

APLICACIÓN DE ÍNDICES DE VEGETACIÓN PARA EVALUAR PROCESOS DE RESTAURACIÓN ECOLÓGICA EN EL PARQUE FORESTAL EMBALSE DEL NEUSA



**Trabajo de grado para optar por el título de:
Especialista en Geomática
Realizado por:
Diego Hernán Beltrán Hernández
Código: 3101377**

**UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESPECIALIZACIÓN EN GEOMÁTICA
BOGOTÁ D.C.
2017**

APLICACIÓN DE ÍNDICES DE VEGETACIÓN PARA EVALUAR PROCESOS DE RESTAURACIÓN ECOLÓGICA EN EL PARQUE FORESTAL EMBALSE DEL NEUSA

Diego Hernán Beltrán Hernández
Ingeniero Forestal, Aspirante a Especialista en Geomática
Estudiante de Posgrados de la Universidad Militar Nueva Granada
Bogotá D.C., Colombia
U3101377@unimilitar.edu.co

RESUMEN

Desde el año 2009 en el Parque Forestal Embalse del Neusa, ubicado entre los municipios de Cogua y Tausa, del departamento de Cundinamarca, se adelantan acciones tendientes a la restauración ecológica por parte de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, y a partir del 2013 ha efectuado procesos de monitoreo y seguimiento a las trayectorias sucesionales y estrategias de restauración implementadas; para ello se quiere evaluar el éxito de los procesos de restauración ecológica por medio de índices de vegetación utilizando imágenes satelitales. Se usaron cuatro imágenes de los sensores Landsat-8 y Sentinel-2 para los años 2014 a 2017, procesadas mediante el software QGIS, aplicándose los índices de vegetación NDVI, SR, RVI, GI y SAVI a las imágenes corregidas. Posteriormente se realizó verificación en campo de la cobertura actual. En dicha verificación se identificó la adaptación de las especies aliso, arboloco, arrayan, cedro, hayuelo, laurel y roble, asociándose a coberturas de pajonal y vegetación propia del bosque alto andino. En los núcleos donde se realizó tala raza y que se encuentran asociados a las plantaciones maduras de pino patula, la regeneración de esta especie se está dando de manera masiva, generando competencia frente a las especies nativas. Respecto a la aplicación de los índices, el NDVI generaliza la superficie con cobertura vegetal y solo distingue los parches de suelo desnudo o con poca vegetación. Los índices SR y GI identifican la variación en superficies vegetales, observándose un comportamiento espectral diferente entre coberturas bajas y bosque denso.

Palabras claves: índice NDVI, índice SR, índice RVI, índice GI, índice SAVI, coberturas vegetales, imagen Landsat-8, imagen Sentinel-2.

ABSTRACT

Since 2009, in the Parque Forestal Embalse del Neusa, located between the municipalities of Cogua and Tausa, in the department of Cundinamarca, actions tending towards ecological restoration are being carried out by the Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, and since 2013 it has carried out monitoring processes and follow-up to the successional trajectories and restoration

strategies implemented; For this, we want to evaluate the success of the ecological restoration processes by means of vegetation indexes using satellite images. Four images of the Landsat-8 and Sentinel-2 sensors are used for the years 2014 to 2017, processed by means of the QGIS software, applying the vegetation indexes NDVI, SR, RVI, GI and SAVI to the corrected images. Subsequently, a verification was made in the field of the current coverage. In this verification, the adaptation of the aliso, arboloco, arrayan, cedro, hayuelo, laurel and roble species was identified, associating with the pajonal coverages and vegetation of the high Andean forest. In the nuclei where the race was carried out and which is associated with mature pine plantations, the regeneration of this species is taking place in a massive way, generating competition against the native species. Regarding the application of the indexes, the NDVI generalizes the surface with plant cover and only distinguishes bare soil or with little vegetation. The SR and GI indices identify the variation in plant surfaces, observing a specific behavior between low cover and dense forest.

Keywords: NDVI index, SR index, RVI index, GI index, SAVI index, vegetation coverage, Landsat-8 image, Sentinel-2 image.

INTRODUCCIÓN

La sostenibilidad de los ecosistemas naturales, seminaturales y sistemas de producción, implica restaurar su integridad ecológica en cuanto a composición, estructura y función [1]. Por lo tanto las acciones para llevar al ecosistema degradado a una condición semejante o parecida a la de predisturbio, buscando su autosostenibilidad, la preservación de especies y la regulación hídrica y de la erosión, se conocen como restauración ecológica [2].

La Sociedad Internacional para la Restauración Ecológica (SERI) define la restauración ecológica como el “proceso de asistir la recuperación de un ecosistema que ha sido degradado, dañado o destruido, como consecuencia de disturbios naturales o antrópicos, tomando como referencia los ecosistemas predisturbio”.

En el Parque Forestal Embalse del Neusa (PFEN), ubicado entre los municipios de Cogua y Tausa, del departamento de Cundinamarca, desde el año 2009 se adelantan acciones tendientes a la restauración ecológica por parte de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR); iniciando con el aprovechamiento forestal de especies introducidas como pinos y eucaliptos y posteriormente con procesos de restauración a través del establecimiento de especies nativas.

Dichos procesos de restauración dentro del PFEN se llevaron a cabo a partir de núcleos, los cuales consisten en el establecimiento de grupos de especies de plantas leñosas nativas de diferentes estadios sucesionales, distribuidos en el área a restaurar, donde el desarrollo de la especie central es favorecido por franjas exteriores que actúan como protección [3-4].

La CAR Cundinamarca desde el año 2013 efectúa procesos de monitoreo y seguimiento a las trayectorias sucesionales y estrategias de restauración implementadas en el PFEN por medio de convenios de asociación con la Pontificia Universidad Javeriana de Bogotá.

Según [5] dentro de los pasos fundamentales en la restauración ecológica se encuentran los de evaluación y seguimiento, que permiten verificar si el proyecto va en la ruta sucesional deseada, o se puedan implementar medidas adaptativas para ajustar las estrategias y prácticas de restauración que se plantearon al inicio del proyecto.

En base a lo anterior se quiere evaluar el éxito de los procesos de restauración ecológica llevados a cabo en el PFEN por medio de índices de vegetación, a través de imágenes satelitales.

Existen diversas metodologías para estudiar mediante imágenes satelitales los cambios estacionales que ocurren en la vegetación; uno de ellos es la aplicación de índices vegetativos que estiman el contenido de clorofila de las plantas siguiendo los principios de la teledetección, debido a que la reflectividad de las cubiertas vegetales, esta determinada por factores atmosféricos, características ópticas del sensor, distribución espacial de la vegetación, donde se tiene en cuenta el suelo sobre el que se asienta, y por su densidad [6-7].

Según [8], la presencia de óxidos de hierro o la presencia de clorofila puede ser determinada por medio de la región visible del espectro, mientras que los iones OH⁻ pueden ser identificados en la zona del infrarrojo cercano (NIR). La relación entre las bandas del NIR (710-1300 nm) y el rojo (620-710 nm) permite identificar el vigor de la vegetación o su débil vitalidad, aprovechando la alta absorción de las bandas del visible y la fuerte reflectancia del NIR [9].

Los índices de vegetación se calculan a partir de los valores de la reflectividad a distintas longitudes de onda, para obtener información relacionada con la vegetación [10]. En las zonas espectrales del rojo existe una fuerte correlación con el contenido de clorofila, mientras que el infrarrojo cercano se relaciona con el índice de superficie foliar [8]. Según [11], la reflectividad de la vegetación pasa de un mínimo relativo en el rojo, correspondiente a la banda de absorción de la clorofila, a un máximo absoluto en el infrarrojo cercano, debido a la dispersión de la radiación provocada por el interior de la estructura celular; además el suelo presenta un comportamiento espectral diferente en dichas zonas espectrales.

Bajo estas premisas algunos índices de vegetación usados en procesamiento digital de imágenes de satélite son el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada o NDVI -Normalized Difference Vegetation Index-, Índice de Relación Simple o SR -Simple Ratio Index-, e Índice de Vegetación de Proporción o RVI -Ratio Vegetation Index-, entre otros [12-14]. Los anteriores índices permiten estudiar grandes zonas de cultivo y realizar estudios de la variabilidad espacial de

su desarrollo o rendimiento, detectando de forma remota estrés hídrico, problemas nutricionales o problemas de desarrollo [14].

1. MATERIALES Y MÉTODOS

1.1. ÁREA DE ESTUDIO

El PFEN comprende 2.332 ha, de las cuales 462,56 ha son plantaciones forestales de pino (*Pinus patula* y *P. radiata*), eucalipto (*Eucalyptus globulus* y *E. viminalis*) y ciprés (*Cupressus lusitanica*), con una edad de 40 años aproximadamente. Desde el año 2009, por medio del Contrato 371/2009 entre CAR Cundinamarca y Geoambiente, se realizó el aprovechamiento forestal de las especies antes mencionadas y posteriormente se iniciaron procesos de restauración en 502,6 ha [15].

En cuanto a los procesos de restauración, estos se llevaron a cabo a través del Convenio de Asociación No. 1219 de 2013 entre la CAR Cundinamarca y la Pontificia Universidad Javeriana, donde se definieron tres núcleos de restauración (Guanquica, Chapinero y Laureles) y parcelas de referencia en los parches de bosque circundante (Fig. 1). El material vegetal establecido en los núcleos, pertenece a las especies aliso (*Alnus acuminata*), arboloco (*Smallanthus pyramidalis*), arrayan (*Myrcianthes leucoxyla*), cedro (*Cedrela montana*), chilco (*Baccharis latifolia*), chuque (*Viburnum triphyllum*), ciro (*Baccharis macrantha*), encenillo (*Weinmannia tomentosa*), gaque (*Clusia grandiflora*), hayuelo (*Dodonaea viscosa*), laurel (*Morella parvifolia*), pino romeron (*Retrophyllum rospigliosii*), roble (*Quercus humboldtii*) y raque (*Vallea stipularis*) [16].

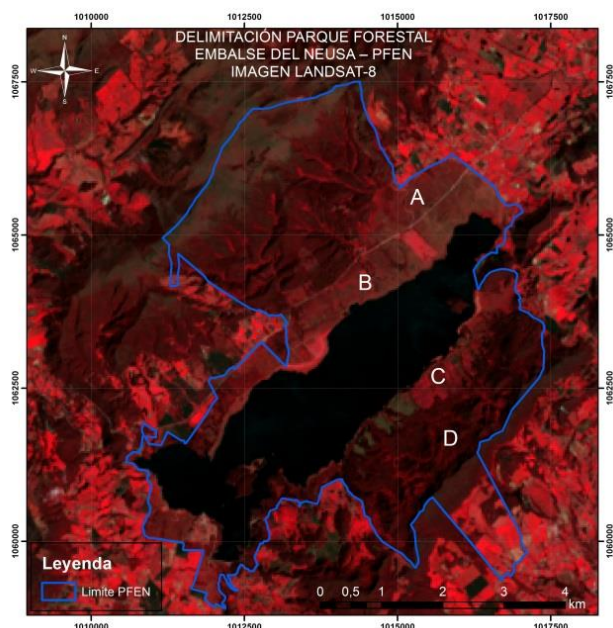


Fig. 1. Delimitación PFEN y Núcleos de Restauración A: Guanquica, B: Chapinero, C: Laureles, D: Bosque de referencia. Imagen Landsat-8 año 2015, RGB 543.

Fuente: USGS Earth Explorer, 2017.

1.2. METODOLOGÍA

1.2.1. Búsqueda de imágenes satelitales

Para la aplicación de los índices de vegetación se trabajó con cuatro (4) imágenes satelitales de diferentes años descargadas de la plataforma de la United States Geological Survey (USGS) Earth Explorer 2017. Se trabajó con dos imágenes Landsat 8, multiespectrales de 9 bandas con resolución espacial de 30 m y pancromática de 15 m, de los años 2014 y 2015, con nivel 1TP de procesamiento, siendo el más alto en corrección; el cual proporciona precisión sistemática, radiométrica y geométrica mediante la incorporación de puntos de control (Fig. 3 y 9).

Adicionalmente se procesaron dos imágenes Sentinel 2, de 4 bandas con resolución espacial de 10 m (azul, verde, rojo e infrarrojo cercano), de los años 2016 y 2017, las cuales tienen un nivel de procesamiento 1C, que incluye correcciones radiométricas y geométricas junto con la ortorectificación y el registro espacial (Fig. 15 y 21).

1.2.2. Procesamiento de imágenes

El procesamiento de las imágenes satelitales se llevó a cabo a través del software QGIS 2.18.14. El preprocesamiento se efectuó mediante el complemento de clasificación semiautomático – SCP (Semi-Automatic Classification Plugin), para realizar corrección atmosférica por medio del método DOS1, transformando los Niveles Digitales a valores de reflectancia en la parte superior de la atmósfera (TOA) y calculando la Temperatura de Brillo; posteriormente se aplicaron los índices de vegetación.

1.2.3. Aplicación de índices de vegetación

La reflectividad de la cubierta vegetal se relaciona con la radiación electromagnética y su respuesta espectral, siendo muy característico el comportamiento de la vegetación en la banda del rojo, en la cual se observan valores altos de absorción de la radiación por parte de la clorofila en la banda del rojo y valores altos de dispersión de la radiación por la estructura celular en la banda del infrarrojo cercano. La fuerte pendiente que se genera entre estos valores extremos se conoce como la banda del rojo cercano o Red Edge (Fig. 2).

Con ayuda del software QGIS 2.18.14. y su herramienta “Calculadora Raster” se generaron los índices de vegetación en base a las bandas del verde (R_{green}), rojo (R_{red}) e infrarrojo cercano (R_{NIR}) con que cuenta la imagen corregida y el sensor con que fue tomada.

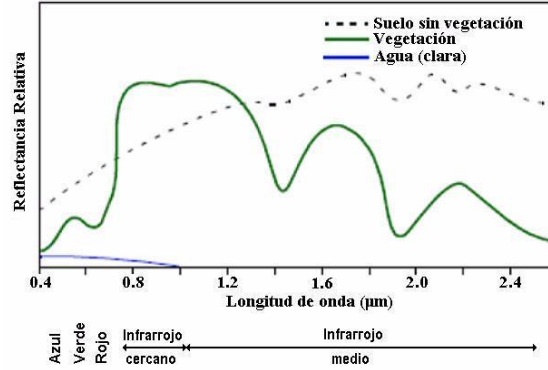


Fig. 2. Espectros de reflectividad típicos de vegetación y suelo, adquiridos mediante un espectroradiómetro GERS IRIS.

Fuente: Gilabert *et al.*, 1997 [8].

- Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada o NDVI:

El índice NDVI se basa en las diferencias de reflectividad entre el rojo y el infrarrojo próximo [17]. Mide la relación entre la energía absorbida y emitida por las coberturas vegetales, a través de valores de intensidad del verdor de la zona, la cantidad de vegetación presente en una superficie y su estado de salud o vigor vegetativo [18].

El NDVI relaciona la información adquirida en las regiones del Rojo y NIR con el estado y características de las cubiertas vegetales, por medio de la diferencia normalizada de las dos bandas, cuyo rango de variación se encuentra entre -1 y 1 [8]. Valores negativos (-1) hasta cero (0) son superficies descubiertas, mientras que los valores de cero (0) a uno (1) muestran la presencia de plantas; la vegetación densa se da a partir de valores entre 0,5 y 0,7 [19].

Este índice arroja valores estimados del verdor del bosque que resultan del análisis de datos obtenidos mediante satélite, representando la salud vegetal por medio del valor reducido del índice debido a la disminución de su verdor, reflejando la degradación de la vegetación del ecosistema [18].

$$NDVI = \frac{R_{NIR} - R_{red}}{R_{NIR} + R_{red}} \quad (1)$$

- Índice de Relación Simple o SR:

El índice SR reduce o elimina la influencia del suelo sobre los valores de reflectancia solar. Se considera como índice estructural que permite estimar valores de índice de área foliar [20].

$$SR = \frac{R_{NIR}}{R_{red}} \quad (2)$$

- Índice de Vegetación de Proporción o RVI:

El valor del índice RVI es inversamente proporcional a la cantidad de vegetación presente en el área [21].

$$RVI = \frac{R_{red}}{R_{NIR}} \quad (3)$$

- Índice de Verdor o GI:

El índice GI (Greenness Index) indica el cociente entre la reflectividad en la banda del verde y la reflectividad en el infrarrojo cercano, detectando carotenos u otros pigmentos en parches de vegetación. Está relacionado al vigor del cultivo, cantidad de vegetación o biomasa [22].

$$GI = \frac{R_{green}}{R_{red}} \quad (4)$$

- Índice de vegetación ajustado al suelo o SAVI:

El Índice SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) minimiza el efecto del suelo en la caracterización de la vegetación, especialmente en superficies parcialmente recubiertas. Tiene en cuenta la cantidad de vegetación que se observa en la imagen (constante L igual a 0.5) [23].

$$SAVI = \frac{R_{NIR} - R_{red}}{R_{NIR} + R_{red} + L} * (1 + L) \quad (5)$$

1.2.4. Verificación de puntos en campo

Se realizó verificación en campo a través de visita a puntos distribuidos en todas las áreas en proceso de restauración y en el bosque de referencia. Los datos tomados fueron cobertura actual, especies establecidas y registro fotográfico.

2. RESULTADOS

2.1. Procesamiento de imágenes

Según la información suministrada por la CAR Cundinamarca se encuentran georreferenciados 116 polígonos con una extensión de 455 ha que corresponden a las áreas en proceso de restauración activa, las restantes 47,6 ha se encuentran en proceso de restauración espontánea. Respecto a la restauración activa, en el núcleo A – Guanquica se intervinieron 83,4 ha, para el núcleo B – Chapinero se

intervinieron 207,1 ha, mientras que para el núcleo C – Laureles se intervinieron 164,5 ha. El bosque de referencia (D) se compone de vegetación nativa propia de bosque alto andino y parches aun existentes de plantaciones de pino (Fig. 2).

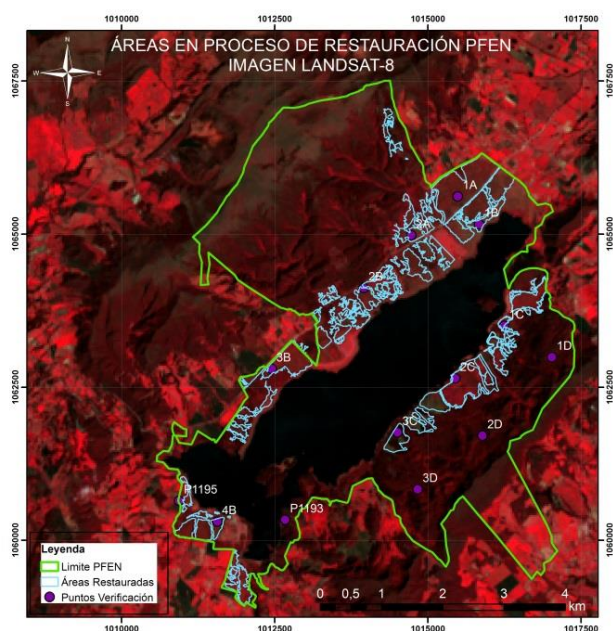


Fig. 2. Áreas en proceso de restauración dentro del PFEN. Imagen Landsat-8 año 2015, RGB 543.
Fuente: CAR Cundinamarca, 2017.

2.2. Aplicación de índices de vegetación

Luego de aplicar los cinco índices de vegetación a cada una de las imágenes se obtuvieron salidas graficas con los resultados por índice para los años comprendidos entre 2014 y 2017.

Los índices NDVI y SAVI presentan escalas entre -1 y 1, siendo los valores negativos o cercanos a cero superficies sin vegetación, y valores cercanos a 1 demuestran la existencia de coberturas vegetales. Los índices SR, GI y RVI inician su escala desde cero; para el índice SR valores bajos corresponden a superficies descubiertas o sin vegetación, mientras que para el índice RVI valores altos corresponden a este tipo de superficies. El índice GI diferencia claramente el suelo desnudo o con poca vegetación de las demás coberturas o superficies observadas.

Para el año 2014, aproximadamente cuatro años después de iniciar las acciones de restauración en el PFEN, se observó luego del procesamiento de la imagen Landsat-8 (Fig. 3), que el índice NDVI muestra superficies descubiertas o con poca vegetación hacia el lado suroriental del embalse (colores fucsias con valores cercanos a cero), en la parte sur y norte del embalse los colores van del rosado al azul indicando valores mayores a 0,5. Se observa claramente en la parte norte

tonos azul oscuro como indicador de vegetación densa, mientras que el color rojo indica la presencia de nubes en la imagen (Fig. 4).

El índice SR muestra claramente en colores amarillo o naranja (valores cercanos a cero) las superficies de cuerpos de agua, presencia de nubes y suelo desnudo (Fig. 5). Por otra parte el índice GI expone el suelo desnudo, siendo visible en comparación a las demás superficies (Fig. 6). El índice RVI, al invertir la escala de colores, muestra los cuerpos de agua con valores altos, el suelo desnudo y las construcciones con valores medios y la vegetación con valores cercanos a cero (Fig. 7). El índice SAVI identifica cuerpos de agua con valores negativos y coberturas de vegetación con valores cercanos a uno (Fig. 8).

El procesamiento de la imagen Landsat-8 del año 2015 (Fig. 9) muestra aumento de las áreas desprovistas de vegetación hacia el lado suroriental del embalse (Fig. 10-13): por otra parte el índice SAVI no define áreas en su resultado (Fig. 14).

La imagen Sentinel-2 del año 2016 (Fig. 15) luego de la aplicación de los índices define claramente, por medio del índice NDVI las superficies alrededores del embalse con presencia de pastos manejados o cobertura de pajonal (Fig. 16). Los índices SR, GI y RVI también identifican estas áreas (Fig. 17-19), pero el índice GI diferencia este tipo de coberturas con mayor precisión de las demás superficies observadas en la imagen. Los resultados del índice SAVI no diferencian las superficies cubiertas de vegetación, sea esta densa o de porte bajo (Fig. 20).

Por último los índices aplicados a la imagen Sentinel-2 del año 2017 (Fig. 21) muestran una cobertura homogénea de vegetación; el índice NDVI presenta parches de superficies sin vegetación al lado suroriental del embalse (Fig. 22). Los índices SR y GI muestran mayor diferencia entre bosque denso y vegetación de porte bajo, siendo notorio el cambio en los valores circundantes al embalse con respecto a los valores observados hacia el límite del parque (Fig. 23-24). El índice RVI, al igual que el índice NDVI, solo muestra parches con poca o nula vegetación (Fig. 25). Con respecto al índice SAVI no se observan diferencias teniendo en cuenta el porte de la vegetación. Cabe resaltar la clara identificación del área en cultivos en los alrededores del parque (zona occidental) en todos los índices, siendo característico este patrón.

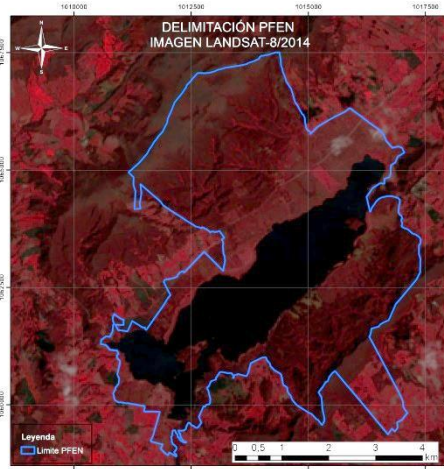


Fig. 3. Imagen Landsat-8 año 2014, RGB 543.

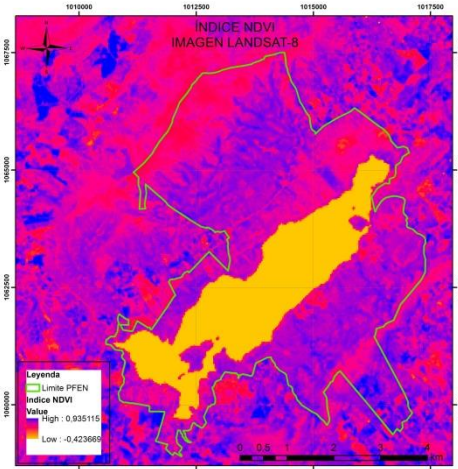


Fig. 4. Índice NDVI aplicado a la imagen Landsat-8 año 2014.

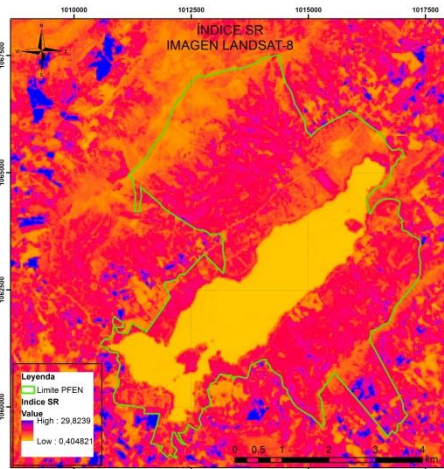


Fig. 5. Índice SR aplicado a la imagen Landsat-8 año 2014.

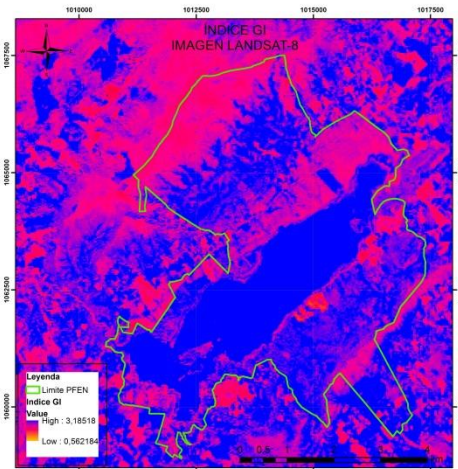


Fig. 6. Índice GI aplicado a la imagen Landsat-8 año 2014.

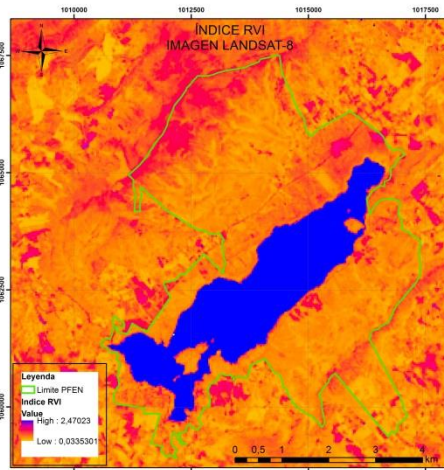


Fig. 7. Índice RVI aplicado a la imagen Landsat-8 año 2014.

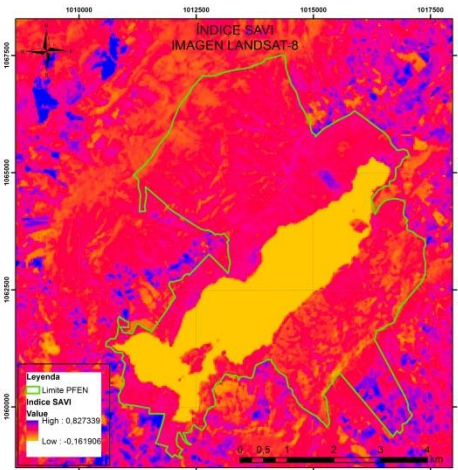


Fig. 8. Índice SAVI aplicado a la imagen Landsat-8 año 2014.

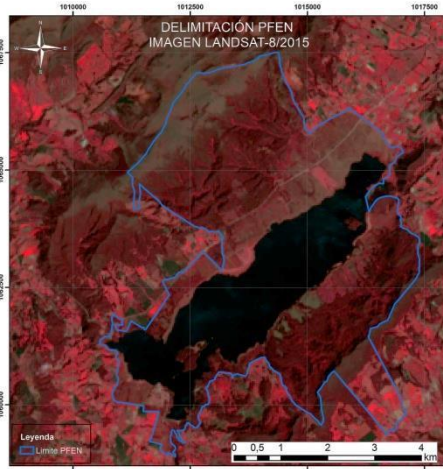


Fig. 9. Imagen Landsat-8 año 2015, RGB 543.

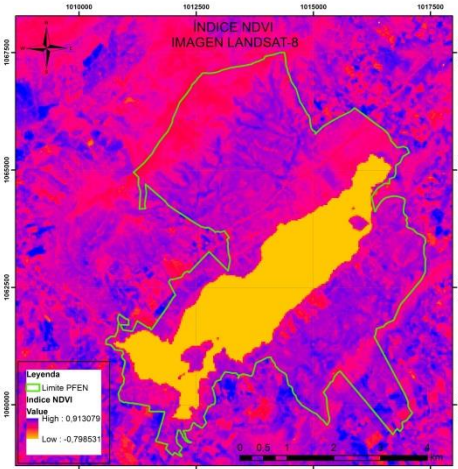


Fig. 10. Índice NDVI aplicado a la imagen Landsat-8 año 2015.

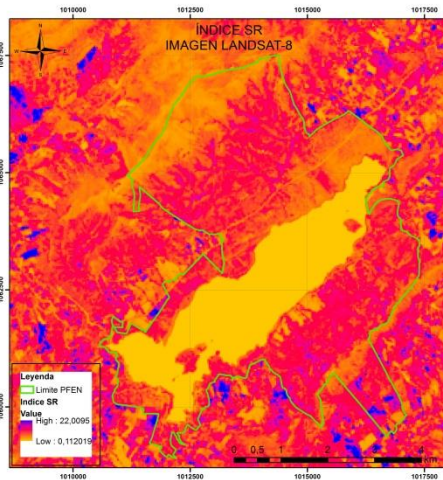


Fig. 11. Índice SR aplicado a la imagen Landsat-8 año 2015.

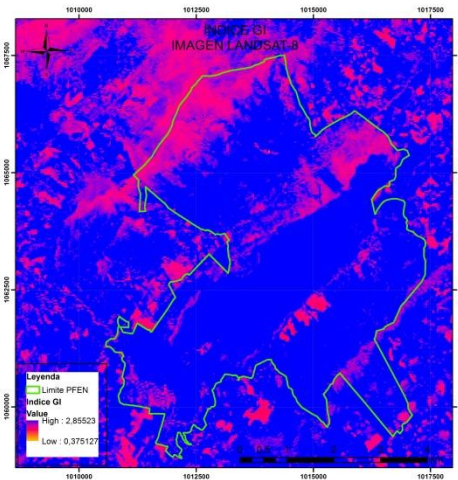


Fig. 12. Índice GI aplicado a la imagen Landsat-8 año 2015.

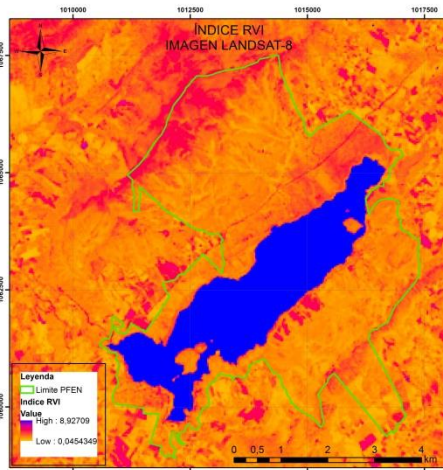


Fig. 13. Índice RVI aplicado a la imagen Landsat-8 año 2015.

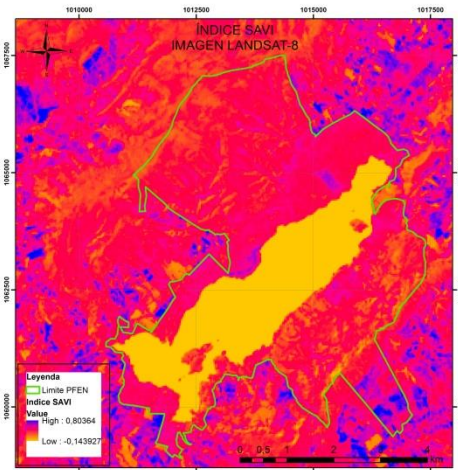


Fig. 14. Índice SAVI aplicado a la imagen Landsat-8 año 2015.

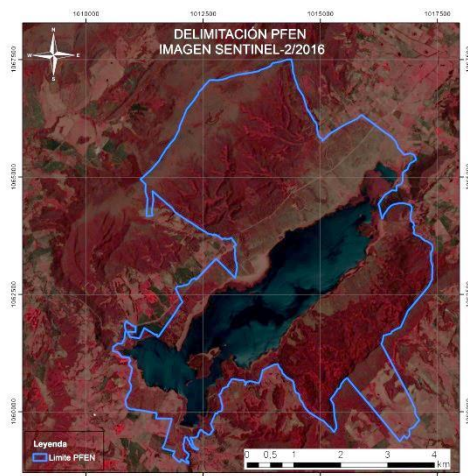


Fig. 15. Imagen Sentinel-2 año 2016, RGB 543.

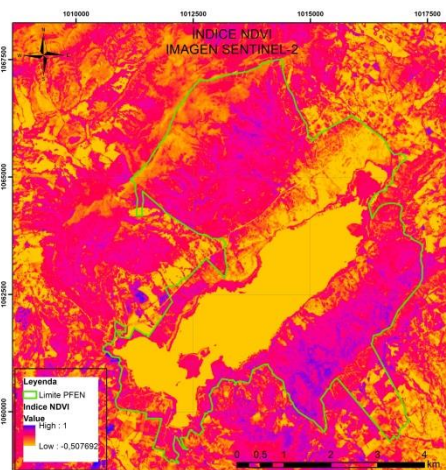


Fig. 16. Índice NDVI aplicado a la imagen Sentinel-2 año 2016.

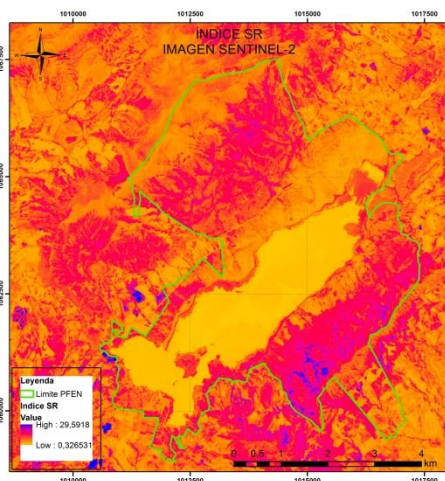


Fig. 17. Índice SR aplicado a la imagen Sentinel-2 año 2016.

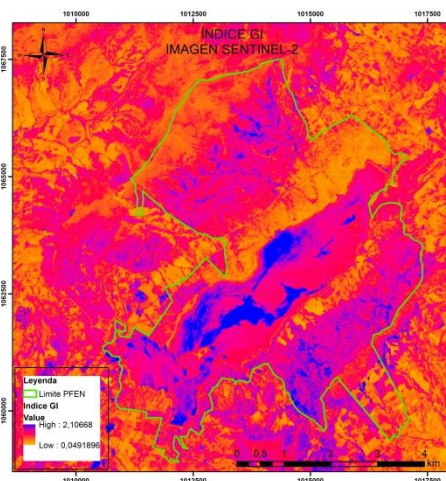


Fig. 18. Índice GI aplicado a la imagen Sentinel-2 año 2016.

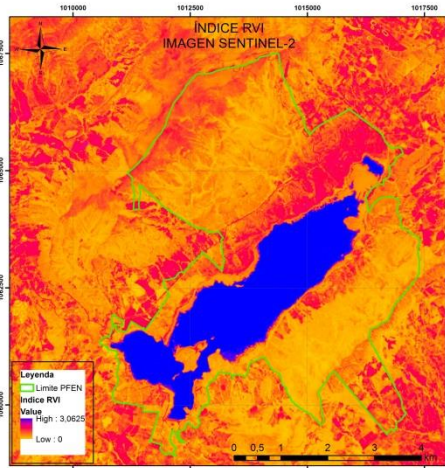


Fig. 19. Índice RVI aplicado a la imagen Sentinel-2 año 2016.

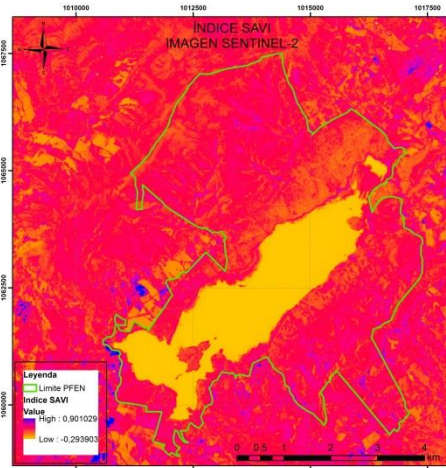


Fig. 20. Índice SAVI aplicado a la imagen Sentinel-2 año 2016.

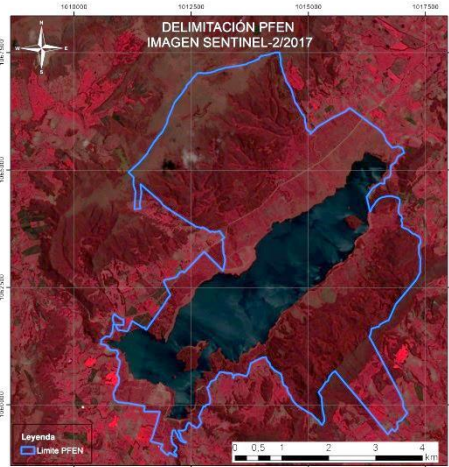


Fig. 21. Imagen Sentinel-2 año 2017, RGB 543.

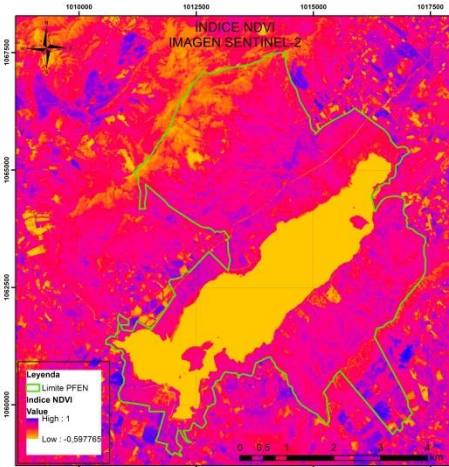


Fig. 22. Índice NDVI aplicado a la imagen Sentinel-2 año 2017.

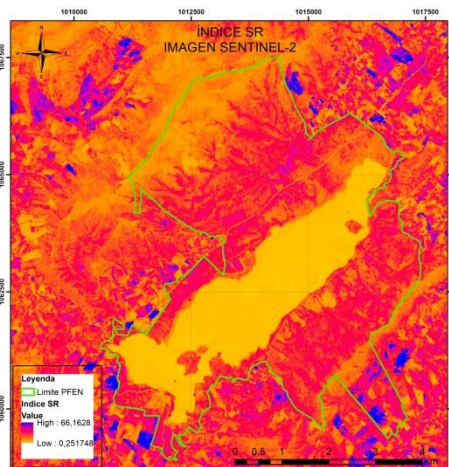


Fig. 23. Índice SR aplicado a la imagen Sentinel-2 año 2017.

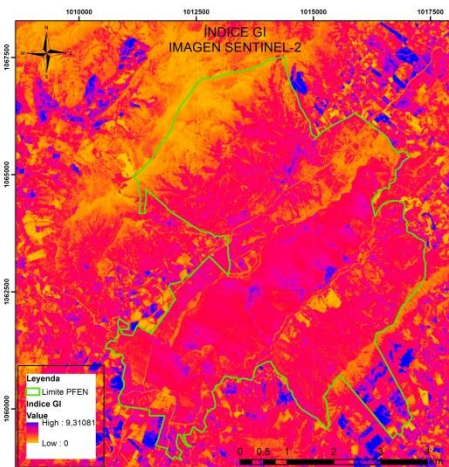


Fig. 24. Índice GI aplicado a la imagen Sentinel-2 año 2017.

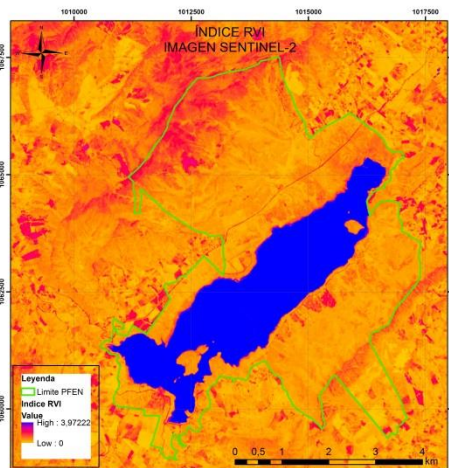


Fig. 25. Índice RVI aplicado a la imagen Sentinel-2 año 2017.

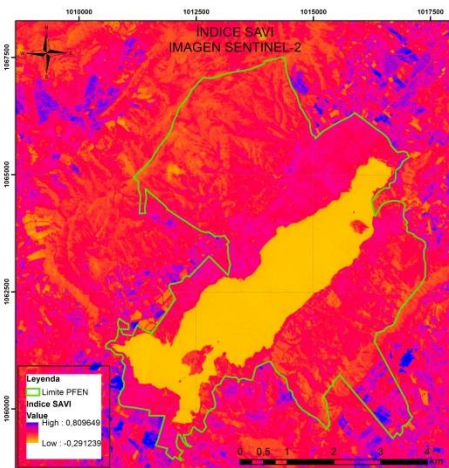


Fig. 26. Índice SAVI aplicado a la imagen Sentinel-2 año 2017.

2.3. Verificación de puntos en campo

De la verificación en campo se obtuvo como resultado la visita a 11 puntos ubicados en las áreas en proceso de restauración y tres puntos más para identificar la cobertura del bosque denso (Fig. 2).

En el núcleo A – Guanquica se visitaron dos puntos (1A y 2A) observándose, como actividad de los procesos de restauración adelantados en el PFEN, el establecimiento de especies nativas de las especies aliso, arboloco y arrayan con alturas aproximadas de 2 metros, y ciro y hayuelo, con alturas aproximadas de 50 cm. En el punto 2A también se observaron especies introducidas como ciprés y pino patula, con alturas aproximadas de 3 m, y eucalipto rojo y blanco, con alturas superiores a 8 m (Fig. 27).

En el núcleo B – Chapinero se recorrieron cinco puntos (1B, 2B, 3B, 4B y P1195). El punto 1B se caracteriza por la cobertura de pajonal con el establecimiento de especies nativas como ciro y hayuelo; además se observó la fuerte regeneración de la especie pino patula (Fig. 28). Los puntos 2B y 3B presentaron cobertura de vegetación densa de porte alto, donde el material vegetal establecido pertenece a las especies hayuelo, arboloco y aliso (Fig. 29); en el punto 3B se identificó una plantación de pino candelabro, con alturas mayores a 15 m. El punto 4B presentó una cobertura vegetal de porte medio siendo características las especies cedro y roble, con alturas aproximadas de 2 m, asociadas a mora silvestre. El punto P1195 fue tomado en el límite del parque donde se observó alta densidad de cultivos transitorios y praderas para ganadería.

El núcleo C – Laureles, ubicado al lado suroriental del embalse, se caracteriza por estar asociado al bosque de referencia (D), y en él se muestrearon cuatro puntos (1C, 2C, 3C y P1193). El punto 1C se caracteriza por la cobertura de pajonal donde se observaron las especies raque, curubo, pino patula, laurel, encenillo, arrayan, retamo y mora silvestre. El punto 2C se caracteriza por la cobertura de helechos y la presencia de las especies aliso, arrayan, laurel, roble, gaque y pino colombiano, con alturas no mayores a 40 cm (Fig. 30). El punto 3C se caracteriza por el mosaico entre las plantaciones existentes de pino patula, con alturas mayores a 15 m, y las zonas donde se realizó tala raza de las plantaciones existentes y que se encuentran en proceso de restauración con especies nativas del bosque alto andino, como aliso, tuno y garrocho, que se combinan con la regeneración del pino patula (Fig. 31). El punto P1193 se caracteriza por la cobertura densa de la especie retamo espinoso.

En cuanto al bosque de referencia (D) se pudo identificar en los puntos 1D y 2D que su cobertura es de vegetación nativa con alturas entre 5 y 10 m (Fig. 32), mientras que en el punto 3D la cobertura es plantación de pino patula con alturas de 15 m y diámetro de 80 cm aproximadamente.



Fig. 27. Núcleo A – Guanquica, cobertura vegetación nativa, punto 1A.



Fig. 28. Núcleo B – Chapinero, cobertura pajonal y regeneración de pino, punto 1B.



Fig. 29. Núcleo B – Chapinero, cobertura vegetación densa de porte alto, punto 2B.



Fig. 30. Núcleo C – Laureles, cobertura helechos, punto 2C.



Fig. 31. Núcleo C – Laureles, cobertura mosaico plantación pino y tala raza, punto 3C.



Fig. 32. Bosque de referencia (D), cobertura vegetación nativa de porte alto, punto 1D.

3. DISCUSIÓN

Al comparar los resultados de la aplicación de los índices de vegetación a las imágenes Landsat-8 y Sentinel-2 con los datos tomados en campo para verificación de coberturas, se puede afirmar que el porte y la altura de la cobertura vegetal influyen en el valor de reflectancia de la imagen.

Las coberturas bajas, como pajonales o especies establecidas con alturas menores a 50 cm, pueden ser diferenciadas de bosque denso o plantaciones con alturas superiores a 10 m. También es fácil identificar el patrón de cultivos y pastos manejados por medio de la aplicación de estos índices.

El índice NDVI, siendo el más usado en estudios de vegetación, generaliza la superficie con cobertura vegetal y solo distingue claramente los parches de suelo desnudo o con poca vegetación; siguiendo este mismo comportamiento se encuentra el índice RVI, que también presenta la información de manera general.

Por otro lado los índices SR y GI identifican la variación en superficies vegetales, observándose un comportamiento espectral diferente entre coberturas bajas y bosque denso. El índice SAVI no hace diferenciación entre tipos de vegetación, los valores correspondientes a estas coberturas no presentan una alta variación.

Los índices que tiene como denominador la banda del infrarrojo cercano (R_{NIR}) generalizan las coberturas vegetales, mientras que los índices que son calculados a partir de bandas del visible (R_{green} o R_{red}) como denominador distinguen los valores de reflectancia de dichas coberturas, siendo diferente el comportamiento de individuos jóvenes y de porte bajo con el de individuos adultos y de porte alto.

Comparando estos resultados con otras investigaciones se obtuvo que, una evaluación de diferentes índices de vegetación para estimar parámetros bioquímicos y estructurales en plantaciones del género *Pinus* establecidas en Almería y Huelva, España, concluyó que uno de los índices más adecuados para la estimación de área foliar es el índice SR, por su alta correlación con los cambios en densidad, estructura y defoliación que influyen en el crecimiento de la plantación [22].

Por otro lado el estudio de índices de vegetación a partir de imágenes aéreas realizado en la provincia de Ciudad Real, España, demostró la semejanza entre los índices NDVI y RVI a través de un análisis de correlación, indicando una relación directa y fuerte entre los dos índices [21].

En cuanto a tesis elaboradas en este campo, se identificó la evaluación del contraste espacio – temporal de indicadores hidrológicos derivados a partir de teledetección realizado en la Cuenca del Río Segura, España, donde se expuso que el índice NDVI a nivel de la cuenca tiene mejor contraste y una distribución espacial de la vegetación más realista que el índice SAVI [24].

También la tesis de maestría sobre la aplicación de índices de vegetación derivados de imágenes Landsat-7 para la caracterización de la cobertura vegetal en la provincia de Loja, Ecuador, explicó que los índices NDVI y SAVI permiten caracterizar y discriminar los diferentes tipos de cobertura vegetal, pero el índice SAVI presenta una menor discriminación de la vegetación que el índice NDVI [23].

Para Colombia se relaciona la investigación sobre estimación de biomasa aérea forestal en robledales del departamento de Antioquia utilizando teledetección, donde se concluye que no es posible estimar la biomasa de coberturas de vegetación arborea con el uso de índices de vegetación como NDVI o SAVI, debido a los problemas de saturación que presentan [25].

4. CONCLUSIONES

La evaluación de los procesos de restauración llevados a cabo en el PFEN muestra una adaptación de las especies aliso, arboloco, arrayan, cedro, hayuelo, laurel y roble, asociándose a coberturas de pajonal y vegetación propia del bosque alto andino. En los núcleos donde se realizó tala raza y que se encuentran asociados a las plantaciones maduras de pino patula, la regeneración de esta especie se está dando de manera masiva, por lo tanto deben enfocarse esfuerzos para que no genere competencia a las especies nativas establecidas.

Frente a esta evaluación, el uso de imágenes satelitales y el cálculo de índices de vegetación constituyen una herramienta para el seguimiento de plantaciones, cultivos y procesos de restauración en áreas de importancia ecológica en grandes extensiones, evidenciando comportamientos anómalos en el desarrollo de la vegetación.

En cuanto a los índices de vegetación, el índice NDVI generaliza la superficie con cobertura vegetal y solo distingue los parches de suelo desnudo o con poca vegetación, al igual que el índice RVI. Los índices SR y GI identifican la variación en superficies vegetales, observándose un comportamiento espectral diferente entre coberturas bajas y bosque denso. Por otro lado el índice SAVI no hace diferenciación entre tipos de vegetación.

Los resultados obtenidos deben ser corroborados con trabajo de campo para calibrar los resultados e identificar las características de la vegetación o las deficiencias que afectan la producción de clorofila, traducándose en su respuesta espectral.

La aplicación de estos índices puede generar alertas tempranas en las anomalías de las coberturas vegetales, permitiendo la toma de decisiones para su manejo por medio de fertilización, riego o la mitigación de los factores externos que pueden afectar su desarrollo.

REFERENCIAS

- [1] Vargas, O. (2007). Guía metodológica para la restauración ecológica del bosque alto-andino. Bogotá D.C., Colombia: Grupo de Restauración Ecológica, Departamento de Biología, Universidad Nacional, pp. 194.
- [2] Gutiérrez, N. (2012). Estado de la vegetación en núcleos de restauración utilizados para el restablecimiento del bosque alto-andino del Parque Forestal Embalse del Neusa, Cundinamarca, Colombia. (Tesis Pregrado). Facultad de Estudios Ambientales y Rurales, Carrera de Ecología, Pontificia Universidad Javeriana.
- [3] Anderson, M. (1953). Plantación en grupos espaciados. *Unasylva*, 7(2), 61-70.
- [4] Corbin, J.D. & Holl, K.D. (2012). Applied nucleation as a forest restoration strategy. *Forest Ecology & Management*, 265, 37-46.
- [5] Vargas, O. (2011, junio). "Los pasos fundamentales en la restauración ecológica". Presentado en I Congreso Colombiano de Restauración Ecológica y II Simposio Nacional de Experiencias en Restauración Ecológica, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C., Colombia.
- [6] Chuvieco, E. (1998). El factor temporal en teledetección: evolución fenomenológica y análisis de cambios. *Revista de Teledetección*, 10, 1-9.
- [7] Haboudane, D., Miller, J.R., Tremblay, N., Zarco-Tejada, P.J. & Dextraze, L. (2002). Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agricultura. *Remote Sensing of Environment*, 81, 416-426.
- [8] Gilabert, M.A., González-Piqueras, J. & García-Haro, J. (1997). Acerca de los índices de vegetación. *Revista de Teledetección*, 8, 1-10.
- [9] Manrique, E.G. (1999, septiembre). Índice de vegetación. Aplicación del NDVI. En *Teledetección. Avances y Aplicaciones*. VIII Congreso Nacional de Teledetección. Albacete, España.
- [10] Jackson, R.D., Slater, P.N. & Pinter, P.J. (1983). Discrimination of growth and water stress in wheat by various vegetation indices through clear and turbid atmospheres. *Remote Sensing of Environment*, 13, 187-208.
- [11] Bannari, A., Morin, D., Bonn, F. & Huete, A. (1995). A review of vegetation indices. *Remote Sensing Reviews*, 13, 95-120.
- [12] JORDAN, C.F. (1969). Derivation of leaf área index from quality of light on the forest floor. *Ecology*, 50, 663-666.

- [13] Rouse, J., Haas, R., Schell, J. & Deering, D. (1973). Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. Third ERTS Symposium, NASA SP-351, 1,309–317.
- [14] Daughtry, C.S., Walthall, C.L., Kim, M.S., Brown, E. & McMurtrey, J.E. (2000). Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 74, 229-239.
- [15] Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, CAR. (2009). Contrato de compraventa No. 371 del 03 de junio de 2009 celebrado entre la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca – CAR y Geoambiente LTDA.
- [16] Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, CAR. (2013). Convenio Institucional de Asociación No. 1219 de 2013 celebrado entre la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca – CAR y la Pontificia Universidad Javeriana.
- [17] Isla, R. & López-Lozano, R. (2005). Comparación de distintos índices de vegetación para detectar deficiencias de nitrógeno en maíz. *Revista de Teledetección*, 24, 5-9.
- [18] Meneses-Tovar, C.L. (2011). El índice normalizado diferencial de la vegetación como indicador de la degradación del bosque. *Unasyuva*, 238, 62(2), 39-46.
- [19] Fernández, D., Martín, M.P., Vilar, L. & Pacheco-Labrador, J. (2015). Estimación del contenido de humedad de la vegetación herbácea en una zona de dehesa a partir de imágenes hiperespectrales adquiridas por el sensor aeroportado CASI. *GeoFocus*, 16, 177-204.
- [20] Bocco, M., Ovando, G., Sayago, S. & Willington, E. (2013). Simple models to estimate soybean and corn percent ground cover with vegetation indices from modis. *Revista de Teledetección*, 39, 1-9.
- [21] Díaz, J. (2015). Estudio de Índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión. (Tesis Maestría). Facultad de Geografía e Historia, Máster en Tecnologías de la Información Geográfica, Universidad Complutense de Madrid.
- [22] Navarro, R. M. & Hernández, R. (septiembre, 2009). “Cartografía de variables eco fisiológicas en repoblaciones de pino a partir de datos hiperespectrales”. Presentado en V Congreso Forestal Español, Montes y Sociedad: Saber qué hacer, Ávila, España.
- [23] Gonzaga, G. (2014). Aplicación de índices de vegetación derivados de imágenes satelitales Landsat 7 ETM+ y ASTER para la caracterización de la

cobertura vegetal en la zona centro de la Provincia de Loja, Ecuador. (Tesis Maestría). Facultad de Ingeniería y Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Magíster en Geomática, Universidad Nacional de La Plata.

- [24] Esparza, J. (2013). Contraste espacio - temporal de indicadores de interés hidrológico derivados desde teledetección. (Tesis Pregrado). Escuela de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos y de Ingeniería de Minas, Ingeniería Técnica de Obras Públicas Especialidad en Hidrología, Universidad Politécnica de Cartagena.

- [25] Aguas, C. (2016). Estimación de biomasa aérea forestal en bosque de robledales del altiplano norte de Antioquia, utilizando teledetección. (Tesis Maestría). Facultad de Minas, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, Maestría Medio Ambiente y Desarrollo, Universidad Nacional de Colombia.