

MONITOREO DE LA DEFORESTACIÓN EN EL VALLE DEL CONLARA (SAN LUIS) A PARTIR DE INFORMACIÓN SATELITAL.

Bertolino Juan José

Facultad de Turismo y Urbanismo

Universidad Nacional de San Luis

Email: jjb Bertolino@gmail.com

Resumen

En la actualidad, diversas regiones del mundo se encuentran bajo un proceso de rápido cambio en la cobertura vegetal. Este cambio se debe, fundamentalmente, a la explotación forestal y al avance de la frontera agrícola. Si bien se reconoce cada vez más la importancia que han tenido y tienen los bosques en la protección del medio ambiente, la deforestación sigue siendo alarmante a nivel mundial.

El uso de la información teledetectada ha permitido estudiar las condiciones de la superficie de la tierra a escalas espaciales y temporales impensadas para redes de monitoreo de superficie. A su vez, la cobertura de datos repetitiva que ofrecen los sensores remotos, posibilitan estudiar la dinámica de cualquier ecosistema. Así, el seguimiento por satélite de los cambios en la cobertura vegetal permite la cuantificación de los mismos y provee información sobre dónde y con qué rapidez se producen dichos cambios.

En este trabajo se monitoreó la deforestación en el Valle de Conlara (San Luis) utilizando técnicas de teledetección y SIG. Se utilizaron imágenes de los sensores MODIS y Landsat y se aplicó la metodología desarrollada por Girolimetto et al., (2014) para obtener indicadores de área deforestada (IAD_{NDVI} o IAD_{SAVI}). Los índices IAD_{NDVI} e IAD_{SAVI} se estudiaron areal y temporalmente a partir de dos secuencias, las secuencias totales: 2002-2006, 2002-2010 y 2002-2014 y las secuencias parciales: 2002-2006, 2006-2010 y 2010-2014.

Los índices IAD_{NDVI} e IAD_{SAVI} derivados de imágenes Landsat permitieron analizar los cambios producidos en la cobertura vegetal, así como la intensidad de la misma. Mientras que el análisis con imágenes MODIS mostró que este sensor no resultaría apropiado en ambientes naturales complejos como son los espacios geográficos serranos y semiáridos.

Palabras clave: cobertura vegetal – deforestación – teledetección - GIS

Área de estudio y datos utilizados

Ubicación

El área de estudio corresponde al Valle de Conlara, provincia de San Luis, Argentina, ubicada entre los 32°18' y 32°36' de latitud sur y los 65°14' y 65°57' de longitud oeste (Figura N° 1)

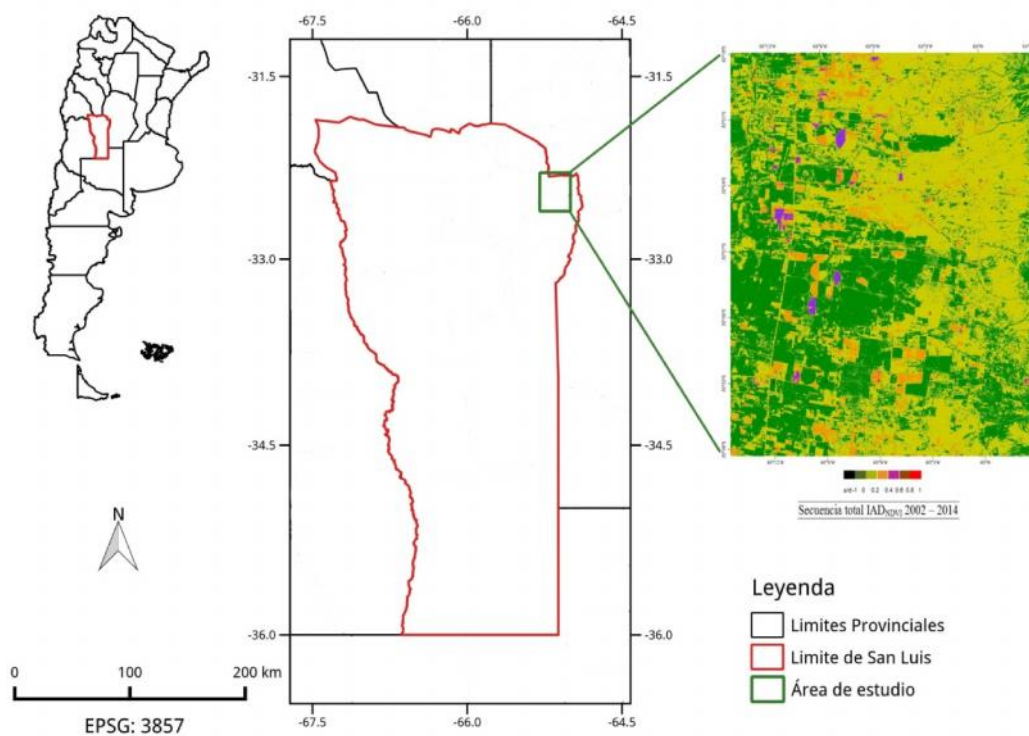


Figura N° 1: Ubicación área de estudio

La zona de estudio pertenece a las unidades geomorfológicas “Depresión de Conlara” y “Sierra de Comechingones” (Gonzalez Díaz E., 1981). Se encuentra dentro de la formación geológica de las Sierras Pampeanas (sector oriental). Esta unidad orográfica presenta unos 500 km de extensión (norte-sur) y unos 350 km de ancho (este-este), incluyendo a las provincias de San Luis y Córdoba.

El relieve constituye un factor importante en la formación y evolución de los suelos, ya que guarda estrecha relación con la erosión y el drenaje de los mismos. El relieve de la zona está representado por la geoforma Valle del Conlara, prevaleciendo un paisaje de sierra y llanura. El Valle de Conlara comprende las planicies, terrazas y faldeos que se encuentran entre las Sierras Pampeanas de San Luis (hacia el oeste) y las Sierras de Comechingones (hacia el este). En general los materiales presentes en el área corresponden a un origen eólico y coluvial (<http://www.mineria.gob.ar>). El perfil geomorfológico de la región en estudio se sintetiza en la Figura N° 2.

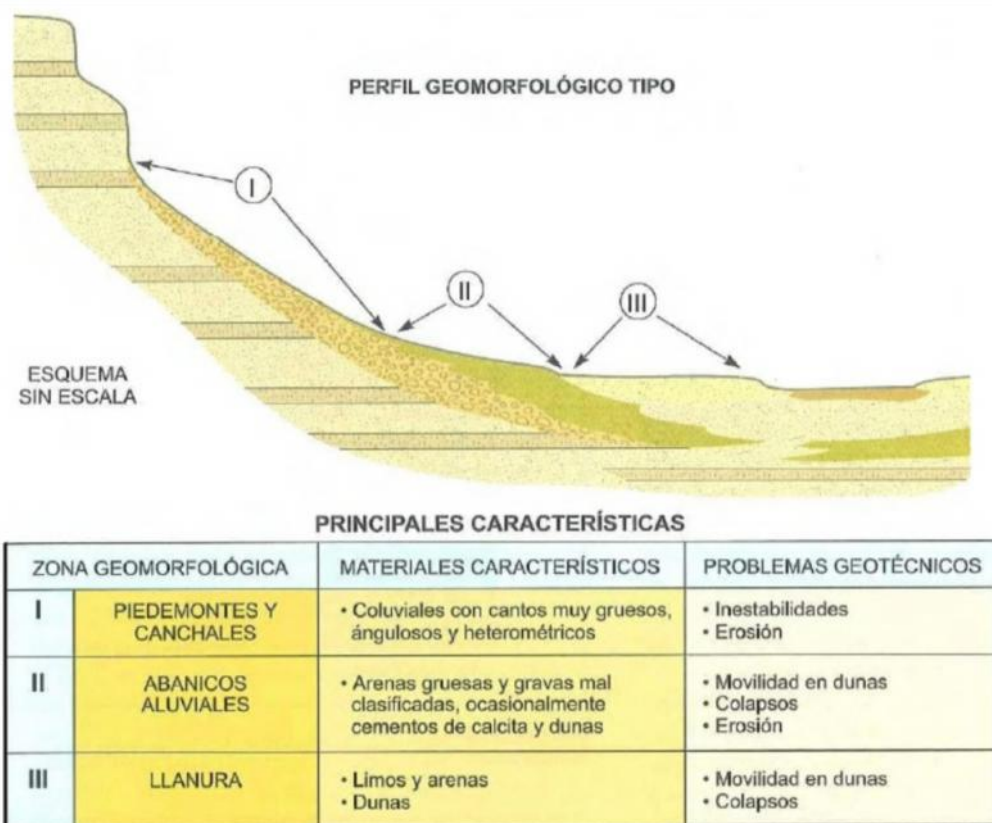


Figura N° 2: Perfil geomorfológico tipo y características principales (Fuente: González de Vallejo L. y Ferrer M., 2011)

Clima e Hidrografía.

El área de estudio se puede definir como una zona mediterránea. Las precipitaciones medias anuales varían entre 600 y 700 mm, concentrándose estacionalmente entre los meses de septiembre a febrero. La temperatura media anual es de aproximadamente 16°C. Esta temperatura es acorde a la latitud en la que se encuentra la región del Valle del Conlara, aunque carente de humedad dado que el valle se encuentra entre dos cordones montañosos que proporcionarían aportes marginales de las lluvias orográficas. Por lo tanto, la zona presenta características de aridez marcada con dominio de un clima árido continental.

El Valle del Conlara pertenece a la Cuenca del Río Conlara (Ivkovic K. et al., 2002). Dicho río escurre por el centro del valle homónimo cuya estructura corresponde a un Graben. Esta llanura es el producto de la acumulación de sedimentos en una depresión cerrada en tiempos geológicos recientes, caracterizándose por ser una cuenca con un escurrimiento muy particular dado que se produce en sentido Sur a Norte, contrario a la pendiente general de escurrimiento de la República Argentina.

Flora

Esta región se caracteriza por tener ambientes xéricos (carentes de agua o semiáridos) tapizados por sabanas de poáceas (gramíneas) que se intercalan con bosques constituidos por una rica diversidad de especies leñosas como espinillos, algarrobos (negro y blanco), chañares, cocos, molles y talas, conformando parte inconfundible de la unidad de vegetación del Bosque Serrano. Éste es un sistema dinámico que presenta características únicas y distintivas que lo convierten en un lugar especial. Las variaciones en la altitud presentan una fuerte influencia en los grupos de plantas determinando una configuración en pisos o cinturones de vegetación tal como se puede observar en la Figura N° 3. Las diferencias en la composición de la vegetación en los distintos pisos, se debe fundamentalmente a la humedad que presenta cada sector (Oggero A. y Arana M., 2012).

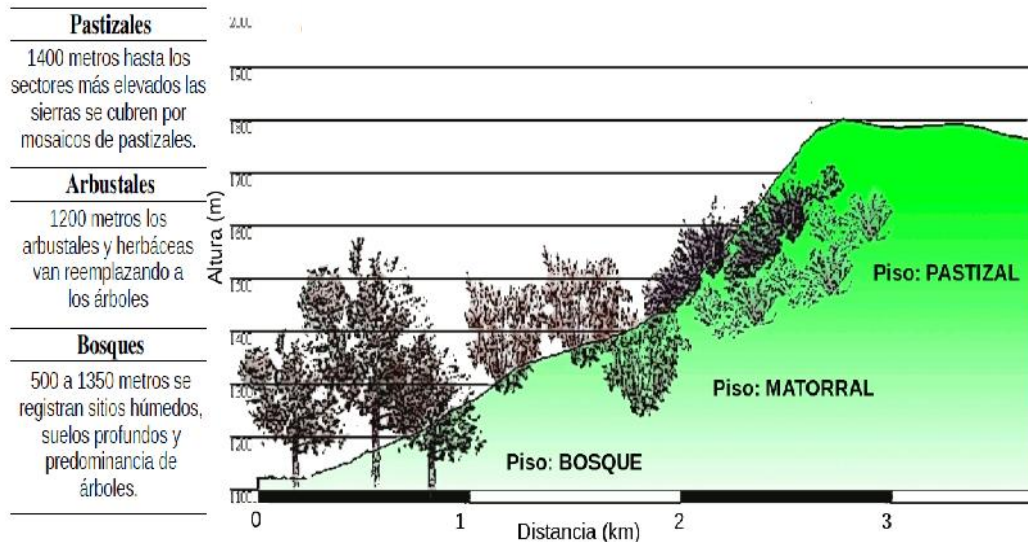


Figura N° 3: Perfil de vegetación según los pisos de altura (Fuente: Oggero A. y Arana M., 2012)

Características generales de las imágenes utilizadas

En la Tabla N° 1 se detalla el sensor, la fecha, horario de adquisición y calidad de las imágenes.

Tabla N° 1: Fecha de adquisición y calidad de las imágenes utilizadas

Sensor	Año	Día / Mes	Calidad de la imagen (% de nubes)
Landsat 5 TM	2002	12/01	1
Landsat 5 TM	2006	30/01	2
Landsat 5 TM	2010	25/01	0
Landsat 8 OLI	2014	13/01	0
MODIS	2002	12/01	2
MODIS	2006	30/01	2
MODIS	2010	25/01	1
MODIS	2014	13/01	0

Metodología

Índice de Área Deforestada (IAD)

Dentro de la gran variedad de metodologías que permiten detectar cambios en la cobertura vegetal usando imágenes de satélite (Nelson R., 1983; Singh A., 1986; Chavez P. y Kwarteng A., 1989; Morton D. et al., 2005; Carnevale N. et al., 2007; Hansen M., 2008b), una técnica muy simple para detectar variaciones en la biomasa verde es la propuesta por Girolimetto D. et al., (2014). Estos autores basan su metodología en la diferencia normalizada de un índice de vegetación (IV) entre dos fechas, una inicial y otra final. Así, Girolimetto D. et al. desarrollaron los siguientes índices:

$$IAD_{NDVI} = \frac{NDVI_i - NDVI_f}{NDVI_i + NDVI_f} \quad (1)$$

$$IAD_{SAVI} = \frac{SAVI_i - SAVI_f}{SAVI_i + SAVI_f} \quad (2)$$

donde, *IAD* indica Índice de Área Deforestada, los subíndices *i* y *f* denotan el inicio y final del período analizado. NDVI es el Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (Huete A. et al., 1997) y SAVI es el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (Huete A., 1988), cuyas expresiones son:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (3)$$

$$SAVI = \frac{NIR - R}{(NIR + R + L)} (1 + L) \quad (4)$$

donde, *R* y *NIR* son las reflectancias de las bandas roja e infrarroja cercana respectivamente y *L* es el factor de corrección del suelo.

La metodología es aplicable cuando el NDVI y el SAVI son mayores que cero. Bajo esta condición, los IAD varían entre -1 y 1. Valores negativos indican que la zona presenta en el estado final, una condición vegetal más favorable que en el estado inicial, mientras que valores positivos indican diferentes grados de deforestación.

Los IAD permiten un monitoreo casi permanente de cualquier región, favoreciendo a quienes deben tomar decisiones acerca de la protección de los recursos naturales.

Procesamiento de imágenes

Software utilizado

El procesamiento de las imágenes se realizó con el programa ENVI (*ITT Industries, 2005*) y con el software QGIS.

Tratamiento de imágenes

Se describe aquí el procedimiento utilizado para el tratamiento de las imágenes sin hacer mención del área particular de estudio ni de los datos utilizados. El área en estudio y los datos utilizados se detallaron en el Capítulo 2.

Las imágenes satelitales fueron georreferenciadas a partir de las coordenadas geográficas (Latitud y Longitud) originales de las mismas. A continuación, las cuentas digitales (CD) fueron traducidas a valores de reflectancia a partir de los factores de escala y aditivo incluidos en las imágenes. Luego, se procedió a cortar la ventana que comprende a la región en estudio.

Posteriormente se calcularon el NDVI y el SAVI a partir de las bandas del rojo y el infra rojo cercano. Estas imágenes se trabajaron a dos resoluciones espaciales, 1x1 km y 30x30 m. Luego se estimaron los índices de área deforestada (IAD_{NDVI} e IAD_{SAVI}), se obtuvieron las estadísticas y se compararon los resultados para ambas resoluciones espaciales.

Finalmente se obtuvieron los mapas de IAD_{NDVI} e IAD_{SAVI} para las dos resoluciones espaciales estudiadas.

Resultados

En este análisis, se tomó como punto de partida el año 2002. Esto se debe a que el último estudio de deforestación encontrado en la bibliografía para la provincia de San Luis, es el realizado por la Unidad de Manejo de Sistemas de Evaluación Forestal (UMSEF) de la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación en el año 2002. En dicho trabajo se actualizó al año 2002 el mapa forestal de la Provincia de San Luis (<http://www.ambiente.gov.ar/>).

Para estudiar los IAD, el análisis temporal de los datos se realizó de dos maneras diferentes. Por un lado, se consideraron secuencias anuales totales (2002-2006, 2002-2010 y 2002-2014) que muestran una condición de deforestación referida en todo momento al año inicial (2002). Por otro lado, las secuencias anuales parciales (2002-2006, 2006-2010 y 2010-2014) consideran que el punto inicial de un período corresponde al punto final del período anterior. A modo ilustrativo, la Tabla N° 2 presenta un esquema gráfico con las condiciones de borde.

Tabla N° 2: Esquema gráfico de las condiciones de borde

Secuencias anuales totales			
2002	2006	2010	2014
Secuencias anuales parciales			
2002	2006	2010	2014

Análisis de los índices IADNDVI e IADSAVI con imágenes Landsat

Los valores medios y desvíos estándar de los índices IAD_{NDVI} e IAD_{SAVI} se muestran en la Tabla N° 3. Los valores medios del IAD_{NDVI} y del IAD_{SAVI} para las secuencias totales manifiestan que la región presentaría una recuperación forestal en el período 2002-2014. En las etapas totales 2002-2006 y 2002-2010, ambos índices presentan valores medios que se mantienen por debajo del 0.25 aproximadamente, indicando bajo nivel de deforestación, que, a su vez, va disminuyendo hacia el período 2002-2010. Esto coincide con el análisis de los períodos parciales, donde se observa que en las etapas 2006-2010 y 2010-2014, los valores medios son negativos (ver Tabla N° 3) evidenciando una recuperación de la vegetación de la superficie en la región.

Los desvíos estándar presentan diferentes grados de dispersión alrededor de la media compatibles con los obtenidos por otros autores (Girolimetto D. et al., 2014).

 Tabla N° 3: Estadística regional de los índices IAD_{NDVI} e IAD_{SAVI}

Secuencia total	IAD_{NDVI}		IAD_{SAVI}	
	Media	Desvío estándar	Media	Desvío estándar
2002-2006	0,23	0,12	0,15	0,14
2002-2010	0,18	0,15	0,08	0,16
2002-2014	-0,02	0,14	-0,07	0,14
Secuencia parcial	IAD_{NDVI}		IAD_{SAVI}	
	Media	Desvío estándar	Media	Desvío estándar
2002-2006	0.23	0.12	0.15	0.14

2006-2010	-0.05	0.14	-0.06	0.16
2010-2014	-0.16	0.13	-0.16	0.13

Los histogramas de frecuencia del IAD_{NDVI} y del IAD_{SAVI} tanto para los períodos totales como los parciales se presentan en la Figura N° 4. Tal como lo evidenciaron los valores medios (Tabla N° 3), durante los períodos totales 2002-2006 y 2002-2010, ambos índices presentan histogramas ubicados hacia la derecha del cero manifestando la existencia de deforestación (Figura N°4 (a) y Figura N°4 (b)), aunque para la fase 2002-2010 los dos índices demuestran una leve recuperación de la cobertura con histogramas que comienzan a moverse hacia la izquierda. Esto coincide con la recuperación de la vegetación que muestran los histogramas correspondientes al período parcial 2006-2010 (Figura N°4 (c) y Figura N°4 (d)). Esta recuperación de la cobertura vegetal podría deberse a la promulgación de la ley de Presupuestos Mínimos de Protección Ambiental de los Bosques Nativos (<http://infoleg.mecon.gov.ar/infolegInternet/anexos/135000-139999/136125/norma.htm>) promulgada en el año 2007 por el Senado y Cámara de Diputados de la Nación Argentina a la cual adhirió la Provincia de San Luis mediante la Ley IX-0697-2009 de Bosques Nativos de la Provincia de San Luis (<http://aplicaciones.ambiente.gob.ar/archivos/web/OrdTerrBN/file/leyes%20prov/SAN%20LUIS%20Ley%20N%C2%BA%20IX-0697-2009.pdf>).

Para la etapa total 2002-2014, ambos índices manifiestan una mejoría de la biomasa. Esto era esperable ya que los histogramas parciales muestran una tendencia hacia los valores negativos de los IAD.

En general, el IAD_{NDVI} presenta valores levemente más altos que el IAD_{SAVI} . Gilabert M. et al., (2002) realizaron una comparación cuantitativa entre el NDVI y el SAVI encontrando que existe una tendencia sistemática a producirse valores altos de NDVI en suelos más vegetados que en aquellos con cobertura vegetal escasa. Huete A. et al., (2002) explicaron en su trabajo que el IV SAVI ha sido creado para corregir el efecto del suelo en aquellos píxeles que no están totalmente cubiertos por vegetación, donde la señal del follaje se contamina con los pequeños espacios de suelo desnudo. Se debe tener en cuenta que los índices IAD_{NDVI} e IAD_{SAVI} miden la diferencia de IV entre dos fechas y cuanto menos contaminada este la señal, mejores resultados arrojarán los IAD. Esto sugiere que el IAD_{SAVI} sería más propicio en zonas semiáridas que el IAD_{NDVI} .

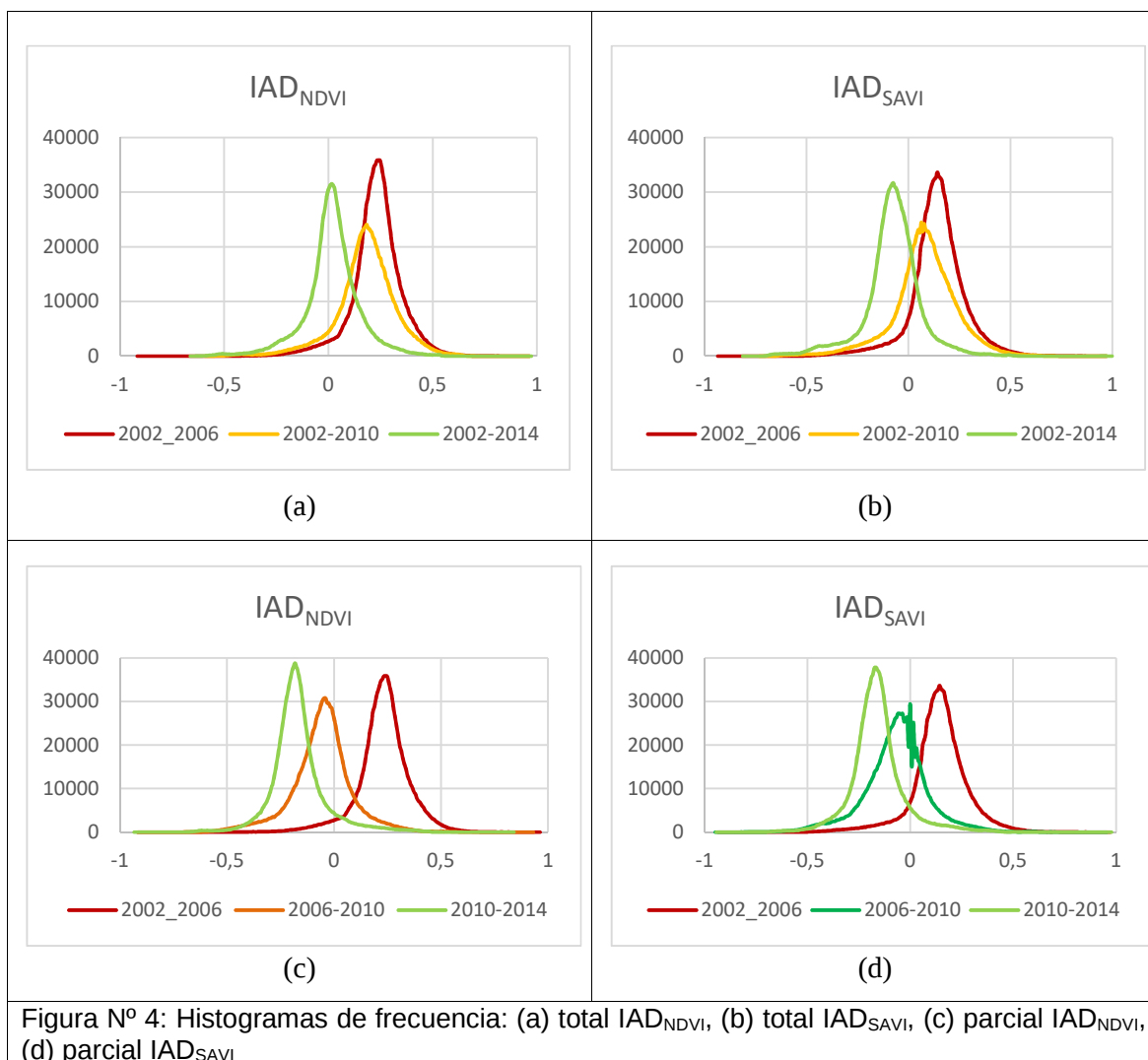


Figura N° 4: Histogramas de frecuencia: (a) total IAD_{NDVI} , (b) total IAD_{SAVI} , (c) parcial IAD_{NDVI} , (d) parcial IAD_{SAVI}

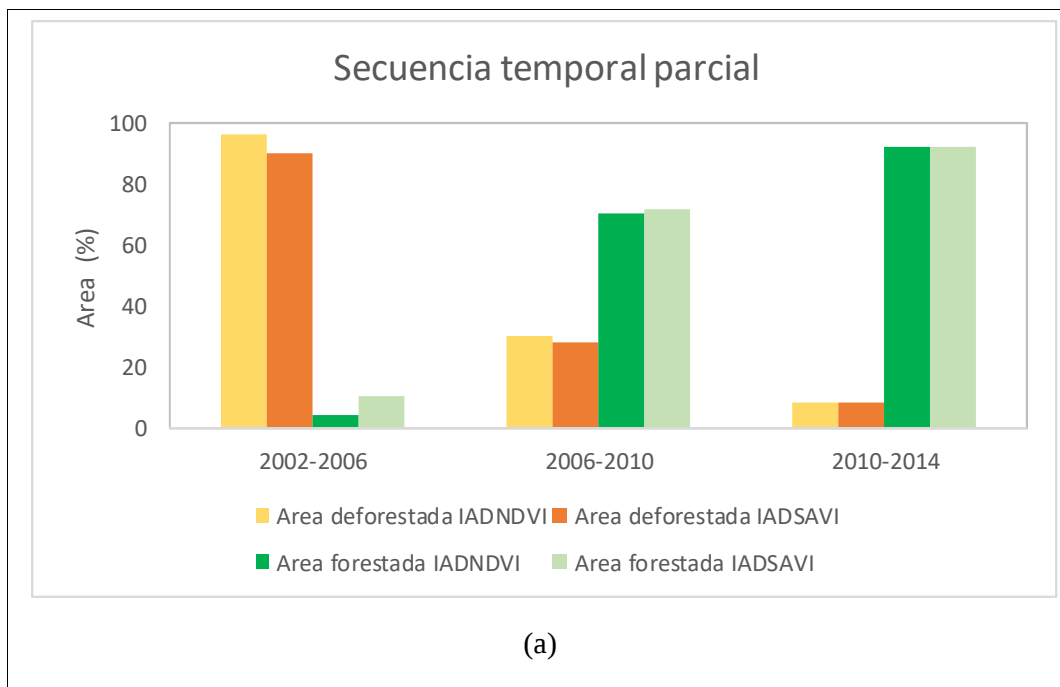
Independientemente de la intensidad de la deforestación que permiten medir los índices IAD_{NDVI} e IAD_{SAVI} , todos aquellos píxeles que presentan valores mayores a 0 representan áreas que han sido deforestadas. Por lo tanto, si sumamos todos los píxeles con $IAD > 0$ y los convertimos a valores de área, podemos analizar la dinámica de la deforestación independientemente de la intensidad de la misma. Esta técnica se aplicó para obtener la Figura N° 5, la que muestra los porcentajes de área forestada [$100 * (\sum IAD < 0 / \text{Área total})$] y deforestada [$100 * (\sum IAD > 0 / \text{Área total})$] para las secuencias parciales y totales del IAD_{NDVI} e IAD_{SAVI} .

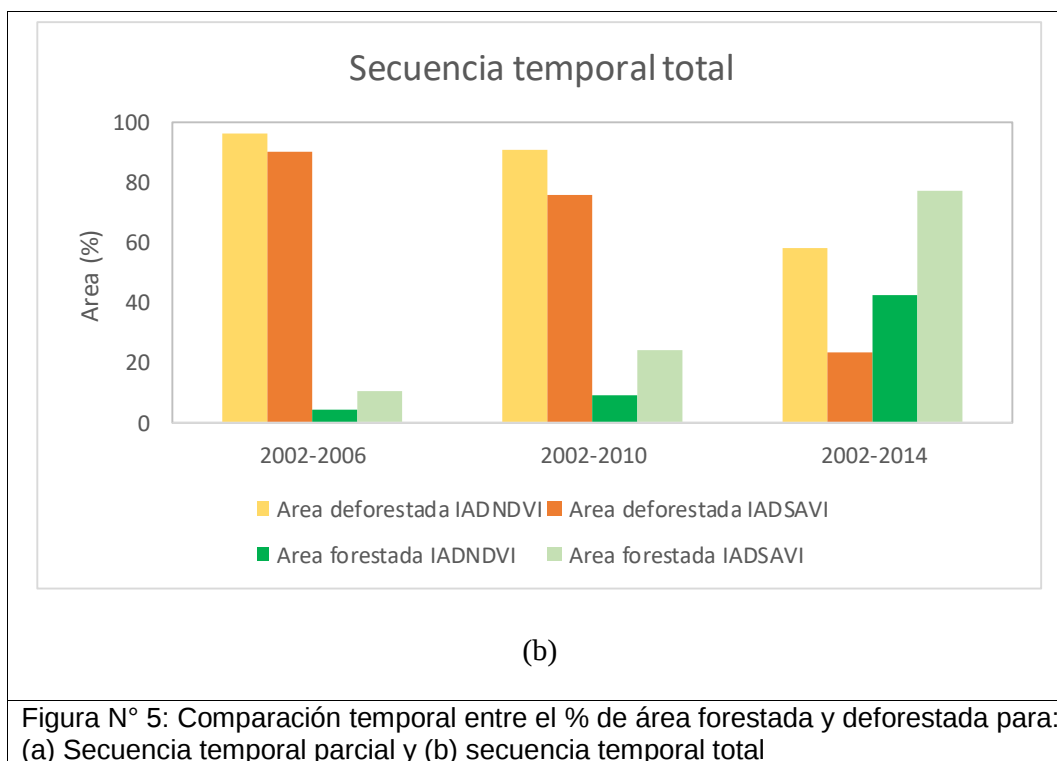
Ambos índices evidencian valores de deforestación sorprendentes para el período 2002-2006 (Figura N° 5 (a) y (b)). Esto es concordante con el estudio realizado por la Unidad de Manejo del Sistema de Evaluación Forestal en el año 2002, quienes encontraron que las zonas con mayor superficie deforestada entre los años 1998-2002 en la provincia de San Luis se localizaban hacia el este, en las planicies próximas a las Sierras de los Comechingones. La pérdida de remanentes de bosque nativo en dichas planicies, llevaría a la ocurrencia de graves procesos de

deforestación (Prego A. et al., 1988). Bogino S., (2005), concluyó que los bosques de la provincia de San Luis han sufrido presión debido a distintos usos, sin tener en cuenta ningún tipo de manejo sustentable o leyes de protección de estos recursos hasta el momento de su análisis. A partir del segundo período analizado (2006-2010), la situación de deforestación comienza a revertirse (ver Figura N° 5 (a)) tal como se observó en el análisis estadístico y en coincidencia con la promulgación Ley IX-0697-2009.

En general, los índices IAD_{NDVI} e IAD_{SAVI} en la secuencia parcial presentan mínimas diferencias en los porcentajes de área deforestada (ver Figura N°5 (a)). Sin embargo, estas pequeñas diferencias parciales se propagan de manera importante en la secuencia total, observándose variaciones significativas entre ambos índices (ver Figura N°5 (b)). Además, en la Figura N° 5 (b) podemos ver que el IAD_{SAVI} arroja menores áreas deforestadas que el IAD_{NDVI} , lo que redundaría en un aumento del porcentaje de área forestada total.

Cualquiera sea el análisis temporal (parcial o total), ambos índices muestran una recuperación forestal importante en el área de estudio hacia el año 2014, lo que responde a las leyes vigentes en la provincia de San Luis.





Finalmente, en la Figura N° 6 observamos una comparación de los mapas de IAD_{NDVI} e IAD_{SAVI} para la secuencia parcial 2002-2006 y 2010-2014 y la secuencia total 2002-2014. Los detalles de estos mapas se pueden apreciar en las Figuras N° 7, 8, 9, 10, 11 y 12. Estos años fueron elegidos por ser contrastantes, lo que permite notar los diferentes niveles de intensidad de la deforestación del área en estudio.

Como se explicó anteriormente, en la secuencia 2002-2006 ambos índices mostraron que la mayor parte del área estudiada presentaba niveles medios-bajos de deforestación (Figura N° 6 (a) y (d)). No obstante, en la región este de la zona en estudio, el mapa de IAD_{NDVI} muestra valores de deforestación del orden de 0.4, mientras que el mapa de IAD_{SAVI} de 0.2 (Figura N° 6 (a) y (d)). Esta diferencia en la intensidad de la deforestación podría deberse a que el índice SAVI es muy sensible a los cambios en la cobertura vegetal independientemente si la zona posee vegetación densa, o si la región es boscosa, árida o semiárida, lo que lo hace apropiado para estudios a nivel regional, donde todos estos ambientes pueden estar presentes (Huete A. et al., 1997). El SAVI ha sido creado para corregir el efecto del suelo en aquellos píxeles que no están totalmente cubiertos por vegetación. Por el contrario, el NDVI al no tener coeficientes de corrección, en zonas semiáridas presenta el problema de que la señal de la vegetación se contamina con los pequeños espacios de suelo desnudo.

La secuencia parcial 2010-2014 (Figura N° 6 (b) y (e)) presentó, tanto para el IAD_{NDVI} como para el IAD_{SAVI} , una recuperación muy importante en la cobertura vegetal con niveles que llegan al 90% del área total estudiada. Es importante destacar aquí que, al estar la zona más forestada,

los índices de vegetación NDVI y SAVI representan la misma situación de la superficie y por ende los IAD arrojan resultados similares. Es necesario aclarar que en este trabajo no se estudió si la recuperación que los índices IAD evidencian, coincide, con un mejoramiento de la vegetación autóctona o simplemente están mostrando una cubierta muy vegetada de diferentes cultivos. Este tema deberá ser analizado en futuras investigaciones.

La recuperación evidenciada en la secuencia 2010-2014 se refleja en la secuencia total 2002-2014 (Figura Nº 6 (c) y (f)), donde el IAD_{NDVI} sugiere una recuperación del orden del 40% y el IAD_{SAVI} del 75% del área total aproximadamente, coincidiendo con el análisis estadístico y con lo sugerido por Huete A. et al., (1997) sobre la bondad que el SAVI presenta por sobre el NDVI para representar la superficie en zonas semiáridas.

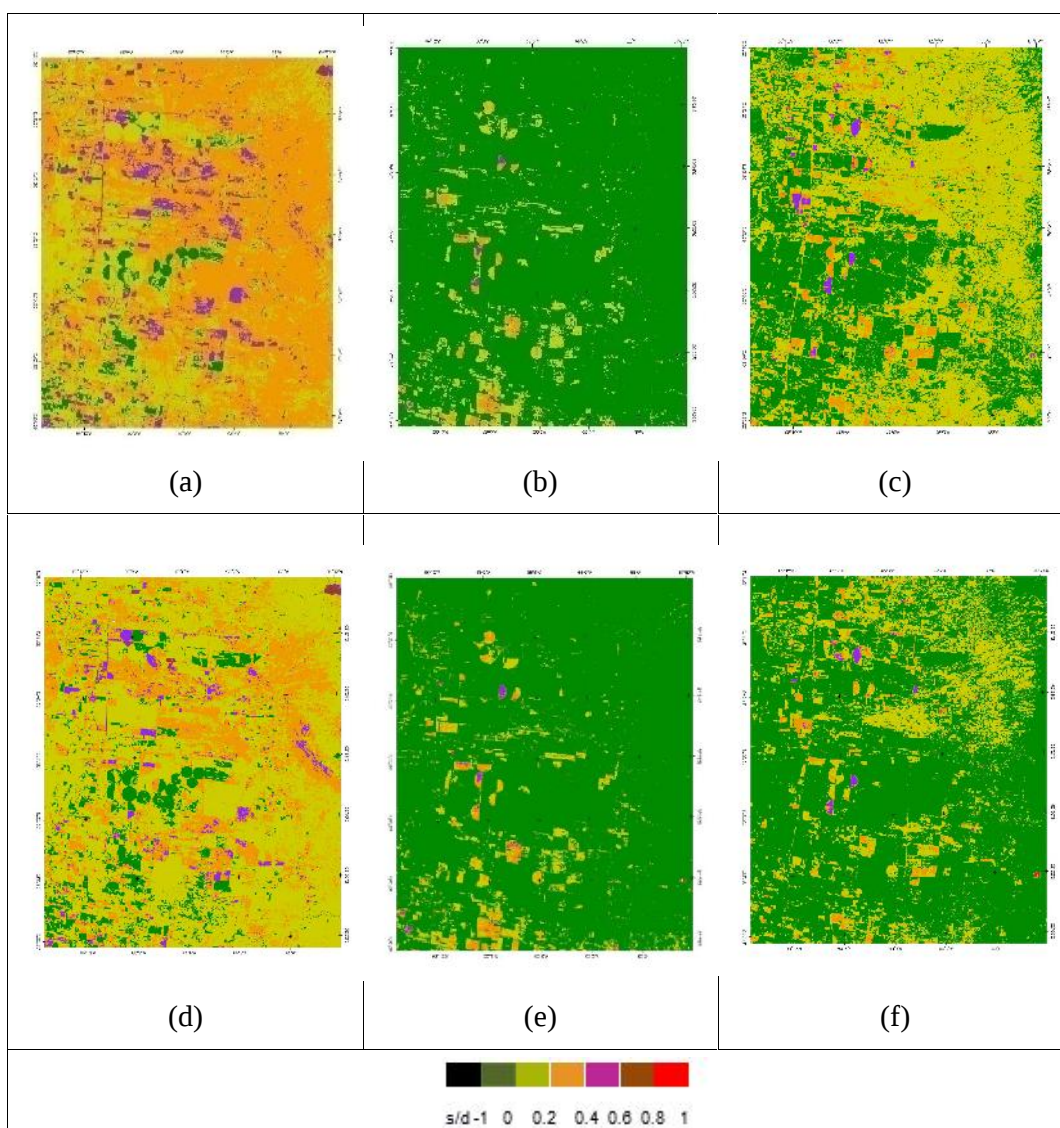


Figura Nº 6: Mapas de: (a) secuencia parcial IAD_{NDVI} 2002-2006, (b) secuencia parcial IAD_{NDVI} 2010-2014, (c) secuencia total IAD_{NDVI} 2002-2014, (d) secuencia parcial

IAD _{SAVI} 2002-2006, (e) secuencia parcial IAD _{SAVI} 2010-2014, (e) secuencia total IAD _{SAVI} 2002-2014.

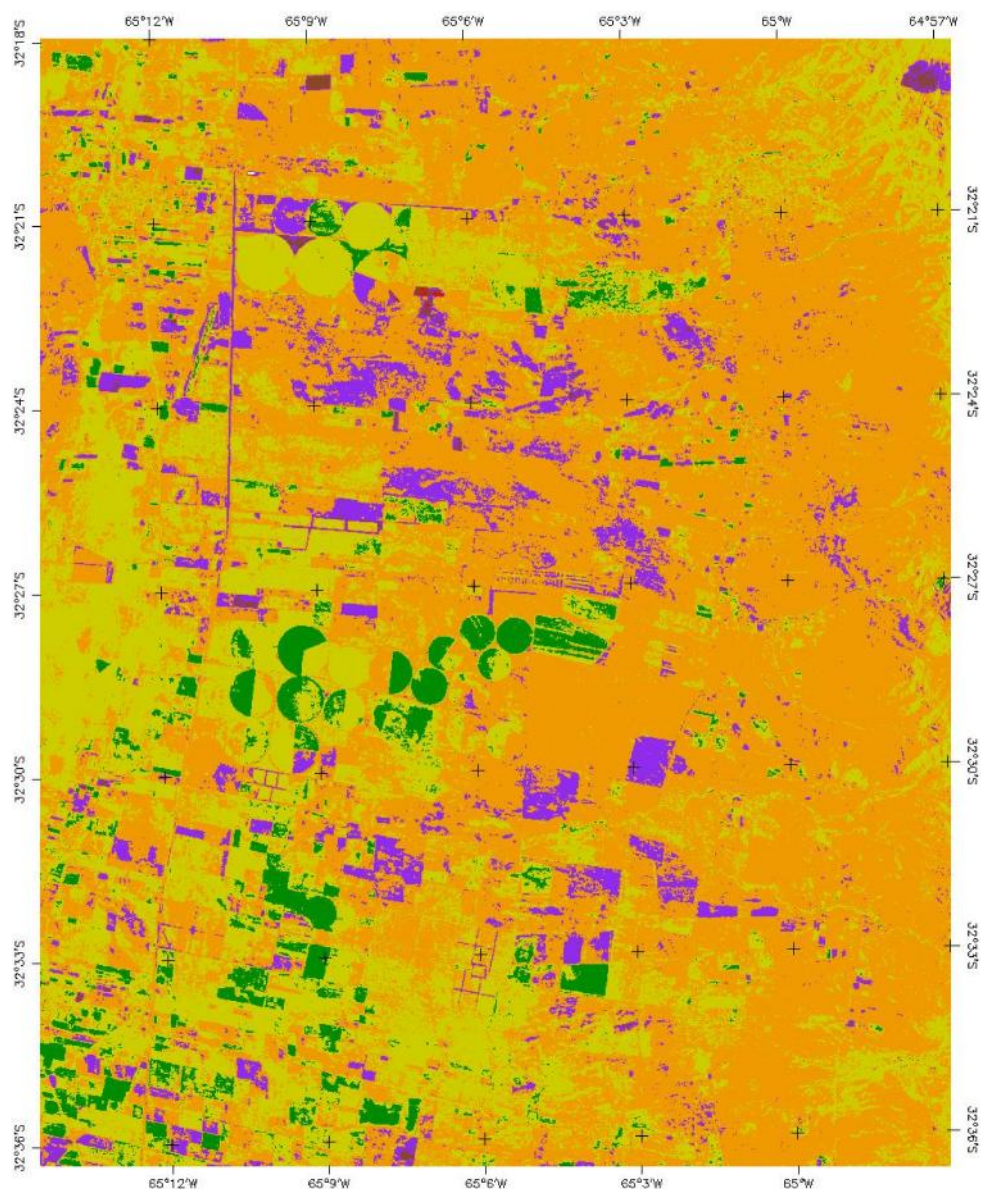


Figura N° 7: Secuencia parcial IAD_{NDVI} 2002 – 2006

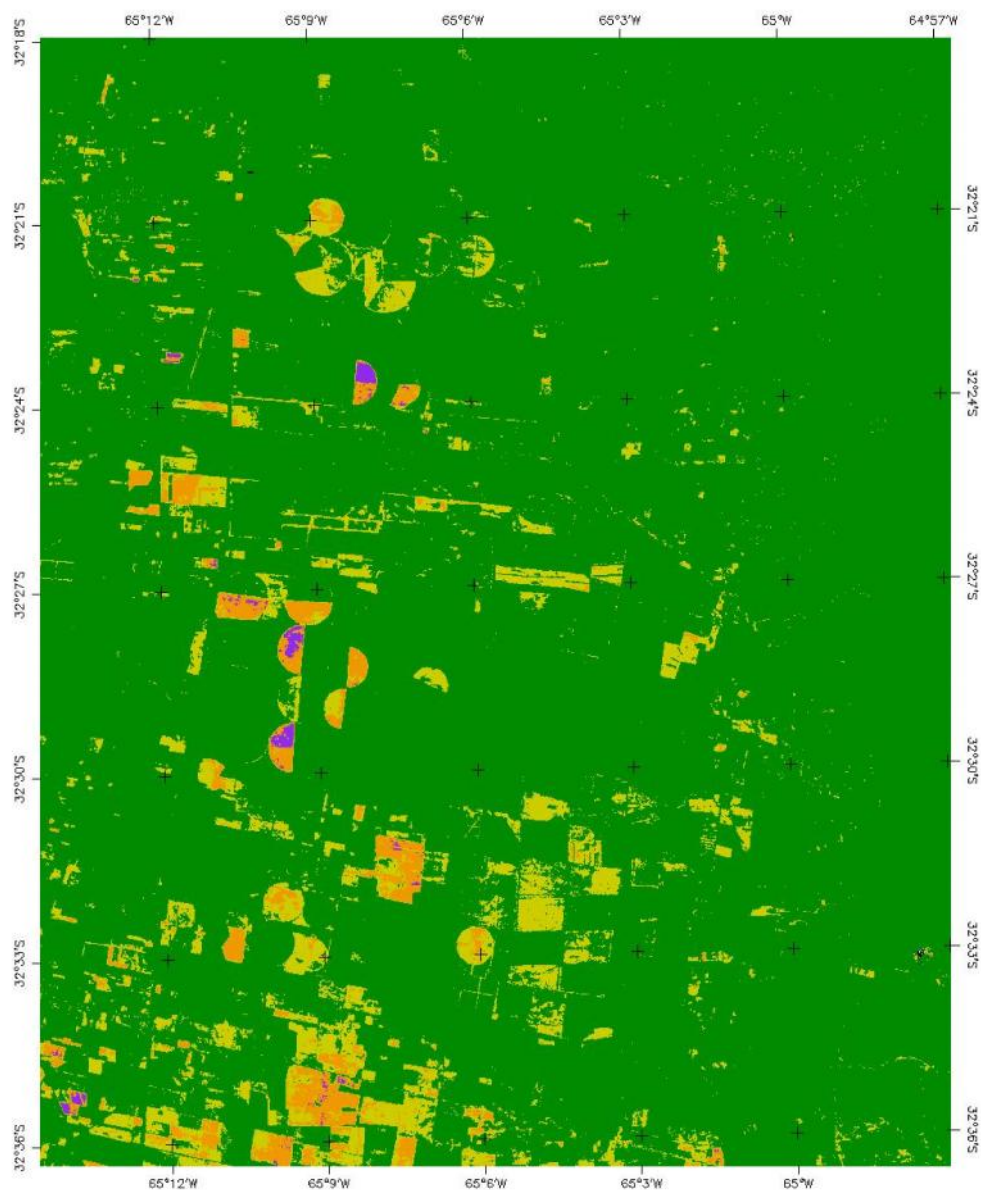


Figura N° 8: Secuencia parcial IAD_{NDVI} 2010 – 2014

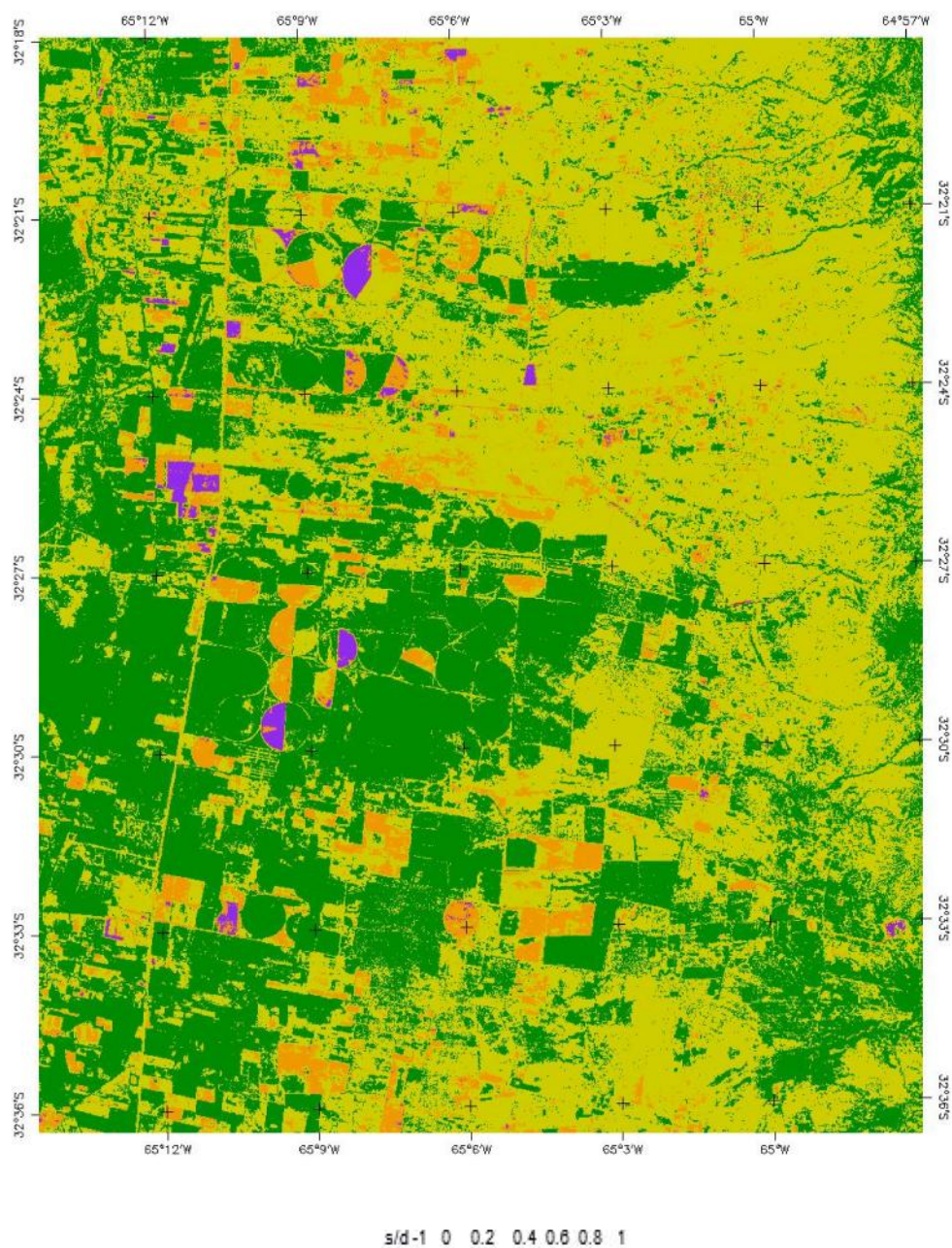


Figura N° 9: Secuencia total IAD_{NDVI} 2002 – 2014

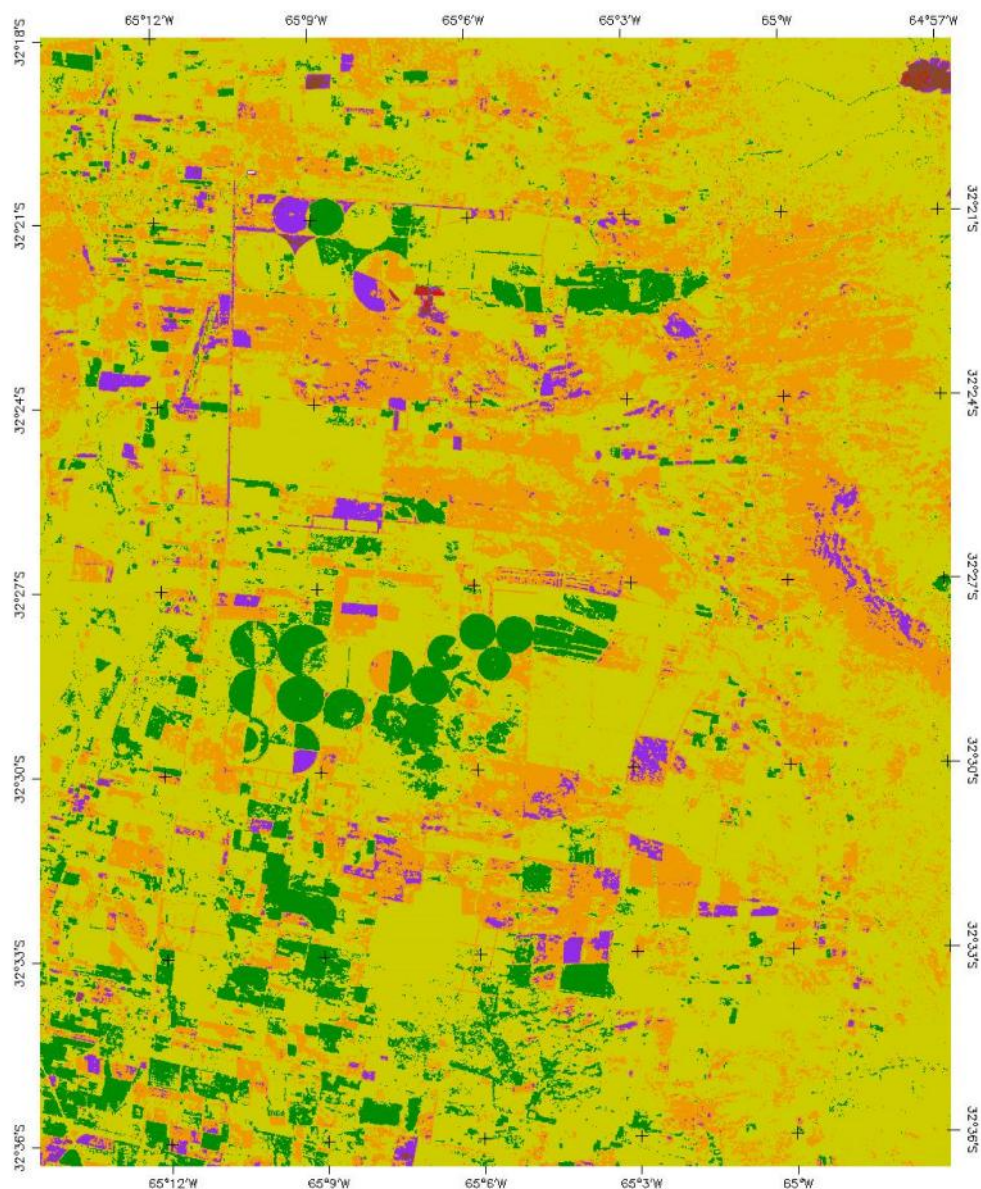


Figura N° 10: Secuencia parcial IAD_{SAVI} 2002 – 2006

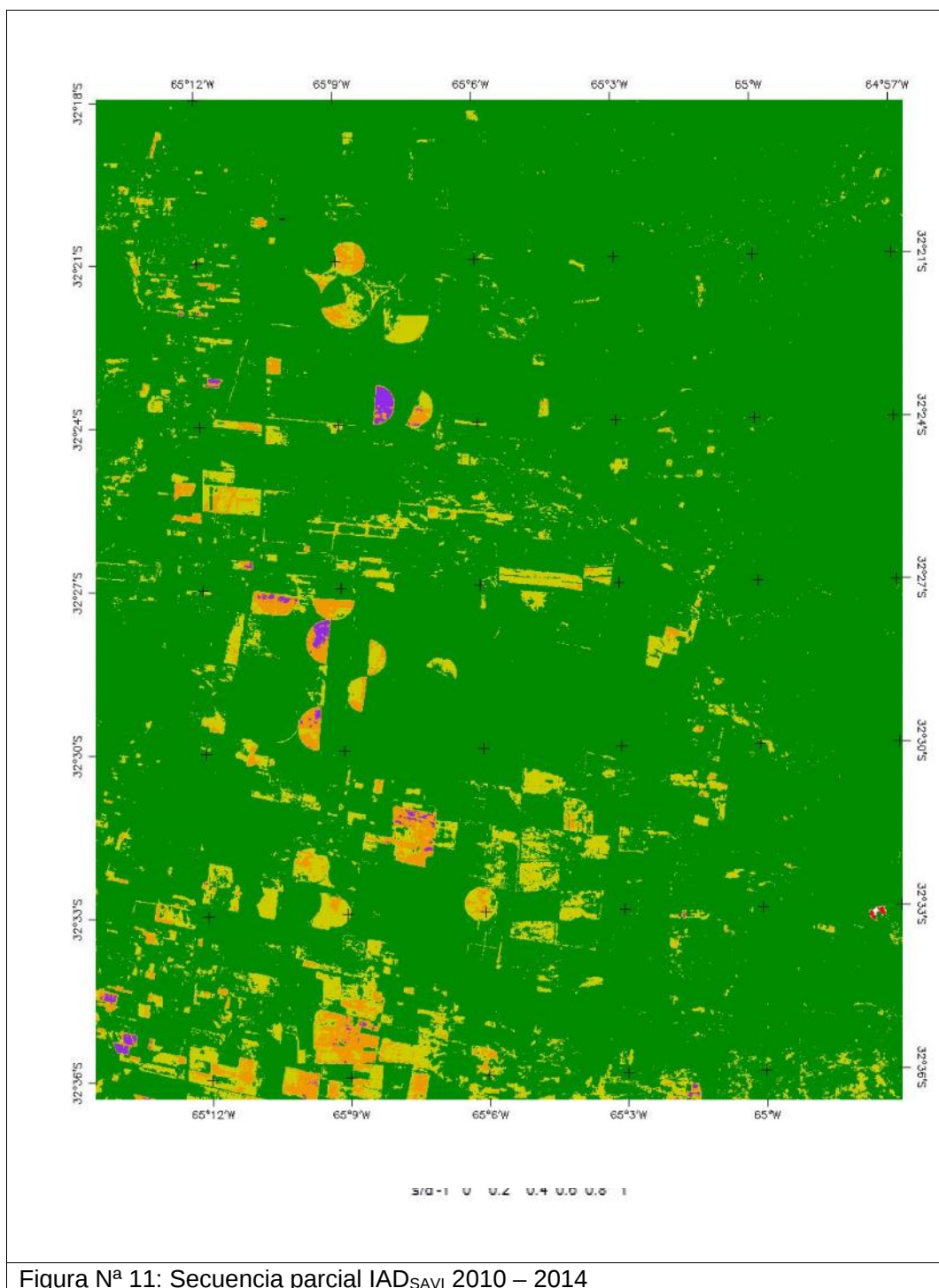
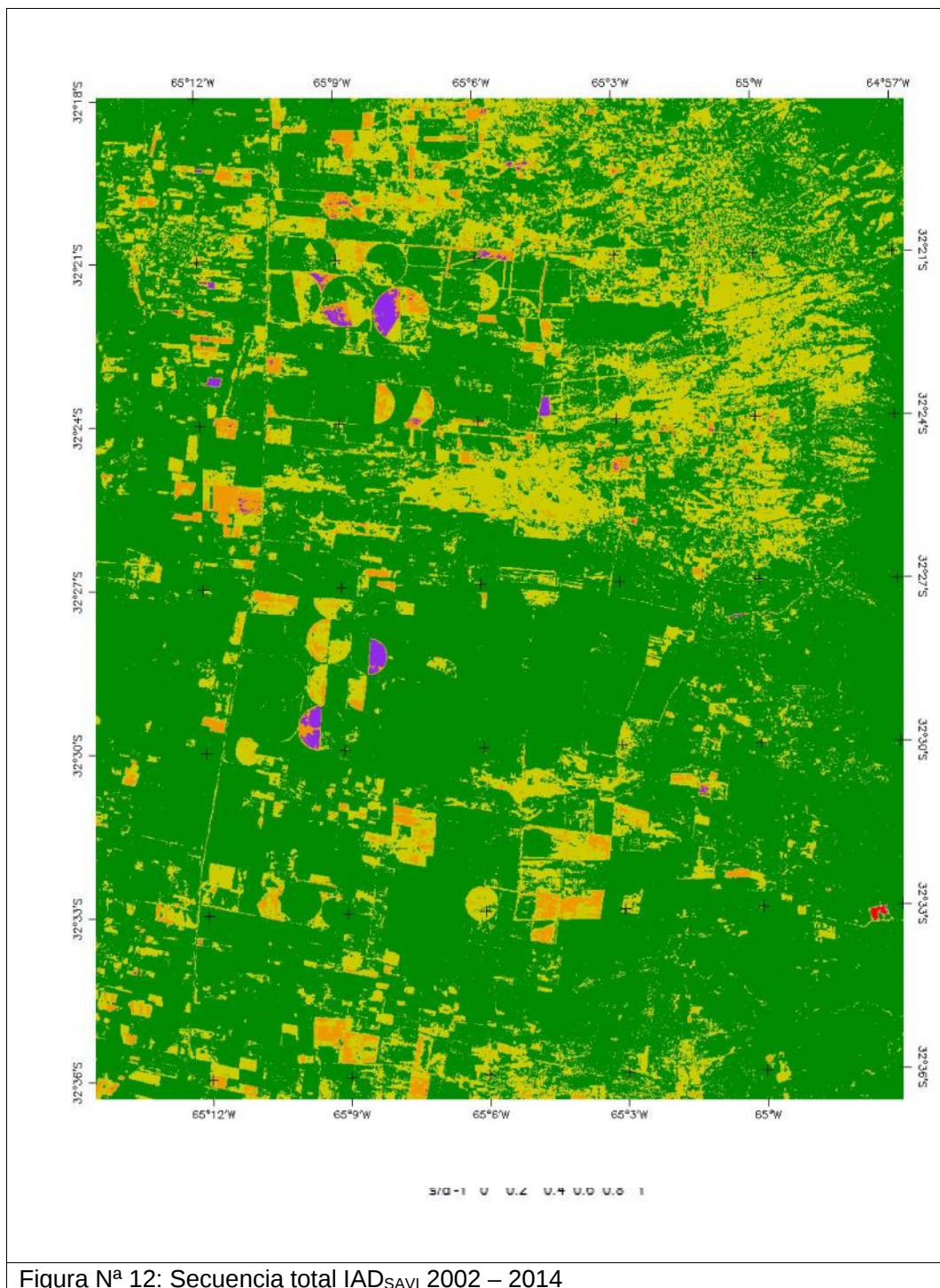


Figura N° 11: Secuencia parcial IAD_{SAVI} 2010 – 2014

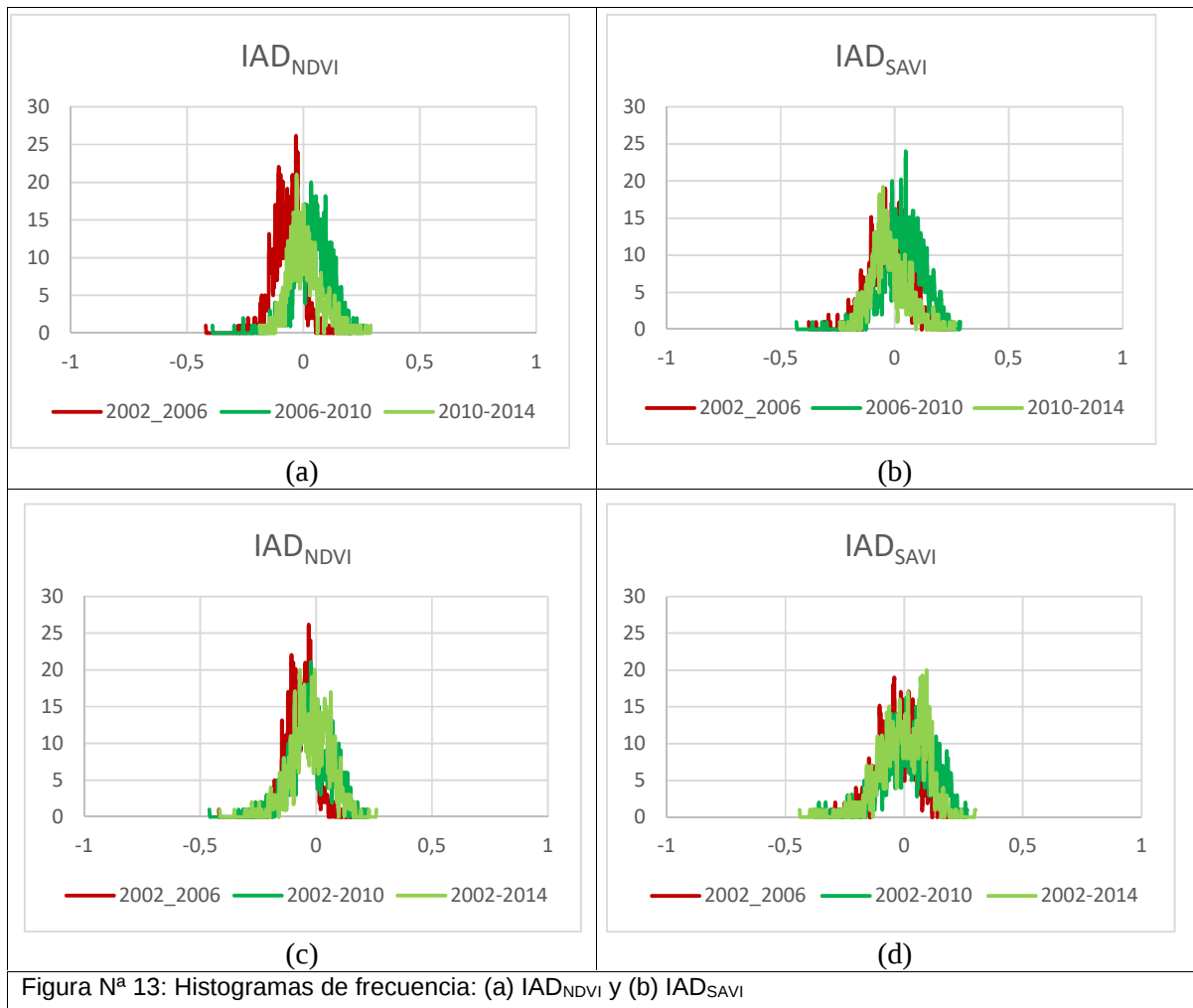


Análisis de los índices IADNDVI e IADSAVI con imágenes MODIS

Como ya fue explicado, MODIS presenta una excelente resolución temporal con dos

escenas diarias de cada punto de la superficie de la tierra. Sin embargo, su resolución especial es media-baja, con pixels que varían entre 250, 500 y 1000 metros. Esto implica la pérdida de rasgos a nivel de detalle, específicamente en ambientes de montaña, donde los cambios en la topografía y consecuentemente en la flora, pueden ocurrir en pocos metros. Esta problemática quedó evidenciada al realizar el análisis de los índices IAD_{NDVI} e IAD_{SAVI} , donde los histogramas de frecuencia mostraron que las imágenes MODIS resultaron insensibles a los cambios ocurridos en la zona en estudio (ver Figura N° 13), con valores medios centrados en el cero lo que indicaría la no existencia de cambios en los años analizados.

MODIS posiblemente no es el sensor más apropiado para este tipo de análisis en ambientes serranos, donde la complejidad de estos ecosistemas plantea la necesidad de una escala de análisis más detallada, que permita un seguimiento de los datos con los que se pueda analizar las tendencias pasadas, presentes y futuras que estos espacios geográficos muestran.



Conclusiones y recomendaciones

En la actualidad, diversas regiones del mundo se encuentran bajo un proceso de rápido cambio en la cobertura vegetal. La teledetección proporciona datos que permiten analizar los cambios ocurridos en cualquier ecosistema. Así, en este trabajo se propuso monitorear la deforestación en el Valle de Conlara (San Luis) utilizando técnicas de teledetección y SIG. Para ello se utilizaron imágenes de los sensores MODIS y Landsat y se aplicó la metodología desarrollada por Girolimetto et al., (2014) quienes propusieron dos indicadores de área deforestada (IAD_{NDVI} o IAD_{SAVI}) basados en la normalización de los índices NDVI y SAVI. Los índices IAD_{NDVI} e IAD_{SAVI} se estudiaron areal y temporalmente a partir de dos secuencias anuales, las secuencias totales: 2002-2006, 2002-2010 y 2002-2014 y las secuencias parciales: 2002-2006, 2006-2010 y 2010-2014.

Los índices IAD_{NDVI} e IAD_{SAVI} derivados de imágenes Landsat permitieron analizar los cambios producidos en la cobertura vegetal, así como la intensidad de la misma. La aplicación de dichos índices mostró que, en la zona bajo estudio, la intensidad de la deforestación fue disminuyendo a partir del año 2006 con valores medios areales que se mantienen por debajo del cero. Si bien en este trabajo no se analizó que tipo de vegetación fue recuperándose, queda claro que la biomasa de la región presenta una situación marcadamente mejorada que la que se encontraba en el período 2002-2006.

Ambos índices mostraron resultados similares en cuanto a intensidad y porcentaje de área deforestada en la secuencia temporal parcial. Sin embargo, en la secuencia total, parecería que el IAD_{SAVI} es más adecuado para estudiar la dinámica de la deforestación, posiblemente por la corrección por efecto del suelo que realiza el SAVI haciéndolo muy sensible a los cambios en la vegetación (Huete A. et al., 1997). El NDVI, al no involucrar en su formulación coeficientes de corrección, en zonas semiáridas presenta el problema de contaminación de la señal de la vegetación con los pequeños espacios de suelo desnudo.

El análisis realizado con imágenes MODIS mostró que este sensor no resultaría apropiado en ambientes naturales complejos como son los espacios geográficos serranos y semiáridos, donde se plantea la necesidad de una escala de análisis más detallada y que permita tener un mejor seguimiento de estos ecosistemas.

Finalmente, en este trabajo se ha explorado la aplicación de una metodología teledetectada para monitorear la deforestación en una zona semiárida utilizando un sensor de media y otro de moderadamente alta resolución espacial (MODIS y Landsat). Se cuantificaron las áreas deforestadas y se compararon los resultados obtenidos. En definitiva, queda plasmado en este trabajo un estudio investigativo donde se demuestra el uso de herramientas de teledetección y SIG para determinar áreas deforestadas, quedando para futuras investigaciones analizar si la recuperación que los índices IAD evidencian, coincide, con un mejoramiento de la vegetación autóctona o simplemente están mostrando una cubierta muy vegetada de diferentes cultivos.

Bibliografía

- Anaya, J., Chuvieco, E. and Palacios-Orueta, A. 2009. *Aboveground biomass assessment in Colombia: A remote sensing approach*. Forest Ecology and Management. 257(4):1237–1246.
- Anderson, D., Del Águila, J. y Bernardón, A. 1970. *Las formaciones vegetales en la provincia de San Luis*. Rev. Inv. Agrop. (INTA) S.2 (Biología y Prod. vegetal). VII (3):153-183.
- Bogino, S. 2005. *El bosque de caldén en la provincia de San Luis: situación actual y estrategias alternativas de manejo*. Revista de la Asociación Forestal Argentina. 59:23-31.
- Broich, M., Stehman, S., Hansen, M., Potapov, P., and Shimabukuro, Y. 2009. *A comparison of sampling designs for estimating deforestation from Landsat imagery: A case study of the Brazilian Legal Amazon*. Remote Sensing of Environment. 113:2448-2454.
- Carnevale, N., Alzugaray, C. y Di leo, N. 2007. *Estudio de la deforestación en la cuña boscosa santafesina mediante teledetección espacial*. Quebracho. Revista de Ciencias Forestales. 014:47-56.
- Chavez, P. and Kwarteng, A. 1989. *Extracting spectral contrast in Landsat Thematic Mapper image data using selective principal components analysis*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 3:339-348.
- Chuvieco, E. 1996. *Fundamentos de teledetección espacial*. Ediciones RIALP, 3º edición. Madrid, ES. 565 pp.
- FAO 2001. *El papel de la silvicultura en la mitigación de la pobreza*. Foro. Italia. 4-6 de setiembre de 2001.
- FAO 2003. *Situación de los bosques del mundo 2003*. Roma. 468 pp.
- Ferreira, N., Ferreira, L., Huete, A. and Ferreira, M. 2007. *An operational deforestation mapping system using MODIS data and spatial context analysis*. International Journal of Remote Sensing. 28(1):47-62.
- Gilabert, M., Piqueras-González, J., García-Haro, F. and Meliá, J. 2002. *A generalized soil-adjusted vegetation index*. Remote Sensing of Environment. 82:303-310.
- Girolimetto, D. and Venturini, V. 2013. *Water Stress Estimation from NDVI-Ts Plot and the Wet Environment Evapotranspiration*. Advances in Remote Sensing. 2:283-291.
- Girolimetto, D., Martinuzzi, C., Missio, G., López, S., Horler, J., Lindt, I., Piedrabuena, A. y Huck, M. 2014. *Desarrollo de indicadores de área deforestada usando información teledetectada – Caso de estudio: Norte de la provincia de Santa Fe, Argentina*. 2º Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras. 23 al 26 de setiembre de 2014. Santa Fe, Argentina.

- Gómez Hermida, V., Demaría, M. y Maceira, N. 2002. *Estado de conservación del bosque de caldén en la Provincia de San Luis. Evaluación preliminar basada en el empleo de imágenes satelitales*. Primera Reunión para la Conservación de la Caldenia Argentina. Córdoba, noviembre de 2002, pp 23-24.
- González de Vallejo, L. and Ferrer, M. 2011. *Geological Engineering*. CRC Press/Balkema, The Netherlands, 678 pp.
- Gonzalez Díaz, E. 1981. *Geomorfología. Geología y recursos naturales de la provincia de San Luis*. Relatorio VIII Congreso Geológico Argentino, pp. 193-236.
- Hansen, M., Stehman, S., Potapov, P., Loveland, T., Townshend, J., DeFries, R., Pittman, K., Arunarwati, B., Stolle, F., Steininger, M., Carroll, M., and DiMiceli, C. 2008a. *Humid tropical forest clearing from 2000 to 2005 quantified by using multitemporal and multiresolution remotely sensed data*. Proceedings of the National Academy of Sciences. 105:9439-9444.
- Hansen, M., Roy, D., Lindquist, E., Adusei, B., Justice, C. and Altstatt, A. 2008b. *A method for integrating MODIS and Landsat data for systematic monitoring of forest cover and change in the Congo Basin*. Remote Sensing of Environment. 112:2495-2513.
- Huete, A. 1988. *A soil-adjusted vegetation index (SAVI)*. Remote Sensing of Environment. 25(3):295-309.
- Huete, A., Liu, H., Batchily, K. and Van Leeuwen W. 1997. *A comparison of vegetation indices global set of TM images for EOS MODIS*. Remote Sensing of Environment. 59:440-451.
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E., Gao, X. and Ferreira, L. 2002. *Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices*. Remote Sensing of Environment, 83:195-213.
- Ivkovic, K., Kingham, R., Chartres, C., Mullen, I., Lunter, S. y Lawrence, C. 2002. *Evaluación de posibilidades físicas y económicas de riego con aguas subterráneas en La Provincia de San Luis*. Fase 1.
- Kintisch, E. 2007. *Improved monitoring of rainforests helps pierce haze of deforestation*. Science. 316:536-537.
- Mas, J. 1999. *Monitoring land-cover changes: a comparison of change detection techniques*. International Journal of Remote Sensing. 20(1):139-152.
- Morton, D., De Fries, R., Shimabukuro, R., Anderson, L., Del Bon Espírito-Santo, F., Hansen, M. and Carroll, M. 2005. *Rapid assessment of annual deforestation in the Brazilian Amazon using MODIS data*. Earth Interactions. 9:1-22.
- Nelson, R. 1983. *Detecting forest canopy change due to insect activity using Landsat MSS*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 9:1303-1314.
- Oggero, A. y Arana, M. 2012. *Inventario de las plantas vasculares del sur de la zona serrana de Córdoba, Argentina*. Hoehnea, 39(2):171-199.

- Pompa, M. 2008. *Análisis de la deforestación en ecosistemas montañosos del noroeste de México*. Avances en Investigación Agropecuaria. Mayo-agosto, 12(002):35-44.
- Prego, A., Barnes, H. y Battoli, M. 1988. *El deterioro del ambiente en la Argentina: suelo, agua, vegetación, fauna*. Centro para la Promoción de la Conservación del Suelo y del Agua (PROSA). Fundación para la Educación, la Ciencia y la Cultura (FECIC). 519 pp.
- Ranchin, T., Wald, L. and Mangolini, M. 2001. *Improving spatial resolution of images by means of sensor fusion. A general solution: the ARSIS method*. Remote Sensing and Urban Change, GISDATA 9. Edited by J.-P. Donnay, M.J. Barnsley and P.A. Longley. Published by Taylor & Francis. London. 224 pp. Chapter 2, pp. 21-37.
- Singh, A. 1986. *Change detection in the tropical forest environment of northeastern India using Landsat*. In *Remote Sensing and Management*. Edited by M.J. Eden and J.T. Parry (New Zealand). pp. 237-253.