

CASO PRÁCTICO

Anomalías de vegetación asociadas con el fenómeno del ENOS en el valle geográfico del río Cauca, Colombia

Valencia, J. M., García, C. E.*, Montero, D.

Área de Geomática, Programa de Agronomía, Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia - Cenicaña, Calle 58 norte No. 3BN-110, Cali, Colombia.

Resumen: Los principales factores que inciden en la producción y el rendimiento de la caña de azúcar son la variedad, el manejo agronómico, el tipo de suelo y el clima. Mientras que en las tres primeras se tiene cierto control, el clima es un factor del cual no se puede tener control alguno, por lo tanto, se debe realizar un seguimiento de este. Colombia, al estar ubicado en el pacífico ecuatorial, es afectada por dos fenómenos atmosféricos oceánicos conocidos como "El Niño" y "La Niña", que componen el fenómeno climático del ENOS (El Niño-Oscilación del Sur) y que afectan la cantidad y el número de días con lluvias influyendo en la producción de caña de azúcar. El objetivo de este trabajo es identificar espacial y temporalmente las zonas con mayor y menor impacto del fenómeno del ENOS en el cultivo de la caña de azúcar en Colombia mediante el uso del Índice de Vegetación Normalizado (SVI) y el Índice de Anomalía de la Precipitación (RAI) utilizando imágenes EVI/MODIS y datos de precipitación de estaciones meteorológicas de manera trimestral para el periodo 2000-2015. Se encontró una tendencia similar entre ambos índices en las temporadas de "El Niño" y las temporadas "Neutral", mientras que en la temporada de "La Niña" el RAI tendió a elevarse mientras que el SVI disminuyó cuando el RAI fue muy alto, siendo esta tendencia mucho más marcada en zonas con inundaciones causadas por el desbordamiento de los principales ríos. Adicionalmente se realizó una comparación entre el índice SVI y un índice de anomalía de productividad (IAP), encontrando una correlación directamente proporcional entre ambos ($R^2=0,4$, $p<0,001$). Este trabajo demostró que por medio del uso de índices de vegetación se puede realizar un análisis temporal del impacto del clima en un cultivo agrícola, especialmente con condiciones ENOS.

Palabras clave: caña de azúcar, índice de vegetación, El Niño-Oscilación del Sur, anomalías de precipitación, MODIS.

Vegetation anomalies associated with the ENSO phenomenon in the Cauca river valley, Colombia

Abstract: The main factors affecting the production and yield of sugarcane are variety, agronomic management, soil type and climate, of which the first three there is some control, while the climate is one factor of which you cannot have any control, therefore, it should be monitored. Colombia, being located in the equatorial pacific, is affected by two atmospheric oceanic phenomena known as "El Niño" and "La Niña", which make up the climatic phenomenon of ENSO (El Niño-Southern Oscillation) and affect the quantity and the number of days with rainfall and influences the production of sugarcane. The objective of this work is to identify spatially and temporally the zones with greater and lower impact of the ENSO phenomenon in the cultivation of sugarcane in Colombia through the use of the Standard Vegetation Index (SVI) and the Rainfall Anomaly Index (RAI) using EVI/MODIS images and precipitation data from meteorological stations on a quarterly basis for the period 2000-2015. A similar trend was found between both indices in the "El Niño" and "Neutral" seasons, while in the "La Niña" season the RAI tended to rise while the SVI decreased

To cite this article: Valencia, J. M., García, C. E., Montero, D. 2017. Vegetation anomalies associated with the ENSO phenomenon in the Cauca river valley, Colombia. *Revista de Teledetección*, 50, 89-99. <https://doi.org/10.4995/raet.2017.7715>

* Autor para la correspondencia: cegarcia@cenicana.org

when the RAI was very high, this tendency being much more marked in areas with floods caused by the overflow of the main rivers. In addition, a comparison was made between the SVI index and a productivity anomaly index (IAP), finding a direct correlation between both ($R^2=0.4$, $p<0.001$). This work showed that through the use of vegetation indexes, a temporal analysis of the impact of climate on an agricultural crop can be carried out, especially with ENSO conditions.

Key words: sugarcane, vegetation index, El Niño–Southern Oscillation (ENSO), rainfall anomalies, MODIS.

1. Introducción

El sector azucarero colombiano está ubicado en el valle geográfico del río Cauca y es el principal productor de caña de azúcar del país. Los suelos del valle son altamente variables y por tal motivo se han generado una serie de prácticas agronómicas de acuerdo al tipo de suelo en combinación con la correcta selección de variedades según su rendimiento en cada zona. La correcta selección de variedades, en conjunto con un buen manejo agronómico, generan altas producciones de caña de azúcar, no obstante, esta producción también se ve altamente influenciada por el comportamiento climático, el cual debe ser monitoreado de manera que sirva de apoyo a la toma de decisiones sobre el manejo del cultivo.

De acuerdo con Villegas *et al.* (2016), de las variables que conforman el clima, la precipitación es el factor principal que incide en la producción y el rendimiento de la caña de azúcar. Según la red meteorológica de Cenicafé, el valor promedio de la precipitación anual en el valle del río Cauca es de 1296 mm, sin embargo, Colombia, al estar ubicada en el pacífico ecuatorial, está afectada por dos fenómenos atmosféricos oceánicos conocidos como “El Niño”, el cual se manifiesta con épocas secas, y “La Niña”, la cual se manifiesta con épocas lluviosas. Estos dos fenómenos componen el fenómeno climático ENOS (El Niño - Oscilación del Sur), que influye en la cantidad y el número de días con lluvias y según estudios realizados (Euscátegui y Hurtado, 2017; Caicedo, 2007), condiciona e influye en la producción de caña de azúcar.

El seguimiento y análisis del impacto del clima en cultivos agrícolas es importante para realizar un buen manejo agronómico. En este contexto la teledetección resulta ser práctica para mantener un seguimiento constante del comportamiento de la vegetación frente al exceso o déficit de lluvias, puesto que es una fuente de datos efectiva y con

alta calidad en el monitoreo de las distintas dinámicas de la vegetación en grandes áreas (El Hajj *et al.*, 2009).

Áreas afectadas debido a los cambios causados por el clima en los cultivos pueden ser identificadas mediante la utilización de índices de vegetación obtenidos de sensores satelitales como MODIS/Terra-Aqua, Vegetation/SPOT o AVHRR/NOAA (Mulianga *et al.*, 2013). El sensor MODIS, a bordo de los satélites TERRA y AQUA, ofrece el Índice de Vegetación Mejorado (EVI) (*Enhanced Vegetation Index*), un parámetro que caracteriza la vegetación sana y permite identificar las variaciones en la vegetación causadas por eventos climáticos como el ENOS (Sousa *et al.*, 2010).

El objetivo de este trabajo es identificar la distribución espacial del impacto causado por los fenómenos atmosféricos oceánicos en el cultivo de la caña de azúcar en el valle geográfico del río Cauca, Colombia, mediante el uso del Índice de Vegetación Estandarizado (SVI) (*Standard Vegetation Index*) obtenido a partir del EVI de MODIS Terra e identificar su relación con los efectos climáticos del fenómeno del ENOS mediante el Índice de la Anomalía de la Precipitación (RAI) (*Rainfall Anomaly Index*), obtenido a partir de datos de estaciones meteorológicas, así como la relación del SVI con la productividad.

2. Materiales y métodos

2.1. Zona de estudio

La zona de estudio la abarca el valle geográfico del río Cauca en los departamentos de Cauca, Valle del Cauca y Risaralda (Colombia). Ubicada entre las longitudes $-75,8^\circ$ y $-76,6^\circ$ y las latitudes $3,0^\circ$ y $5,0^\circ$, la elevación de la zona es de aproximadamente de 1.000 m.s.n.m. con una precipitación media anual de 1.296 mm y una temperatura promedio de 23°C con una oscilación media diaria de 11°C (Cenicafé, 2017).

Con aproximadamente 240.000 ha de extensión en el cultivo de caña de azúcar, el valle geográfico del río Cauca es el centro de la industria azucarera colombiana, teniendo la particularidad de que no existe zafra en el sector, lo que significa que durante todo el año se cosecha, teniendo un pico alto en el tercer trimestre, que corresponde a la temporada menos lluviosa del año en condiciones normales.

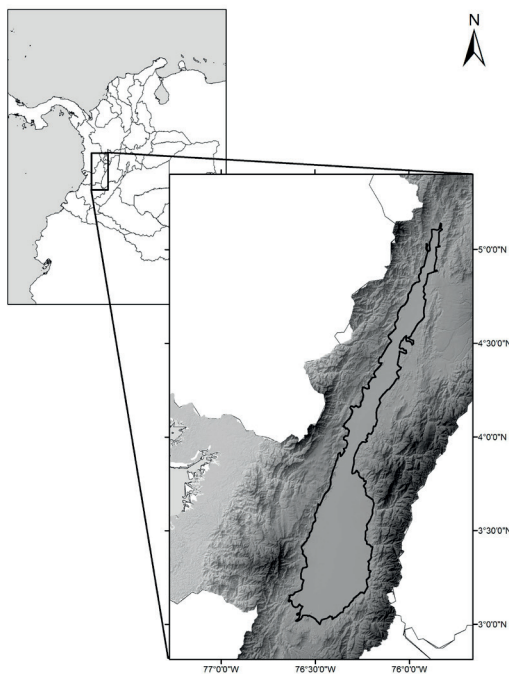


Figura 1. Zona de estudio.

2.2. Índice de Vegetación Mejorado (EVI)

Las imágenes MOD13Q1 son un producto obtenido por el sensor MODIS con una frecuencia de adquisición de 16 días desde febrero del año 2000 hasta la fecha. Este producto contiene información espectral en las bandas MIR (2105-2155 nm), NIR (841-876 nm), Rojo (620-670 nm) y Azul (459-479 nm), como de los índices NDVI, EVI y la imagen de calidad de la información (*Quality flag*) a una resolución de 250 m almacenados en una cuadrícula sinusoidal.

A pesar de que el NDVI es el más utilizado globalmente, este índice presenta fuertes saturaciones en zonas con alto contenido en biomasa como el área

de estudio. En esta se alcanzan valores promedios de 120 Toneladas de Caña por hectárea (TCH), obteniendo incluso 200 TCH en algunas zonas. Por tal motivo se ha utilizado el índice EVI del sensor MODIS del satélite Terra EOS AM-1 (Murillo y Carbonell, 2012) el cual presenta mejor desempeño en zonas con alto contenido de biomasa.

Un total de 365 imágenes del índice de vegetación EVI fueron utilizadas en el estudio, las cuales comprenden productos cada 16 días desde el 18 de febrero del 2000 hasta el 19 de diciembre del 2015. Estas imágenes fueron transformadas al sistema de referencia local (MAGNA SIRGAS Zona Oeste, EPSG:3115) y corregidas según la banda de calidad de información (*Quality flag*), en donde los valores correspondientes a nubes y nieve fueron considerados como píxeles que deben ser extraídos y por lo cual se realizó una máscara a cada imagen EVI para obtener únicamente los píxeles que no correspondieran a estos estados. Una vez aplicada la máscara a cada una de las imágenes EVI, se procedió a interpolar de manera lineal aquellos píxeles vacíos usando los que estuvieran en imágenes de fechas anteriores o posteriores de la imagen.

A pesar de tener una serie de tiempo del índice de vegetación completa, se presenta en ésta una serie de ruido que debe ser corregido. Por lo tanto, la serie de tiempo fue suavizada usando el filtro Savitzky-Golay (Savitzky y Golay, 1964), que propone una convolución por ajuste de mínimos cuadrados para un conjunto dado de datos y preserva los momentos altos del conjunto (Chen *et al.*, 2004) de manera que el ruido pueda ser corregido sin alterar en gran medida la forma de la serie temporal (Acharya *et al.*, 2016).

2.3. Índice de Vegetación Estandarizado (SVI)

El SVI es un índice basado en la probabilidad de verdor de un píxel según su media histórica y que puede estar altamente influenciado por los efectos del clima. Para la obtención del SVI se utilizaron las imágenes de EVI del producto para el periodo comprendido entre los años 2000 y 2015.

Con los datos depurados y filtrados, se procedió a realizar un promedio y desviación estándar global y un promedio trimestral para obtener el SVI, (Ecuación 1) (Sousa *et al.*, 2010):

$$SVI_i = \frac{EVI_i - EVI_R}{\sigma_R} \quad (1)$$

Donde SVI_i es el Índice de Vegetación Estandarizado en el trimestre i , EVI_i es el promedio del índice EVI en el trimestre i , EVI_R es el promedio histórico del índice EVI y σ_R es la desviación estándar histórica del índice EVI .

2.4. Índice de Anomalía de Precipitación (RAI)

El índice RAI muestra las anomalías de precipitación según los históricos de su media y su desviación estándar y se adapta según el tipo de temporada que se requiera estudiar (McKee *et al.*, 1993). Para la obtención del RAI se utilizaron los datos de la Red Meteorológica Automatizada (RMA) de Cenicafía, la cual está conformada por 34 estaciones repartidas a lo largo del valle geográfico del río Cauca. A partir de estas lecturas se interpolaron los datos mensuales, el método de interpolación utilizado fue la Distancia Inversa Ponderada (IDW) (*Inverse Distance Weighting*) (Andrade y Moreano, 2013), método que intercala con menos errores los datos de precipitación. Los datos de precipitación registrados por las estaciones son diarios, por lo cual se adicionan los datos por trimestres y a estos datos se les realizó la interpolación.

Con los datos interpolados se procedió a realizar el promedio y desviación estándar global y un promedio trimestral para obtener el Índice de Anomalía de la Precipitación (RAI), ecuación 2:

$$RAI_i = \frac{P_i - P_R}{\sigma_R} \quad (2)$$

Donde RAI_i es el Índice de Anomalía de Precipitación, P_i es la precipitación en mm en el trimestre i , P_R es el promedio de precipitación en mm trimestral entre los años 2000 y 2015 y σ_R es la desviación estándar trimestral entre los años 2000 y 2015 de la precipitación.

2.5. Índice de Anomalía de Productividad (IAP)

El índice IAP (generado por los autores), presenta las anomalías de productividad del sector azucarero del país según los históricos de su media y su desviación estándar. Este índice fue calculado

a partir de la base de datos del sector azucarero que posee Cenicafía, la cual contiene los valores de productividad en toneladas de caña y el total de área cosechada, lo que permite obtener el valor estándar de Toneladas de Caña por Hectárea (TCH) para diversas fechas de cosecha de todo el sector azucarero del país. El cálculo del IAP fue realizado de manera semestral mediante la ecuación 3:

$$IAP_i = \frac{TCH_i - TCH_R}{\sigma_R} \quad (3)$$

Donde IAP_i es el Índice de Anomalía de Productividad, TCH_i es la productividad en caña por hectárea en el semestre i , TCH_R es el promedio de la productividad en caña por hectárea semestral entre los años 2000 y 2015 y σ_R es la desviación estándar semestral entre los años 2000 y 2015 de la productividad.

2.6. Relación SVI - RAI

Se observó la tendencia de los índices SVI y RAI a lo largo del periodo de estudio, analizando su comportamiento de manera trimestral y su relación con las temporadas “El Niño”, “La Niña” o una temporada “Neutral”.

Los índices SVI y RAI se mueven entre valores positivos y negativos, se estableció un umbral de valor cero para estimar el Área Afectada (AA). Por tal motivo, todos los valores de SVI negativos fueron clasificados como afectados según el tipo de temporada ENOS que estuvieran (Sousa *et al.*, 2010) y su cálculo se realizó como el sumatorio de todos los píxeles considerados “afectados” (Ecuación 4):

$$AA = r^2 \times n \quad (4)$$

Donde AA es el área afectada, r es la resolución de la imagen (250 m para el caso del índice de vegetación EVI) y n es la cantidad de píxeles considerados como “afectados”. El porcentaje del área afectada respecto al área total de la zona de estudio (240.000 ha) también fue calculado.

2.7. Relación SVI - IAP

Un análisis entre los índices SVI e IAP de manera semestral fue realizado debido a la fuerte correlación existente entre los índices de vegetación y la productividad de la caña de azúcar (Abdel-Rahman

y Ahmed, 2008; Lofton *et al.*, 2012; Montero y García, 2016), correlación que se ve aumentada cuando el índice de vegetación es calculado entre los 6 y 7 meses de edad del cultivo y teniendo en cuenta que la edad de cosecha de la caña de azúcar en Colombia se encuentra entre los 11 y los 13 meses. Por tal motivo, para este estudio se tuvo en cuenta este comportamiento y se relacionó el SVI contra el IAP del semestre inmediatamente siguiente, donde se observa una fuerte tendencia, especialmente en los últimos años de estudio.

Finalmente, teniendo en cuenta la relación existente entre los índices SVI e IAP, fueron creadas cuatro imágenes de susceptibilidad de acuerdo al promedio SVI por trimestre y que determinan la susceptibilidad espacial de la zona de estudio a presentar valores de SVI por debajo de la media y por ende una mayor probabilidad a presentar una anomalía de productividad menor. Estas susceptibilidades fueron clasificadas según los siguientes rangos: Muy alta (-1 a -0,5), alta (-0,5 a 0), baja (0 a 0,5) y muy baja (0,5 a 1).

3. Resultados y discusión

En la Figura 2 se observa un ejemplo del comportamiento espacial de los índices SVI y RAI para las 3 temporadas (Niño, Niña y Neutral) durante periodos representativos de estas. En la temporada “Niño” se presenta un índice SVI bajo como respuesta a una disminución de la precipitación y un

aumento en la sequía (Belenguer-Plomer, 2016) representado en el bajo RAI durante una temporada “Niño”. En la temporada “Niña” se observan algunas zonas con bajo SVI debido a que, al ser una temporada “Niña” (representada por un alto índice RAI), se presentaron inundaciones en las zonas adyacentes de los ríos principales de la zona de estudio, afectando los cultivos representados por el bajo índice SVI. En la temporada “Neutral” se presenta el índice SVI con valores más altos debido a una precipitación en condiciones normales.

El comportamiento del promedio de los índices SVI y RAI en la zona de estudio trimestralmente se muestra para los periodos 2000 – 2003 (Figura 3), 2004 – 2007 (Figura 4), 2008 – 2011 (Figura 5) y 2012 – 2015 (Figura 6). Existe una tendencia similar entre los índices SVI y RAI cuando se encuentran en temporada “Niño” y “Neutral”, sin embargo, dicha tendencia desaparece cuando se encuentran en temporada “Niña”, donde a mayor valor del índice RAI se obtienen menores valores en el índice SVI (Figura 5).

En el área afectada se encuentra una tendencia en las figuras 3, 4, 5 y 6 en la que esta alcanza sus picos máximos justo 2 trimestres después de salir de una temporada “Niña”, siendo el más alto encontrado en el tercer trimestre del 2012 con un área afectada de aproximadamente el 90% saliendo de una temporada “Niña” que terminó en el primer trimestre de dicho año (Figura 6).

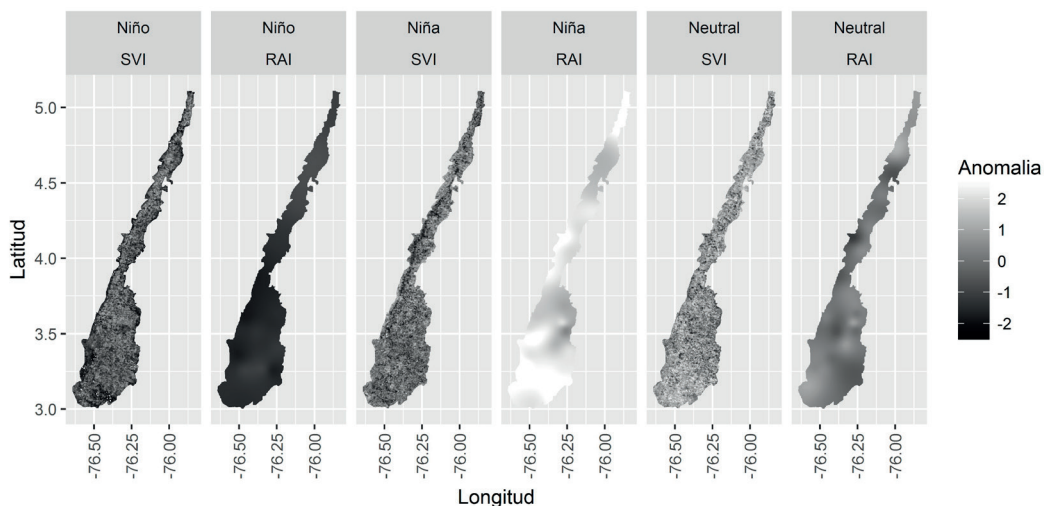


Figura 2. Imágenes de los índices SVI y RAI para la zona de estudio en temporadas “Niño”, “Niña” y “Neutral”.

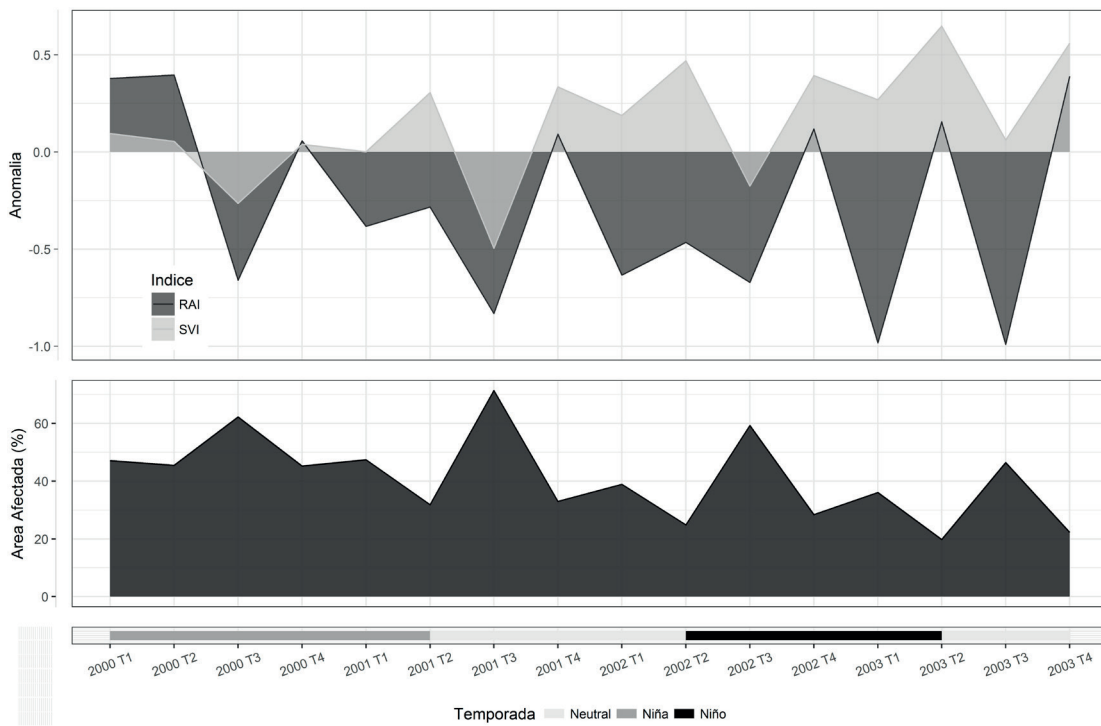


Figura 3. Comportamiento trimestral de los índices SVI, RAI y el porcentaje de área afectada en el periodo 2000 – 2003. T representa el trimestre.

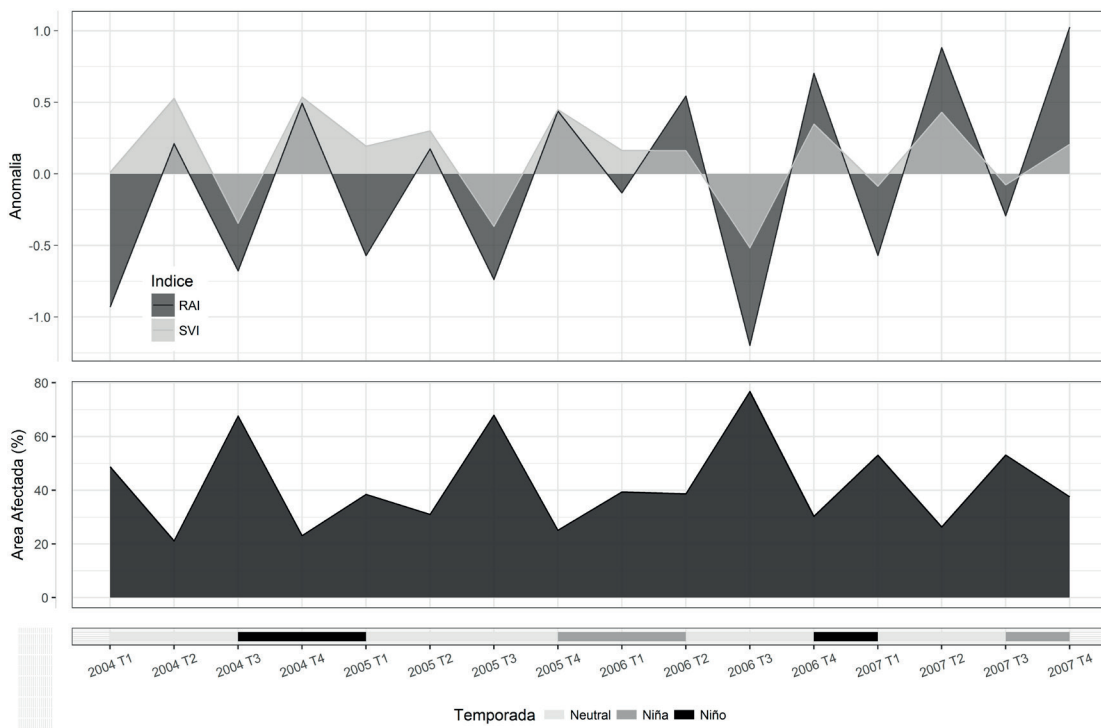


Figura 4. Comportamiento trimestral de los índices SVI, RAI y el porcentaje de área afectada en el periodo 2004 – 2007. T representa el trimestre.

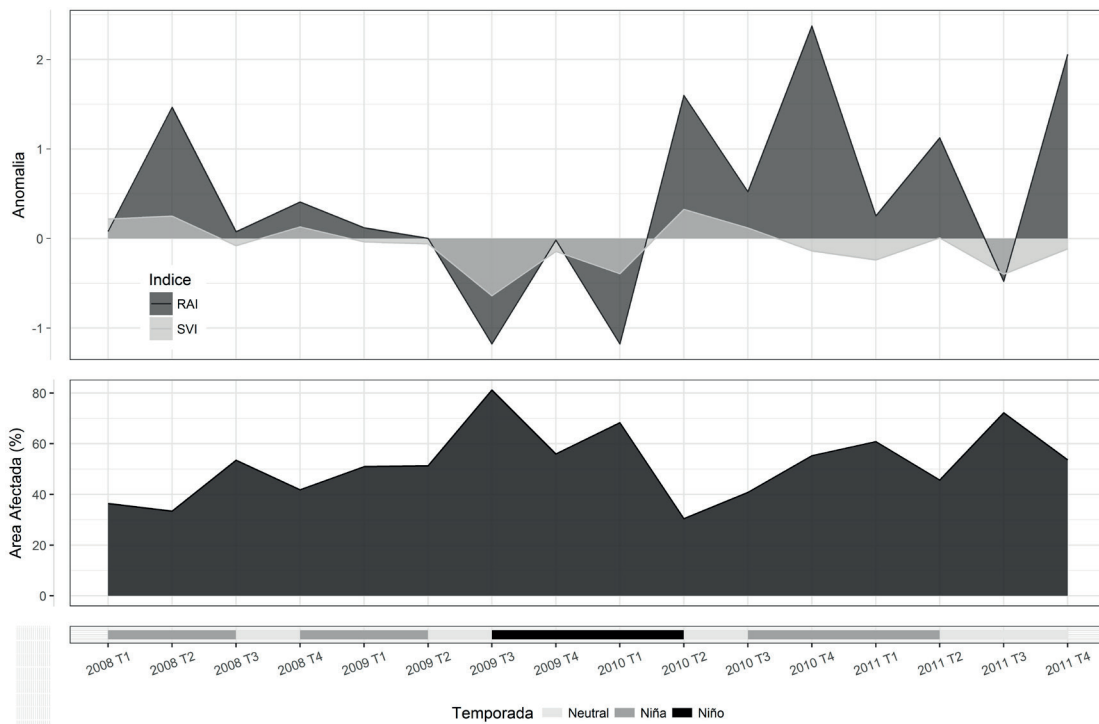


Figura 5. Comportamiento trimestral de los índices SVI, RAI y el porcentaje de área afectada en el periodo 2008 – 2011. T representa el trimestre.

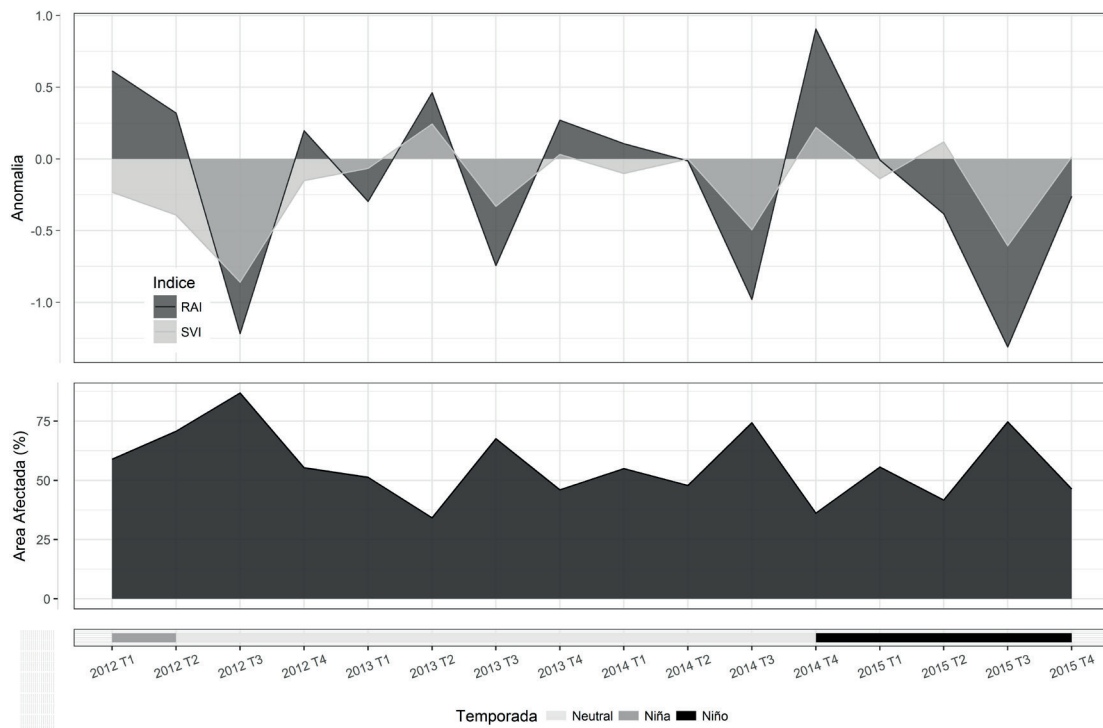


Figura 6. Comportamiento trimestral de los índices SVI, RAI y el porcentaje de área afectada en el periodo 2012 – 2015. T representa el trimestre.

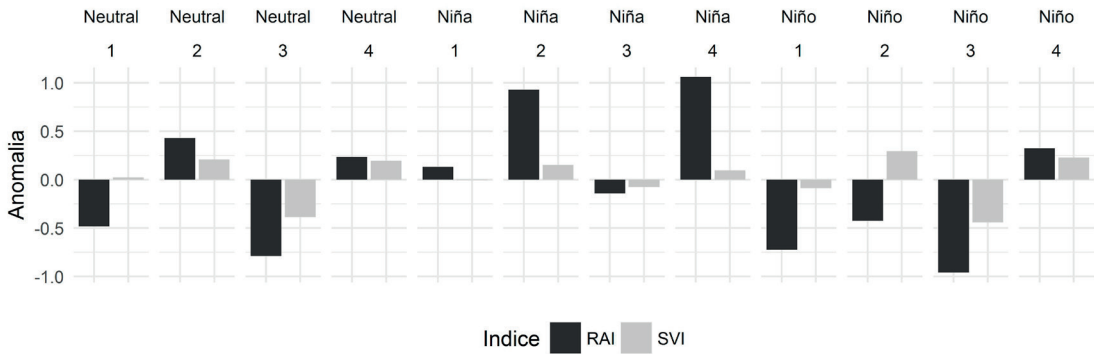


Figura 7. Comportamiento medio de los índices SVI y RAI por temporada y trimestre.

El mayor promedio de área afectada fue hallado durante el periodo comprendido entre el tercer trimestre del 2009 y el primer trimestre del 2010 en temporada “Niño” con un promedio trimestral del 68,5% del área afectada.

En un análisis por temporada, en la Figura 7 se puede observar el promedio de los índices SVI y RAI por temporada y trimestre. Durante el primer y tercer trimestre el índice SVI tiende a ser negativo, excepto en la temporada “Neutral”, mientras que en el segundo y cuarto trimestre siempre tiende a ser positivo. El índice RAI tiende a ser negativo durante el primer y tercer trimestre excepto en la temporada “Niña” y tiende a ser positivo en el segundo y cuarto trimestre exceptuando la temporada “Niño”. Durante la temporada “Niña” se observan los valores más altos del índice RAI y valores tendentes a 0 en el índice SVI mientras que en la temporada “Niño” el índice RAI tiene los valores más bajos, pero no muy distantes de la temporada “Neutral”, lo cual representa una

alta variabilidad en la precipitación (Puertas y Carvajal, 2008). El tercer trimestre, el cual es el más seco del año, tiende a tener los valores más bajos de cada índice por temporada, siendo los más bajos encontrados en la temporada “Niño” seguidos por la temporada “Neutral”; en el tercer trimestre de la temporada “Niña” los valores de ambos índices tienden a ser más altos que en las otras dos temporadas debido a la compensación del trimestre seco con una época lluviosa.

En la Figura 8 se observa el promedio del área afectada por temporada y trimestre. En el primer y tercer trimestre (trimestres secos del año) el área afectada tiende a ser la más alta por temporada, siendo esta mayor en la temporada “Niño”, en donde el tercer trimestre es aquel que más afecta al cultivo de caña de azúcar en el sector con base en el índice SVI, lo cual se explica por el aumento de la temperatura en la región pacífica y una disminución de precipitación que afecta la oferta natural de recursos hídricos (Montealegre y Pabón, 2000).

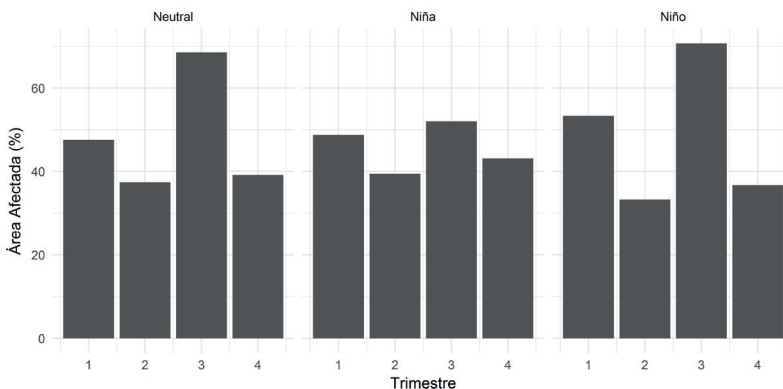


Figura 8. Comportamiento medio del área afectada en porcentaje por temporada y trimestre.

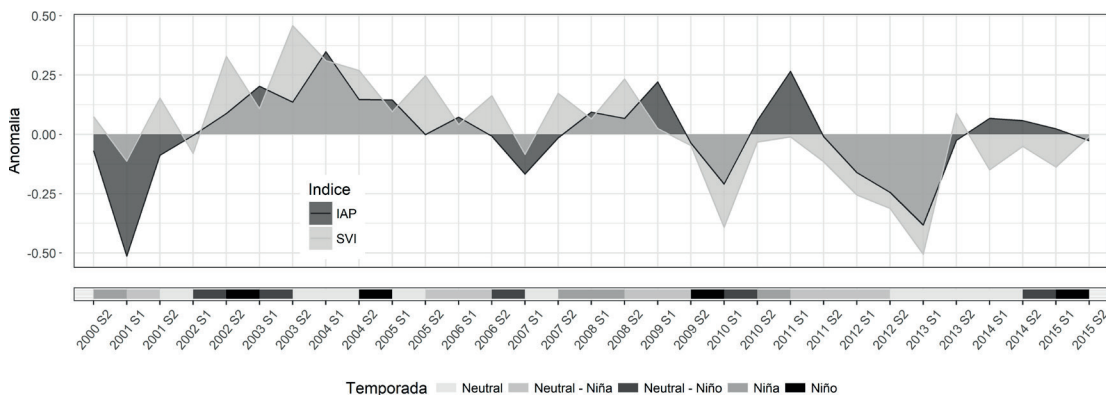


Figura 9. Comportamiento semestral de los índices SVI e IAP en el periodo 2000 – 2015. El SVI se encuentra desplazado un semestre adelante. S representa el semestre.

En el segundo y cuarto trimestre (trimestres húmedos del año) el área afectada tiende a ser la más baja por temporada, pero siendo esta mayor en la temporada “Niña”, en donde durante los trimestres húmedos se presentan más inundaciones en los cultivos aledaños a ríos principales y donde el exceso de agua produce pérdidas en grandes extensiones de caña de azúcar.

Para realizar la comparativa con la productividad del sector, se calculó el índice IAP y su comportamiento en relación con el índice SVI se muestra en la Figura 9.

Se presencian valores bajos en el índice IAP correspondientes a fenómenos “Neutral”, “Niña” y su combinación, ya que generalmente al salir de un fenómeno “Niña” fuerte la productividad del sector disminuye, como es el caso de los años 2011, 2012 y 2013. De igual manera sucede al presentarse un fuerte fenómeno “Niño”, como el presenciado en los años 2009 y 2010, en donde se acusó una caída en el IAP.

En la Figura 10 es notable una fuerte relación entre los índices IAP y SVI, que tienen respuestas similares a los diversos fenómenos, especialmente al final de los años de estudio, en donde ambos presentan tendencias análogas. Se realizó un análisis de regresión lineal entre ellos (Figura 10), en donde se encontró una relación estadísticamente significativa en la que el SVI explica hasta en un 40% el comportamiento del IAP ($R^2=0,4, p<0,001$).

Se observa que en las temporadas “Niña” y “Niño” los índices IAP y SVI se mantienen en valores cercanos a cero, esto se debe a que la respuesta en estos índices a dichos fenómenos se ve reflejada uno o dos trimestres después, por lo generalmente en una temporada “Neutral” o de transición.

Teniendo en cuenta la relación entre el SVI y el IAP se crearon los mapas de susceptibilidad por trimestre, los cuales son presentados en la Figura 11.

En la Figura 11 se observa que el tercer trimestre (segundo trimestre seco del año) es aquel que mayor susceptibilidad tiene, seguido por el primer trimestre (primer trimestre seco del año) cuya mayor susceptibilidad se halla en el norte de la zona de estudio.

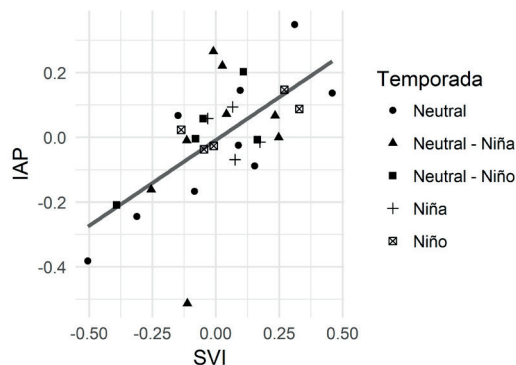


Figura 10. Regresión lineal entre los índices SVI e IAP.

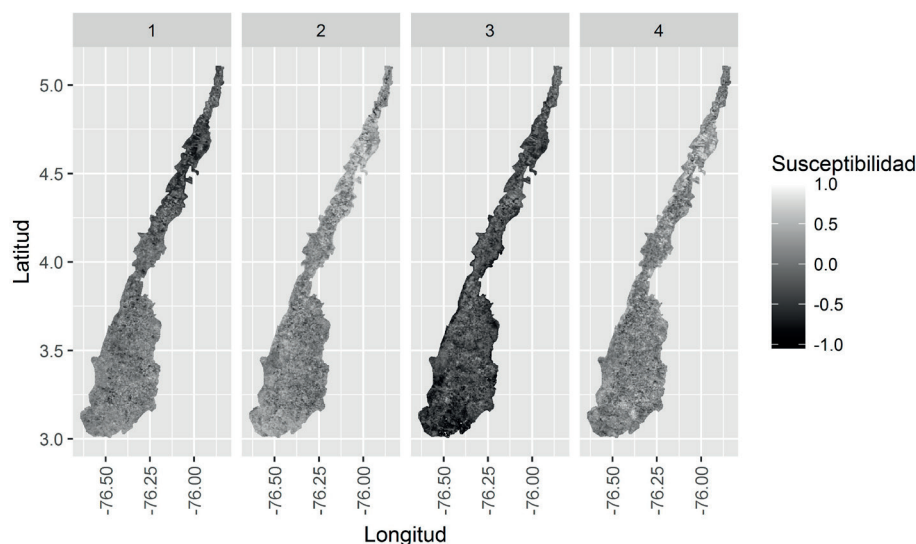


Figura 11. Mapas de susceptibilidad basados en el índice SVI por trimestre.

4. Conclusiones

La teledetección es una herramienta muy útil a la hora de realizar monitoreos continuos sobre caña de azúcar, y en este caso, la resolución espacial de las imágenes adquiridas por MODIS permiten un efectivo seguimiento del cultivo a nivel regional de manera trimestral que representa la respuesta de éste al fenómeno del ENOS y se encuentra altamente relacionado con la productividad del cultivo de manera semestral.

El índice de vegetación EVI aporta información valiosa para el monitoreo de la vegetación a una escala de tiempo trimestral, presentando anomalías que se encuentran relacionadas con el fenómeno del ENOS. Estas anomalías SVI y RAI mantienen una tendencia similar en las temporadas de “El Niño” y “Neutral”. En la temporada de “La Niña” se presenta el caso de que cuando la anomalía RAI tiende a elevarse demasiado el SVI disminuye y se pierde la tendencia similar existente entre ambos índices, esto debido a que el exceso de agua genera anomalías negativas. Se encontró que existe una tendencia en el tercer trimestre (trimestre seco) de cada año a elevarse el área afectada, así como se presenta una disminución en las anomalías SVI y RAI. Esta tendencia es más marcada en el fenómeno del “Niño”, mientras que durante el fenómeno de “La Niña”, la mayor parte de las áreas afectadas

corresponden a las inundaciones que se presentan sobre las áreas adyacentes a los ríos principales.

Se destaca que los índices SVI e IAP tienen una correlación directamente proporcional con un rezago de un semestre, por tal motivo el estado del SVI influenciará la respuesta de IAP en el semestre inmediatamente siguiente. En el tercer trimestre del año existe una mayor susceptibilidad, seguido por el primer trimestre (ambos trimestres secos) y a continuación por el segundo y cuarto trimestre con baja susceptibilidad (ambos trimestres húmedos), por lo que es crucial idear planes estratégicos de manejo del cultivo durante estas épocas para evitar caídas en la productividad. Las anomalías de vegetación generadas por medio del índice EVI resultan ser de gran utilidad para evaluar el comportamiento de la vegetación según los fenómenos del ENOS y generar planes de manejo agronómico para la caña de azúcar en orden de evitar reducciones de la productividad debido a estos.

Agradecimientos

Los autores agradecen al sector azucarero de Colombia por los aportes a las investigaciones que Cenicaña realiza.

Referencias

- Abdel-Rahman, E. M., Ahmed, F. B. 2008. The application of remote sensing techniques to sugarcane (*Saccharum* spp. hybrid) production: a review of the literature. *International Journal of Remote Sensing*, 29(13), 3753-3767. <https://doi.org/10.1080/01431160701874603>
- Acharya, D., Rani, A., Agarwal, S., Singh, V. 2016. Application of adaptive Savitzky-Golay filter for EEG signal processing. *Perspectives in Science*, 8, 677-679. <https://doi.org/10.1016/j.pisc.2016.06.056>
- Andrade, L., Moreano, R. 2013. Sistema de información para la interpolación de datos de temperatura y de precipitación del Ecuador. *Revista Politécnica*, 32(1), 70-75.
- Belenguer-Plomer, M.A. 2016. Análisis de series temporales de precipitación y vegetación para la detección de anomalías en la producción de alimentos en el Cuerno de África. El caso de Lower Shabelle (Somalia). *Revista de Teledetección*, 47, 41-50. <https://doi.org/10.4995/raet.2016.6690>
- Caicedo, E. 2007. El fenómeno de El Niño y su posible impacto en Colombia. *Reportes del Emisor*, 92, 1-4.
- Cenicaña. La región azucarera de Colombia. Cenicaña. Último acceso: 6 de Abril, 2017, de <http://www.cenicana.org/web/acerca-de/agroindustria/la-region-azucarera-de-colombia>
- Chen, J., Jönsson, P., Tamura, M., Gu, Z., Matsushita, B., Eklundh, L. 2004. A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky-Golay filter. *Remote Sensing of Environment*, 91, 332-344. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.03.014>
- El Hajj, M., Bégué, A., Guillaume, S., Martiné, J.F. 2009. Integrating SPOT-5 time series, crop growth modeling and expert knowledge for monitoring agricultural practices — The case of sugarcane harvest on Reunion Island. *Remote Sensing of Environment*, 113, 2052-2061. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.04.009>
- Euscátegui, C., Hurtado, G. Análisis del impacto del fenómeno “La Niña” 2010-2011 en la hidroclimatología del país. IDEAM. Último acceso: 6 de Abril, 2017, de <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/418818/An%C3%A1lisis+Impacto+La+Ni%C3%B1a.pdf/640a4a18-4a2a-4a25-b7d5-b3768e0a768a>
- Lofton, J., Tubana, B. S., Kanke, Y., Teboh, J., Viator, H., Dalen, M. 2012. Estimating sugarcane yield potential using an in-season determination of normalized difference vegetative index. *Sensors*, 12(6), 7529-7547. <https://doi.org/10.3390/s120607529>
- McKee, T., Doesken, N., Kleist, J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. En: Eighth Conference on Applied Climatology. Anaheim, EE.UU., 17-22 Enero.
- Montealegre, J. E., Pabón, J. D. 2000. La variabilidad climática interanual asociada al ciclo El Niño-La Niña—Oscilación del Sur y su efecto en el patrón pluviométrico de Colombia. *Meteorología Colombiana*, 2, 7-21.
- Montero, D., García, C. E. 2016. Modelo de aforo de caña de azúcar a partir de modelos digitales de altura e índices de vegetación. En: SELPER 2016: Geotecnologías, Herramientas para la construcción de una nueva visión del cambio global y su transformación para un futuro sostenible: *Libro de Actas de XVII Simposio Internacional en Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica*. Puerto Iguazú, Argentina, 7-11 Noviembre.
- Mulianga, B., Bégué, A., Simoes, M., Todoroff, P., 2013. Forecasting Regional Sugarcane Yield Based on Time Integral and Spatial Aggregation of MODIS NDVI. *Remote Sensing*, 5, 2184-2199. <https://doi.org/10.3390/rs5052184>
- Murillo, P. J., Carbonell, J. A. 2012. *Principios y aplicaciones de la percepción remota en el cultivo de la caña de azúcar en Colombia*. Cali: Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia.
- Puertas, O. L., Carvajal, Y. 2008. Incidencia de El Niño-Oscilación del Sur en la precipitación y la temperatura del aire en Colombia, utilizando el Climate Explorer. *Ingeniería & Desarrollo*, 23, 104-118.
- Savitzky, A., Golay, M. J. E. 1964. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Analytical Chemistry*, 36(8), 1627-1639. <https://doi.org/10.1021/ac60214a047>
- Sousa, M., Sausen, T. M., Pardi, M. S. 2010. Monitoramento de estiagem na região sul do brasil utilizando dados evi/modis no período de dezembro de 2000 a junho de 2009. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE.
- Villegas, F., Carbonell, J., Cortés, E., Chica, H. 2016. Efecto del clima en la producción y rendimiento de la caña de azúcar en el valle del río Cauca, 1990 – 2015. *Revista Tecnicaña*, 38, 25-31.