



**UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
NÚCLEO DE MONAGAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA  
COMISIÓN DE TRABAJOS DE GRADO  
MATURÍN, ESTADO MONAGAS**

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL VIGOR DE LA  
VEGETACIÓN EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO AMANA PARA EL  
PERIODO 2013-2017.**

**TRABAJO DE GRADO  
MODALIDAD INVESTIGACIÓN**

**PRESENTADO POR  
BR. RICARDO ANDRÉ BELMONTE CHARMEL  
C.I.: 21200557**

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERO AGRÓNOMO**

**MATURÍN, ABRIL DE 2018**



UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
NÚCLEO DE MONAGAS

ESCUELA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AGRONÓMICA  
SUB-COMISIÓN DE TRABAJO DE GRADO

ACTA DE EVALUACIÓN DEL TRABAJO DE GRADO

CTG-EIA-IA- 2018

MODALIDAD: TESIS DE GRADO

ACTA N° 1875

En Maturín, siendo las 11:00 (a.m.) del día 20 de abril del 2018 reunidos en la Sala de Economía Agrícola Campus: Los Guaritos del Núcleo de Monagas de la Universidad de Oriente, los miembros del jurado profesores: Victor Malavé (Asesor Académico), Héctor Castellanos (Jurado), Luis Daniel Andérico (Jurado). A fin de cumplir con el requisito parcial exigido por el Reglamento de Trabajo de Grado vigente para obtener el Título de Ingeniero Agrónomo, se procedió a la presentación del Trabajo de Grado, titulado: "EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL VIGOR DE LA VEGETACIÓN EN LA CUENCA ALTA DEL RIO AMANA PARA EL PERIODO 2013-2017" Por el Bachiller: RICARDO ANDRÉ BELMONTE CHARMEL, C.I: 21.200.557. El jurado, luego de la discusión del mismo acuerdan calificarlo como:

APROBADO

\_\_\_\_\_  
Prof. Héctor Castellanos. MSc.  
C.I: 4.259.885  
Jurado

\_\_\_\_\_  
Prof. Luis Daniel Andérico. MSc.  
C.I: 4.619.571  
Jurado

\_\_\_\_\_  
Prof. Víctor Malavé. MSc.  
C.I: 8.895.244  
Asesor Académico

\_\_\_\_\_  
Prof. Nelson José Morúaño Mata. Dr.  
C.I: 4.505.457  
Sub-Comisión de Trabajo de Grado

\_\_\_\_\_  
Prof. Jesús Acosta. MSc.  
C.I: 11.005.240  
Jefe de Departamento (E)

Según establecido en resolución de Consejo Universitario N° 034/2009 de fecha 11/06/2009 y Artículo 13 Literal J del Reglamento de Trabajo de Grado de la Universidad de Oriente. **NOTA:** Para que esta acta tenga validez debe ser asentada en la hoja N°- XXX del XX° libro de Actas de Trabajos de Grado del Departamento de Ingeniería de Agronomía, EIA de la Universidad de Oriente y estar debidamente firmada por el (os) asesor (es) y miembros del jurado.

DEL PUEBLO VENIMOS / HACIA EL PUEBLO VAMOS

## DEDICATORIA

A mis padres **Meyra De La Caridad Charmel Padrón** y **Ricardo Antonio Belmonte Pérez** por dedicar todo lo que estuviese a su alcance para ayudarme en lo que fuese necesario y por nunca dejar de estar, son mi gran ejemplo a seguir.

A mi hermana **Brigsmeri Ariannis Belmonte Charmel**, por ser una pieza fundamental junto a mis padres, por estar en todo momento, sigamos por el buen camino.

A toda mi **Familia** porque de alguna u otra forma siempre hubo un consejo de su parte para seguir luchando por todo lo bueno.

**Ricardo André Belmonte Charmel**

## AGRADECIMIENTOS

A **Dios** principalmente por no dejar que decayera en la lucha por tan anhelado logro, por darme salud, sabiduría y perseverancia para superar cada obstáculo que se me presentó en este camino.

A mi **Familia** por estar allí, apoyar incondicionalmente y aconsejarme en todo momento.

A mi asesor **Víctor H. Malavé Girón** por permitirme ser parte de este proyecto, por su gran paciencia, consejos y apoyo.

A las **Amistades** que logré cosechar en nuestra casa de estudio, principalmente en la carrera, fueron apoyo fundamental a lo largo de la misma, tanto deportiva, como académicamente, esperemos continúe la hermandad de Agronomía.

A los **Profesores** que compartieron sus conocimientos y anécdotas de enseñanza conmigo y mis compañeros.

A la **Escuela de Ingeniería Agronómica** por la exigencia que tiene sobre nosotros sus estudiantes para lograr convertir a bachilleres en grandes profesionales.

**Ricardo André Belmonte Charmel**

## ÍNDICE GENERAL

<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>iii</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>iv</b>
<b>ÍNDICE GENERAL</b> .....	<b>v</b>
<b>ÍNDICE DE CUADROS</b> .....	<b>vii</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>viii</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>x</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>xi</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>2</b>
OBJETIVO GENERAL.....	2
OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	2
<b>MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>3</b>
ANTECEDENTES.....	3
LA CUENCA COMO UNIDAD TERRITORIAL.....	5
PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS .....	6
TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO DIGITAL .....	11
TELEDETECCIÓN.....	12
NATURALEZA DE LA RADIACIÓN.....	14
SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG).....	16
ÍNDICE DE VEGETACIÓN .....	16
Índice de vegetación de monitoreo ambiental global (GEMI) .....	18
Índice de Vegetación Mejorado (EVI) .....	18
Índice de Vegetación Resistente a la Atmósfera (ARVI) .....	19
REFLECTIVIDAD DE LAS SUPERFICIES NATURALES. ....	20
Reflectividad del suelo.....	20
Reflectividad del agua .....	22
Repuesta del agua .....	22
Reflectividad de la vegetación .....	23
SATÉLITE LANDSAT .....	25
Landsat 8.....	25
Diferencias y semejanzas de Landsat 8 .....	27
El futuro de LDCM (Landsat 8) .....	30
Instrumentos en Landsat 8 .....	30
Sensor OLI .....	31
Sensor TIRS .....	32
IMÁGENES DE SATÉLITES .....	34
Corrección atmosférica para imágenes de satélites .....	36
SOFTWARE UTILIZADO PARA EL PROCESAMIENTO DE IMÁGENES DE SATÉLITE.....	39

COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE PEARSON .....	40
<b>MARCO METODOLÓGICO.....</b>	<b>43</b>
UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO .....	43
MATERIALES A USAR EN LA INVESTIGACIÓN .....	43
METODOLOGÍA.....	44
CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS .....	48
CÁLCULO DE LOS ÍNDICES DE VEGETACIÓN.....	50
<b>DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....</b>	<b>62</b>
PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS .....	62
ÍNDICES DE VEGETACIÓN.....	63
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>84</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>85</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>91</b>
<b>HOJAS METADATOS.....</b>	<b>95</b>

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Características de la Región Espectral. ....	15
Cuadro 2. Características más importantes de los Índices de Vegetación. ...	17
Cuadro 3. Caracterización de los factores externos y factores internos que interfieren en la reflectividad de las cubiertas vegetales. ....	25
Cuadro 4. Especificaciones de Productos LDCM a Nivel 1. ....	28
Cuadro 5. Rangos espectrales y tamaños de píxel de bandas en el sensor OLI.....	32
Cuadro 6. Rangos espectrales y tamaños de píxel de las bandas en el sensor TIRS. ....	34
Cuadro 7. Escenas disponibles descargadas desde el visualizador global (glovis).....	45
Cuadro 8. Parámetros Morfométricos de la cuenca alta del río Amana.....	62
Cuadro 9. Resultados del cálculo del Índice de Vegetación Resistente a la Atmosfera (ARVI) calculado sobre bandas corregidas por el método de Reflectividad usando el software R.....	64
Cuadro 10. Resultados del cálculo del Índice de Vegetación Mejorado (EVI) calculado sobre bandas corregidas por el método de Reflectividad usando el software R. ....	65
Cuadro 11. Resultados del cálculo del Índice de Vegetación Ambiental Global (GEMI) calculado sobre bandas corregidas por el método de Reflectividad usando el software R. ....	66
Cuadro 12. Resumen del Análisis de Varianza que muestra las diferencias estadísticamente significativas entre los tres índices de vegetación.....	81
Cuadro 13. Nivel de significancia para rangos de p-value. ....	81
Cuadro 14. Resultados que muestran la desviación estándar para los tres índices de vegetación.....	82

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tipificación de una Cuenca Hidrográfica. ....	6
Figura 2. Longitudes de Ondas en el Espectro Electromagnético. ....	15
Figura 3. Firma espectral de un suelo desnudo con distintos porcentajes de humedad. ....	21
Figura 4. Reflectividad típica de la vegetación, el suelo y el agua. ....	23
Figura 5. Espectros de reflectividad y transmisividad de una hoja sana. ....	24
Figura 6. Promedio de la Respuesta Espectral Relativa en LDCM. ....	29
Figura 7. Diagramas de dispersión. ....	40
Figura 8. Ubicación geográfica para la Cuenca Alta del Río Amana (Mapa Cartográfico 7345 y 7346). ....	43
Figura 9. Índice de Vegetación Resistente a la Atmosfera en la cuenca alta del Río Amana para el 31 de julio del 2013. ....	67
Figura 10. Histograma que muestran la frecuencia para ARVI en la cuenca alta del Río Amana para el 31 de julio del 2013. ....	68
Figura 11. Índice de Vegetación Mejorado en la cuenca alta del Río Amana para el 31 de julio del 2013. ....	69
Figura 12. Histograma que muestran la frecuencia para EVI en la cuenca alta del Río Amana para el 31 de julio del 2013. ....	70
Figura 13. Índice de Vegetación de Monitoreo Ambiental Global en la cuenca alta del Río Amana para el 31 de julio del 2013. ....	70
Figura 14. Histograma que muestran la frecuencia para GEMI en la cuenca alta del Río Amana para el 31 de julio del 2013. ....	71
Figura 15. Índice de Vegetación Resistente a la Atmosfera en la cuenca alta del Río Amana para el 26 de noviembre del 2015. ....	72
Figura 16. Histograma que muestra la frecuencia para ARVI en la cuenca alta del Río Amana para el 26 de noviembre del 2015. ....	73
Figura 17. Índice de Vegetación Mejorado en la cuenca alta del Río Amana para el 26 de noviembre del 2015. ....	73
Figura 18. Histograma que muestra la frecuencia para EVI en la cuenca alta del Río Amana para el 26 de noviembre del 2015. ....	74
Figura 19. Índice de Vegetación de Monitoreo Ambiental Global en la cuenca alta del Río Amana para el 26 de noviembre del 2015. ....	75
Figura 20. Histograma que muestra la frecuencia para GEMI en la cuenca alta del Río Amana para el 26 de noviembre del 2015. ....	76
Figura 21. Índice de Vegetación Resistente a la Atmosfera en la cuenca alta del Río Amana para el 16 de febrero del 2017. ....	76

Figura 22. Histograma que muestra la frecuencia para ARVI en la cuenca alta del Río Amana para el 16 de febrero del 2017. ....	77
Figura 23. Índice de Vegetación Mejorado en la cuenca alta del Río Amana para el 16 de febrero del 2017. ....	78
Figura 24. Histograma que muestra la frecuencia para EVI en la cuenca alta del Río Amana para el 16 de febrero del 2017. ....	79
Figura 25. Índice de Vegetación de Monitoreo Ambiental Global en la cuenca alta del Río Amana para el 16 de febrero del 2017. ....	79
Figura 26. Histograma que muestra la frecuencia para GEMI en la cuenca alta del Río Amana para el 16 de febrero del 2017. ....	80
Figura 27. Comportamiento multitemporal del Índice de Vegetación ARVI para el periodo 2013-2017. ....	82
Figura 28. Comportamiento multitemporal del Índice de Vegetación EVI para el periodo 2013-2017. ....	83
Figura 29. Comportamiento multitemporal del Índice de Vegetación GEMI para el periodo 2013-2017. ....	83



**UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
NÚCLEO DE MONAGAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA  
COMISIÓN DE TRABAJOS DE GRADO  
MATURÍN, ESTADO MONAGAS**

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL VIGOR DE LA  
VEGETACIÓN EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO AMANA PARA EL  
PERIODO 2013-2017.**

Autor: Ricardo André Belmonte Charmel

## **RESUMEN**

Con el propósito de realizar la evaluación multitemporal del vigor de la vegetación para tres índices de vegetación (ARVI, EVI y GEMI) durante el periodo 2013 a 2017 en la naciente de la cuenca hidrográfica del Río Amana la cual pertenece al estado Anzoátegui y Monagas, Venezuela; se calculó en primera instancia sus parámetros morfométricos con los cuales se caracteriza la cuenca en términos de su ubicación espacial, magnitud superficial y las características de su relieve a través de la elevación modal, elevación media y perfil del cauce principal, empleándose para este cálculo el modelo digital de elevación (SRTM), procesado por el software de Sistema de Información Geográfica GRASS-GIS. En una segunda fase se aplicaron las técnicas de procesamiento digital a imágenes obtenidas del satélite Landsat 8, procesadas con el software GRASS para el análisis gráfico y el software R para el análisis estadístico, conjuntamente con el código Tinn-R donde se compiló la mayoría de los datos. Indicando diferencia estadísticamente significativa entre los tres índices de vegetación, tanto ARVI como GEMI tuvieron un comportamiento similar, mientras que EVI resultó ser un índice con menor variabilidad. En la representación gráfica para comparar el comportamiento espacial se muestra que la vegetación con mayor vigor se situó en la parte norte de la cuenca. Para la caracterización del comportamiento multitemporal se observa que el vigor de la vegetación es creciente, es decir la línea de tendencia va en aumento con el paso del tiempo.

Palabras claves: Índice de Vegetación, GRASS, Río Amana, Cuenca, Vigor.



**UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
NÚCLEO DE MONAGAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA  
COMISIÓN DE TRABAJOS DE GRADO  
MATURÍN, ESTADO MONAGAS**

**EVALUATION OF THE BEHAVIOR OF THE VIGOR OF THE VEGETATION  
IN THE HIGH BASIN OF THE AMANA RIVER FOR THE PERIOD 2013-  
2017**

Author: Ricardo André Belmonte Charmel

**SUMMARY**

With the purpose of carrying out the multi-temporal assessment of vegetation vigor for three vegetation indices (ARVI, EVI and GEMI) during the period 2013 to 2017 in the source of the Amana river basin, which belongs to the state of Anzoátegui and Monagas, Venezuela; In the first instance, its morphometric parameters were calculated with which the basin is characterized in terms of its spatial location, surface magnitude and the characteristics of its relief through the modal elevation, average elevation and profile of the main channel, using for this calculation the digital elevation model (SRTM), processed by the GRASS-GIS Geographic Information System software. In a second phase, digital processing techniques were applied to images obtained from the Landsat 8 satellite, processed with GRASS software for graphic analysis and R software for statistical analysis, together with the Tinn-R code where the majority of the data were compiled. the data. Indicating a statistically significant difference between the three vegetation indices, both ARVI and GEMI had a similar behavior, while EVI turned out to be an index with less variability. In the graphical representation to compare the spatial behavior, it is shown that the most vigorous vegetation was located in the northern part of the basin. For the characterization of the multitemporal behavior it is observed that the vigor of the vegetation is increasing, that is to say, the trend line is increasing with the passage of time.

Keywords: Vegetation Index, GRASS, Amana River, Cuenca, Vigor.

## INTRODUCCIÓN

El avance tecnológico que se experimenta actualmente, permite alcanzar un conocimiento global de cualquier región de la superficie de la tierra a partir de imágenes provenientes de sensores a bordo de plataformas satelitales, que pueden ser de fácil acceso a cualquier persona o institución.

Sin embargo, en muchas ocasiones la información ambiental no está a disposición de las instituciones con responsabilidad en la gestión del territorio, ya sea por falta de centros de formación adecuados, o por carencia de materiales de distintos tipos; y pese a sus dificultades de aplicación, estas tecnologías pueden ofrecer una gran ayuda al país y en especial al Estado, ya que proporciona rapidez y precisión en los estudios ambientales, lo cual también facilita el levantamiento, evaluación, análisis, toma de decisión y puesta en marcha de proyectos civiles y agrícolas en espacios económicamente deprimidos y/o ecológicamente amenazados.

Esta investigación fue aplicada en zonas donde han ocurrido cambios significativos en el uso del suelo por actividades agrícola, minera y aprovechamiento forestal, para buscar predecir un contexto a futuro de aspectos como el vigor de la vegetación y su grado de estrés; la identificación de áreas forestadas – deforestadas; la separación entre distintos tipos de masas vegetales; el riesgo de incendios, entre otros; todos estos a partir de la evaluación de los Índices de Vegetación, con la peculiaridad que estos estudios ya tienen un avance en el diagnóstico previo de dichas áreas, para así poder generar conciencia y educar a las comunidades que se encuentran cerca de la cuenca alta del Río Amana, las cuales se benefician de ésta sobre todo para el uso de agua en regadío de siembra, el consumo humano y animal, entre otras actividades.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Describir el comportamiento multitemporal del vigor de la vegetación presente en la cuenca alta del río Amana para el periodo 2013-2017 empleando técnicas de procesamiento digital de imágenes de satélite sobre material espectral capturado por el programa Landsat 8.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Caracterizar la cuenca alta del río Amana en relación con sus parámetros morfométricos.
2. Identificar la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre los índices de vegetación GEMI, EVI y ARVI, calculados para el periodo 2013-2017 sobre la cuenca alta del río Amana.
3. Comparar el comportamiento espacial del vigor de la vegetación descrito por los índices GEMI, EVI y ARVI calculados sobre la cuenca alta del río Amana para el periodo 2013-2017.
4. Caracterizar el comportamiento multitemporal del vigor de la vegetación presente en la cuenca alta del río Amana según los resultados arrojados por los índices GEMI, EVI y ARVI.

## MARCO TEÓRICO

### ANTECEDENTES

Anaya, Chuvieco y Palacios. (2008), realizaron una estimación de biomasa aérea en Colombia a partir de imágenes MODIS. Concluyeron que el tratamiento de los bosques secundarios o intervenidos sigue siendo la mayor limitante en las estimaciones de biomasa, no solo por la dificultad en su separabilidad con técnicas de teledetección en el rango óptico con bosques primarios, sino también por su gran dinámica en extracciones por uso de la madera. Por otro lado la variación mensual de biomasa en los pastizales se encontró altamente correlacionada con el índice de vegetación EVI, debido fundamentalmente al aumento proporcional del verdor con la biomasa en virtud de los cambios en precipitación intra-anual. De esta forma los valores más bajos de biomasa se encuentran en la época seca en Febrero y los valores más altos en la época de lluvias de Agosto.

Bisquert, *et al.*, (2009), compararon los índices de vegetación como indicadores del riesgo de incendio con imágenes del sensor TERRA-MODIS. Concluyeron que existe una relación lineal entre la variación experimentada por tres de los índices utilizados y la frecuencia de los incendios, en concreto se observa una tendencia creciente de la frecuencia de incendios al disminuir el valor del índice de vegetación. Una disminución de los índices es un indicador de la salud de la planta, cuando no dispone de agua o nutrientes suficientes se vuelve amarillenta y el índice de vegetación disminuye, es entonces cuando la vegetación es más vulnerable a los incendios.

Carvacho y Sánchez. (2010), compararon cinco índices de vegetación (NDVI, SAVI, ARVI, GreeNDVI y EVI) determinando sus comportamientos según cubiertas, en dos periodos del año (verano e invierno) de los años 2001, 2003 y 2005. Obtuvieron que las tendencias generales de las mediciones del vigor sean semejantes, aunque existen diferencias localizadas que hace evidente la necesidad de elegir correctamente el tipo de Índice de Vegetación adecuándose al tipo de estudio.

González. (2012), comparó los índices de vegetación (NDVI, SAVI, PVI y GEMI) en su capacidad para representar el vigor de la vegetación sobre una cuenca hidrográfica, la investigación se condujo mediante un enfoque multitemporal, sobre la cuenca del Río Aragua. Concluyó que el índice de vegetación GEMI mostró menor coeficiente de variación lo que lo convirtió en el más preciso y comparando los valores de cada pixel de cada índice de vegetación se demostró que el NDVI describió mejor el vigor de la vegetación de la cuenca del Río Aragua.

Boix. (2015), evaluó mediante distintas técnicas de teledetección la producción de cítricos en la comarca del río Guadalhorce (zona de Cártama, Álora y Pizarra), al mismo tiempo evaluó las respuestas de índices de vegetación en parcelas de cítricos, con distintos niveles de cobertura y suelo, con el propósito de estimar su producción. Además de NDVI se suman el cálculo de los índices SAVI, EVI, PVI y TSAVI relacionados con la producción de cultivos para ser analizados en una serie de tiempo en el periodo 2000-2011. Como resultado se logra definir la relación o el grado de asociación que existe, en este caso particular, entre los índices espectrales derivados de imágenes de satélites y la producción de cítricos. Los resultados para NDVI son los que mejor han reflejado la cubierta de cultivo en la zona y su relación con la actividad productiva del cultivo. Los índices y TSAVI muestran

relación, esta resulta aún más débil. Sin embargo, el índice EVI muestra una alta restrictividad, con una correlación negativa o ninguna con el rendimiento.

## **LA CUENCA COMO UNIDAD TERRITORIAL**

De acuerdo con Cotler (2004) una cuenca es el área drenada por una corriente fluvial y sus tributarios. Sus componentes están definidos por:

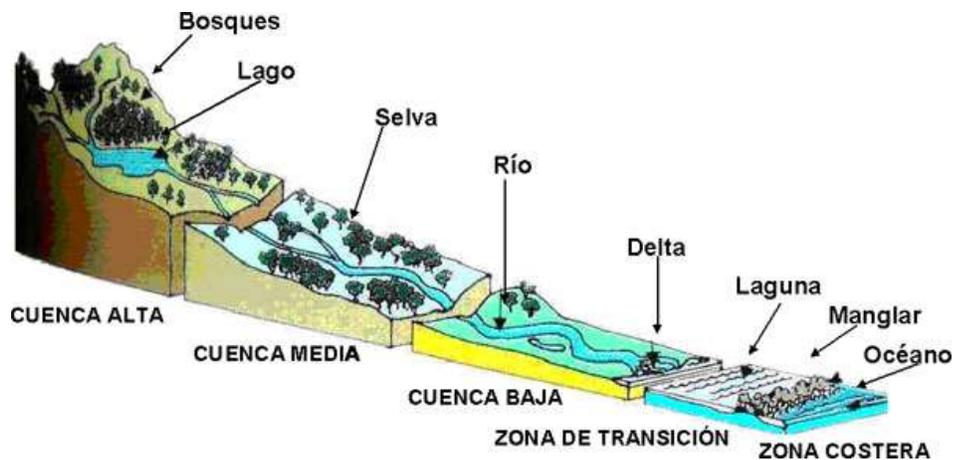
- El relieve, (la altitud y cambios en la altitud: canales o cursos principales y tributarios.)
- Laderas.
- Divisorias de aguas.
- Nivel de base.

Las cuencas y sus canales se organizan a nivel jerárquico: sub-cuencas y órdenes de cauces (ver figura 1). La delimitación de sub-cuencas está dada por la organización de los cauces, no así por las demás características del terreno (Cotler, 2004).

Para poder manejar el recurso agua en forma eficiente, es preciso considerar aspectos tales como:

- Pisos altitudinales (por los cambios en precipitación y temperatura).
- Formas del relieve y suelos (por los cambios en las rocas y materiales superficiales).
- Uso del suelo y cambio de uso de suelo.
- Cambios en la riqueza y abundancia en la biota.
- Sistemas productivos y aptitud para los mismos.
- Organización social y política para el manejo de recursos.

Todos estos componentes pueden ser inventarios analizados y cartografiados utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG) y otras técnicas complementarias (Cotler, 2004).



**Figura 1. Tipificación de una Cuenca Hidrográfica.**

(Elearning.semarnat.gob.mx, 2009).

## PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS

Los parámetros morfométricos constituyen indicadores que son utilizados para realizar un análisis cuantitativo físico de las cuencas hidrográficas. Junto con la localización espacial, constituyen el dato más útil para evaluar en forma preliminar las particularidades territoriales de una cuenca y esbozar características generales de la misma (Jardí, 1985).

Las características morfométricas de una cuenca dependen de la forma, del relieve, de la red de drenaje, del tipo de suelo, de la cobertura vegetal, y de las características geológicas de la zona (Arrieta, 2010).

Los parámetros morfométricos de mayor importancia son:

- Area de Cuenca (A):

Ludueña *et al*, (2007), señalan que corresponde a la superficie de la misma y está limitada por las divisorias de agua que permiten identificarla. Se calcula a través de la representación a escala, sobre un mapa topográfico de la cuenca. Por tanto, la medida calculada no coincidirá con la medida real, ya que se tratará del área de la proyección en el plano horizontal de la superficie de la cuenca. Cuanto mayor sea el relieve, entendiendo por relieve las diferencias de nivel, mayor será el error cometido en la medida de la superficie. De todas formas, ante la complejidad que comporta el cálculo de la superficie real y la magnitud del error que se comete, se acepta como medida de la superficie la de su proyección (Jardí, 1985).

- Longitud axial (Lax):

Es la distancia desde el punto de drenaje hasta el punto más remoto de la cuenca (Castillo, 2008).

- Perímetro (P):

Corresponde al cálculo de la longitud de la línea del borde del área ocupada por la cuenca. Tanto A como P se calculan automáticamente mediante herramientas propias de los SIG (Ludueña *et al*, 2007).

- Coeficiente de compacidad(Kc):

Relaciona el perímetro de una cuenca con el perímetro de un círculo cuya área es igual a la de la cuenca (Ludueña *et al*, 2007).

Matemáticamente se define con la siguiente fórmula:

$$K_c = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (1)$$

Donde:

$K_c$ = Coeficiente de compacidad.

$P$ = Perímetro de la cuenca (longitud de la línea de parteaguas).

$A$ = Área de la cuenca.

Este factor es indicativo de la concentración de los deflujos, donde si  $K$  se acerca a 1, se estará frente a una cuenca casi circular, mientras que un aumento en el valor del coeficiente indicará una mayor distorsión en la forma de la cuenca, volviéndose más alargada o asimétrica (Ludueña *et al*, 2007).

- Elevación media:

La elevación media de una cuenca refleja la media ponderada de las alturas sobre el nivel del mar que se encuentran segmentos del área de la cuenca (Umaña, 2002).

- Densidad de Drenaje ( $D_d$ ):

Según Ludueña *et al* (2007), este parámetro cuantifica el grado de desarrollo de un sistema hidrográfico, relacionando la longitud total de los cauces de una cuenca y el área de la misma, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$D_d = \frac{L}{A} \quad (2)$$

Donde:

L= longitud de cauces.

A= área de la cuenca.

- Factor de forma (Ff):

Arrieta (2010) la define como la relación entre el ancho medio de la cuenca y su longitud axial.

El ancho medio se calcula dividiendo el área por la longitud axial de la cuenca.

$$Ff = \frac{A}{La^2} \quad (3)$$

Donde:

A=Área de la cuenca en km<sup>2</sup>

La= Longitud axial en km.

Una cuenca con un factor de forma bajo es una cuenca alargada y tiene menos posibilidades de eventos de crecientes que otra cuenca del mismo tamaño con un factor de forma mayor.

- Pendiente Media de los cauces (P<sub>m</sub>):

Es la relación entre la altura total del cauce principal (cota máxima menos cota mínima) y la longitud del mismo (Cortolima, 2010).

$$P_m = \frac{H_{max} - H_{min}}{L} \times 100 \quad (4)$$

Donde:

$P_m$  = Pendiente media de la cuenca en %.

$H_{max}$  = Cota máxima.

$H_{min}$  = Cota mínima.

$L$  = Longitud del cauce.

- Pendientes:

Se refiere al grado de inclinación del terreno expresado en porcentaje; los rangos de pendientes son variables dentro de una región o cuenca hidrográfica. Es común hoy estimar las pendientes a través de métodos cartográficos con la ayuda de un Sistema de Información Geográfica (SIG), a partir de información de curvas de nivel (Cortolima, 2010).

- Índice de Alargamiento ( $I_a$ ):

Es la relación entre la longitud máxima de la cuenca con su ancho máximo medido perpendicularmente a la dimensión anterior (Cortolima, 2010).

$$I_a = \frac{L_{ax}}{a} \quad (5)$$

Donde:

$L_{ax}$  = Longitud axial de la cuenca.

$a$  = ancho máximo de la cuenca.

- Tiempo de Concentración (Tc):

Es el tiempo teórico que se demora una gota de agua desde la parte más alta de la cuenca hasta la desembocadura de la misma (Cortolima, 2010).

$$T_c = \left[ \frac{0.870 \times L^3}{H} \right]^{0.385} \quad (6)$$

Dónde:

L = longitud del cauce principal (km)

H = diferencia de nivel entre la divisoria de aguas y la salida (m).

## **TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO DIGITAL**

De acuerdo con Castillo (2008), existe una gran disponibilidad de herramientas tecnológicas que otorga la opción de poder estudiar un determinado espacio geográfico a través de una variada gama de técnicas modernas, como:

- La Cartografía.
- Los Sistemas de Información Geográfica (SIG).
- La Teledetección.

Estas técnicas son las herramientas necesarias para el monitoreo. El proceso de evaluar consiste en estudiar y medir las características espaciales de un objeto geográfico, mientras que el monitoreo corresponde al seguimiento de un fenómeno en particular. Generalmente se acostumbra a realizar la medición multitemporal de variables o atributos espaciales de interés (Castillo, 2008).

## TELEDETECCIÓN

Chuvienco (1996) define la teledetección espacial como la técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados sobre plataformas espaciales. Estamos suponiendo que entre la Tierra y el sensor existe una interacción energética, ya sea por reflexión de la energía solar o un haz energético artificial, ya por emisión propia. En el sentido más amplio la teledetección no engloba sólo procesos que permitan obtener una imagen desde el aire o el espacio, sino también su posterior tratamiento, en el contexto de una determinada aplicación.

La Teledetección se denomina también como Percepción Remota y se puede definir como:

“La ciencia y el arte de obtener información útil de un objeto, área o fenómeno, a través del análisis e interpretación de los datos de imágenes adquiridas por un equipo que no esté en contacto físico con el objeto, área, o fenómeno bajo investigación”, Principios Básicos de Cartografía Temática (1998) citado por IGAC (2004).

Montoya (1996), citado por IGAC (2004) lo define como el "Proceso de adquisición de información a distancia, sin que exista contacto físico entre la fuente de información (objeto) y el receptor de la misma (sensor)"

Luego de ser definida por varios autores, se puede decir en general que es un grupo de técnicas para recolectar información sobre un objeto o área sin tener que estar en contacto físico con el objeto o área.

Martini (2008), comenta que las distancias que separan al sensor del objeto o área estudiada pueden variar desde unos pocos metros hasta miles de kilómetros. Los métodos más comunes para recoger información incluyen el uso de sensores colocados sobre aviones o sobre satélites.

Según el mismo autor, las técnicas de la percepción remota son usadas ampliamente para recolectar información sobre facciones de la superficie terrestre. Los datos percibidos remotamente tienen muchos usos como por ejemplo:

- La vigilancia militar.
- Planificación del uso de la tierra urbana e industrial.
- Estudio del suelo agrícola.
- Monitoreo de desastres naturales y los cultivos.

Estas técnicas son una alternativa interesante a los métodos tradicionales de estudio del campo, por la capacidad de cubrir grandes áreas rápida y repetidamente. Puede ser usado durante toda la estación de crecimiento, incluso cuando el contacto físico directo con los cultivos es difícil o le causaría daño.

La percepción remota resulta a menudo, una información oportuna de las condiciones del cultivo ya que la detección temprana y el manejo anticipado de problemas pueden ayudar a prevenir pérdidas potenciales de cultivos o de áreas de protección vegetal o acuífera; esto provee al productor los medios para identificar problemas potenciales antes que estos se vuelvan irreversibles en términos de rendimiento o calidad de la cosecha (Martini, 2008).

## NATURALEZA DE LA RADIACIÓN

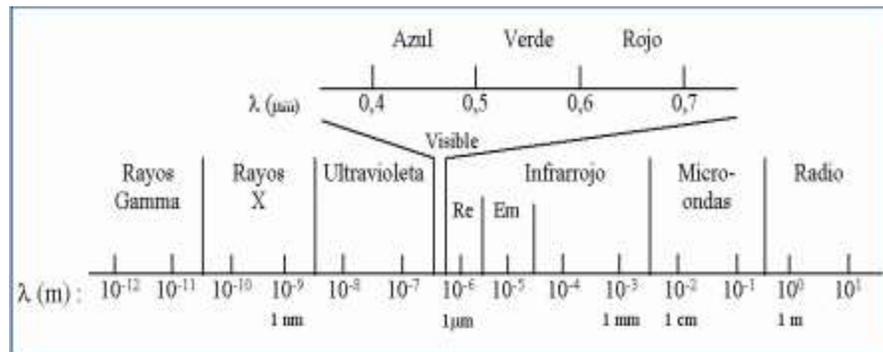
La radiación electromagnética es una forma de energía que se propaga mediante ondas que se desplazan por el espacio a la velocidad de la luz (300000 km/s) transportando cantidades discretas de energía (cuantos) (Paco, 2003).

Estas ondas se caracterizan por tener longitudes muy diferentes, desde los rayos X y gamma con longitudes de onda menores de 100 Armstrong hasta las ondas de televisión y radio con longitudes mayores de un metro.

De acuerdo con Paco (2003), el conjunto de todas las longitudes de onda se denomina espectro electromagnético. Dentro del espectro electromagnético se distinguen una serie de regiones en función de la longitud de onda. Las regiones más utilizadas por las diferentes técnicas de teledetección son:

- Luz visible.
- Infrarrojo reflejado.
- Infrarrojo térmico.
- Radar.

En la figura 2, se observa la porción de interés para las aplicaciones agronómicas que va desde el ultravioleta (UV) hasta el infrarrojo (IR). La mayor parte de la luz solar está en estas bandas y tiene longitudes de onda entre 0.2 y 0.4 micrómetros (Martini, 2008).



**Figura 2. Longitudes de Ondas en el Espectro Electromagnético.**  
(Martini, 2008).

A continuación se muestra un esquema del espectro electromagnético que representa las características de cada región espectral (cuadro 1).

**Cuadro 1. Características de la Región Espectral.**

Región Espectral (bandas)	Longitud de onda ( $\lambda$ )	Características
Rayos Gamma	< 0,03 nm	Radiación completamente absorbida por las capas superiores de la atmósfera. No se usa en teledetección
Rayos X	3 - 30 nm	Radiación completamente absorbida por la atmósfera. No se usa en teledetección
Ultravioleta	0,03 - 04 $\mu$ m	La radiación con $\lambda < 0,3 \mu$ m es completamente absorbida por la capa de ozono
Visible (azul, verde y rojo)	0,4 - 0,7 $\mu$ m	Se puede detectar a través de fotodetectores y películas fotosensibles normales (color y B/N).
Infrarrojo Próximo	0,7 - 1,3 $\mu$ m	Discrimina masas vegetales y concentraciones de humedad.
Infrarrojo Medio	1,3 - 8 $\mu$ m	Estima contenido de humedad en la vegetación y detección de focos de alta temperatura.
Infrarrojo Térmico	8 - 14 $\mu$ m	Detecta el calor proveniente de la mayor parte de la cubierta terrestre
Micro-Ondas	0,1 - 100 cm	Radiación de grandes longitudes de onda, capaces de penetrar nubes, nieblas y lluvia
Ondas de Radio	> 100 cm	Radiación con las mayores longitudes de onda del espectro. Usadas en telecomunicaciones

Arce, 2005.

## **SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)**

Según el Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (2008), el SIG se define como un conjunto de métodos, herramientas y datos que están diseñados para actuar coordinada y lógicamente así capturar, almacenar, analizar, transformar y presentar toda la información geográfica y de sus atributos con el fin de satisfacer múltiples propósitos.

Humboldt (2008), refiere que los SIG surgieron como resultado de la necesidad de disponer rápidamente de información para resolver problemas y contestar a preguntas de modo inmediato.

El desarrollo de los SIG ha consistido en integrar conocimientos e innovaciones de campos tan diversos como los sistemas de información, la geografía, la cartografía, la fotogrametría, la percepción remota, la geodesia, la estadística, la informática, así también de áreas tan diversas como las ciencias sociales y naturales (Bautista, Delfin, & Palacio, 2004).

## **ÍNDICE DE VEGETACIÓN**

Es un parámetro calculado a partir de los valores de reflectividad a distintas longitudes de onda y que pretende extraer la información relacionada con la vegetación minimizando la influencia de otros factores externos como las propiedades ópticas del suelo, la irradiación solar, etc. (Sobrino, 2000).

Según Jackson *et al* (1983) citado por Sobrino (2000) opina que el índice de vegetación ideal ha sido descrito como: "Aquel particularmente

sensible a la cubierta vegetal insensible al brillo y color del suelo y poco afectado por las perturbaciones atmosféricas, los factores medioambientales y la geometría de iluminación y de observación”.

No existe un índice de vegetación ideal y los que se encuentran en la bibliografía son diversas aproximaciones al mismo. Como más del 90% de la información espectral de una cubierta vegetal está contenida en las bandas roja e infrarroja próxima, son estas dos bandas las que se utilizan principalmente (Sobrino, 2000).

En el cuadro 2 se muestran las características más importantes de los índices mencionados los cuales son modificaciones y adaptaciones en cuanto a la interferencia del medio ambiente (suelo y efectos atmosféricos).

**Cuadro 2. Características más importantes de los Índices de Vegetación.**

<b>Índice</b>	<b>Características más relevantes</b>
<b>RVI</b>	Poco sensible a las condiciones de iluminación, pero mucho a las propiedades ópticas de la Tierra.
<b>NDVI</b>	La normalización que realiza reduce el efecto de la degradación de calibración del sensor la influencia de los efectos atmosféricos. Presenta una gran sencillez matemática.
<b>PVI</b>	Intenta minimizar el efecto del suelo en la estimación de la vegetación.
<b>SAVI</b>	Minimiza el efecto de la reflectividad del suelo.
<b>MSAVI</b>	Minimiza el efecto del suelo desnudo en el SAVI.
<b>TSAVI</b>	Es una transformación del SAVI, Introduciendo los parámetros de la línea de suelo, dándole así al índice un carácter global.
<b>GEMI</b>	Minimiza la información relativa de los efectos atmosféricos sin alterar la información sobre la vegetación.
<b>ARVI</b>	Minimizar el efecto de la atmósfera.
<b>EVI</b>	Reducir la dependencia del NDVI a las cambiantes condiciones atmosféricas.

Sobrino (2000).

De acuerdo a los índices mencionados en la tabla anterior se han seleccionado los siguientes índices de vegetación los cuales se detallarán a continuación:

Índice de Monitoreo Ambiental Global (GEMI).

Índice de Vegetación Mejorado (EVI).

Índice de Vegetación Resistente a la Atmósfera (ARVI).

### **Índice de vegetación de monitoreo ambiental global (GEMI)**

De acuerdo al manual de GRASS GIS 7.0.5, el GEMI denominado Global Environmental Monitoring Index utiliza 2 bandas (redchan, nirchan) y se calcula de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \text{GEMI} = & ((2 * ((\text{nir} * \text{nir}) - (\text{red} * \text{red})) + \\ & 1.5 * \text{nir} + 0.5 * \text{red}) / (\text{nir} + \text{red} + 0.5)) * \\ & (1 - 0.25 * (2 * ((\text{nir} * \text{nir}) - (\text{red} * \text{red})) + \\ & 1.5 * \text{nir} + 0.5 * \text{red}) / (\text{nir} + \text{red} + 0.5))) - \\ & ((\text{red} - 0.125) / (1 - \text{red})) \end{aligned} \quad (7)$$

### **Índice de Vegetación Mejorado (EVI)**

De acuerdo al manual de GRASS GIS 7.0.5, el EVI denominado Enhanced Vegetation Index utiliza 3 bandas (bluechan, redchan, nirchan) y se calcula de la siguiente manera:

$$\text{EVI} = 2.5 * (\text{nir} - \text{red}) / (\text{nir} + 6.0 * \text{red} - 7.5 * \text{blue} + 1.0) \quad (8)$$

### Índice de Vegetación Resistente a la Atmósfera (ARVI)

Por otro lado, el ARVI conocido como Atmospheric Resistant Vegetation Index, es resistente a los efectos atmosféricos (en comparación con el NDVI) y se logra mediante un proceso de autocorrección para el efecto atmosférico en el canal rojo, usando la diferencia en el resplandor entre los canales azul y rojo. Utiliza 3 bandas ( redchan, nirchan, bluechan ) y se calcula de acuerdo a la siguiente formula:

$$ARVI = (nir - (2.0 * red - blue)) / (nir + (2.0 * red - blue)) \quad (9)$$

Según Rodríguez (2004) el **ARVI** (Índice de Vegetación Resistente a la Atmósfera), se utiliza para minimizar el efecto de la atmósfera. Se puede usar la fórmula del Índice de Vegetación Atmosféricamente Resistente ya que es 4 veces más sensible que el NDVI a los efectos atmosféricos, que tiene en cuenta las diferencias de dispersión entre la banda roja y la banda azul.

El ARVI está diseñado con el fin de reducir la dependencia del NDVI a las cambiantes condiciones atmosféricas y se ha propuesto un nuevo índice que ha demostrado estar menos afectado que el NDVI por tales efectos. Este índice se basa en el proceso de auto-corrección del efecto atmosférico sobre la banda roja (TM3) mediante la inclusión en la expresión matemática de la banda azul (TM1), que es la que más se ve afectada por la dispersión atmosférica.

Aunque según sus autores los resultados son muy buenos, este Índice de Vegetación presenta el inconveniente de no poder utilizarse si el sensor no dispone de una banda en la región azul del espectro, lo cual es muy

normal. En realidad, se puede utilizar sólo con Landsat TM porque es el único sensor de uso extendido que cuenta con una banda en la región azul del espectro.

## **REFLECTIVIDAD DE LAS SUPERFICIES NATURALES.**

Todos los cuerpos reflejan o emiten los flujos energéticos bajo forma de radiación. La variación relativa de la energía reflejada o emitida en función de la longitud de onda constituye lo que se denomina su signatura espectral. Cada superficie tiene su curva de reflectividad y emisividad espectral característica. (Sobrino, 2000).

### **Reflectividad del suelo**

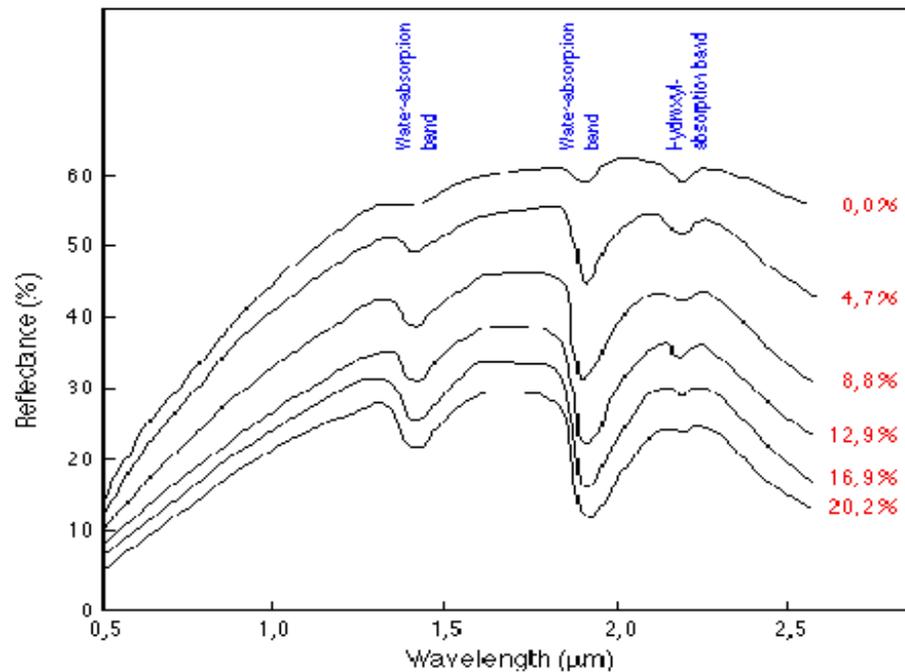
Sobrino (2000), emite que en la teledetección es importante el estrato más superficial del suelo pero es esencial conocer las propiedades de los estratos más profundos sobre todo cuando tienen lugar procesos de erosión, teniendo en cuenta que el primer horizonte ya habrá desaparecido.

Destaca Sobrino (2000), que la reflectividad de los suelos aumenta con la longitud de onda. Sin embargo, la textura, el contenido en agua, la cantidad de materia orgánica, el contenido en óxidos de hierro y la rugosidad de los suelos hacen que varíen las curvas de reflectividad de los suelos, por lo que las curvas de reflectividad de los suelos son como menos complejas que las de la vegetación debido a que en los suelos no existe transmisión.

Los suelos desnudos (sin vegetación) muestran una curva casi horizontal pero suavemente ascendente desde el visible al infrarrojo próximo.

La respuesta espectral presenta cierta variabilidad según las propiedades físico-químicas del suelo. (Sobrino, 2000).

De acuerdo a la superficie reflejada se puede mostrar diferentes formas de firmas espectrales la cual se define como la radiación reflejada en función de la longitud de onda reflejan la radiación de manera distinta en varios canales; En la figura 3 se muestra la firma espectral de un suelo desnudo con distintos porcentajes de humedad (Eduspace.esa.int, 2009).



**Figura 3. Firma espectral de un suelo desnudo con distintos porcentajes de humedad.**

(Caece.edu.ar, 2009).

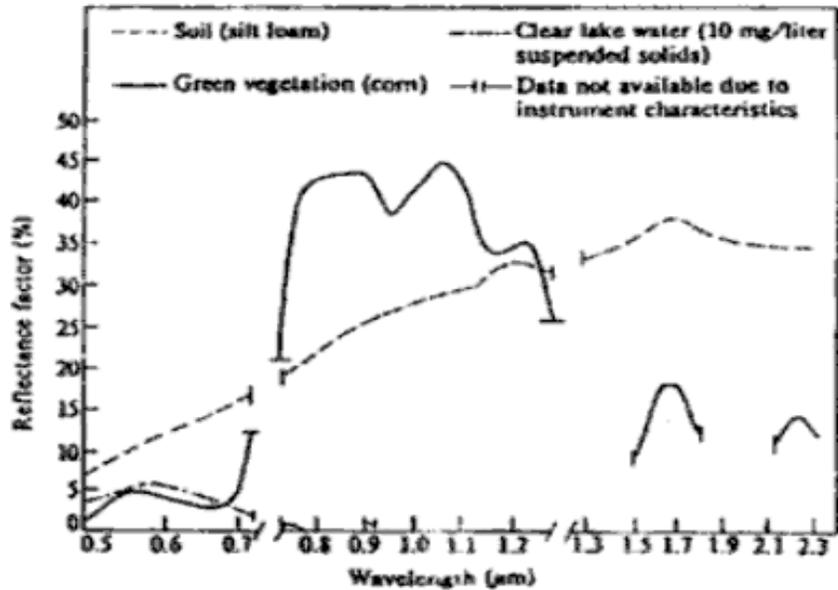
### **Reflectividad del agua**

Las superficies de agua absorben o transmiten la mayor parte de la radiación visible y prácticamente toda en longitudes de onda superiores a los 0,7  $\mu\text{m}$  (nanómetros). Las bandas del infrarrojo próximos resultan fundamentales para discriminar las superficies acuosas. La variabilidad en la reflectividad del agua depende de la profundidad, el contenido en materiales disueltos (clorofila, arcillas, nutrientes) y la rugosidad de la superficie (Sobrino, 2000).

### **Repuesta del agua**

La respuesta del agua varía según la longitud de onda, dentro del espectro óptico e infrarrojo, el agua tiende a absorber la energía a medida que la longitud de onda aumenta, en el caso de las microondas, éstas son reflejadas especularmente si el agua está tranquila, cuando hay turbulencia u oleajes la energía es reflejada en varias direcciones. También está influenciada por la profundidad y el contenido de sedimentos que contribuyen a reflejar la energía cuando esta llega hasta las partículas o al fondo del agua (Ciat.cgiar.org, 2009).

En la figura 4 se muestra la reflectividad típica de las tres cubiertas donde se puede apreciar la diferencia entre ellos para cada longitud de onda. De manera general se puede decir que el agua absorbe casi toda la energía incidente en las longitudes de onda del infrarrojo próximo y medio, por lo que hay muy poca porción de energía incidente que pueda ser reflejada en esas longitudes de onda, lo que nos permite distinguir muy bien en una imagen de satélite el agua de la vegetación y del suelo ya que su reflectividad es mucho menor que la de los otros elementos (Gandia, 1991).



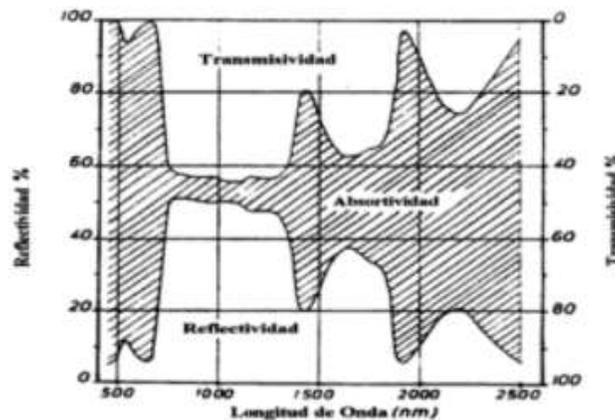
**Figura 4. Reflectividad típica de la vegetación, el suelo y el agua.**  
(Gandia y Melia, 1991)

### Reflectividad de la vegetación

#### a) *Hojas*

Sobrino (2000), refiere que para la vegetación sana (hojas verdes) la respuesta espectral puede presentarse como en la figura 5. Donde se muestra el comportamiento de los espectros de reflectividad y transmisividad los cuales se puede definir como típico, teniendo en cuenta que puede sufrir variación en función de los factores que afectan a las propiedades espectrales de las hojas y entre los que se destacan:

- La estructura anatómica de las hojas.
- Su edad que hace que desaparezca la clorofila.



**Figura 3. Espectros de reflectividad y transmisividad de una hoja sana.**  
(Sobrino, 2000).

Esto hace que aumente la reflectividad en el amarillo y el rojo, el contenido de agua en las hojas; lo que implica en el caso de hojas secas un aumento de la reflectividad que es más acusado en el Infrarrojo Medio (MIR) que en el Visible Vis(VIS) e Infrarrojo Próximo (PIR), la deficiencia de los que afectan a la tenencia en clorofila y a la estructura anatómica de la hoja, los ataques de los parásitos, que modifican los pigmentos, producen necrosis, y afectan a los intercambios hídricos y por tanto al valor de la reflectividad medida (Sobrino, 2000).

#### **b) Cubiertas**

Es el conjunto de hojas y otros elementos vegetales con geometría más o menos compleja, suelo y sombras. En teledetección lo que realmente se observa desde satélite son las coberturas vegetales; la cual es el conjunto de hojas y otros elementos vegetales, suelo y sombras. Existen diversos factores que interfieren en la reflectividad de las cubiertas vegetales, pueden ser externos como internos. Están caracterizados en el cuadro 3 (Sobrino, 2000).

**Cuadro 3. Caracterización de los factores externos y factores internos que interfieren en la reflectividad de las cubiertas vegetales.**

Factores Externos	Factores Internos
<ul style="list-style-type: none"> <li>• La dimensión de la superficie observada.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porcentaje de cobertura del suelo</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• La altura del sol.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Orientación de los cultivos.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Angulo cenital y acimutal de observación.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geometría de la cubierta.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Presencia de nubes y Velocidad del viento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Actividad fisiológica de las plantas.</li> </ul>

(Sobrino 2000).

## **SATÉLITE LANDSAT**

Desde 1972, los satélites Landsat han recopilado información sobre la Tierra desde el espacio. Esta ciencia, conocida como la teledetección, ha madurado con el programa Landsat. El programa Landsat es una serie de misiones de la tierra por satélite de observación administrado conjuntamente por la NASA y el Servicio Geológico de EE.UU. (NASA, 2009).

### **Landsat 8**

Asegura Ariza (2013) que en la actualidad el programa se encuentra en su octava versión denominada: "Landsat Data Continuity Mission" (LDCM) es el octavo satélite de observación de la serie Landsat y continuará el legado de archivo de los anteriores satélites, convirtiéndose de esta manera en el futuro de los satélites de observación de la tierra de mediana resolución con más historia. Este programa amplía, mejora y avanza en el registro de

imágenes multispectrales, manteniendo la misma calidad de sus siete predecesores.

Tras el lanzamiento, el satélite LDCM será rebautizado como Landsat 8. Este sistema está compuesto de dos grandes segmentos:

- **El observatorio;** el cual consta de una plataforma con capacidad de carga de dos sensores de observación terrestre, el primero de ellos denominado *Operational Land Imager* (OLI) y el sensor térmico infrarrojo *Thermal Infrared Sensor* (TIRS). OLI y TIRS recogerán los datos de forma conjunta para proporcionar imágenes coincidentes de la superficie terrestre, incluyendo las regiones costeras, hielo polar, las islas y las zonas continentales. El OLI es un instrumento construido por la empresa Ball Aerospace & Technologies Corporation en Boulder, Colorado y el TIRS es un instrumento que fue construido por la NASA en el centro de vuelo espacial Goddard en Greenbelt, Md. Además, el LDCM seguirá la misma secuencia de trayectoria (también conocida como “paths” o rutas de acceso) como sus antecesores Landsat 4, Landsat 5 y Landsat 7. Esto permitirá que todos los datos del LDCM son referenciados al mismo sistema de coordenadas, continuando con el registro de datos desde hace décadas. El satélite almacena los datos del sensor OLI y TIRS en una grabadora de estado sólido incluida a bordo y transmite los datos a estaciones receptoras terrestres.
- **El sistema terrestre;** el cual proporciona la capacidad necesaria para la planificación y programación de las operaciones del LDCM y todas aquellas necesarias para administrar y distribuir los datos. La plataforma LDCM, fue construida por la empresa Orbital Sciences Corporation en Gilbert, Arizona, tiene una vida útil de 5 años, pero lleva

suficiente combustible para 10 años de operaciones. La nave orbitará de norte a sur durante el día, cruzando el ecuador a las 10 a.m., hora local, con una órbita aproximada de unas 438 millas (705 kilómetros) por encima de la Tierra (USGS, 2013).

### **Diferencias y semejanzas de Landsat 8**

De acuerdo con Ariza (2013) afirma que el satélite Landsat 8 incorpora dos instrumentos de barrido: *Operational Land Imager* (OLI), y un sensor térmico infrarrojo llamado *Thermal Infrared Sensor* (TIRS).

Las bandas espectrales del sensor OLI, aunque similares a el sensor Landsat 7 ETM +, proporcionan una mejora de los instrumentos de las misiones Landsat anteriores, debido a la incorporación de dos nuevas bandas espectrales: un canal profundo en el azul visible (banda 1), diseñado específicamente para los recursos hídricos e investigación en zonas costeras, y un nuevo canal infrarrojo (banda 9) para la detección de nubes cirrus.

Adicionalmente una nueva banda de control de calidad se incluye con cada producto de datos generado. Esto proporciona información más detallada sobre la presencia de características tales como las nubes, agua y nieve.

Por otra parte el sensor TIRS recoge dos bandas espectrales en longitudes de onda incluidas por la misma banda en los anteriores sensores TM y ETM+.

La calidad de los datos (relación de la señal en función del ruido) y la resolución radiométrica (12 bits) del OLI y TIRS es más alta que los anteriores instrumentos Landsat (8 bits para TM y ETM+), proporcionando una mejora significativa en la capacidad de detectar cambios en la superficie terrestre.

Aproximadamente se recogen 400 escenas al día, las cuales son cargadas en el servidor de USGS con el fin de que se encuentren disponibles para su descarga 24 horas después de la adquisición.

Los datos de productos Landsat 8 son totalmente compatibles con todos los datos de los productos estándar a nivel 1 (ortorectificado) creados usando Landsat 1 al Landsat 7; a continuación se describen algunas de sus especificaciones generales en el cuadro 4:

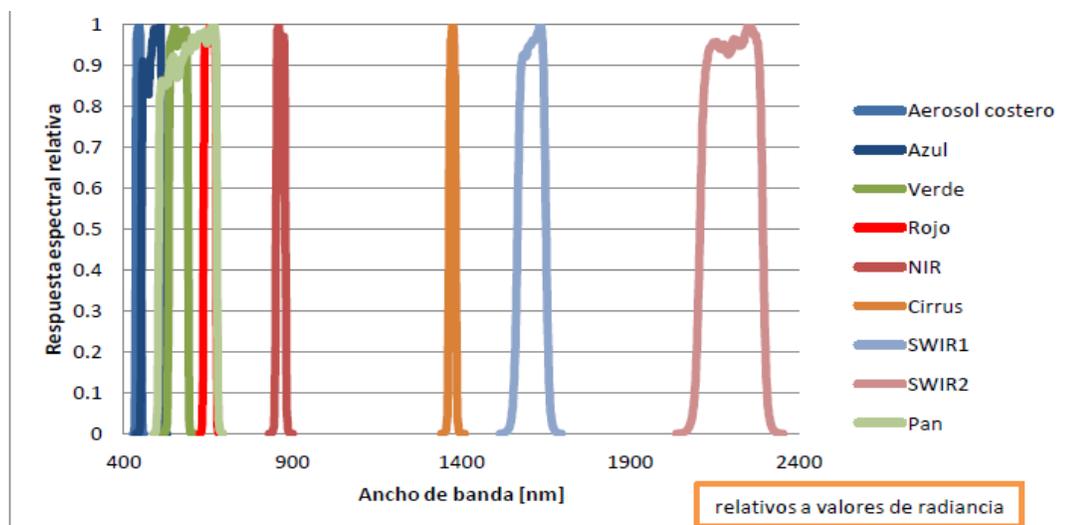
**Cuadro 4. Especificaciones de Productos LDCM a Nivel 1.**

Procesamiento:	Nivel 1 T-Corrección geométrica
Tamaño de píxel:	Bandas OLI multiespectrales 1-7,9: 30-metros Banda OLI pancromática 8: 15-metros Bandas TIRS 10-11: tomadas en 100 metros, pero remuestreadas a 30 metros para que coincida con las bandas multiespectrales de OLI
Características de los datos:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Formato de datos GeoTIFF</li> <li>• Remuestreo por convolución cúbica (CC)</li> <li>• Norte arriba (MAP) de orientación</li> <li>• Proyección cartográfica: Universal Transversal Mercator (UTM) (estereográfica polar de la Antártida)</li> <li>• Datum al Sistema Geodésico Mundial (WGS) 84</li> <li>• 12 metros de error circular, 90% de confianza exactitud global para OLI</li> <li>• 41 metros de error circular, 90% de confianza exactitud global para TIRS</li> <li>• Los valores de píxel en 16 bits</li> </ul>
Entrega de datos:	Archivo comprimido .Tar.gz y de descarga a través de HTTP
Tamaño de archivo:	Aproximadamente 1 GB (comprimido), aproximadamente 2 GB (sin comprimir)

(USGS, 2013).

Las imágenes Landsat 8 obtenidas por el sensor (OLI) y (TIRS) constan de nueve bandas espectrales con una resolución espacial de 30 metros para las bandas de 1 a 7 y 9. Una banda nueva (1) (azul-profundo) es útil para estudios costeros y aerosoles. La nueva banda (9) es útil para la detección de cirrus. La resolución para la banda 8 (pancromática) es de 15 metros. Dos bandas térmicas 10 y 11 son útiles para proporcionar temperaturas más precisas de la superficie y se toman a 100 metros de resolución. El tamaño aproximado de la escena es de 170 km de norte-sur por 183 kilómetros de este a oeste (106 km por 114 km).

La resolución espacial (o nivel de detalle) es a menudo el aspecto más interesante de una imagen de satélite, pero menos apreciado y valorado es cómo se utilizan los cambios en la energía por irradiación reflejada por los materiales de superficie con el fin de lograr identificar las características de interés. Estos aspectos pueden identificarse gracias a la respuesta espectral relativa (RSR) de cada banda como se muestra en la figura 6.



**Figura 4. Promedio de la Respuesta Espectral Relativa en LDCM.**  
(Ariza, 2013).

### **El futuro de LDCM (Landsat 8)**

El nuevo programa de la plataforma LDCM tiene fundamentalmente tres objetivos (Ariza, 2013):

- a) Recopilar y archivar datos bandas multiespectrales y térmicas de cada superficie de la tierra, cada temporada de cada año en una resolución que puede distinguir un área del tamaño de un campo de béisbol.
- b) Asegurar de que los datos de LDCM sean consistentes con los datos de las misiones Landsat anteriores, en términos de la geometría de adquisición, calibración, características de cobertura, espectral y espacial características, calidad del producto, la producción y la disponibilidad de los datos para permitir estudios de cobertura de la tierra y uso de la tierra cambian en periodos multitemporales.
- c) Distribuir productos de datos LDCM estándar sobre una base no discriminatoria y sin costo a los usuarios.

### **Instrumentos en Landsat 8**

Los dos instrumentos a bordo del LDCM, *Operational Land Imager* (OLI) y el sensor térmico infrarrojo (TIRS) representan avances evolutivos en la tecnología de sensores remotos y en su rendimiento. OLI y TIRS miden la superficie terrestre en el visible, infrarrojo cercano, infrarrojo de onda corta, e infrarrojo térmico con una resolución moderada entre 49 y 328 pies (15 y 100 metros) dependiendo de la longitud de onda espectral. La distribución de la energía observada en estas longitudes de onda revela información sobre la reflexión y emisión de superficies.

## **Sensor OLI**

El sensor *Operational Land Imager* (OLI) avanza en la tecnología de sensores Landsat, utilizando un enfoque demostrado ya por el sensor Advanced Land Imager ubicado en el satélite experimental de la NASA Observing- 1 (EO-1). OLI, utiliza un sensor del tipo "pushbroom" compuesto por una serie de baterías larga de detectores, con más de 7.000 detectores por banda espectral, alineados en su plano focal en su respectivo ancho de banda. El diseño del "pushbroom" lo hace un instrumento más sensible proporcionando una mejor información de la superficie terrestre con menos partes móviles.

Sus imágenes tienen una resolución espacial de 49 pies (15 m) pancromáticas y 98 pies (30 metros) (incluido el visible, infrarrojo cercano y el infrarrojo de onda corta) a lo largo de 115 millas (185 kilómetros) de ancho de imagen, cubriendo así amplias zonas de la tierra mientras que proporciona una resolución suficiente como para distinguir las características tales como centros urbanos, granjas, bosques y otros tipos de cubiertas del suelo.

El OLI fue diseñado para tener una vida útil de cinco años y detectará las mismas bandas espectrales de los anteriores instrumentos del Landsat (es decir sensores, TM y ETM+), con la excepción de una banda en el infrarrojo térmico. Además de las 7 bandas multiespectrales del anterior Landsat (seis de los cuales han sido refinadas) OLI agregará dos nuevas bandas espectrales, una banda azul "costera" (banda 1) y una banda en el infrarrojo de onda corta "cirros" (banda 9). Estas nuevas bandas, ayudaran a los científicos a medir la calidad del agua y facilitaran la detección de nubes

altas y delgadas que previamente han sido difíciles de observar en las imágenes Landsat.

Todas las bandas del sensor OLI se pueden adquirir en 12 bits de resolución radiométrica, 8 bandas serán de 30 metros y 1 de las bandas, la banda pancromática, es de 15 metros como se puede observar en el cuadro 5.

**Cuadro 5. Rangos espectrales y tamaños de píxel de bandas en el sensor OLI.**

Nº Banda	Descripción	Ancho de banda (nm)	Centro Tolerancia ( $\pm$ nm)	Mínimo inferior (nm)	Máximo superior (nm)
1	Aerosol costero	443	2	433	453
2	Azul	482	5	450	515
3	Verde	562	5	525	600
4	Rojo	655	5	630	680
5	NIR	865	5	845	885
6	SWIR1	1610	10	1560	1660
7	SWIR2*	2200	10	2100	2300
8	Pancromático	590	10	500	680
9	Cirrus	1375	5	1360	1390

(USGS, 2013 y NASA, 2009).

### **Sensor TIRS**

El sensor térmico infrarrojo (TIRS) fue añadido a la carga útil del LDCM cuando se hizo evidente que los gestores de los recursos hídricos se basaban en las mediciones de alta precisión de la energía térmica de la tierra obtenidas por los predecesores del LDCM – el TM del satélite Landsat 5 y *Enhanced Thematic Mapper* – Plus ETM+ del Landsat 7 – con el fin de hacer un seguimiento del uso de la tierra y el agua. La decisión de añadir el sensor

TIRS se hizo después de que el diseño de la misión se había iniciado. Los ingenieros tenían menos de cuatro años para diseñar y construir TIRS por lo que recurrieron a una nueva tecnología desarrollada por la NASA llamada *Quantum Well Infrared Photodetectors* (QWIPs).

Los detectores QWIPs están hechos de un material que es compatible con el procesamiento de silicio, lo que significa que son las mismas herramientas que utilizan en las instalaciones para hacer chips de computadora. QWIPs son muy fiables, uniformes, y muy adecuados a las necesidades del sensor TIRS.

Los satélites Landsat anteriores miden la temperatura superficial del suelo utilizando una sola banda térmica para detectar longitudes de onda largas de la luz emitida por la superficie de la tierra. Los QWIPs en el TIRS sin embargo, detectan dos segmentos del espectro infrarrojo térmico, ambos incluidos dentro de una ventana de transmisión atmosférica, con el fin de producir mejores estimaciones de la temperatura superficial.

Al igual que el sensor OLI, el TIRS es también un sensor “Pushbroom” con un 115-millas (185 kilómetros) de campo de visión (Cross-track). Con una resolución espacial de 328 pies (100 metros) de ancho, esta resolución espacial del TIRS está diseñada para captar las mediciones de consumo de agua en los campos riego, particularmente a través de las grandes llanuras de los Estados Unidos, características mostradas en el cuadro 6.

**Cuadro 6. Rangos espectrales y tamaños de píxel de las bandas en el sensor TIRS.**

Nº Band	Descripción	Ancho de banda (nm)	Centro Tolerancia ( $\pm$ nm)	Mínimo inferior (nm)	Máximo superior (nm)
10	Thermal 1	10800	200	10300	11300
11	Thermal 2	12000	200	11500	12500

(USGS, 2013 y NASA, 2009).

Una de las diferencias más importantes entre las especificaciones del OLI y el TIRS es que TIRS sólo tiene una vida útil de tres años. Esta característica se especificó con el fin de ayudar a acelerar el desarrollo del TIRS.

## IMÁGENES DE SATÉLITES

Para Paco (2003), la imagen de satélite consiste en un conjunto de matrices, una por cada canal del sensor, en la que aparecen números del 0 al 255. El cero indica que no llega nada de radiación desde ese punto y el 255 que llega el valor más alto de radiación. Estos valores se denominan niveles digitales y será necesario transformarlos en algún tipo de variable física. La transformación suele ser a través de una ecuación lineal cuyos parámetros se suministran junto con la imagen.

UNR (2009), define la imagen satelital como la representación visual de la información capturada por un sensor montado en un satélite artificial. Estos sensores recogen información reflejada por la superficie de la tierra que luego es enviada a la tierra y que procesada convenientemente entrega valiosa información sobre las características de la zona representada.

Actualmente la imagen satelital constituye una tecnología indispensable para la población y el conocimiento científico debido a las múltiples aplicaciones que ofrece y la diversidad de información que se obtiene con ella, tales como:

- Medio ambiente (detección de incendios, sequías e inundaciones).
- Agricultura (índices de vegetación, pasturas, estimación de cosechas).
- Urbano (obtención de datos que constaten el crecimiento urbano, la detección de bolsones de pobreza, demografía urbana, vías de comunicación).

Al mismo tiempo, este tipo de imagen es posible ser aplicado a distintas disciplinas, como la oceanografía, la meteorología, la hidrografía, la ecología, la física y la ecología.

Para la interpretación de las imágenes de satélites los programas más acertados serían los de análisis de imagen para el tratamiento visual y los Sistemas de Información Geografía para el análisis numérico y su combinación con otro tipo de información espacial (Paco, 2003).

Según ABRAE (2009), el análisis de las características físico naturales a través de las imágenes de satélites permite realizar entre otros estudios:

- El soporte para la agricultura de precisión con imágenes de alta resolución espacial tales como: valoración del estado fenológico de superficies cultivadas por distribución irregular de riego y fertilizantes y delimitación de áreas afectadas por plagas o enfermedades.

- La generación precisa de ortoimágenes y ortofotomapas con líneas de actualización cartográficas y posterior incorporación a los SIG.
- La elaboración de modelos digitales del terreno. Análisis de pendientes y estudios de cuencas hidrográficas.
- La evaluación de daños diversos, evaluación de impacto por sequía y delimitación de áreas afectadas por episodios de contaminación.
- El análisis y detección de cambios en la cobertura y uso de la tierra. Identificación de zonas de expansión urbana y estudios de catastro urbano, mediante la utilización de imágenes de satélite de alta resolución espacial.
- La elaboración de bloques diagramáticos e imágenes en tercera dimensión que permiten realizar pruebas o simulacros en la prevención de daños, siniestros por inundación, contaminación ambiental y riesgos geológicos.
- La obtención de soluciones específicas aplicadas a la calidad de las aguas continentales, costeras y oceánicas.
- La generación de mapas de uso de la tierra a partir de procesos de clasificación digital supervisada, con aplicación directa en la planificación urbana, rural y ordenación del territorio.

### **Corrección atmosférica para imágenes de satélites**

Según Chuvieco (1996), la radiación electromagnética se ve notablemente afectada por los distintos componentes de la atmosfera. La presencia de aerosoles y vapor de agua dispersa de una forma selectiva la radiación transmitida entre la superficie terrestre y el sensor. Por ello, la radiancia finalmente detectada por este no corresponde exactamente a la

que parte de la superficie terrestre, sino que cuenta con un porcentaje añadido, a consecuencia del efecto dispersor de la atmosfera.

El principal problema que implica esta dispersión es su carácter heterogéneo, en el espacio y en el tiempo. En otras palabras, la dispersión atmosférica no es constante en la imagen sino, que determinadas zonas pueden haber sido más afectadas que otras, en función de la diversa presencia de aerosoles o vapor de agua. Además, el efecto es dependiente de la longitud de onda, y varía entre imágenes de forma difícil de predecir. Lastimosamente, resulta muy complejo abordar una corrección rigurosa de la dispersión atmosférica, por cuanto requiere una serie de medidas simultáneas a la adquisición de la imagen.

Pese a estas dificultades, es preciso realizar, al menos, una estimación del efecto atmosférico. Esta corrección será en tres tipos de situaciones: cuando pretendan realizarse combinaciones lineales entre bandas, puesto que el efecto de dispersión, es distinto en función de la longitud de onda; cuando intenten establecerse modelos que pongan en relación los ND (*Digital Number*) con determinados parámetros físicos: temperatura, biomasa, humedad del suelo, clorofila en el agua, etc., y cuando se realicen estudios multi-temporales, puesto que la dispersión sufrida por una imagen no es comparable a la que experimenta otra adquirida en distinta fecha.

Entre los métodos propuestos para corregir el aporte de radiancia atmosférica, uno de los más sencillos es el ideado por Chávez (1988), que se denomina corrección del Histograma por sus valores mínimos (*Histogram Method*). Se asume que las áreas cubiertas con materiales de fuerte absortividad (agua, zonas en sombra), deberían presentar una radiancia espectral muy próxima a cero. En la práctica, el histograma de los ND de la

imagen siempre presenta un mínimo superior a ese valor, que se atribuye al efecto de dispersión atmosférica. La dispersión Rayleigh, la más común, afecta principalmente a las longitudes de onda más cortas, lo que confirma que ese valor mínimo puede corresponder más al efecto de la atmosfera que a la radiancia espectral proveniente de la superficie terrestre. En consecuencia, una sencilla aproximación a la corrección atmosférica consiste en restar a todos los ND de cada banda el ND mínimo de esa misma banda, situando el origen del histograma en cero:

$$ND_{ijk}' = ND_{ijk} - ND_{\min k} \quad (10)$$

Esto es, el ND del pixel (i,j) en la banda k, se ajusta restándole el ND mínimo de esa misma banda.

Recientemente se ha sugerido un método más avanzado de corrección, basado sobre éste pero teniendo en cuenta que la dispersión tiende a estar correlacionada entre bandas. Se basa en establecer una banda de referencia, la que se supone más afectada por la dispersión (TM-1 ó MSS-4, será lo más habitual). A partir del valor mínimo de esa banda, se calcula una corrección atmosférica para el resto de las bandas teniendo en cuenta dos parámetros: los valores de calibración de cada banda, y una estimación de las condiciones atmosféricas en el momento de adquisición de la imagen. Chávez (1988), aporta cinco modelos atmosféricos: muy claro (*veryclear*), claro (*clear*), moderado (*moderated*), brumoso (*hazy*) y muy brumoso (*veryhazy*), que son estimados por el usuario sobre información de campo o sobre un examen de la importancia del valor mínimo en cada una de las bandas.

Otro procedimiento dirigido a suprimir la dispersión atmosférica, se basa en una regresión entre bandas. Se parte de delimitar sobre la imagen unas zonas de baja radiancia (sombras, aguas claras y profundas). Posteriormente se obtienen los ND de los píxeles incluidos en esas áreas, para cada una de las bandas que intervienen en el análisis. A partir de esos valores, se calcula la línea de regresión entre cada banda y una de ellas, en donde la dispersión sea menos intensa (típicamente la banda situada en el infrarrojo medio). Esta recta de regresión debería pasar a través del origen del eje de coordenadas formado por las dos bandas. En caso contrario, se supone que el desplazamiento de la recta es debido a la dispersión, por lo que basta conocer el punto en el que ésta corta al eje de la banda a corregir. Ese valor se sustrae a todos los ND de dicha banda, de modo similar al método anterior.

Para el caso de estudios multi-temporales, la corrección atmosférica puede abordarse de modo relativo. Esto es, basta normalizar los ND de distintas escenas a otra, que se elige como referencia. El método se basa en determinar la reflectividad aparente para una serie de cubiertas que no cambian entre fechas (asfalto, aguas claras y arena). A partir de esos valores, pueden estimarse los ND entre fechas distintas, soslayando el efecto atmosférico, Chávez (1988).

## **SOFTWARE UTILIZADO PARA EL PROCESAMIENTO DE IMÁGENES DE SATÉLITE**

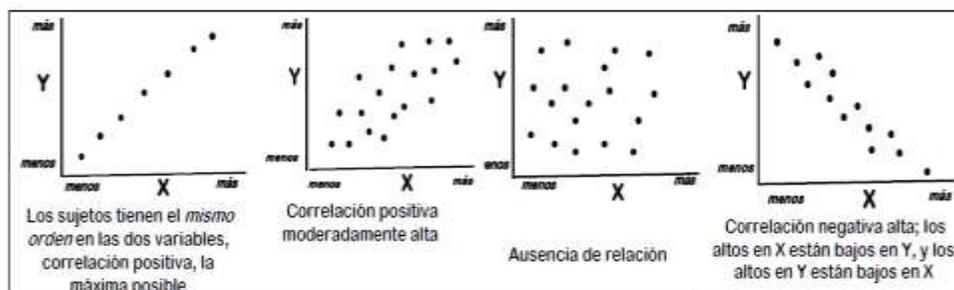
Para efectos de la presente investigación, el Software que se utilizó para el procesamiento de las imágenes de satélites será el *Geographic Resources Analysis Support System* (GRASS), el cual arrojará los resultados para los previos cálculos de los índices de vegetación planteados.

GRASS (acrónimo inglés de *Geographic Resources Analysis Support System*) es un software SIG (Sistema de Información Geográfica) bajo licencia GPL (software libre). Puede soportar información tanto ráster como vectorial y posee herramientas de procesamiento digital de imágenes (Hengl y Reuter, 2009).

## COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE PEARSON

Para Morales (2011), el coeficiente de correlación  $r$  de Pearson expresa en qué grado los sujetos tienen el mismo orden en dos variables. Si los sujetos más altos pesan más y los más bajitos pesan menos, entre peso y altura tendremos una correlación positiva: a mayor altura, mayor peso. Si los de más edad corren más despacio y los más jóvenes corren más deprisa, entre edad y velocidad tendremos una correlación negativa; a mayor edad, menor velocidad.

Los coeficientes de correlación pueden ser por lo tanto positivos o negativos. Lo que expresan estos coeficientes se entiende bien mediante su representación gráfica, los diagramas de dispersión en los que las dos variables están simbolizadas con las letras X e Y como se muestra en la figura 10.



**Figura 5. Diagramas de dispersión.**

El valor del coeficiente de correlación oscila entre 0 y  $\pm 1$ ; una correlación igual a 0 significa ausencia de relación. Si de los mejores profesores unos investigan mucho y otros nada o muy poquito y de los profesores que no son tan buenos docentes unos investigan y publican mucho y otros no investigan nada, entre productividad en investigación y calidad de la docencia no hay relación (que no hay que confundir con relación negativa), Morales (2011).

Los coeficientes de correlación se calculan con toda facilidad en programas informáticos (como por ejemplo EXCEL).

Por otro lado, Amon (1990) afirma que el coeficiente de correlación de Pearson, pensado para variables cuantitativas (escala mínima de intervalo), es un índice que mide el grado de covariación entre distintas variables relacionadas linealmente. Adviértase que decimos "variables relacionadas linealmente". Esto significa que puede haber variables fuertemente relacionadas, pero no de forma lineal, en cuyo caso no procede a aplicarse la correlación de Pearson. Por ejemplo, la relación entre la ansiedad y el rendimiento tiene forma de U invertida; igualmente, si relacionamos población y tiempo la relación será de forma exponencial. En estos casos (y en otros muchos) no es conveniente utilizar la correlación de Pearson.

Decimos que la correlación entre dos variables X e Y es perfecta positiva cuando exactamente en la medida que aumenta una de ellas aumenta la otra. Esto sucede cuando la relación entre ambas variables es funcionalmente exacta. Difícilmente ocurrirá en psicología, pero es frecuente en las ciencias físicas donde los fenómenos se ajustan a leyes conocidas, Por ejemplo, la relación entre espacio y tiempo para un móvil que se desplaza a velocidad constante, Morales (2011).

Se dice que la relación es perfecta negativa cuando exactamente en la medida que aumenta una variable disminuye la otra. Igual que en el caso anterior esto sucede para relaciones funcionales exactas, propio de las ciencias físicas. Por ejemplo, la relación entre presión y volumen se ajusta a este caso.

## MARCO METODOLÓGICO

### UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

En las serranías del Turimiquire a una altitud de 2.200 msnm, nace el río Amana, en la confluencia de las quebradas Las Cabeceras y Agua Blanca, aguas arriba de la población de Mundo Nuevo en los Municipios Freites y Libertad del estado Anzoátegui.



**Figura 6. Ubicación geográfica para la Cuenca Alta del Río Amana (Mapa Cartográfico 7345 y 7346).**

### MATERIALES A USAR EN LA INVESTIGACIÓN

- Computador con Sistema Operativo Windows.
- Acceso a internet de banda ancha.

- Software libre Grass Gis.
- Software “R” para aplicaciones estadísticas.
- Imágenes de Satélites Landsat (ETM+, TM) desde el *Global Land Cover Facility* (GLCF).
- Imágenes de Satélites Landsat 8 (OLI) desde el *Visualizador Global* (GLOVIS).
- Materiales de Oficina en general.

En el **cuadro 4** se podrán observar las 15 imágenes que fueron descargadas desde el *glovis*:

## **METODOLOGÍA**

Para la realización de la metodología inicialmente se cumplió la fase de recolección de información preliminar, en la cual se obtuvieron totalmente gratis desde la página web tanto el material espectral como el modelo digital de elevación (SRTM) (anexo 1) que se descargó desde el Global Land Cover Facility (GLCF) disponible en: <http://glcfapp.glcg.umd.edu:8080/esdi/index.jsp>. Por tanto, el material espectral se obtuvo desde el Visualizador Global (GLOVIS) disponible en: <http://glovis.usgs.gov/>, contando con la adquisición de 15 escenas disponibles (cuadro 7) y con la menor nubosidad posible de acuerdo a la zona de estudio.

**Cuadro 7. Escenas disponibles descargadas desde el visualizador global (glovis)**

<b>ESCENAS LANDSAT 8</b>		
<b>DÍA</b>	<b>MES</b>	<b>AÑO</b>
31	Julio	2013
28	Marzo	2014
3	Agosto	2014
11	Febrero	2015
2	Mayo	2015
23	Septiembre	2015
26	Noviembre	2015
14	Febrero	2016
18	Abril	2016
20	Mayo	2016
23	Julio	2016
9	Septiembre	2016
14	Diciembre	2016
15	Enero	2017
16	Febrero	2017

Todo el manejo cartográfico de estos datos se desarrolló empleando en el software GRASS-GIS. La creación de localización y mapset en el Grass se realizó tal como lo explicó en su trabajo de investigación Hernández (2010) y Pisani (2010).

Posterior a ello, fue importar el modelo digital de elevación utilizando el modulo *r.in.gdal* para luego ajustarse a la paleta de colores del *srtm*. Las fallas en los datos de altimetría contenidos en el modelo digital de elevación fueron corregidos utilizando el modulo *r.fill.dir*.

Por un lado, se utilizó el modulo *r.watershed* en el cual aparecieron múltiples cuencas pero para la delimitación de la cuenca de interés, se

consultó en el visualizador de mapas ráster para saber el número de la cuenca en la cual se toman varios segmentos para conformarla, los cuales estaban enumerados de la siguiente forma: 14, 16, 18, 20 y 22.

Por otro lado, a través del módulo *r.reclass* se procedió a la reclasificación de la cuenca del Río Amana siendo 14=1, 16=1, 18=1, 20=1 y 22=1.

Luego de generada la cuenca hidrográfica, su perímetro fue utilizado mediante una máscara para configurar el área de trabajo mediante el modulo *r.mask*.

Por consiguiente, se importaron las bandas requeridas para el cálculo de cada índice de vegetación, las cuales fueron 2, 4 y 5 correspondientes a cada escena mediante el modulo *r.in.gdal*

Una vez importadas todas las bandas, se procedió a la corrección atmosférica de la imagen aplicando el método ideado por Chávez (1988) que se denomina corrección del histograma para valores mínimos (*Histogram Minimum Method*). Pero, como los valores mínimos consultados para las 5 bandas dieron 0, solo se realizó una copia del mismo añadiendo el sufijo *\_ATM*.

Para el cálculo de radiancia se usó la ecuación 12 descrita por Ariza (2013):

$$L_{\lambda} = M_L Q_{cal} + A_L \quad (12)$$

Donde:

$L_{\lambda}$  = Es el valor de radiancia espectral en el techo de la atmosfera (TOA) medida en valores de (Watts /m<sup>2</sup> \* srad \* μm)

$M_L$  = Banda – Es el factor multiplicativo de escalado especifico obtenido del metadato (*RADIANCE\_MULT\_BAND\_x*, donde x es el número de la banda)

$Q_{cal}$  = Producto estándar cuantificado y calibrado por valores de pixel (ND). Este valor se refiere a cada una de las bandas de la imagen.

$A_L$  = Banda – Es el factor aditivo de escalado especifico obtenido del metadato (*RADIANCE\_ADD\_BAND\_x*, donde x es el número de la banda)

Para el cálculo de la reflectancia, se usó la ecuación 13 descrita por Ariza (2013) para convertir los ND niveles digitales a valores de reflectancia para los obtenidos por el sensor OLI.

$$\rho_{\lambda} = M_p Q_{cal} + A_p \quad (13)$$

Donde:

$\rho_{\lambda}$  = valor de reflectancia planetaria, sin corrección por ángulo solar.

$M_p$  = factor multiplicativo de escalado especifico por banda obtenido del metadato (*REFLECTANCE\_MULT\_BAND\_x*, donde x es el número de la banda).

**Q<sub>cal</sub>** = producto estándar cuantificado y calibrado para valores de pixel (ND). Este valor se refiere a cada una de las bandas de la imagen.

**A<sub>p</sub>** = factor aditivo de escalado específico por banda obtenido del metadato (REFLECTANCE\_ADD\_BAND\_x, donde x es el número de la banda).

## CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS

El área de la cuenca (A) se calculó usando el módulo *r.report* de GRASS en el cual se incluyó el archivo *cuencaaltaamana* en la pestaña *Requerido* y en la pestaña *Estadísticas* se seleccionaron las opciones *Kilómetros* y *Hectáreas* en las cuales fueron mostrados los resultados. Para acceder a este módulo se sigue la secuencia de comandos *Ráster---Informe y estadísticas---Suma área por mapa ráster y categoría*.

Usando la herramienta de medición de distancia del Visualizador de mapas de GRASS se mide la longitud axial de la cuenca.

El perímetro (P) se calculó utilizando una herramienta CAD la cual trabajó con un archivo vectorial GRASS en la extensión de CAD *.dxf*. El archivo vectorial se creó utilizando el módulo *r.to.vect* de GRASS al cual se accede mediante la secuencia *Archivo---Conversiones de tipos de mapas---Ráster a vectorial*, con el cual se generó el archivo vectorial a partir del archivo ráster que contenía el área de la cuenca el cual fue exportado con el módulo *v.out.dxf* de GRASS al cual se accede mediante la secuencia *Archivo---Exportar mapa vectorial---Exporta a DXF*.

Aplicando la ecuación número uno (1) se obtuvo el coeficiente de compacidad ( $K_c$ ) de la cuenca.

La elevación media se obtuvo consultando la estadística del modelo digital de elevación a través del módulo *r.univar* del GRASS al cual se accede mediante la secuencia *Ráster---Informe y estadísticas---Estadísticas univariadas de ráster*, el mismo solicita el archivo srtm ya que este es el que contiene la información de elevación.

La densidad de drenaje ( $D_d$ ) se obtuvo utilizando la ecuación número dos (2). Para la misma se necesita la longitud de todos los cauces de la cuenca, esta se obtiene transformando el archivo ráster ríos a vectorial y el resultante es exportado para ser utilizado en una herramienta CAD con la cual se determina la longitud de los cauces.

El factor de forma ( $F_f$ ) se calculó utilizando la ecuación número tres (3).

La pendiente media de los cauces ( $P_m$ ) se calculó utilizando la ecuación número cuatro (4).

La pendiente de la cuenca se calculó utilizando el módulo *r.slope.aspect* de GRASS, al cual se accede siguiendo la secuencia de comandos *Ráster---Análisis de terreno---Pendiente y aspecto (Orientación)*, para este módulo es requerido un archivo srtm que no muestre errores, para obtener este nuevo archivo se utilizó el módulo *r.fill.dir* de GRASS, el cual nos generó un nuevo archivo que se le llamó srtmcorregido, el cual se usó en el módulo *r.slope.aspect* de GRASS para generar un mapa de pendientes. A este mapa de pendientes se le consulta su estadística

univariable utilizando el módulo *r.univar* de GRASS el cual nos indicó los valores de la pendiente media, pendiente mínima y pendiente máxima de la cuenca.

El índice de alargamiento ( $I_a$ ) se calculó utilizando la ecuación número cinco (5).

El tiempo de concentración ( $T_c$ ) se estimó utilizando la ecuación número seis (6).

## **CÁLCULO DE LOS ÍNDICES DE VEGETACIÓN**

Una vez obtenidos todos los cálculos de reflectancia de las bandas, se procedió al cálculo de los índices de vegetación mediante el modulo *i.vi* el cual pidió las bandas correspondientes para cada índice a ser calculado.

Obtenidos ya los índices de vegetación, se observó que los valores de los índices resultaron muy bajos por lo que se procedió a calcularlos a través del software R.

Para el cálculo de los tres índices de vegetación, se necesitaron las bandas 2,4 y 5 las cuales se exportaron desde GRASS cada una corregida a través del módulo *r.out.xyz* en formato *txt* a la carpeta de “Datos R” donde se guardó toda la información.

Posteriormente se procedió a trabajar en el Software “R” pero adicional a éste, se trabajó con la ayuda de otro programa llamado Tinn-R en el cual se cargaron los diferentes códigos que dieron los resultados esperados del

R. Estos códigos de acuerdo a los cálculos para los índices de vegetación se ordenaron de la siguiente manera:

- **Código para solicitar el escritorio actual**

```
setwd("C:/Users/Ricardo/Desktop/Bandas para Índices de
Vegetación/2013")
```

- **Bandas importadas para crear la base de datos**

```
b2=read.table("banda2original.txt")
b4=read.table("banda4original.txt")
b5=read.table("banda5original.txt")
```

- **Códigos para cambiar el nombre de las columnas**

```
names(b2)=c("eb2","nb2","ndb2")
names(b4)=c("eb4","nb4","ndb4")
names(b5)=c("eb5","nb5","ndb5")
```

- **Acceso a las columnas**

```
attach(b2)
attach(b4)
attach(b5)
```

- **Transformación de los niveles digitales (ND) a valores de radiancia**

```
b2_reflec=(REFLECTANCE_MULT_BAND_2*ndb2+
REFLECTANCE_ADD_BAND_2)/sin(SUN_ELEVATION*pi/180)
b4_reflec=(REFLECTANCE_MULT_BAND_4*ndb4+REFLECTANCE_A
DD_BAND_4)/sin(SUN_ELEVATION*pi/180)
```

$$b5\_reflec = (REFLECTANCE\_MULT\_BAND\_5 * ndb5 + REFLECTANCE\_ADD\_BAND\_5) / \sin(SUN\_ELEVATION * \pi / 180)$$

- **Evaluación de los valores de reflectividad sosteniendo que el rango debe ser de 0.00 a 1.00 máximo**

`range(b2_reflec)`

`range(b4_reflec)`

`range(b5_reflec)`

- **Renombrar las bandas según las fórmulas**

`nir=b5_reflec`

`red=b4_reflec`

`blue=b2_reflec`

- **Calculo de los Índices de Vegetación**

$$ARVI = (nir - (2.0 * red - blue)) / (nir + (2.0 * red - blue))$$

$$EVI = 2.5 * (nir - red) / (nir + 6.0 * red - 7.5 * blue + 1.0)$$

$$GEMI = \left( \frac{2 * ((nir * nir) - (red * red)) + 1.5 * nir + 0.5 * red}{nir + red + 0.5} \right) * \left( \frac{1 - 0.25 * (2 * ((nir * nir) - (red * red)) + 1.5 * nir + 0.5 * red)}{nir + red + 0.5} \right) - \left( \frac{red - 0.125}{1 - red} \right)$$

Los índices de vegetación deben arrojar valores mínimos -1 y máximos 1, mediante el modulo *i.vi* de GRASS por “default” se puede hacer pero como mediante R no, es por eso que se configuro el código en R para que valores menores o mayores a estos sean corregidos. Para este caso, fue aplicado a los tres índices.

- **Escalado de ARVI para ajustar su valor mayor a 1**

```

ARVI2=ARVI
  for (i in 1:length(ARVI2))
  {
  if(ARVI2[i]>1){
  ARVI2[i] = 1.0;
  }
  else {
  ARVI2[i]=ARVI2[i];
  }
  }
  summary(ARVI2)

```

- **Escalado de ARVI para ajustar su valor menor a -1**

```

for (i in 1:length(ARVI2))
  {
  if(ARVI2[i]<(-1)){
  ARVI2[i] = -1.0;
  }
  else {
  ARVI2[i]=ARVI2[i];
  }
  }
  summary(ARVI2)

```

- **Escalado de EVI para ajustar su valor mayor a 1**

```

EVI2=EVI
  for (i in 1:length(EVI2))

```

```

    {
    if(EVI2[i]>1){
    EVI2[i] = 1.0;
        }
    else {
    EVI2[i]=EVI2[i];
        }
    }
    summary(EVI2)

```

- **Escalado de EVI para ajustar su valor menor a -1**

```

for (i in 1:length(EVI2))
    {
    if(EVI2[i]<(-1)){
    EVI2[i] = -1.0;
        }
    else {
    EVI2[i]=EVI2[i];
        }
    }
    summary(EVI2)

```

- **Escalado de GEMI para ajustar su valor mayor a 1**

```

GEMI2=GEMI
for (i in 1:length(GEMI2))
    {
    if(GEMI2[i]>1){
    GEMI2[i] = 1.0;

```

```

    }
else {
  GEMI2[i]=GEMI2[i];
}
}
summary(GEMI2)

```

- **Escalado de GEMI para ajustar su valor menor a -1**

```

for (i in 1:length(GEMI2))
{
  if(GEMI2[i]<(-1)){
    GEMI2[i] = -1.0;
  }
else {
  GEMI2[i]=GEMI2[i];
}
}
summary(GEMI2)

```

- **Evaluación Gráfica**

```

par(mfrow=c(2,2))
hist(ARVI2)
hist(EVI2)
hist(GEMI2)

```

- **Tabulación de Resultados**

```

write.table(EVI,file="EVI2013.txt",row.names=F,col.names=F)
write.table(ARVI,file="ARVI2013.txt",row.names=F,col.names=F)

```

```
write.table(GEMI,file="GEMI2013.txt",row.names=F,col.names=F)
```

Con este último código se envió a guardar los resultados en la carpeta donde se direccionó inicialmente.

- **Resumen general**

```
resumen=cbind(summary(ARVI),summary(NDVI),summary(GVI))
resumen=data.frame(resumen)
names(resumen)=c("ARVI","NDVI","GVI")
resumen
```

Igualmente se utilizan estos mismos códigos para las 14 escenas restantes para cada archivo cabecera correspondiente a las bandas exportadas desde GRASS.

Una vez finalizado la exploración de los datos (AEDA), se procedió al análisis de la estadística inferencial que se ejecutó mediante el ANAVA o análisis de varianza para comparar las diferencias significativas entre los índices. Se consideró un diseño experimental completamente aleatorizado, donde la unidad experimental fue la cuenca del alta del Río Amana, los tratamientos fueron los índices de vegetación, las repeticiones fueron las escenas consideradas para cada fecha y la variable fue la respuesta espectral reportada por cada índice de vegetación. Con este análisis de varianza se pretendió confirmar la hipótesis nula de igualdad de medias. Los códigos a utilizar fueron los siguientes, tomando como ejemplo solo el Índice ARVI:

- **Código para solicitar el escritorio actual**

```
setwd("C:/Users/Ricardo/Desktop/Indices de Vegetación")
```

- **Códigos para importar la base de datos**

```
arvi_2013=read.table("ARVI2013.txt")
arvi_2014_03_28=read.table("ARVI2014-03-28.txt")
arvi_2014_08_03=read.table("ARVI2014-08-03.txt")
arvi_2015_02_11=read.table("ARVI2015-02-11.txt")
arvi_2015_05_02=read.table("ARVI2015-05-02.txt")
arvi_2015_09_23=read.table("ARVI2015-09-23.txt")
arvi_2015_11_26=read.table("ARVI2015-11-26.txt")
arvi_2016_02_14=read.table("ARVI2016-02-14.txt")
arvi_2016_04_18=read.table("ARVI2016-04-18.txt")
arvi_2016_05_20=read.table("ARVI2016-05-20.txt")
arvi_2016_07_23=read.table("ARVI2016-07-23.txt")
arvi_2016_09_09=read.table("ARVI2016-09-09.txt")
arvi_2016_12_14=read.table("ARVI2016-12-14.txt")
arvi_2017_01_15=read.table("ARVI2017-01-15.txt")
arvi_2017_02_16=read.table("ARVI2017-02-16.txt")
```

- **Nombres de las columnas para cada archivo**

```
names(arvi_2013)=c("arvi2013")
names(arvi_2014_03_28)<-c("arvi2014")
names(arvi_2014_08_03)<-c("arvi2014_2")
names(arvi_2015_02_11)<-c("arvi2015")
names(arvi_2015_05_02)<-c("arvi2015_2")
```

```
names(arvi_2015_09_23)<-c("arvi2015_3")
names(arvi_2015_11_26)<-c("arvi2015_4")
names(arvi_2016_02_14)<-c("arvi2016")
names(arvi_2016_04_18)<-c("arvi2016_2")
names(arvi_2016_05_20)<-c("arvi2016_3")
names(arvi_2016_07_23)<-c("arvi2016_4")
names(arvi_2016_09_09)<-c("arvi2016_5")
names(arvi_2016_12_14)<-c("arvi2016_6")
names(arvi_2017_01_15)<-c("arvi2017")
names(arvi_2017_02_16)<-c("arvi2017_2")
```

- **Acceso a las columnas**

```
attach(arvi_2013)
attach(arvi_2014_03_28)
attach(arvi_2014_08_03)
attach(arvi_2015_02_11)
attach(arvi_2015_05_02)
attach(arvi_2015_09_23)
attach(arvi_2015_11_26)
attach(arvi_2016_02_14)
attach(arvi_2016_04_18)
attach(arvi_2016_05_20)
attach(arvi_2016_07_23)
attach(arvi_2016_09_09)
attach(arvi_2016_12_14)
attach(arvi_2017_01_15)
attach(arvi_2017_02_16)
```

- **Calculo para las medias**

```
arvi=c(mean(arvi2013),mean(arvi2014),mean(arvi2014_2),mean(arvi2015),mean(arvi2015_2), mean(arvi2015_3), mean(arvi2015_4), mean(arvi2016), mean(arvi2016_2),mean(arvi2016_3),mean(arvi2016_4), mean(arvi2016_5), mean(arvi2016_6), mean(arvi2017), mean(arvi2017_2))
```

- **Asignación para los tratamientos**

```
ivi=c(arvi,evi,gemi)
t_arvi=rep("arvi",15)
t_evi=rep("evi",15)
t_gemi=rep("gemi",15)
tratamientos=c(t_arvi,t_evi,t_gemi)
tratamientos=as.factor(tratamientos)
```

- **Organización Índices-Tratamientos**

```
anava=aov(ivi~tratamientos)
summary(anava)
```

- **Desviación estándar**

```
sd_arvi=c(
sd(arvi2013),
sd(arvi2014),
sd(arvi2014_2),
sd(arvi2015),
sd(arvi2015_2),
sd(arvi2015_3),
sd(arvi2015_4),
sd(arvi2016),
```

```

sd(arvi2016_2),
sd(arvi2016_3),
sd(arvi2016_4),
sd(arvi2016_5),
sd(arvi2016_6),
sd(arvi2017),
sd(arvi2017_2))
desviaciones=cbind(summary(sd_arvi),
summary(sd_evi),
summary(sd_gemi))
desviaciones=data.frame(desviaciones)
names(desviaciones)=c("arvi", "evi", "gemi")
desviaciones

```

- **Plot (ARVI,GVI,NDVI)**

```

par(mfrow=c(2,2))
plot(arvi,type="l",col=2)
plot(evi,type="l",col=2)
plot(gemi,type="l",col=2)

```

Estos mismos códigos fueron sustituidos por los otros dos índices faltantes, EVI y GEMI. Una vez terminada la parte estadística, se procedió a la caracterización del comportamiento geoespacial del vigor de la vegetación.

Todo el manejo geoespacial se realizó desde GRASS pero importando primero la información contenida en R de la siguiente manera:

- **Acceso a los resultados de los índices**

```
arvi2=cbind(eb2,nb2,ARVI2)
```

```
evi2=cbind(eb2,nb2,EVI2)
```

```
gemi2=cbind(eb2,nb2,GEMI2)
```

- **Código para guardar el archivo en formato texto**

```
write.table(arvi2,file="ARVI_2013.txt",row.names=F,col.names=F)
```

```
write.table(evi2,file="EVI_2013.txt",row.names=F,col.names=F)
```

```
write.table(gemi2,file="GEMI_2013.txt",row.names=F,col.names=F)
```

Estos resultados fueron guardados en formato *.txt* a una carpeta creada dentro de cada escena en Datos R llamada "Índices para GRASS" los cuales fueron importados a GRASS mediante el modulo *r.in.xyz* donde a cada uno se le añadieron los elementos de mapa resaltando la leyenda del vigor de la vegetación y la identificación de cada escena para luego ser guardados como imagen en formato JPG.

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos se muestran a continuación siguiendo la secuencia de los objetivos planteados para este trabajo de investigación.

### PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS

A continuación el **cuadro 8** muestra los resultados de cada parámetro morfométrico de la cuenca.

**Cuadro 8. Parámetros Morfométricos de la cuenca alta del río Amana.**

Parámetro Morfométrico	Total	Unidad
Área	112,594	Ha
Longitud Axial	49,07	Km
Perímetro	270,72	Km
Coefficiente de Compacidad	2,2590	s/a
Elevación Media	516,834	M
Densidad de Drenaje	0,055	Km
Factor de Forma	0,46	s/a
Pendiente Media de los Cauces	4,83	%
Pendiente Media	9,22	%
Pendiente Mínima	0	%
Pendiente Máxima	73,29	%
Índice de Alargamiento	1,62	s/a
Tiempo de Concentración	5,30	Horas

La cuenca alta del Río Amana tiene un coeficiente de compacidad (Kc) de 2,2590, identificando un drenaje de forma rectangular oblonga, un valor bajo en la densidad de drenaje (Dd) generando bajos volúmenes de

escorrentía, tiene un factor de forma (Ff) de 0,46 que demuestra una cuenca moderadamente achatada, una pendiente media de los cauces (Pm) suave, con un índice de alargamiento refiriéndose a una cuenca moderadamente alargada y un tiempo de concentración (Tc) muy lento de 5 horas y media aproximadamente, de acuerdo a Cortolima, 2010.

## **ÍNDICES DE VEGETACIÓN**

Se calcularon los índices de vegetación (ARVI, EVI y GEMI) empleando imágenes satelitales Landsat corregidas por el método de Reflectividad empleando los software R y GRASS para cada una de las quince escenas.

Posteriormente se calcularon los estadísticos básicos de cada Índice de Vegetación para cada escena empleando el programa estadístico R.

Las escenas resaltadas en los siguientes cuadros fueron las que se representaron mediante las imágenes a continuación para el comportamiento espacial por cada índice de vegetación. Se utilizaron 3 imágenes por cada índice de vegetación ya que en la mayoría de las mismas se observa que el comportamiento espacial muestra el mayor vigor de la vegetación en la zona norte de la cuenca alta del Río Amana.

**Cuadro 9. Resultados del cálculo del Índice de Vegetación Resistente a la Atmosfera (ARVI) calculado sobre bandas corregidas por el método de Reflectividad usando el software R.**

<b>Escena</b>	<b>Mínimo</b>	<b>1erQ</b>	<b>3erQ</b>	<b>Máximo</b>	<b>Mediana</b>	<b>Media</b>
<b>31/07/2013</b>	<b>-0.1971</b>	<b>0.2830</b>	<b>0.5459</b>	<b>1</b>	<b>0.3979</b>	<b>0.4328</b>
28/03/2014	-0.1971	0.2830	0.5459	1	0.3979	0.4328
03/08/2014	-0.0849	0.5061	0.8741	1	0.7235	0.6705
11/02/2015	-0.0960	0.3005	0.6897	1	0.4879	0.4978
02/05/2015	-0.0674	0.1881	0.5514	1	0.3691	0.3858
23/09/2015	-0.0972	0.5236	0.8719	1	0.7191	0.6811
<b>26/11/2015</b>	<b>-0.1148</b>	<b>0.5455</b>	<b>0.9099</b>	<b>1</b>	<b>0.7642</b>	<b>0.7023</b>
14/02/2016	-0.1043	0.3102	0.6222	1	0.4540	0.4727
18/04/2016	-0.1151	0.2129	0.4220	1	0.3196	0.3492
20/05/2016	-0.1062	0.3908	0.8291	1	0.6190	0.5951
23/07/2016	-0.0983	0.5299	0.8792	1	0.7346	0.6852
09/09/2016	-0.3029	0.6143	0.9520	1	0.8257	0.7578
14/12/2016	-0.1100	0.6267	0.9377	1	0.8272	0.7573
15/01/2017	-1	0.5757	0.8965	1	0.7518	0.7232
<b>16/02/2017</b>	<b>-0.1380</b>	<b>0.4029</b>	<b>0.7657</b>	<b>1</b>	<b>0.5752</b>	<b>0.5786</b>

**Cuadro 10. Resultados del cálculo del Índice de Vegetación Mejorado (EVI) calculado sobre bandas corregidas por el método de Reflectividad usando el software R.**

<b>Escena</b>	<b>Mínimo</b>	<b>1erQ</b>	<b>3erQ</b>	<b>Máximo</b>	<b>Mediana</b>	<b>Media</b>
<b>31/07/2013</b>	<b>-0.0220</b>	<b>0.2252</b>	<b>0.3681</b>	<b>1</b>	<b>0.2796</b>	<b>0.3123</b>
28/03/2014	-0.0221	0.2260	0.3694	1	0.2805	0.3134
03/08/2014	-0.0256	0.3561	0.6838	1	0.5147	0.5205
11/02/2015	-0.0246	0.2488	0.4254	1	0.3160	0.3513
02/05/2015	-0.0063	0.2061	0.3826	1	0.2767	0.3107
23/09/2015	-0.0080	0.3961	0.6615	1	0.5258	0.5308
<b>26/11/2015</b>	<b>0.02656</b>	<b>0.3663</b>	<b>0.6327</b>	<b>1</b>	<b>0.4906</b>	<b>0.4998</b>
14/02/2016	0.0190	0.2376	0.3940	1	0.2977	0.3291
18/04/2016	0.0133	0.2161	0.3168	1	0.2571	0.2872
20/05/2016	0.0558	0.3358	0.6512	1	0.4697	0.4969
23/07/2016	0.0458	0.4122	0.7135	1	0.5584	0.5625
09/09/2016	-0.1184	0.4357	0.7466	1	0.6138	0.5892
14/12/2016	-0.0743	0.4041	0.6594	1	0.5433	0.5297
15/01/2017	-0.0301	0.3646	0.5833	1	0.4678	0.4772
<b>16/02/2017</b>	<b>-0.0174</b>	<b>0.2786</b>	<b>0.4750</b>	<b>1</b>	<b>0.3645</b>	<b>0.3845</b>

**Cuadro 11. Resultados del cálculo del Índice de Vegetación Ambiental Global (GEMI) calculado sobre bandas corregidas por el método de Reflectividad usando el software R.**

<b>Escena</b>	<b>Mínimo</b>	<b>1erQ</b>	<b>3erQ</b>	<b>Máximo</b>	<b>Mediana</b>	<b>Media</b>
<b>31/07/2013</b>	<b>-1</b>	<b>0.4601</b>	<b>0.5588</b>	<b>0.9850</b>	<b>0.5027</b>	<b>0.5070</b>
28/03/2014	-1	0.4607	0.5596	0.9860	0.5032	0.5077
03/08/2014	-1	0.5238	0.7285	1	0.6282	0.6055
11/02/2015	-1	0.4293	0.5678	1	0.4961	0.4577
02/05/2015	-1	0.3904	0.5563	0.9489	0.4863	0.4116
23/09/2015	-1	0.5567	0.7182	0.9747	0.6398	0.6286
<b>26/11/2015</b>	<b>-1</b>	<b>0.5113</b>	<b>0.6849</b>	<b>1</b>	<b>0.6027</b>	<b>0.5647</b>
14/02/2016	-1	0.4487	0.5579	0.9714	0.4994	0.4894
18/04/2016	-1	0.4540	0.5249	1	0.4852	0.4698
20/05/2016	-1	0.5002	0.7098	1	0.5924	0.5787
23/07/2016	-1	0.5615	0.7135	1	0.5584	0.5625
09/09/2016	-1	0.5848	0.7648	1	0.6934	0.6612
14/12/2016	-1	0.5510	0.7048	1	0.6402	0.6042
15/01/2017	-0.2627	0.5370	0.6631	1	0.5970	0.6024
<b>16/02/2017</b>	<b>-1</b>	<b>0.4782</b>	<b>0.6050</b>	<b>1</b>	<b>0.5378</b>	<b>0.5272</b>

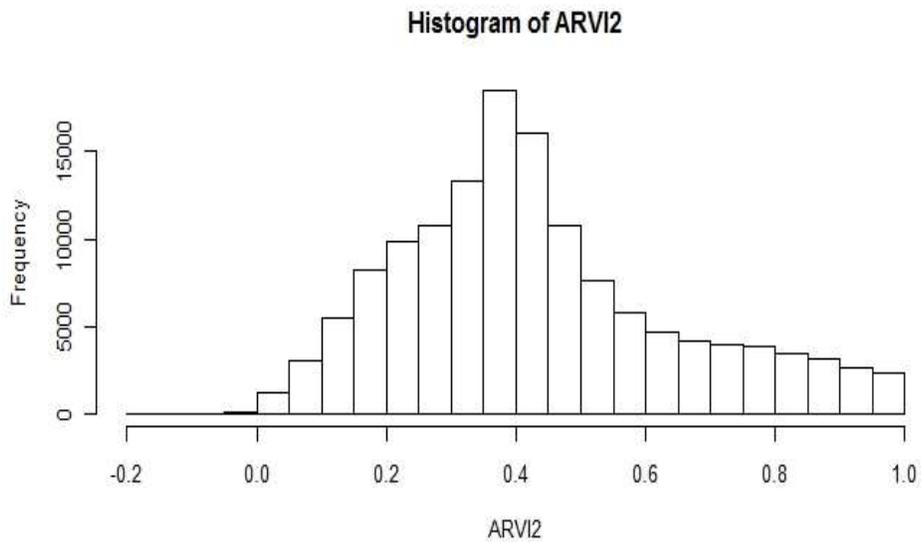
La figura 9 se muestra el Índice de Vegetación Resistente a la Atmosfera (ARVI) en la cuenca alta del Río Amana para el 31 de julio del 2013. Se puede apreciar vegetación en toda la cuenca pero la más densa se observa en la parte Norte de la cuenca.



**Figura 7. Índice de Vegetación Resistente a la Atmosfera en la cuenca alta del Río Amana para el 31 de julio del 2013.**

En el siguiente histograma se muestra la distribución de los valores de los píxeles en una comparación de frecuencia para el Índice de Vegetación Resistente a la Atmósfera del 31 de julio del 2013 (ver figura 10). En el mismo se observa que el 69,81% de los valores arrojados por el Índice de Vegetación Resistente a la Atmósfera en la cuenca alta del Río Amana para el 31 de julio del 2013 están comprendidos entre 0 y 0.49, a su vez el 30,10% son valores de vegetación vigorosa y solo un 0,09% son valores negativos, siendo el valor mínimo -0.1971 y el máximo 1, con una media de 0.4328 (cuadro 9). De acuerdo con Sobrino (2000) los valores negativos representan

áreas con características de suelo desnudo, roca, agua o nubosidad, por otra parte los valores positivos representan la vegetación, considerando los iguales o superiores a 0.5 como vegetación vigorosa, densa o fotosintéticamente activa.



**Figura 8 Histograma que muestran la frecuencia para ARVI en la cuenca alta del Río Amana para el 31 de julio del 2013.**

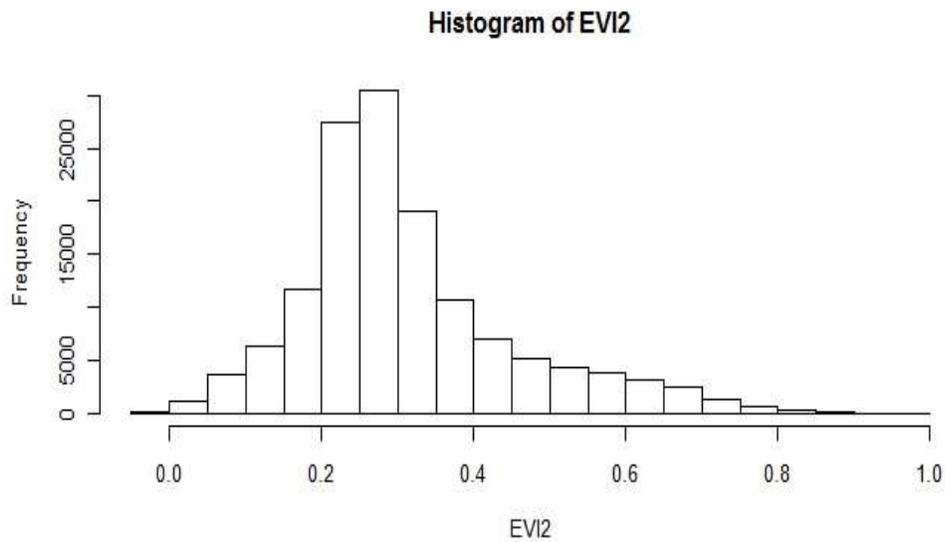
En la figura 11 se muestra el Índice de Vegetación Mejorado (EVI) en la cuenca alta del Río Amana para el 31 de julio del 2013. Se puede apreciar vegetación en toda la cuenca pero la más densa se observa en la parte Norte, Nor-Oeste y Nor-este.

Índice de Vegetación Mejorado en la cuenca alta del Río Amana



**Figura 9. Índice de Vegetación Mejorado en la cuenca alta del Río Amana para el 31 de julio del 2013.**

En el siguiente histograma se muestra la distribución de los valores de los píxeles en una comparación de frecuencia para el Índice de Vegetación Mejorado del 31 de julio del 2013 (ver figura 12). En el mismo se observa que el 88,13% de los valores arrojados por el Índice de Vegetación Mejorado en la cuenca alta del Río Amana para el 31 de julio del 2013 está cubierta por vegetación no vigorosa, a su vez el 11,78% son valores de vegetación vigorosa y solo un 0,09% son valores negativos, siendo el valor mínimo -0.02206 y el máximo 1, con una media de 0.31230 (cuadro 10).



**Figura 10. Histograma que muestran la frecuencia para EVI en la cuenca alta del Río Amana para el 31 de julio del 2013**

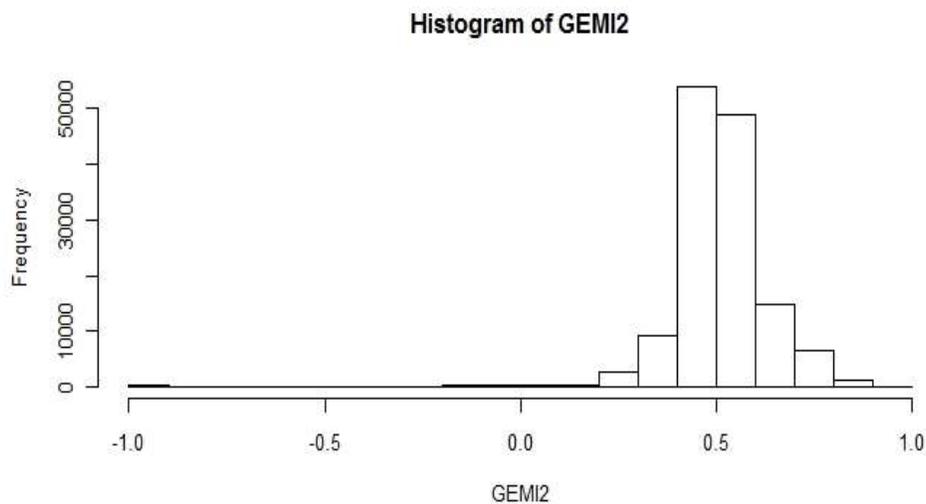
En la figura 13 se muestra el Índice de Vegetación de Monitoreo Ambiental Global (GEMI) en la cuenca alta del Río Amana para el 31 de julio del 2013. Se puede apreciar vegetación densa en toda la cuenca.

**Índice de Vegetación de Monitoreo Ambiental Global en la cuenca alta del Río Amana**



**Figura 11. Índice de Vegetación de Monitoreo Ambiental Global en la cuenca alta del Río Amana para el 31 de julio del 2013.**

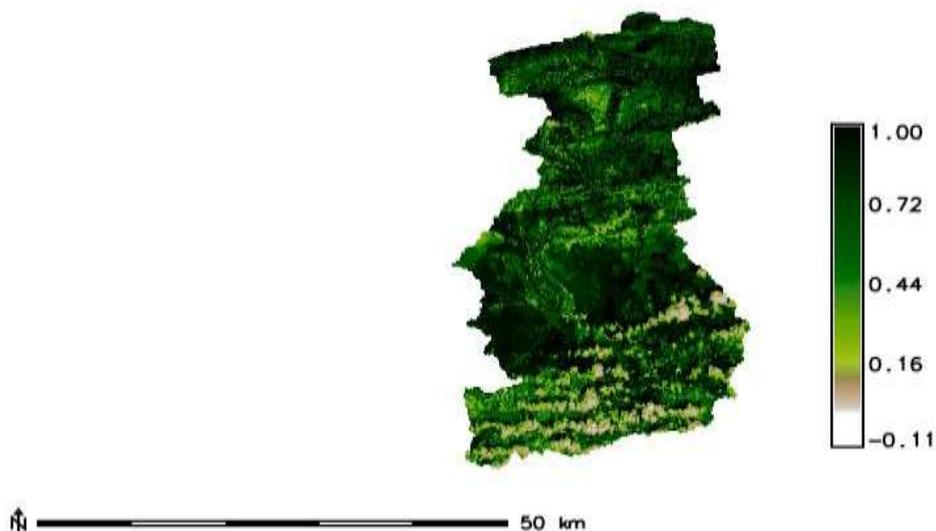
En el siguiente histograma se muestra la distribución de los valores de los píxeles en una comparación de frecuencia para el Índice de Vegetación de Monitoreo Ambiental Global del 31 de julio del 2013 (ver figura 14). En el mismo se observa que el 47,77% de los valores arrojados por el Índice de Vegetación Monitoreo Ambiental Global en la cuenca alta del Río Amana para el 31 de julio del 2013 está cubierta por vegetación no vigorosa, a su vez el 51,51% son valores de vegetación vigorosa y solo un 0,72% son valores negativos, siendo el valor mínimo -1 y el máximo 0.9850, con una media de 0.5070 (cuadro 11).



**Figura 12. Histograma que muestran la frecuencia para GEMI en la cuenca alta del Río Amana para el 31 de julio del 2013.**

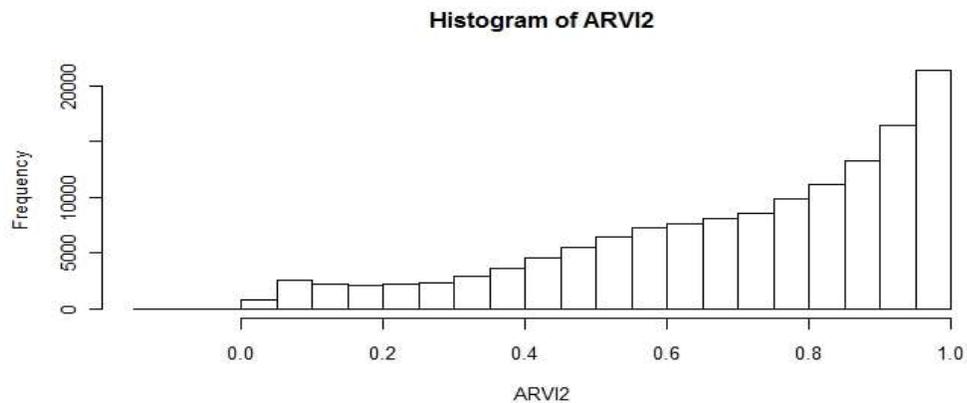
La figura 15 muestra el Índice de Vegetación Resistente a la Atmosfera (ARVI) en la cuenca alta del Río Amana para el 26 de noviembre del 2015. Se aprecia vegetación vigorosa uniforme en toda la cuenca, excepto por algunos puntos sin vegetación en la parte Sur.

Índice de Vegetación Resistente a la Atmósfera en la cuenca alta del Río Amana



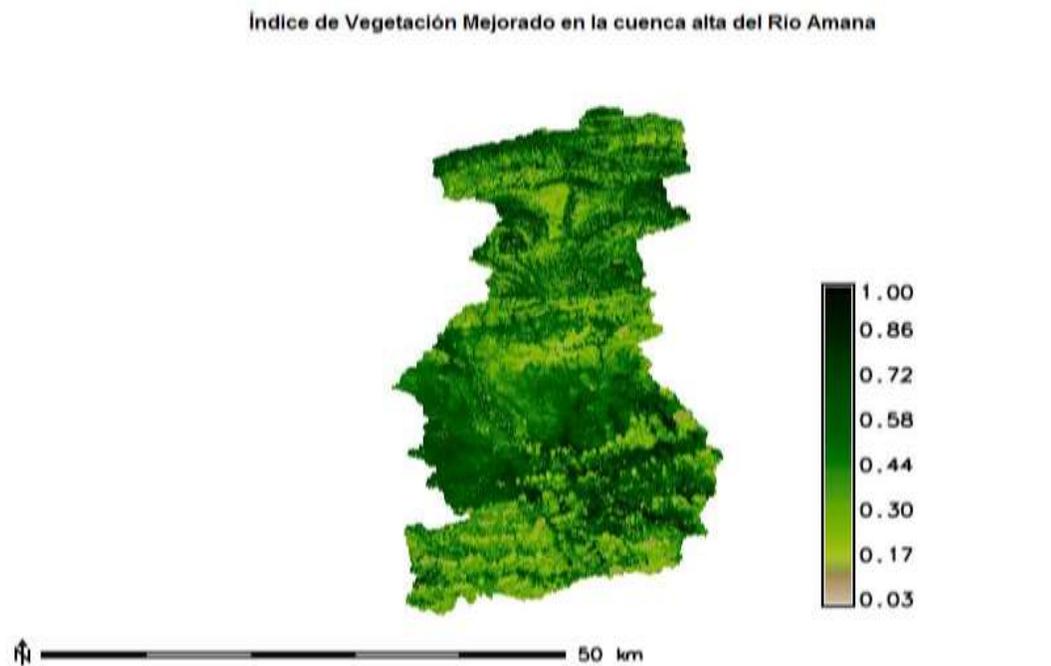
**Figura 13. Índice de Vegetación Resistente a la Atmósfera en la cuenca alta del Río Amana para el 26 de noviembre del 2015.**

En el histograma de la figura 16 se muestra la distribución de los valores de los píxeles en una comparación de frecuencia para el Índice de Vegetación Resistente a la Atmósfera del 26 de noviembre del 2015. Observándose que el 20,76% de los valores arrojados por el Índice de Vegetación Resistente a la Atmósfera en la cuenca alta del Río Amana para el 26 de noviembre del 2015 está cubierta por vegetación no vigorosa, a su vez el 79,22% son valores de vegetación vigorosa y solo un 0,02% son valores negativos, siendo el valor mínimo -0.1148 y el máximo 1, con una media de 0.7023 (cuadro 9).



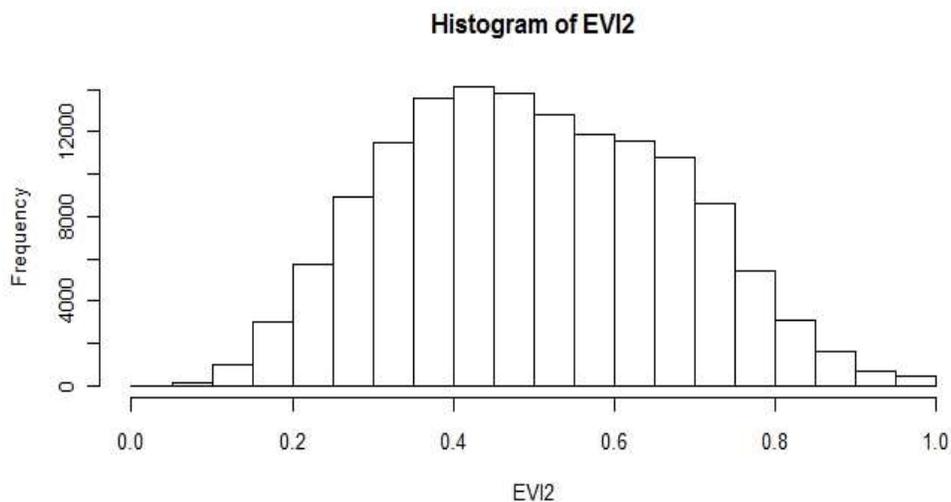
**Figura 14. Histograma que muestra la frecuencia para ARVI en la cuenca alta del Río Amana para el 26 de noviembre del 2015.**

En la figura 17 se muestra el Índice de Vegetación Mejorado (EVI) en la cuenca alta del Río Amana para el 26 de noviembre del 2015. Se aprecia presencia de vegetación en la mayor parte de la cuenca, notándose en la parte norte y la parte central más densa la vegetación.



**Figura 15. Índice de Vegetación Mejorado en la cuenca alta del Río Amana para el 26 de noviembre del 2015.**

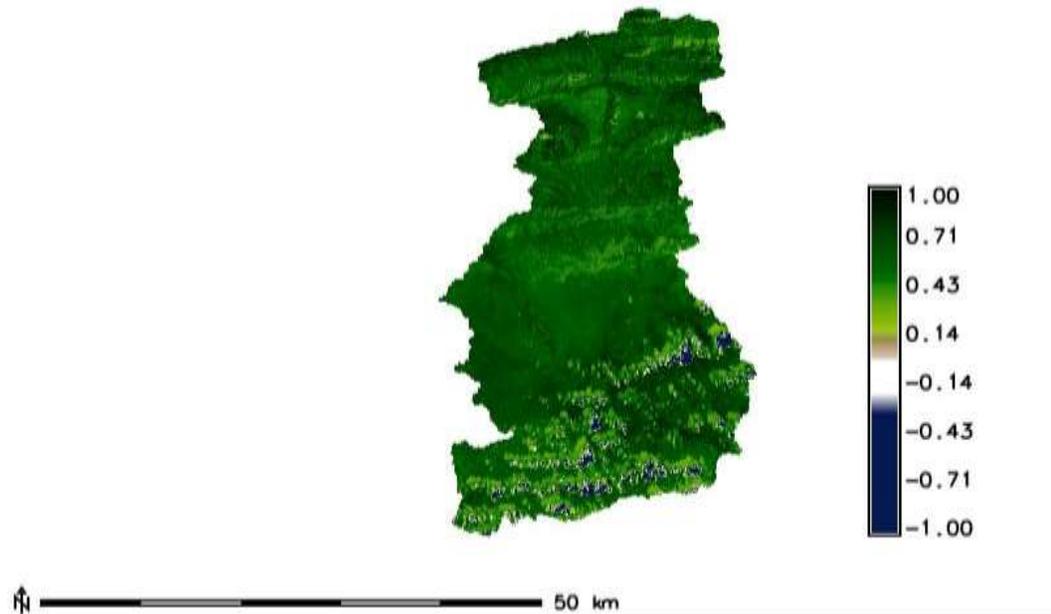
A continuación la figura 18 se muestra la distribución de los valores de los píxeles en una comparación de frecuencia para el Índice de Vegetación Mejorado del 26 de noviembre del 2015. En el mismo se observa que el 51,47% de los valores arrojados por el Índice de Vegetación Mejorado en la cuenca alta del Río Amana para 26 de noviembre del 2015 está cubierta por vegetación no vigorosa, a su vez el 48,53% son valores de vegetación vigorosa, siendo el valor mínimo 0.02656 y el máximo 1, con una media de 0.49980 (cuadro 10).



**Figura 16. Histograma que muestra la frecuencia para EVI en la cuenca alta del Río Amana para el 26 de noviembre del 2015.**

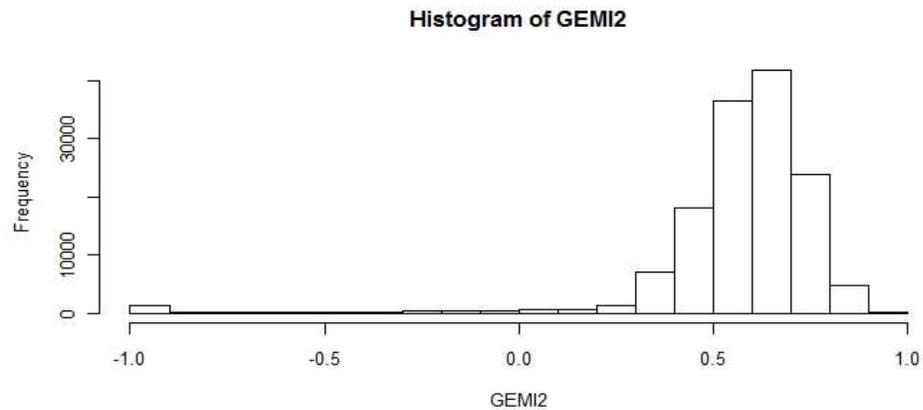
En la figura 19 se muestra el Índice de Vegetación de Monitoreo Ambiental Global (GEMI) en la cuenca alta del Río Amana para el 26 de noviembre del 2015. Se puede apreciar vegetación densa en toda la cuenca.

Índice de Vegetación de Monitoreo Ambiental Global en la cuenca alta del Río Amana



**Figura 17. Índice de Vegetación de Monitoreo Ambiental Global en la cuenca alta del Río Amana para el 26 de noviembre del 2015.**

El siguiente histograma muestra la distribución de los valores de los píxeles en una comparación de frecuencia para el Índice de Vegetación de Monitoreo Ambiental Global del 26 de noviembre del 2015 (figura 20). En el mismo que el 20,06% de los valores arrojados por el Índice de Vegetación Monitoreo Ambiental Global en la cuenca alta del Río Amana para el 26 de noviembre del 2015 está cubierta por vegetación no vigorosa, a su vez el 77,18% son valores de vegetación vigorosa y solo un 2,76% son valores negativos, siendo el valor mínimo -1 y el máximo 1, con una media de 0.5647 (cuadro 11).



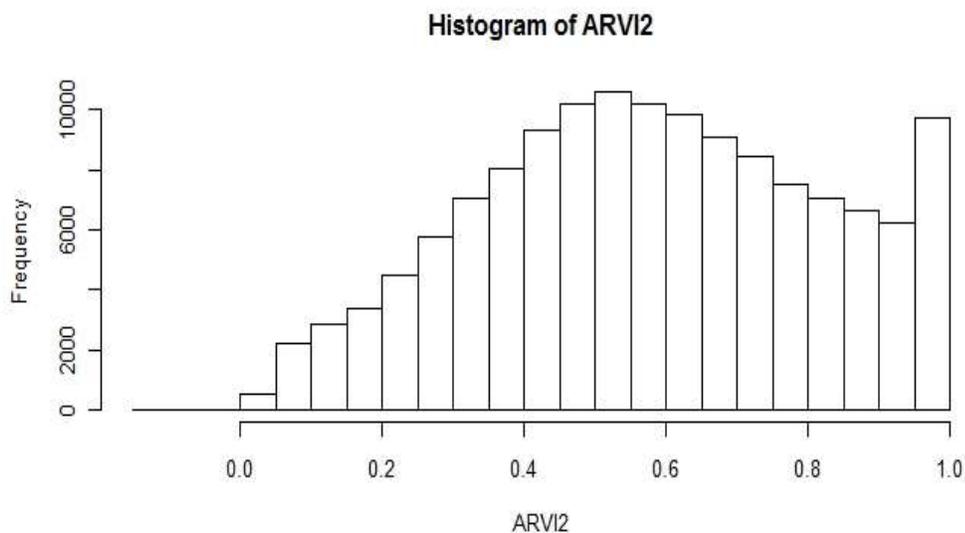
**Figura 18. Histograma que muestra la frecuencia para GEMI en la cuenca alta del Río Amana para el 26 de noviembre del 2015.**

La figura 21 muestra el Índice de Vegetación Resistente a la Atmosfera (ARVI) en la cuenca alta del Río Amana para el 16 de febrero del 2017. La vegetación más densa se sitúa al Norte. Varias zonas de la parte central no poseen vegetación.



**Figura 19. Índice de Vegetación Resistente a la Atmosfera en la cuenca alta del Río Amana para el 16 de febrero del 2017.**

En el siguiente histograma se muestra la distribución de los valores de los píxeles en una comparación de frecuencia para el Índice de Vegetación Resistente a la Atmósfera del 16 de febrero del 2017 (ver figura 22). En el mismo se observa que el 38,63% de los valores arrojados por el Índice de Vegetación Resistente a la Atmósfera en la cuenca alta del Río Amana para el 16 de febrero del 2017 está cubierta por vegetación no vigorosa, a su vez el 61,34% son valores de vegetación vigorosa y solo un 0,03% son valores negativos, siendo el valor mínimo -0.1380 y el máximo 1, con una media de 0.5786 (cuadro 9).



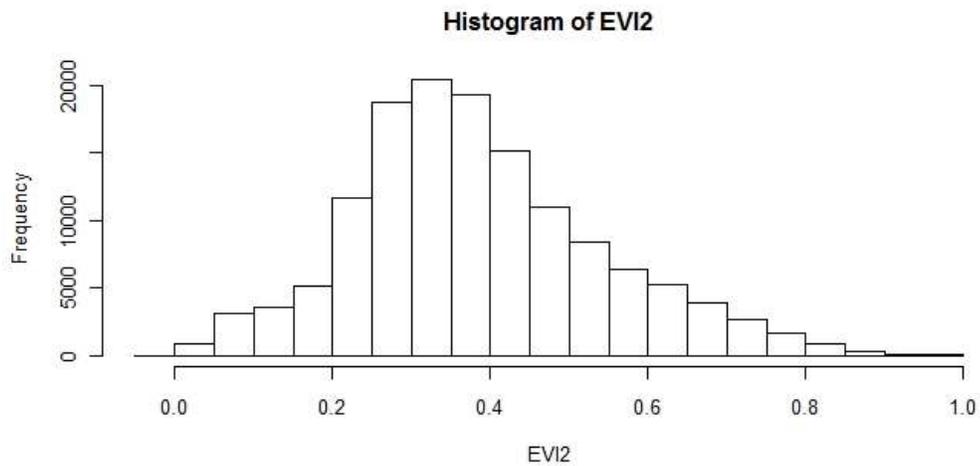
**Figura 20. Histograma que muestra la frecuencia para ARVI en la cuenca alta del Río Amana para el 16 de febrero del 2017.**

En la figura 23 se muestra el Índice de Vegetación Mejorado (EVI) en la cuenca alta del Río Amana para el 16 de febrero del 2017. En esta escena se puede apreciar vegetación vigorosa en la zona Norte de la cuenca.



**Figura 21. Índice de Vegetación Mejorado en la cuenca alta del Río Amana para el 16 de febrero del 2017.**

En la figura 24 se muestra el histograma con la distribución de los valores de los píxeles en una comparación de frecuencia para el Índice de Vegetación Mejorado del 16 de febrero del 2017. En el mismo se observa que el 78,59% de los valores arrojados por el Índice de Vegetación Mejorado en la cuenca alta del Río Amana para el 16 de febrero del 2017 está cubierta por vegetación no vigorosa, a su vez el 21,36% son valores de vegetación vigorosa, siendo el valor mínimo -0.01748 y el máximo 1, con una media de 0.38450 (cuadro 10).



**Figura 22. Histograma que muestra la frecuencia para EVI en la cuenca alta del Río Amana para el 16 de febrero del 2017.**

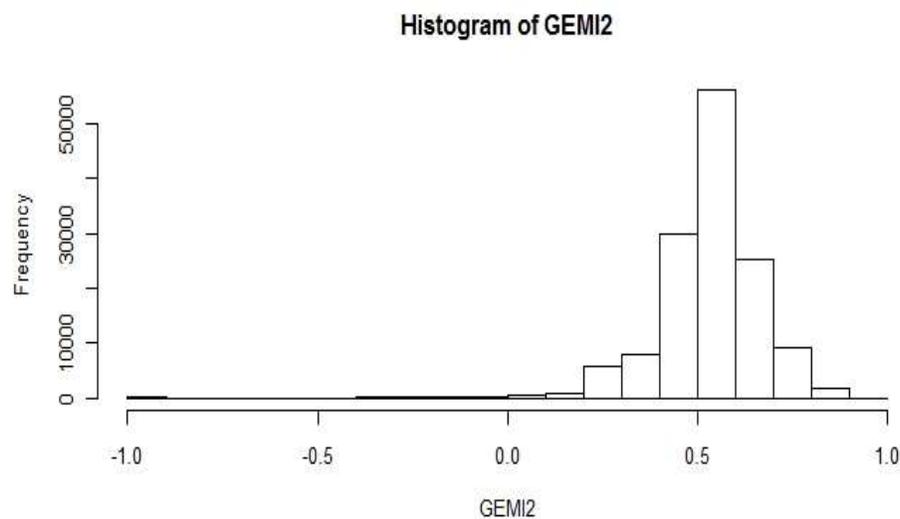
En la figura 25 se muestra el Índice de Vegetación de Monitoreo Ambiental Global (GEMI) en la cuenca alta del Río Amana para el 16 de febrero del 2017. Se puede apreciar vegetación densa en toda la cuenca.

Índice de Vegetación de Monitoreo Ambiental Global en la cuenca alta del Río Amana



**Figura 23. Índice de Vegetación de Monitoreo Ambiental Global en la cuenca alta del Río Amana para el 16 de febrero del 2017.**

En el siguiente histograma se muestra la distribución de los valores de los píxeles en una comparación de frecuencia para el Índice de Vegetación de Monitoreo Ambiental Global del 16 de febrero del 2017 (ver figura 26). En el mismo se observa que el 32,16% de los valores arrojados por el Índice de Vegetación Monitoreo Ambiental Global en la cuenca alta del Río Amana para el 16 de febrero del 2017 está cubierta por vegetación no vigorosa, a su vez el 66,72% son valores de vegetación vigorosa y solo un 1,12% son valores negativos, siendo el valor mínimo -1 y el máximo 1, con una media de 0.5272 (cuadro 11).



**Figura 24. Histograma que muestra la frecuencia para GEMI en la cuenca alta del Río Amana para el 16 de febrero del 2017.**

El resultado obtenido del análisis estadístico para los tres índices de vegetación arroja diferencias estadísticamente significativas entre los índices.

**Cuadro 12. Resumen del Análisis de Varianza que muestra las diferencias estadísticamente significativas entre los tres índices de vegetación.**

```
> summary(anava)
              Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
tratamientos  2 0.19070 0.095351   7.468 0.001679 **
Residuals    42 0.53625 0.012768
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

**Cuadro 13. Nivel de significancia para rangos de p-value.**

Rango p-value	Estrellas de significancia	Descripción común
0	***	Extremadamente significativa
.001	**	Altamente significativa
.01	*	Estadísticamente significativa
.05	.	Pudiera ser significativa
.1		No significativa

(Verzani, 2015).

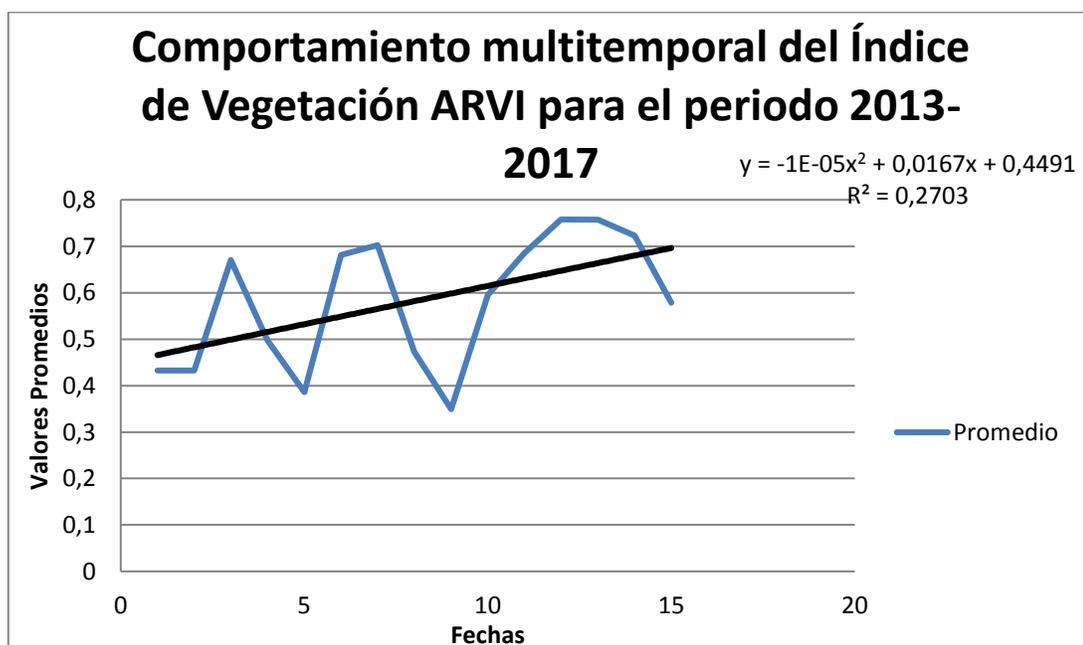
Por tanto, mediante los resultados obtenidos de la desviación estándar, se escogió el índice con menor variabilidad resultando para este el EVI o Índice de Vegetación Mejorada por presentar entre los valores mínimos el segundo menor, entre los valores máximos el valor menor y entre las medias la menor media.

**Cuadro 14. Resultados que muestran la desviación estándar para los tres índices de vegetación.**

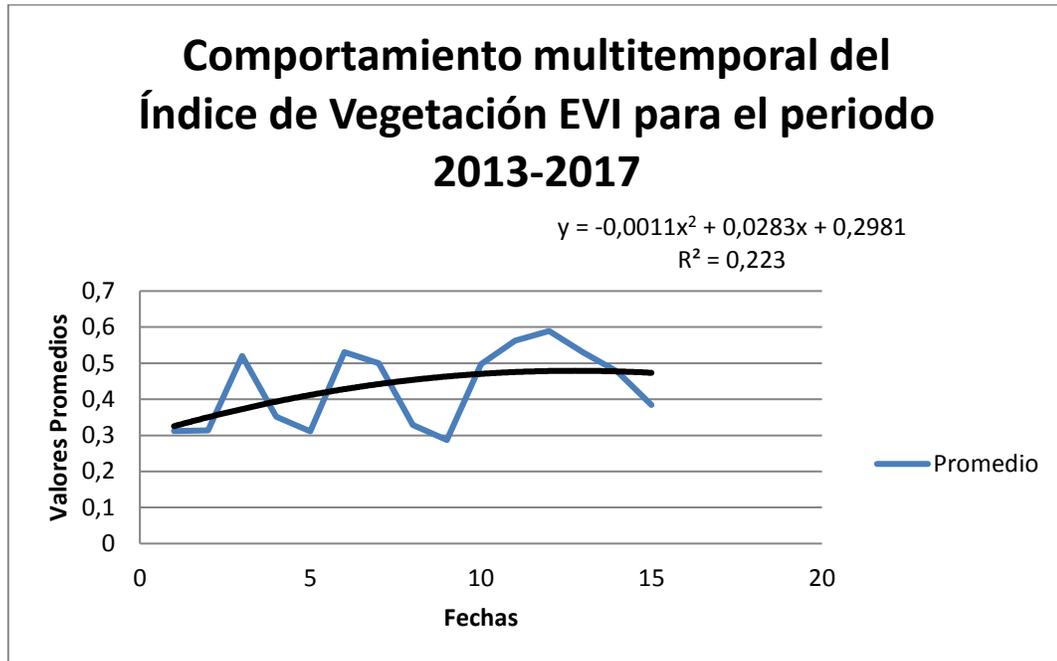
```
> desviaciones
```

	arvi	evi	gemi
Min.	0.1968	0.1210	0.09545
1st Qu.	0.2321	0.1460	0.16760
Median	0.2393	0.1581	0.21740
Mean	0.2610	0.1624	1.81300
3rd Qu.	0.2764	0.1805	1.19400
Max.	0.4638	0.1988	8.43300

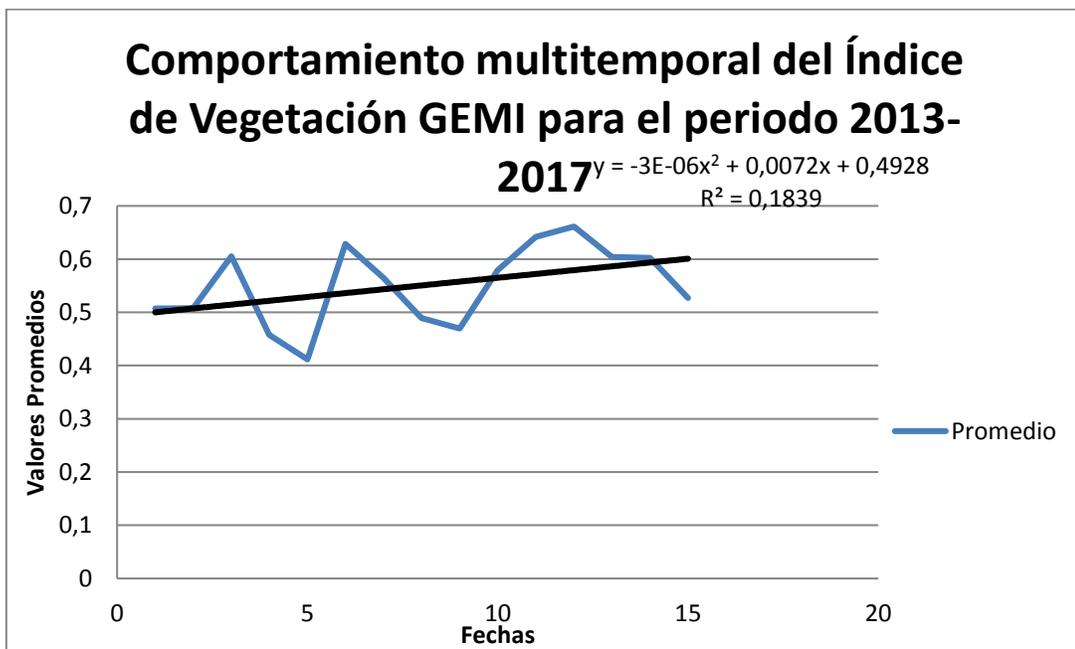
De acuerdo a los resultados arrojados por los Índices de Vegetación ARVI, EVI, GEMI en la cuenca alta del Río Amana se observa en las siguientes figuras que el comportamiento multitemporal es creciente. La línea color negro de las figuras demuestra el vigor de la vegetación, según la misma, el vigor de la vegetación se encuentra en ascenso con el paso del tiempo, siempre y cuando la línea de tendencia se dirija hacia arriba.



**Figura 25. Comportamiento multitemporal del Índice de Vegetación ARVI para el periodo 2013-2017.**



**Figura 26. Comportamiento multitemporal del Índice de Vegetación EVI para el periodo 2013-2017**



**Figura 27. Comportamiento multitemporal del Índice de Vegetación GEMI para el periodo 2013-2017.**

## CONCLUSIONES

A través del modelo digital de elevación obtenido de la Misión Topográfica de Radar Aerotransportado (SRTM por sus siglas en inglés) empleando el software GRASS GIS se pudo obtener los parámetros morfométricos de la cuenca donde destaca estar en presencia de una cuenca moderadamente achatada y moderadamente alargada, con un drenaje de forma rectangular oblonga, un valor bajo en la densidad de drenaje generando bajos volúmenes de escorrentía, una pendiente media de los cauces suave y un tiempo de concentración muy lento de 5 horas y media aproximadamente

Se calcularon los Índices de Vegetación: Resistente a la Atmosfera (ARVI), Mejorado (EVI) y de Monitoreo Ambiental Global (GEMI). Resultando diferencia estadísticamente significativa entre los tres índices de vegetación, tanto ARVI como GEMI tuvieron un comportamiento similar, mientras que EVI resultó ser el índice con menor variabilidad.

En la representación gráfica para comparar el comportamiento espacial se muestra que la vegetación con mayor vigor se situó en la parte norte de la cuenca, resultando la parte sur con una vegetación poco vigorosa y hasta en algunos casos sin presencia de la misma.

. Para la comparación del comportamiento multitemporal del vigor de la vegetación se observa que la misma fue creciente, es decir, la vegetación irá mejorando y la línea de tendencia va en aumento con el paso del tiempo.

## REFERENCIAS

- ABRAE, (2009). Agencia Bolivariana para Actividades Espaciales. [Documento en línea] Disponible: <http://www.abae.gob.ve/observacionesfisicadelatierra8.html> [Consulta: Enero, 2017].
- AMON, J. (1990). Estadística para psicólogos (2). Probabilidad. Estadística Inferencial. [Documento en línea]. Disponible en: XXX. Última Consulta: 17/01/18.
- ANAYA J. A, CHUVIECO E. Y PALACIOS A. (2008). Estimación de biomasa aérea en Colombia a partir de imágenes MODIS. Revista de Teledetección. ISSN: 1988-8740. Número 30. Pp. 5-22.
- ARCE, (2005) Actualización Cartográfica con Imágenes Satelitales [Documento en línea] Disponible:[http://www.cartografia.cl/index.php?option=com\\_content&task=view&id=31&Itemid=9](http://www.cartografia.cl/index.php?option=com_content&task=view&id=31&Itemid=9) [Consulta: Enero, 2017].
- ARIZA, A. (2013). Productos LDCM-Landsat 8. [Documento en línea]. Disponible en: <http://www.un-spider.org/sites/default/files/LDCM-L8.R1.pdf>. [Consulta: Marzo, 2017].
- ARRIETA, A. (2010). Curso de hidrología. Universidad de Cartagena. Colombia.
- BAUTISTA Z., F., DELFIN G., H., Y PALACIO (2004). Técnicas de Muestreo para Manejadores de Recursos Naturales. (Primera ed.). México: UNAM POSGRADO. [Documento en línea] Disponible: <http://books.google.co.ve/books?id=iChhyOsktnMC&printsec=frontcover&lr=&client=firefox-a#PPA6,M>. [Consulta: Abril, 2017].

- BISQUERT M., SÁNCHEZ J. M., CASELLES V., PAZ ANDRADE M. I., Y LEGIDO J. L. (2009). Los índices de vegetación como indicadores del riesgo de incendio con imágenes del sensor TERRA-MODIS. Revista de Teledetección. ISSN: 1999-8740. Número 33. Pp 80-91.
- BOIX, L. (2015). Integración de Sensores y uso de índices de vegetación para evaluar la producción en plantaciones de cítricos en Málaga. Editor: Publicaciones y Divulgación Científica. Universidad de Málaga. [Documento en línea] Disponible: [https://riuma.uma.es/xmlui/bitstream/handle/10630/11250/TD\\_Boix.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://riuma.uma.es/xmlui/bitstream/handle/10630/11250/TD_Boix.pdf?sequence=1&isAllowed=y) [Consulta: Julio, 2017].
- CAECE.EDU.AR, (2009) Teledetección. Bases Físicas. Técnicas Espaciales de Análisis [Documento en línea] Disponible: [http://www.caece.edu.ar/tea/Apuntes/Teledetecci%C3%B3n\\_1.pdf](http://www.caece.edu.ar/tea/Apuntes/Teledetecci%C3%B3n_1.pdf) [Consulta: Abril, 2017].
- CARVACHO, L. Y SANCHEZ, M. (2010) Comparación de índices de vegetación a partir de imágenes MODIS en la región del Libertador Bernardo O'Higgins, Chile, en el periodo 2001-2005. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla. Sevilla. ISBN 978-84-472-1294-1. Pp. 728-737.
- CASTILLO, (2008). La Importancia de la Evaluación y Monitoreo de los Recursos Naturales. Universidad de Chile - Departamento de Manejo de Recursos Forestales: Documento en línea] Disponible: [http://www.forestal.uchile.cl/ambiente\\_forestal/ambiente\\_forestal\\_3/cap2.pdf](http://www.forestal.uchile.cl/ambiente_forestal/ambiente_forestal_3/cap2.pdf). [Consulta: Abril, 2017]
- CHAVEZ, J. (1988). An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. Remote Sensing of Environment 24:459-479

- CHUVIECO, E. (1996). Fundamentos de Teledetección. 3ª edición revisada ed. Ediciones RIALP, Madrid.
- CIAT.CGIAR.ORG (2009). Centro Internacional de Agricultura Tropical. Conceptos Básicos de Teledetección. [Documento en línea] Disponible: <http://www.ciat.cgiar.org/dtmradar/factores.htm> [Consulta: Abril, 2017 ].
- CORTOLIMA, (2010). Plan de ordenación y manejo ambiental de la microcuenca de las quebradas, las panelas y la balsa. [Documento en línea] Disponible: <http://www.cortolima.gov.co/cuenca-gual/gesti-n-integral-recurso-h-drico> [Consulta: Julio, 2017].
- COTLER, (2004). El Manejo Integral de Cuencas en México. Estudios y Reflexiones para Orientar la Política Ambiental. (Primera ed.). Sistema de Publicaciones del INE. [Documento en línea] Disponible: [http://www.ine.gob.mx/publicaciones/consultaPublicacion.html?id\\_public=452](http://www.ine.gob.mx/publicaciones/consultaPublicacion.html?id_public=452) [Consulta: Enero, 2017].
- DÍAZ, A. (1999). Diseño estadístico de experimentos. Universidad de Antioquia. Medellín-Colombia.
- EDUSPACE.ESA.INT, (2009) [Documento en línea] Disponible: <http://www.eduspace.esa.int/subtopic/default.asp?document=295&language=es> [Consulta: Abril, 2017].
- ELEARNING, (2009). Conceptos básicos de ecología y manejo de recursos [Documento en línea] Disponible:<http://elearning.semarnat.gob.mx/cte/MATERIALESAPOYO/manejo%20de%20recursos%20naturales%20y%20planeaci%C3%B3n%20ambiental/BASICO/1.html> [Consulta: Abril, 2017].

- FERNÁNDEZ, S., CORDERO J. Y CÓRDOBA A.(2002). Estadística descriptiva. ESIC Editorial. Madrid-España.
- GANDIA Y MELIA (1991). La Teledetección en el Seguimiento de los Fenómenos Naturales. Recursos Renovables: Agricultura, Curso de Posgrado. Universitat de València Estudi General Departament de Termodinámica. Unidad de Investigación de Teledetección.
- GEOGRAPHIC RESOURCES ANALYSIS SUPPORT SYSTEM (GRASS). 2013. Software libre.
- GLOBAL LAND COVER FACILITY (GLCF) Disponible: <http://glcfapp.glcf.umd.edu:8080/esdi/index.jsp>
- GONZÁLEZ, J. (2010). Comparación de los Índices de Vegetación en su capacidad para describir la evolución del vigor de la vegetación en la cuenca del Río Aragua. Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Agrónomo. Universidad de Oriente. Venezuela.
- GRASS, ITC, (2009). [Documento en línea] Disponible: <http://grass.itc.it/index.php> [Consulta: Junio, 2017].
- HENGL, T. Y REUTER, H. (2009). Geomorphometry: concepts, software and applications. Primera edición. Ámsterdam - Reino de los Países Bajos.
- HERNANDEZ, M. (2010). Evaluación del comportamiento del vigor de la vegetación en la cuenca del rio Areo a través de técnicas de teledetección para el periodo 1985 – 2003. Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Agrónomo. Universidad de Oriente. Venezuela.
- HUMBOLDT, (2008). Los Sistemas de Información Geográfica - SIG. [Documento en línea] Disponible:

<http://www.humboldt.org.co/humboldt/mostrarpagina.php?codpage=70001#2> [Consulta: Marzo, 2017].

IGAC. (2004). Instituto Geográfico Agustín Codazzi. [Documento en línea] Disponible:[http://www.igac.gov.co:8080/igac\\_web/UserFiles/File/ciaf/TutorialSIG\\_2005\\_26\\_02/paginas/ctr\\_prdefinicion.htm](http://www.igac.gov.co:8080/igac_web/UserFiles/File/ciaf/TutorialSIG_2005_26_02/paginas/ctr_prdefinicion.htm) [Consulta: Mayo, 2017].

JARDÍ, M. (1985). Forma de una cuenca de drenaje: Análisis de las variables morfométricas que nos la definen. Barcelona.

LUDUEÑA, S. VALLADARES, A. Y GIRAUT, M. (2007). Caracterización hidrológica preliminar a partir de técnicas de teledetección. Caso de estudio: Islas Malvinas. Argentina.

MARTINI, A. (2008). Percepción Remota - Proyecto Agricultura de Precisión INTA Manfredi. [Documento en línea] Disponible: <http://www.agriculturadeprecision.org/percrem/PercepcionRemota.htm> [Consulta: Mayo, 2017].

MORALES, P. (2011). Universidad Rafael Landívar El coeficiente de Correlación. [Documento en línea] Disponible: xxxxx. Última Consulta: 15/01/18.

NASA, (2009) Landsat. [Documento en línea] Disponible: <http://landsat.gsfc.nasa.gov/>[Consulta: Marzo, 2017].

PACO, A. (2003). Fotointerpretación y Teledetección. Universidad de Murcia. [Documento en línea] Disponible: <http://www.um.es:> <http://www.um.es/geograf/sig/teledet/> [Consulta: Abril, 2017].

PISANI, J. (2010). Evaluación del comportamiento del vigor de la vegetación en el parque nacional península de paria para el período 1985 – 2003.

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Agrónomo. Universidad de Oriente. Venezuela.

RODRÍGUEZ (2004). I Curso de experto Universitario en Sistemas de Información Geográfica. Entrada de datos y edición ráster. Análisis ráster y tratamiento digital de imágenes de satélite. Universidad Internacional de Andalucía Sede Iberoamericana Santa María de la Rábida [Documento en línea] Disponible: [200.0.31.72/sigutpl/biblioteca/manuales/teoria%204.pdf](http://200.0.31.72/sigutpl/biblioteca/manuales/teoria%204.pdf) [Consulta: Junio, 2017].

SARABIA, J. Y SÁEZ, M. (2005). Curso básico de estadística para economía y administración de empresas. Universidad de Cantabria. España.

SOBRINO. (2000). Teledetección. (Primera Ed) Valencia - España [Documento en línea] Disponible: <http://books.google.co.ve/books?id=Yb6xIldfoT0C&printsec=frontcover&lr=&client=firefox-a#PPA464,M1> [Consulta: Junio, 2017].

UMAÑA, E. (2002). Manejo de cuencas hidrográficas y protección de fuentes de agua. Universidad nacional agraria. Nicaragua.

UNR, (2009) Programa de Comunicación Institucional. Imágenes satelitales: Tecnología de múltiples aplicaciones. Periódico Virtual. Dirección de Comunicación UNIVERSIDAD NACIONAL DE ROSARIO- ARGENTINA [Documento en línea] Disponible: <http://www.unr.edu.ar/periodico/secciones/2006/julio/fceia-imagsat.htm> [Consulta: Junio, 2017].

USGS, (2013) Landsat 8 Product. U.S. Department of the Interior. U.S. Geological Survey. URL: <http://landsat.usgs.gov>

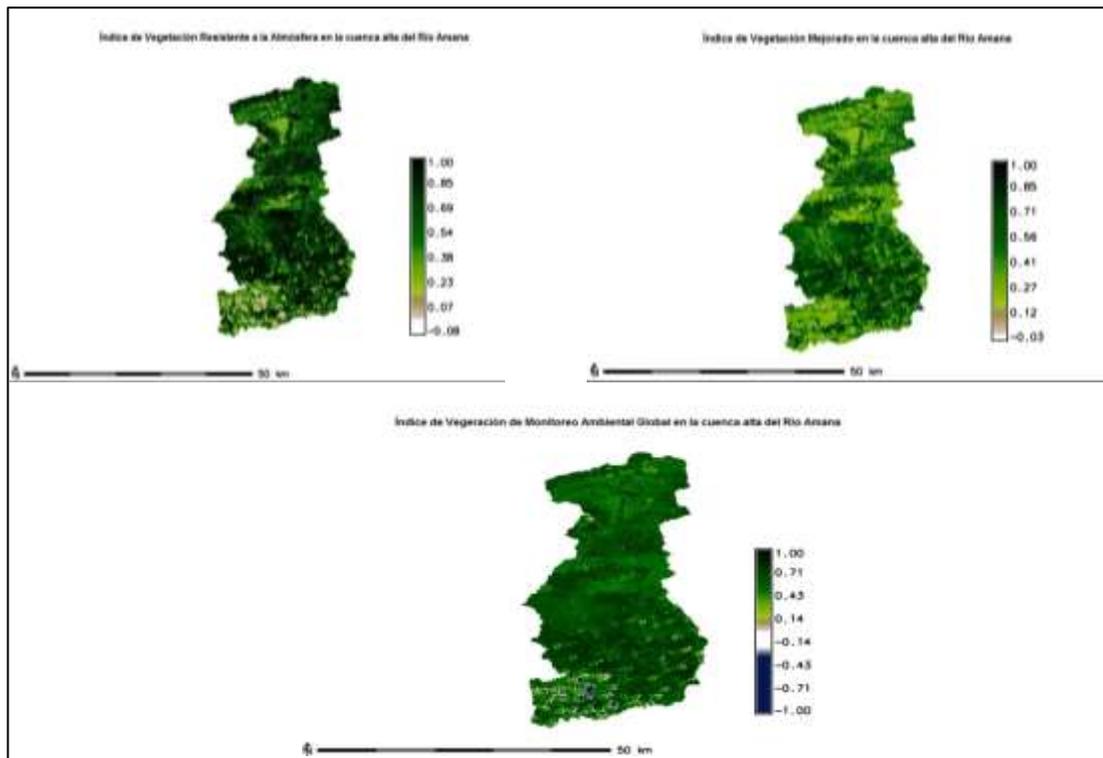
VERZANI, J. (2005). Using introductory statistic. CRC Pres. Florida USA.

VISUALIZADOR GLOBAL (GLOVIS) Disponible: <http://glovis.usgs.gov/>

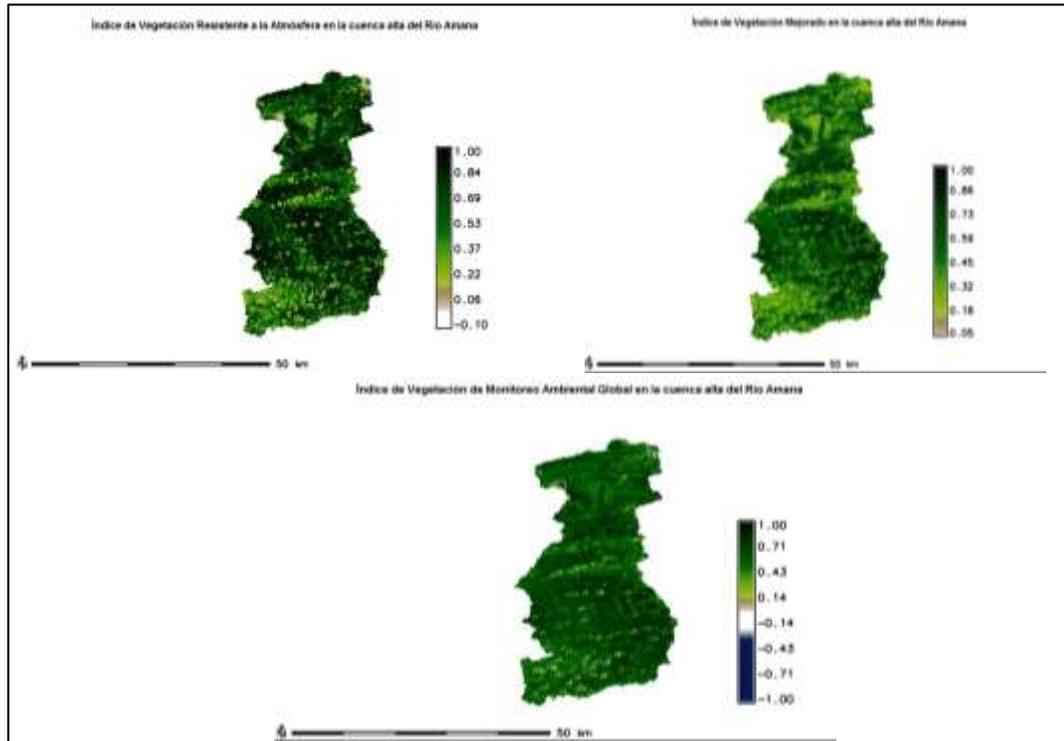
## **ANEXOS**



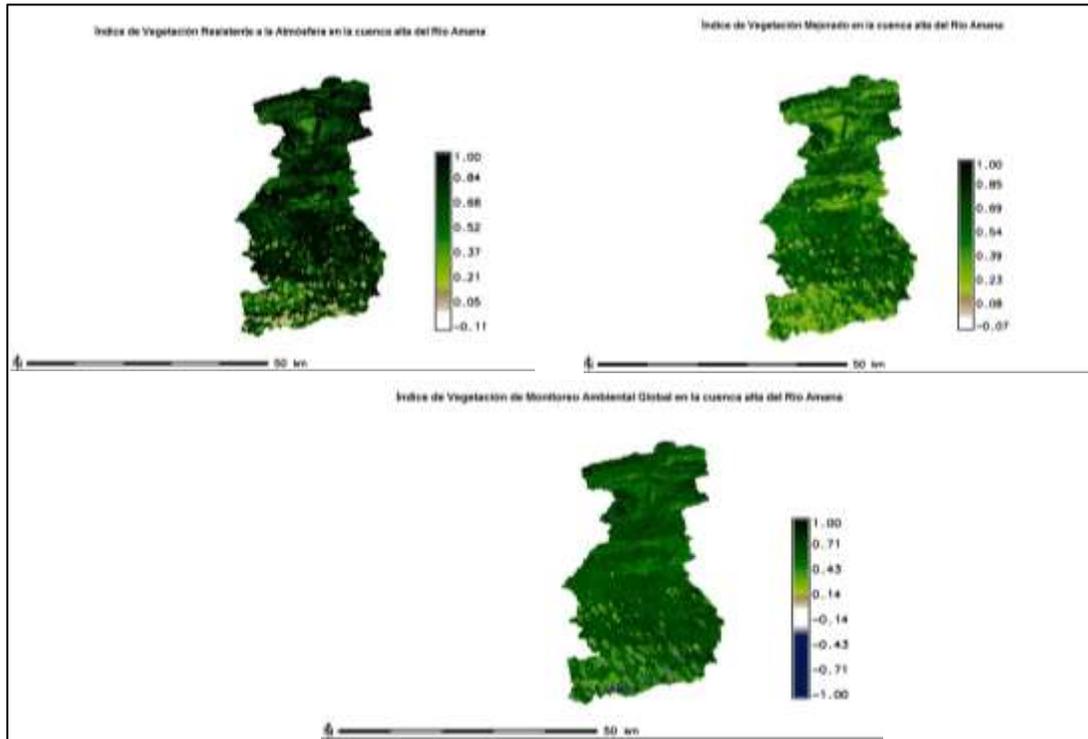
**Anexo 1.** Modelo digital de elevación (SRTM).



**Anexo 2.** Índice de Vegetación ARVI, EVI y GEMI en la cuenca alta del Río Amara para el 03 de agosto del 2014.



**Anexo 3.** Índice de Vegetación ARVI, EVI y GEMI en la cuenca alta del Río Amara para el 14 de diciembre del 2016.



**Anexo 4.** Índice de Vegetación ARVI, EVI y GEMI en la cuenca alta del Río Amara para el 23 de julio del 2016.

## HOJAS METADATOS

### Hoja de Metadatos para Tesis y Trabajos de Ascenso - 1/6

<b>Título</b>	<b>Evaluación del vigor de la vegetación en la cuenca alta del río amana para el periodo 2013-2017</b>
---------------	--

El Título es requerido. El subtítulo o título alternativo es opcional.

### Autor(es)

<b>Apellidos y Nombres</b>	<b>Código CVLAC / e-mail</b>	
<b>Belmonte Charmel, Ricardo André</b>	<b>CVLA C</b>	<b>C.I: 21.200.557</b>
	<b>e-mail</b>	<b>belmontericardo0@gmail.com</b>
	<b>CVLA C</b>	<b>C.I:</b>
	<b>e-mail</b>	

Se requiere por lo menos los apellidos y nombres de un autor. El formato para escribir los apellidos y nombres es: "Apellido1 InicialApellido2., Nombre1 InicialNombre2". Si el autor esta registrado en el sistema CVLAC, se anota el código respectivo (para ciudadanos venezolanos dicho código coincide con el numero de la Cedula de Identidad). El campo e-mail es completamente opcional y depende de la voluntad de los autores.

### Palabras o frases claves:

índice de vegetación
grass
río amana
cuenca
vigor
tesis d grado

El representante de la subcomisión de tesis solicitará a los miembros del jurado la lista de las palabras claves. Deben indicarse por lo menos cuatro (4) palabras clave.

## Hoja de Metadatos para Tesis y Trabajos de Ascenso - 2/6

### Líneas y sublíneas de investigación:

Área	Sub-área
Tecnología y Ciencias Aplicadas	Ingeniería Agronómica

Debe indicarse por lo menos una línea o área de investigación y por cada área por lo menos un subárea. El representante de la subcomisión solicitará esta información a los miembros del jurado.

### Resumen (Abstract):

Con el propósito de realizar la evaluación multitemporal del vigor de la vegetación para tres índices de vegetación (ARVI, EVI y GEMI) durante el periodo 2013 a 2017 en la naciente de la cuenca hidrográfica del Río Amana la cual pertenece al estado Anzoátegui y Monagas, Venezuela; se calculó en primera instancia sus parámetros morfométricos con los cuales se caracteriza la cuenca en términos de su ubicación espacial, magnitud superficial y las características de su relieve a través de la elevación modal, elevación media y perfil del cauce principal, empleándose para este cálculo el modelo digital de elevación (SRTM), procesado por el software de Sistema de Información Geográfica GRASS-GIS. En una segunda fase se aplicaron las técnicas de procesamiento digital a imágenes obtenidas del satélite Landsat 8, procesadas con el software GRASS para el análisis gráfico y el software R para el análisis estadístico, conjuntamente con el código Tinn-R donde se compiló la mayoría de los datos. Indicando diferencia estadísticamente significativa entre los tres índices de vegetación, tanto ARVI como GEMI tuvieron un comportamiento similar, mientras que EVI resultó ser un índice con menor variabilidad. En la representación gráfica para comparar el comportamiento espacial se muestra que la vegetación con mayor vigor se situó en la parte norte de la cuenca. Para la caracterización del comportamiento multitemporal se observa que el vigor de la vegetación es creciente, es decir la línea de tendencia va en aumento con el paso del tiempo.

## Hoja de Metadatos para Tesis y Trabajos de Ascenso - 3/6

### Contribuidores:

Apellidos y Nombres	Código CVLAC / e-mail	
MSc. Ing. Víctor Malavé	ROL	CA <input type="checkbox"/> AS <input type="checkbox"/> TU <input type="checkbox"/> JU <input type="checkbox"/>
	CVLAC	C.I: 8.895.244
	e-mail	vmalave@udo.edu.ve
MSc. Ing. Héctor Castellanos	ROL	CA <input type="checkbox"/> AS <input type="checkbox"/> TU <input type="checkbox"/> JU <input type="checkbox"/>
	CVLAC	C.I: 4.259.885
	e-mail	hcastellanos5457@hotmail.com
MSc. Ing. Luis Andérico	ROL	CA <input type="checkbox"/> AS <input type="checkbox"/> TU <input type="checkbox"/> JU <input type="checkbox"/>
	CVLAC	C.I: 4.619.571
	e-mail	

Se requiere por lo menos los apellidos y nombres del tutor y los otros dos (2) jurados. El formato para escribir los apellidos y nombres es: "Apellido1 InicialApellido2., Nombre1 InicialNombre2". Si el autor esta registrado en el sistema CVLAC, se anota el código respectivo (para ciudadanos venezolanos dicho código coincide con el numero de la Cedula de Identidad).. La codificación del Rol es: CA = Coautor, AS = Asesor, TU = Tutor, JU = Jurado.

### Fecha de discusión y aprobación:

Año	Mes	Día
2018	04	20

Fecha en formato ISO (AAAA-MM-DD). Ej: 2005-03-18. El dato fecha es requerido.

**Lenguaje:** spa Requerido. Lenguaje del texto discutido y aprobado, codificado usando ISO 639-2. El código para español o castellano es spa. El código para ingles en. Si el lenguaje se especifica, se asume que es el inglés (en).

## Hoja de Metadatos para Tesis y Trabajos de Ascenso - 4/6

### Archivo(s):

<b>Nombre de archivo</b>
<b>NMOTTG_BCRA2018</b>

Caracteres permitidos en los nombres de los archivos: **A B C D E F G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u v w x y z 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 \_ - .**

### Alcance:

Espacial: \_\_\_\_\_ (opcional)

Temporal: \_\_\_\_\_ (opcional)

### Título o Grado asociado con el trabajo:

Ingeniero Agrónomo

Dato requerido. Ejemplo: Licenciado en Matemáticas, Magister Scientiarum en Biología Pesquera, Profesor Asociado, Administrativo III, etc

### Nivel Asociado con el trabajo: Ingeniería

Dato requerido. Ejs: Licenciatura, Magister, Doctorado, Post-doctorado, etc.

### Área de Estudio:

Tecnología y Ciencias Aplicadas

Usualmente es el nombre del programa o departamento.

### Institución(es) que garantiza(n) el Título o grado:

Universidad de Oriente Núcleo Monagas

Si como producto de convenciones, otras instituciones además de la Universidad de Oriente, avalan el título o grado obtenido, el nombre de estas instituciones debe incluirse aquí.

Hoja de metadatos para tesis y trabajos de Ascenso- 5/6



UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
CONSEJO UNIVERSITARIO  
RECTORADO

CUN°0975

Cumaná, 04 AGO 2009

Ciudadano  
**Prof. JESÚS MARTÍNEZ YÉPEZ**  
Vicerrector Académico  
Universidad de Oriente  
Su Despacho

Estimado Profesor Martínez:

Cumplo en notificarle que el Consejo Universitario, en Reunión Ordinaria celebrada en Centro de Convenciones de Cantaura, los días 28 y 29 de julio de 2009, conoció el punto de agenda **"SOLICITUD DE AUTORIZACIÓN PARA PUBLICAR TODA LA PRODUCCIÓN INTELECTUAL DE LA UNIVERSIDAD DE ORIENTE EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL DE LA UDO, SEGÚN VRAC N° 696/2009"**.

Leído el oficio SIBI - 139/2009 de fecha 09-07-2009, suscrita por el Dr. Abul K. Bashirullah, Director de Bibliotecas, este Cuerpo Colegiado decidió, por unanimidad, autorizar la publicación de toda la producción intelectual de la Universidad de Oriente en el Repositorio en cuestión.

Comunicación que hago a usted a los fines consiguientes.

RECIBIDO POR [Firma]  
FECHA 5/8/09 HORA 5:30

Cordialmente,  
[Firma]  
**JUAN A. BOLANOS CURTEL**  
Secretario

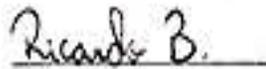
C.C: Rectora, Vicerrectora Administrativa, Decanos de los Núcleos, Coordinador General de Administración, Director de Personal, Dirección de Finanzas, Dirección de Presupuesto, Contraloría Interna, Consultoría Jurídica, Director de Bibliotecas, Dirección de Publicaciones, Dirección de Computación, Coordinación de Teleinformática, Coordinación General de Postgrado.

JABC/YOC/manaja

Hoja de metadatos para tesis y trabajos de Ascenso- 6/6

De acuerdo al Artículo 41 del reglamento de Trabajos de Grado:

Los Trabajos de Grado son de la exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente, y sólo podrán ser utilizados a otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quién deberá participarlo previamente al Consejo Universitario, para su autorización.



Ricardo A. BelmonteC.

Autor



---

Prof. Víctor Malavé. MSc.  
C.I.: 8.895.244