sin cambios en el índice fue del 58% para las zonas sin deforestar y del 32% para las áreas agropecuarias (Fig.17).

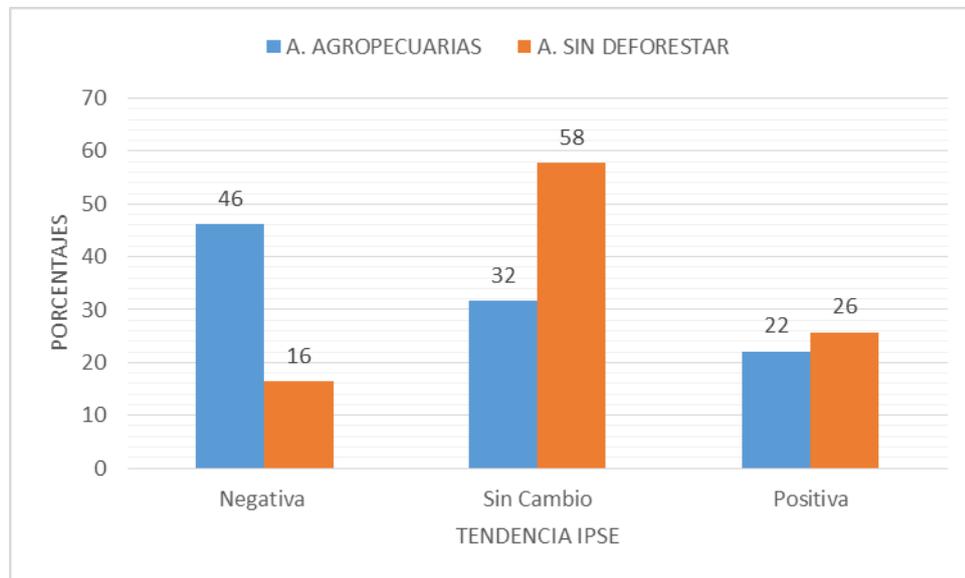


Figura 17. Porcentajes de las tendencias del IPSE, negativa (1), sin cambios (2) y positiva (3) para las áreas agropecuarias y sin deforestar, en el periodo de 2005 – 2015.

En el mapa se muestran las tendencias del IPSE (Fig. 18), evaluadas anteriormente, las cuales se discriminan en tres valores: sin cambio, negativa y positiva, representadas en color verde, naranja y amarillo respectivamente, y en tono gris las áreas deforestadas con fines agropecuarios (en el periodo de 1976 al 2015), las cuales se usaron para el análisis y comparación de las tendencias.

Se observa como el IPSE explica bien los cambios en la provisión de los SE debido a alteraciones naturales y/o antrópicas en el cambio del uso o la cobertura del suelo, apoyando los análisis anteriores, siendo que los resultados han sido coincidentes con este resultado final. Es apreciable que en las áreas donde se ha presentado algún tipo de deforestación durante los últimos 39 años (1976-2015), se presentaron los tres tipos de tendencias, lo cual se explica teniendo en cuenta el tiempo del análisis y el tiempo transcurrido con las deforestaciones, ya que le permite a la vegetación tener una recuperación fotosintética o corroborar la transformación del terreno.

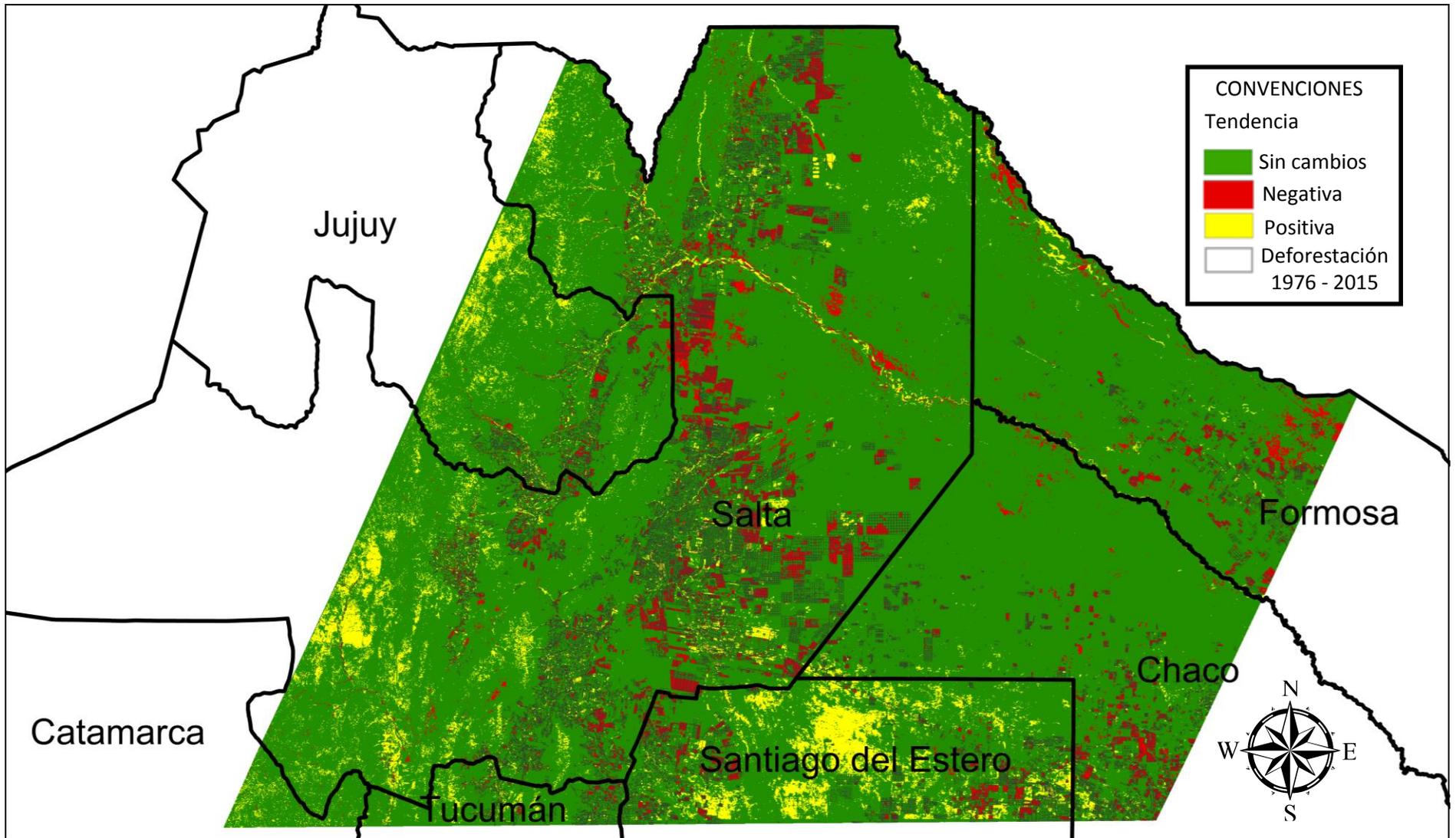


Figura 18. Mapa de tendencias (negativa, positiva y nula) del IPSE en el periodo 2005-2015 en el NOA; en naranja se encuentra la tendencia negativa, en amarillo la tendencia positiva y en verde las áreas sin cambio.

3.1. Discusión y conclusiones

La transformación de los hábitats naturales en áreas de cultivo cambió significativamente la provisión de los SE, debido a que las áreas donde se produjo un cambio en el uso y/o cobertura del suelo, presentó valores bajos en el NDVI \bar{X} (un indicador de la intercepción de la luz y por lo tanto de las ganancias totales del C) estrechamente asociada a los cambios del suelo (Paruelo *et al.*, 2001; Guerschman *et al.*, 2003) y valores altos en el NDVI_{cv} (descriptor de la estacionalidad),.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el IPSE es un indicador sensible a los cambios en la provisión de servicios ecosistémicos relacionados con las alteraciones y/o modificación en la cobertura terrestre. Lo anterior es apoyado por diversos autores quienes afirman que los cambios en el nivel de provisión de SE están regulados por cambios estructurales, como por ejemplo la pérdida de biodiversidad y funcionales como los cambios en la dinámica del agua y el C (Guerschman *et al.*, 2003; Guerschman, 2005; Jackson *et al.*, 2005; Noretto *et al.*, 2005; Fisher *et al.*, 2009; Volante, 2014). Sin embargo en estas áreas donde en años anteriores al estudio se registraron actividades agropecuarias y al momento de la adquisición de las imágenes probablemente cambiaron de vocación agrícola o simplemente pueden haber abandono de terreno, permitiendo el retorno de la vegetación natural, mostraron un alza en el IPSE representando el 22% de la zona deforestada, lo que indica que se dio una posible recuperación de SE. Coincidente con lo hallado por Paruelo *et al.*, (2016), donde la superficie analizada presentó pixeles con cambios positivos en el índice debido a la transición de pastizales naturales a plantaciones de árboles, teniendo valores del IPSE más altos en este caso que los registrados con la vegetación nativa que se sustituyó.

Partiendo de estos hallazgos se podría decir que posiblemente en algunos casos se pudo haber presentado una resiliencia ecosistémica, la cual es la capacidad de recuperación que posee la vegetación tras diversos fenómenos de perturbación, ya sean de tipo natural o antrópico (Gunderson, 2000), siendo de dos formas: estructural o funcional. Esta teoría podría dar inicio a futuros estudios, donde se fusionen el índice con otros indicadores que permitan observar estos cambios de forma más detallada, información que podría ser muy útil para la toma de decisiones políticas, económicas, ambientales y sociales, llevando el concepto de sostenibilidad ambiental y reconciliación ecológica cercanos a una realidad.

De igual manera en las áreas donde no hay indicadores base como el mapa de deforestación, para comparar los resultados obtenidos del IPSE, se genera hipótesis acerca del porqué se presentaron esos valores. En el caso donde la tendencia del IPSE se dio a la caída sin antecedentes registrados, se debió a que se están presentando alteraciones aledañas al terreno, como puede ser la homogenización del paisaje trayendo consigo problemas en la polinización natural de las plantas, siendo que este es un papel crucial para el mantenimiento de la integridad funcional de los ecosistemas terrestres (FAO, 2014).

También se podría decir que se debe a factores como la erosión eólica, salinización entre otros problemas ambientales consecuencia de la explotación del suelo.

Así mismo en las zonas deforestadas donde el IPSE no presentó cambios, se piensa que fue porque hubo una alteración en el uso más no una transformación como tal de la cobertura terrestre, permitiendo que la vegetación presente, como los cultivos, tuvieran un comportamiento funcional similar al natural, debido a que el análisis multitemporal se realizó en un lapso de tiempo relativamente corto, teniendo en cuenta que se poseen registros de deforestación de 39 años, lo que permitió que se diera una adaptación por parte de la vegetación. Para finalizar, se puede concluir que la provisión de SE es medible por medio de sensores remotos, teniendo en cuenta los dos atributos funcionales que se encuentran conectados a las ganancias de C, los cuales se pueden monitorear en el tiempo y el espacio (Paruelo *et al.*, 2016). Estas mediciones son importantes para la toma de decisiones futuras en la organización de una sociedad.

4. Bibliografía

- Boyd, J., and S. Banzhaf. 2007. What are ecosystem services? The need for standardized environmental accounting units. *Ecol. Econ.* 63(2-3): 616–626.
- Didan, K., Munoz, A.B., Solano, R., Huete, A., 2015. MODIS vegetation index user's guide (MOD13 Series) version 3.00 (Collection 6). Vegetation Index and Phenology Lab. The University of Arizona .
- Dirzo, R., and P.H. Raven. 2003. Global state of biodiversity and loss. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 28(1): 137–167.
- Di Gregorio, A., and L.J. Jansen. 2005. Land Cover Classification System. Classification concepts and user manual. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma, Italia.
- Fisher, B., Turner, R.K., Morling, P., 2009. Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecol. Econ.* 68 (3), 643–653.
- FAO. 2014. Principios y avances sobre polinización como servicio ambiental para la agricultura sostenible en países de Latinoamérica y el Caribe.
- FAO. 2015. Atlas de cobertura del suelo de Uruguay; cobertura del suelo y detección de cambios 2000-2011.
- Gunderson, L.H. 2000. Ecological resilience: in theory and application. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 31: 425–439. *Ecol. Syst.* 31.1.425.
- Geist, H.J., and E.F. Lambin. 2006. Land-use and land-cover change local processes and global impacts (Eric F. Lambin and H Geist, Eds.). *Global Change – The IGBP Series*.
- Guerschman, J.P., J.M. Paruelo, and I. Burke. 2003. Land use impacts on the normalized difference vegetation index in temperate Argentina. *Ecol. Appl.* 13(3): 616–628.
- Guerschman, J.P., Paruelo, J.M., 2005. Agricultural impacts on ecosystem functioning in temperate areas of North and South America. *Glob. Planet. Change* 47 (2), 170–180.
- Haines-Young, R., Potschin, M. (2010). The links between biodiversity, ecosystem services and human well-being. In: Raffaelli, D., Frid, C. (Eds.), *Ecosystem Ecology: A New Synthesis*, *BES Ecological Reviews Series*. CUP, Cambridge.
- Jackson, R., E. Jobbágy, R. Avissar, S. Roy, D. Barrett, C. Cook, K. Farley, D. le Maitre, B. McCarl, and B. Murray. 2005. Trading Water for Carbon with Biological Carbon Sequestration. *Science* (80-.). 310(5756): 1944–1947.

- MEA. 2005. Millenium Ecosystem Assessment: Ecosystems and human well-being. Biodiversity synthesis. World Resources Institute, World Resources Institute, Washington, DC.
- Nosetto, M.D., E.G. Jobbágy, and J.M. Paruelo. 2005. Land-use change and water losses: the case of grassland afforestation across a soil textural gradient in central Argentina. *Glob. Chang. Biol.* 11(7): 1101–1117.
- Paruelo, J.M., Burke, I.C., Lauenroth, W.K., 2001. Land use impact on ecosystem functioning in eastern Colorado, USA. *Glob. Change Biol.* 7 (6), 631–639.
- Paruelo, J., Guerschman, J., & Verón, S. 2005. Expansión agrícola y cambios en el uso del suelo. *Ciencia Hoy*, 15(87), 14–23.
- Paruelo, J. M., Texeira, M., Staiano, L., Mastrángelo, M., Amdan, L., & Gallego, F. 2016. An integrative index of Ecosystem Services provision based on remotely sensed data. *Ecological Indicators*, 71(August), 145–154.
- Valero, J., Benezra, M., Chong, L., Guenni, O. 2006. Comportamiento fenológico y producción de frutos de algunas especies leñosas del bosque decido en el asentamiento Las Peñitas, al sur del estado Aragua. Instituto de Producción Animal, Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela. Maracay, Aragua. Venezuela.
- Volante J, Bianchi, A. R., Paoli H., Noé Y., Elena H., Cabral. C. 2005. Análisis de la Dinámica del Uso del Suelo Agrícola del Noroeste Argentino Mediante Teledetección y Sistemas de Información Geográfica Período 2000-2005. INTA .
- Volante, J. N. 2014. Dinámica y consecuencias del cambio en la cobertura y el uso del suelo en el Chaco Semi-Árido. Universidad de Buenos Aires