



**UNIVERSIDAD DE CARABOBO**  
**ÁREA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**MAESTRIA EN INGENIERÍA AMBIENTAL**



**ANÁLISIS ESPACIOTEMPORAL DE LOS ÍNDICES BIOFÍSICOS EN LA  
CUENCA DEL RÍO PAO**

**AUTOR: LICDA. NIEVES HERRERA MA. ALEJANDRA**

**TUTOR: MSC. PHD. MARQUEZ ADRIANA**

**VALENCIA, MAYO DE 2019**

**UNIVERSIDAD DE CARABOBO**  
**ÁREA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**MAESTRIA EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

**ANÁLISIS ESPACIOTEMPORAL DE LOS ÍNDICES BIOFÍSICOS EN LA  
CUENCA DEL RÍO PAO**

**AUTOR: LICDA. NIEVES HERRERA MA. ALEJANDRA**

**Trabajo presentado ante el Área de Estudios de Postgrado de la Universidad de  
Carabobo para optar al Título de Magister en Ingeniería Ambiental**

**VALENCIA, MAYO DE 2019**



UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERIA  
DIRECCIÓN DE ESTUDIOS PARA GRADUADOS  
SECCIÓN DE GRADO



**ACTA DE DISCUSIÓN DE TRABAJO DE GRADO**

*En atención a lo dispuesto en los Artículos 137, 138 y 139 del Reglamento de Estudios de Postgrado de la Universidad de Carabobo, quienes suscribimos como Jurado designado por el Consejo de Postgrado de la Facultad de Ingeniería, de acuerdo a lo previsto en el Artículo 135 del citado Reglamento, para estudiar el Trabajo de Grado titulado:*

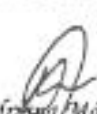
***"ANÁLISIS ESPACIO TEMPORAL DE LOS ÍNDICES  
BIOFÍSICOS EN LA CUENCA DEL RÍO PAO, ESTADOS  
CARABOBO Y COJEDES"***

*Presentado para optar al grado de **MAGÍSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL** por el (la) aspirante:*

**MARÍA NIEVES**  
**V.- 18.266.246**

*Habiendo examinado el Trabajo presentado, decidimos que el mismo está **APROBADO**.*

*En Valencia, a los cinco (05) día del mes de Junio del año dos mil diecinueve.*

  
Prof. Adrián Márquez  
C.I.: 12604007  
Fecha: 05/06/2019

  
Prof. Samuel Cárdenas  
C.I.: 77.753.640  
Fecha: 05/06/2019  
PE: 04/06/2019 /D6.-

  
Prof. Julio Maldonado  
C.I.: 5.670.777  
Fecha: 05/06/2019

UNIVERSIDAD DE CARABOBO / DIRECCIÓN DE POSTGRADO

FACULTAD DE INGENIERÍA MAGUANAQUIA SECTOR BARBULA - Telefonos Directos: (0241) 8572829 / 8574200 - 8570005 EXT 100. FAX: -(0241) 8571855 <http://postgrado.ing.uc.edu.ve>



Universidad de Carabobo  
Facultad de Ingeniería  
Dirección de Postgrado



## ACTA DE APROBACION DEL PROYECTO DE TRABAJO DE GRADO

Por medio de la presente hacemos constar que el Proyecto de Trabajo de Grado titulado: "ANÁLISIS ESPACIO TEMPORAL DE LOS INDICES BIOFÍSICOS EN LA CUENCA DEL RIO PAO, ESTADOS CARABOBO Y COJEDES" presentado por la ciudadana: MARIA ALEJANDRA NIEVES, alumno regular del Programa de Maestría en INGENIERIA AMBIENTAL, reúne los requisitos exigidos para la inscripción.

La Dra. Adriana M. Márquez R., aceptó la tutoría de este Trabajo, según Constancia anexa.

En Valencia, a los once días del mes de julio del año Dos mil Diecisiete.

Por La Comisión Coordinadora:

Prof. Adriana Márquez  
Jefe del Programa

Prof. Auxilia Mallia  
Miembro

Prof. Bettys Fariás  
Miembro

## ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	.....1
<b>CAPÍTULO I</b>	
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	.....4
FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	.....8
OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	.....8
OBJETIVO GENERAL	.....8
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	.....9
JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	.....9
LIMITACIONES Y ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN	.....12
<b>CAPITULO II</b>	
ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	.....13
MARCO TEÓRICO	.....18
Fundamentos de la teledetección	.....18
Teledetección	.....18
Radiación Electromagnética	.....21

Interacción de la atmósfera con la energía electromagnética	.....27
Corrección de imágenes satelitales (procesamiento preliminar)	.....29
Cuenca hidrográfica	.....41
Sistema de Información Geográfica (SIG)	.....41
Uso y cobertura terrestre	.....42
Sensores remotos e índices de Vegetación	.....43
Índice de Vegetación de diferencia normalizada NDVI	.....47
Índice de Suelo Ajustado SAVI	.....49
Descripción general del área de estudio	.....51
Geología regional	.....52
Geomorfología	.....53
Clima	.....54
Hidrología	.....55
Hidrografía	.....55

### **CAPÍTULO III**

MARCO METODOLÓGICO	.....57
TIPO DE INVESTIGACIÓN	.....57
DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	.....57
TECNICAS DE RECOLECCIÓN DE	.....59

INFORMACIÓN	
ETAPAS DE LA INVESTIGACIÓN .....	59
1° Etapa Selección de imágenes satelitales .....	60
2° Etapa Procesamiento preliminar de las imágenes satelitales .....	62
3° Etapa Estimación de los índices biofísicos .....	62
4° Etapa Análisis espaciotemporal del uso y cobertura de la tierra .....	63

#### CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	69
CAPÍTULO V	
CONCLUSIONES	
RECOMENDACIONES	
BIBLIOGRAFÍA	

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I. Características de las imágenes satelitales Landsat 8 OLI TIRS Level 1 .....	70
Tabla II. Resumen estadístico del índice NDVI en la cuenca del río Pao .....	77
Tabla III. Resumen estadístico del índice SAVI en la cuenca del río Pao .....	77
Tabla IV. Estadísticos generados de la clasificación supervisada en la cuenca del río Pao .....	81



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Espectro electromagnético .....	19
Figura 2. Diagrama de la sección transversal de una hoja típica .....	24
Figura 3. Ubicación de la cuenca del río Pao (imagen de la cuenca mostrada en falsos colores con la combinación R-G-B) .....	52
Figura 4. Distribución de los puntos de muestreo para el análisis espacio temporal de los índices biofísicos en la Cuenca del Río Pao .....	68
Figura 5. Reflectancia (%) en la bandas espectrales 4 (roja) y 5 (infrarrojo cercano) de la imagen Noviembre 2014 del Satélite Landsat 8 OLI .....	73
Figura 6. Índice NDVI en la Cuenca del Río Pao .....	74
Figura 7. Índice SAVI en la Cuenca del Río Pao .....	75
Figura 8. Análisis comparativo de los índices biofísicos durante las tres temporadas secas en la Cuenca del Río Pao. A: Media del índice NDVI. B: Diagrama de cajas del índice SAVI .....	79
Figura 9. Clasificación Supervisada .....	80

## RESUMEN

Entre las técnicas que emplean el uso de datos satelitales multiespectrales destacan los índices de vegetación. La cuenca del río Pao (CRP) se caracteriza por condiciones socioambientales particulares, siendo amparada bajo instrumentos legales. Analizar espaciotemporalmente los índices biofísicos en la CRP implicaría una contribución importante para los planes de manejo de la misma, debido a las grandes amenazas que las actividades antrópicas han generado. Para ello, se consideraron tres temporadas secas (año 2014 al 2017), seleccionándose doce imágenes satelitales (Landsat 8 OLI TIRS Level1), a las cuales previamente se les realizó correcciones topográficas y radiométricas (software ERDAS IMAGINE 2014, módulo ATCOR 3 y ATCOR 2). Luego, se emplearon los índices NDVI y SAVI (software ARCGIS 10, caja de herramientas modelo SEBAL versión 1.0). Finalmente se realizó un análisis espaciotemporal sobre el cambio del uso y cobertura de la cuenca por medio de una clasificación supervisada (software ENVI 5.3) y comparando los valores de los índices en cuarenta puntos de muestreo que contemplaron las cinco coberturas terrestres preestablecidas (vegetación, urbano, cuerpos de agua, suelo descubierto, agropecuario) a través de un análisis estadístico ANOVA (software STATGRAPHICS). Se observó que el índice SAVI mostró una mayor variación en el contraste de color a diferencia del NDVI, lo cual se pudo notar claramente en el análisis de varianza arrojado en el ANOVA. Además se observó que sólo hubo diferencia significativa entre la media del índice NDVI de la temporada 2016-2017 con respecto a la dos temporadas anteriores. En cuanto al análisis cualitativo de la clasificación supervisada, se notó que las diferencias espaciotemporales obedeció más a las características espectrales entre las distintas coberturas terrestres preestablecidas. Se recomienda realizar un análisis comparativo por cada tipo de cobertura terrestre, incrementando la cantidad de años de estudio y reforzar los resultados con información obtenida de campo.

**Palabras clave:** Cuenca del río Pao, Índices de Vegetación, NDVI, SAVI, Clasificación Supervisada

## INTRODUCCIÓN

El aumento de la población humana ha traído consigo la expansión de las tierras cultivables, los pastos, las plantaciones y las zonas urbanas, acompañado de grandes aumentos en el consumo de energía, agua y fertilizantes, junto con considerables pérdidas de biodiversidad; socavando la capacidad de los ecosistemas para sostener la producción de alimentos, mantener los recursos de agua dulce y forestal, regular el clima y la calidad del aire, y contrarrestar las enfermedades. El uso de la tierra ha sido, por lo general, considerado un asunto ambiental local, aunque se ha estado reconociendo la importancia que esto tiene a nivel mundial (Foley *et al.*, 2005).

El cambio en el uso de la tierra, se da como resultado de complejas interacciones entre factores sociales, económicos y ambientales que ocurren a distintas escalas temporales y espaciales. Las dinámicas que pueden influir en ello son, por ejemplo, el incremento en la demanda de recursos naturales y materia prima, en particular de los sistemas tropicales; el cambio en las economías regionales; el efecto del turismo; la globalización de los mercados; o la presencia y eficiencia de las instituciones sociales (Bonilla, 2017). El uso y cobertura de la tierra juega un papel importante en la configuración del ambiente en el cual habitamos debido a la modificación dramática

de la composición biofísica y de las características del ambiente natural (Xian y Crane, 2006; Deng *et al.*, 2015). Debido a ello, entender los ambientes urbanos/suburbanos y sus cambios espacio temporal, es esencial para el manejo y la planificación local y regional (Deng y Wu, 2012; Deng *et al.*, 2015).

Las técnicas con sensores remotos han sido extensamente aplicadas por la importancia que tienen para entender y monitorear los entornos, debido a su perspectiva sinóptica y a la repetición de la cobertura sobre amplias áreas geográficas. De manera tradicional, las imágenes de sensores remotos han sido empleadas para generar mapas multitemporales con el uso y cobertura de la tierra, a través de numerosos algoritmos analíticos espaciales, espectrales y contextuales (Yuan & Bauer, 2007).

Entre las técnicas que emplean el uso de datos satelitales multiespectrales, destacan los índices de vegetación. Estos pueden ser definidos como un parámetro calculado a partir de los valores de la reflectividad a distintas longitudes de onda y que buscan extraer de ellos la información relacionada con la vegetación minimizando la influencia de las perturbaciones como las debidas al suelo y a las condiciones atmosféricas. El gran reto de la teledetección consiste

en estudiar la vegetación de una escena a partir de medidas de reflectividad con independencia de todos los factores que perturban a la señal radiométrica (Gilabert *et al.*, 1997).

En ese sentido, el presente estudio consistió en una evaluación de índices de vegetación derivados de imágenes adquiridas por el sensor Landsat 8 OLI TIRS Level 1, con el fin de realizar una descripción de la cobertura terrestre de la cuenca del río Pao. Para ello, este estudio está dividido en cinco capítulos. El capítulo I comprende el planteamiento del problema, el objetivo general y los específicos, y la justificación del estudio; el capítulo II comprende la información sobre la cual se basó este estudio, como lo son el marco referencial y el marco teórico; el capítulo III comprende la descripción de la metodología empleada para cumplir cabalmente con los objetivos de este estudio; el capítulo IV que comprende los resultados a los objetivos establecidos y la discusión de lo obtenido; y finalmente el capítulo V el cual contiene las conclusiones y recomendaciones sobre este estudio.

## **CAPITULO I**

### **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

La cuenca hidrográfica del río Pao (cuenca alta y media), jurisdicción de los estados Carabobo y Cojedes, es una de las seis cuencas del estado Carabobo. Esta se caracteriza por condiciones socioambientales particulares, pues es una cuenca compartida en cuanto a la ocupación, la utilización de los recursos naturales, la concentración poblacional, desarrollo industrial y comercial, actividades agropecuarias intensivas para el sector avícola y porcino y la ganadería extensiva hacia la parte alta de la cuenca. La existencia de una intervención tipo rural propia de la población campesina del estado Carabobo y Cojedes, hace a la cuenca vulnerable a la contaminación por el aporte de aguas residuales, y el uso inapropiado de sus recursos naturales, pues tal intervención genera sedimentos para los cursos de agua y desequilibrio en los recursos forestales y fauna (FLSCN, sf-a). Una vez construidas las obras de captación de la cuenca del río Pao (CRP), para el abastecimiento de agua al Acueducto Regional del Centro, quedó dividida en dos subcuencas: subcuenca Pao-Cachinche-

Embalse Cachinche y subcuenca Pao Pao-La Balsa –Embalse Pao- La Balsa; conformando así dos temas hidrológicos dinámicos sobre los cuales actúan factores socioeconómicos, tecnológicos y culturales de características propias (FLSCN, sf-b).

La legislación ambiental venezolana contempla figuras de Régimen de Administración Especial a las “Zonas Protectoras de Cuencas Hidrográficas” cuyo principal objetivo es la preservación de las zonas generadoras de agua dulce, con la finalidad de conservar los recursos de agua, suelos y vegetación, fundamentalmente, ordenando y normando su aprovechamiento racional (FLSCN, sf-b). En 1992 se declara “Zona Protectora la Cuenca alta y media del río Pao”, ubicado en la jurisdicción de los estados Carabobo y Cojedes (Decreto N° 2.320 del 05/06/1992, G. O. N° 35.112 del 14/12/1992), por su importancia vital y estratégica para la defensa del país por ser fuente hídrica abastecedora actual y potencial de la región central (estados Aragua, Carabobo y Cojedes). Sin embargo, el uso y manejo inadecuado de los recursos naturales de la cuenca, así como la ausencia de una normativa legal con fundamento en la ordenación del espacio físico de la cuenca, ha generado una problemática creciente, que se traduce en el deterioro continuo de la calidad y cantidad de los recursos hídricos y edáficos (FLSCN, sf-b). Por ello, en 1996 se promulga el Plan de Ordenamiento

y Reglamento de Uso de la Zona Protectora de la parte alta y media de la cuenca del río Pao, estados Carabobo y Cojedes (Decreto N° 1.358 del 05/06/1996, G.O. N° 35.997 del 10/07/1996). Dichos instrumentos legales han servido para evitar poner en riesgo el suministro de agua y garantizar la conservación del recurso, del cual depende la producción y la captación del agua hacia el sistema de embalses.

El Plan de Ordenamiento de la CRP tiene como objetivo primordial, el ordenamiento del espacio físico de la cuenca mediante la regulación de la ocupación y el adecuado manejo y la administración del área protegida, para garantizar su protección integral, y su potencial como fuente generadora y reguladora del recurso hídrico. En dicho plan se definen cinco (5) unidades en función de las características físico-naturales, socioeconómicas y ambientales. De manera general se tiene que las unidades I, II y III varían en cuanto a usos y restricciones de las siguientes actividades: uso protector y servicios públicos, agrícola vegetal y animal, forestal, minero, residencial rural, turísticos recreacional, científico y comunicación, obra pública, entre otros. La unidad IV corresponde a las tierras ubicadas alrededor de los embalses Guataparó, Pao-Cachinche y Pao- La Balsa, así como los espejos de agua respectivos y su uso está



my restringido; mientras que la unidad V corresponde al área de seguridad y defensa bajo uso militar.

Debido a la importancia estratégica de las subcuencas de los ríos Paya y Pirapira, pues de ellas depende en alto grado el abastecimiento de agua para gran parte de la población del centro del país, se ha estado llevando a cabo el levantamiento de información sobre algunas características de la zona debido a las amenazas que han constituido las actividades antrópicas aun y cuando existan instrumentos legales para la protección de la CRP. Estas amenazas están constituidas por: deforestación indiscriminada, actividades agropecuarias, extracción ilegal de especies arbóreas, pérdida de la cobertura vegetal /fragmentación de hábitat, contaminación de los cuerpos de agua, acumulación y disposición de residuos sólidos, cacería de subsistencia y comercio ilegal de fauna silvestre (FLSCN, sf-a).

El desarrollo de diversas actividades de investigación que se han estado llevando a cabo dentro de la cuenca, han sido en el marco del Proyecto Gestión Integral de Cuencas Pao y Unare, a cargo de una Red Interinstitucional integrada por la Universidad de Carabobo, la Universidad Pedagógica Experimental

Libertador, la Universidad Simón Bolívar, la Fundación la Salle de Ciencias Naturales, la Fundación Tierra viva, entre otros, con la finalidad de elaborar instrumentos como el Plan Consensuado para el Manejo Integral de la Cuenca Media del Río Pao – Subcuencas de Pirapira y Paya. Si bien se ha logrado el levantamiento de una serie de información importante sobre las características del lugar, esto ha sido a través de observaciones directas, opinión de los lugareños y registro fotográfico, lo cual restringe la capacidad de una caracterización que abarque zonas más amplias. Por ello se considera que haciendo uso de sensores remotos para la generación y análisis de índices biofísicos en la CRP, constituiría una herramienta apropiada que contribuya a una mayor caracterización espaciotemporal de la cuenca.

## **FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

¿Cómo se puede obtener un mapa que refleje los índices biofísicos para la cuenca del río Pao?

¿Cuál es la dinámica de los índices biofísicos en la cuenca del río Pao?

## **OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**

### **OBJETIVO GENERAL**

Analizar espaciotemporalmente los índices biofísicos en la cuenca del río Pao, estados Carabobo y Cojedes.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Seleccionar imágenes satelitales de la cuenca del río Pao a ser requeridas, empleando el satélite Landsat 8 OLI TIRS Level 1
2. Realizar procesamiento preliminar de las imágenes satelitales de la cuenca del río Pao
3. Estimar los índices biofísicos a partir de las imágenes satelitales de la cuenca del río Pao.
4. Analizar espaciotemporalmente el cambio en el uso y cobertura de la tierra en la cuenca del río Pao.

## **JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN**

La implementación de técnicas de sensores remotos ha sido ampliamente utilizada para monitorear y analizar entornos. Estimar los índices biofísicos y analizar espaciotemporalmente el cambio en el uso y ocupación de de la tierra en la CRP implicaría una herramienta importante para los planes de manejo de la misma, debido a las grandes amenazas que las actividades antrópicas han generado en la cuenca a pesar de existir instrumentos legales para su protección.

Desde la perspectiva ambiental, la desmedida actividad antrópica generada sobre la CRP ha ocasionado la afectación de manera negativa de la calidad del ambiente de diversas maneras, como la modificación del paisaje debido a la tala y quema de árboles, la contaminación de las quebradas por el incremento de las aguas servidas de las actividades agropecuarias y aquellas producto de la ausencia de infraestructura de conducción de aguas negras, erosión del suelo, disminución de la fauna local, entre otros. De modo que haciendo un análisis espaciotemporal del uso y ocupación de la

tierra se puede apreciar cómo ello ha ido variando luego de la creación de los instrumentos legales de protección a la CRP.

Desde el punto de vista económico, la aplicación de este tipo de herramientas de sensores remotos para análisis espaciotemporales de un lugar, como parte de la planificación local, genera un beneficio significativo pues disminuye los gastos que implican la movilización del personal capacitado para el levantamiento de información. Por otro lado, se tiene que la fragilidad física del terreno aunado a la progresiva deforestación de áreas naturales con escasa capacidad de recuperación y el uso expansivo de actividades agropecuarias, ha originado erosión laminar, generación de cárcavas y desprendimiento de masas, incremento del acarreo de sedimentos aguas abajo y la subsiguiente colmatación de los causes, lo que entre otras cosas puede ocasionar en un futuro la disminución del agua disponible y por ende el acortamiento de la vida útil del sistema de embalses (FLSCN, sf-a). Esto podría requerir de una inversión monetaria importante por parte del Estado que incluyan proyectos de recuperación del sistema de embalses para poder continuar abasteciendo de agua a las poblaciones beneficiadas, además de que se generaría un conflicto social si el sistema de embalse llegase a no poder abastecer de agua a tal población. En tal sentido, los resultados de esta investigación resultarán significativos para los planes de manejo que actualmente se ejecutan en la cuenca.

Desde el punto de vista institucional, esta investigación implicará un aporte importante para el grupo de Red Institucional que actualmente se encuentran realizando investigación para el desarrollo de planes de manejo de la CRP. Así como, este estudio está incluido dentro la línea de investigación Gestión Integral de Cuencas del Centro de Investigaciones Hidrológicas y Ambientales (CIHAM UC) Adicionalmente, este estudio contribuiría a ampliar el campo de investigación titulado “Sistemas de información geográfica y sensores remotos del ambiente” dentro del Área Postgrado de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Carabobo.

### **LIMITACIONES Y ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN**

Para este estudio se determinarán los índices biofísicos en la CRP y se analizará la variación espaciotemporal del uso y cobertura de la tierra mediante el procesamiento de imágenes satelitales del satélite Landsat 8 OLI TIRS, desde año 2014 al 2017. La limitación para la ejecución de la investigación es la selección de las imágenes solamente durante la temporada de sequía para evitar distorsiones por condiciones atmosféricas que puedan alterar el análisis de los resultados de los índices biofísicos.

## **CAPITULO II**

### **MARCO REFERENCIAL**

#### **ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN**

A continuación se presentará un resumen de algunos trabajos de investigación a nivel internacional, en los cuales se haya empleado los índices biofísicos para estudiar algunos lugares particulares y en donde se haya realizado análisis espaciotemporales del uso y ocupación de la tierra.

El modelo I-V-S (vegetación-superficies impermeables-suelo) fue propuesto por Ridd (1995) como una base para la estandarización de la composición biofísica en los sistemas urbano/suburbanos por su interés sobre estos últimos como entidades ecológicas. Se estimó el empleo I-V-S como un modelo global de análisis y

comparación de ecosistemas urbanos en todo el mundo en la medida de que estos fueran impulsados mediante datos satelitales, pudiéndose detectar el cambio urbano y el modelado del crecimiento para el análisis del impacto ambiental de la urbanización.

Hung (2002) realiza un análisis en la localidad Salt Lake Utah empleando el modelo conceptual V-I-S de Ridd (1995), pero debido a la heterogeneidad que puede poseer el uso de la tierra, seleccionaron seis componentes del suelo como componentes básicos del ambiente urbano: dos para vegetación, tres para superficies impermeables y uno para el suelo. El análisis de varias tablas y planos obtenidos permitió revelar que la mayoría de las características urbanas poseen una única composición V-I-S, las cuales son difíciles para observar desde un método de imágenes satelitales o una clasificación por píxel.

Dada las confusiones que se presentan entre los tipos de cobertura de la tierra, especialmente entre las superficies impermeables y el suelo desnudo, Deng y Wu (2012) proponen un índice de composición biofísica (BCI) para una derivación simple y conveniente de la composición biofísica urbana, siguiendo el modelo V-I-S bajo una reexaminación de la transformación Tasseled Cap (TC). Además en esta investigación se explora la aplicabilidad de BCI en imágenes de varios sensores



remotos a diferentes resoluciones espaciales. Los resultados indicaron que BCI tiene una relación más cercana con la abundancia de superficies impermeables que con los índices NDVI, NDBI y NDISI, con coeficientes de correlación de 0.8 aproximadamente a varias resoluciones. El desempeño de BCI en la cuantificación de la abundancia es comparable con el NDVI en las tres escalas espaciales experimentadas. Además, con valores mayores de separabilidad métrica que otros índices, este estudio confirma que BCI demostró ser el índice más efectivo de los cuatro evaluados por separado para superficies impermeables y suelos desnudos.

Debido a la importancia que tiene entender el cambio en el uso y cobertura de la tierra en el manejo y planificación ambiental, y la dificultad que para ello representa la identificación del tipo de cobertura “suelo” mediante el empleo de la tecnología de sensores remotos debido, principalmente, a sus complejas composiciones físicas y químicas, así como a la falta de una relación directa entre la abundancia del suelo y sus firmas espectrales, Deng *et al.* (2015) presentaron un enfoque empírico para mejorar la información del suelo a través del desarrollo del índice RNSI. Ello implicó la generación de muestras aleatorias de las tres coberturas principales de la tierra (suelo- áreas de superficie impermeable-vegetación). Con las firmas espectrales de tales muestras, propusieron un índice de diferencia normalizada para suelo (NDSI) empleando la combinación de las bandas 7 y 2 del Landsat Thematic Mapper Image. Finalmente desarrollaron un índice de proporción para resaltar los tipos de suelo

dividiendo el índice NDSI por el primer componente del Tasseled Cap Transformation (TC1). Análisis cualitativos y cuantitativos fueron empleados para examinar el comportamiento del índice RNDSI. Los resultados y los análisis comparativos con otros dos índices, el BCI y el EBBI, indicaron que el índice RNDSI promete poder separar la cobertura suelo de las aéreas con superficies impermeables y la vegetación, y además tal índice puede servir como entrada a los modelos sobre cambios en el uso y cobertura de la tierra.

Rawat y Kumar (2015) ilustraron la dinámica espacio temporal en el uso/ cobertura de la tierra en Hawalbagh block en la India, empleando las imágenes satelitales Landsat desde 1990 hasta 2010 y aplicando un algoritmo de máxima verosimilitud en ERDAS 9.3. Las imágenes fueron clasificadas en cinco tipos de uso de la tierra, detectando el incremento de la cobertura de tipo vegetación y edificaciones, mientras la cobertura de tipo agricultura, tierras infértiles y cuerpos de agua, han decrecido, resaltándose la importancia de las técnicas digitales para la detección de cambios en el uso/ cobertura de la tierra en tal localidad.

Finalmente, y en lo referente específicamente al estudio y manejo de cuencas hidrográficas, tenemos que la evaluación y el desarrollo de estrategias de manejo sobre las mismas, requieren de medidas precisas de los parámetros de cobertura y uso

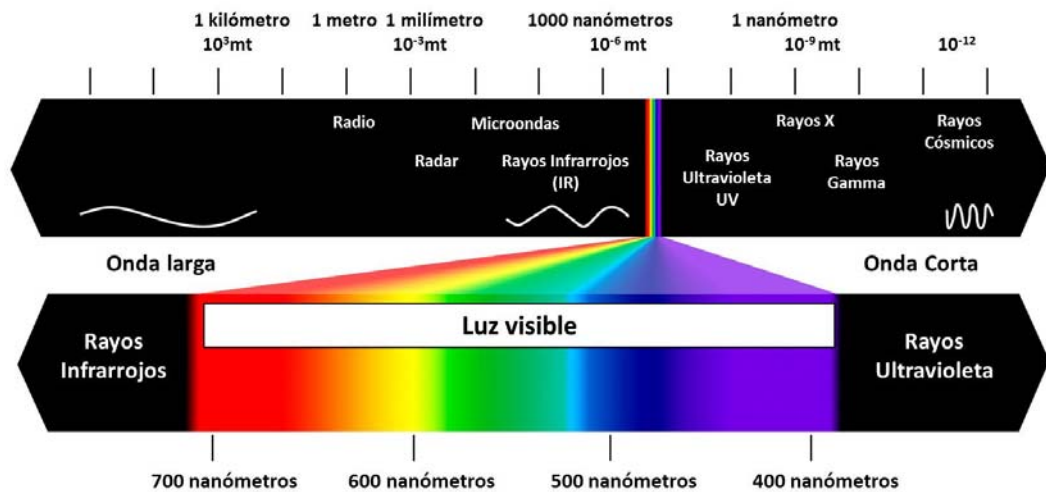
del suelo y sus cambios en el pasado y el presente, debido a que determinan los procesos hidrológicos y ecológicos en una cuenca hidrográfica. Por ello, Butt *et al.* (2015) toman como caso de estudio a la cuenca hidrográfica Simly en Pakistán y aplicaron un algoritmo de máxima verosimilitud en ERDAS para detectar los cambios en el uso/cobertura de la tierra, utilizando datos multiespectrales obtenidos de Landsat 5 y SPOT 5 para los años 1992 y 2012 respectivamente. Clasificaron la cuenca en cinco áreas de cobertura/uso de la tierra para generar mapas que fueron superpuestos en ArcGIS 10, resultando cambios significativo en el uso/cobertura de la tierra, los cuales representan amenazas severas para los recursos de la cuenca, requiriéndose con urgencia una gestión adecuada, pues de lo contrario los recursos disponibles pronto se perderán y no podrán ser capaces de desempeñar su rol en el desarrollo socioeconómico del área.

## MARCO TEÓRICO

### Fundamentos de la teledetección

#### Teledetección

La teledetección es una técnica que permite obtener información de objetos a distancia, a través de la interacción entre los objetos situados sobre la superficie terrestre, marina o en la atmósfera, y un sensor situado en una plataforma (satélite o avión). La interacción que se produce resulta de un flujo de radiación que parte de los objetos y es recibida por el sensor. El flujo de radiación puede tener tres tipos de origen: radiación solar reflejada por los objetos (luz visible e infrarrojo reflejado), radiación terrestre emitida por los objetos (infrarrojo térmico), y radiación emitida por el sensor y reflejada por los objetos (radar). Las técnicas basadas en los dos primeros tipos de radiación se conocen como teledetección pasiva, y la última como teledetección activa. El flujo reflejado se recoge por el sensor, que lo transmite posteriormente a las estaciones receptoras. Entre superficie y sensor se interpone la atmósfera, que dispersa y absorbe parte de la señal original (Lizana, sf).



**Figura 1. Espectro electromagnético**

Cualquier tipo de energía radiante se puede definir en función de su longitud de onda o frecuencia, y aunque la sucesión de valores de longitud de onda es continua, suelen establecerse una serie de bandas en donde la radiación electromagnética manifiesta un comportamiento similar. La organización de estas bandas de longitudes de onda o frecuencia se denomina espectro electromagnético (Fig. 1). Para la teledetección, una serie de bandas espectrales son las más frecuentemente empleadas con la tecnología actual. Su denominación y amplitud varía según los autores, sin embargo la terminología más común es la siguiente (Chuvieco, 2008):

*Espectro visible* (0,4 a 4,7  $\mu\text{m}$ ). Se denomina así por tratarse de la única radiación electromagnética que pueden percibir nuestros ojos, coincidiendo con las longitudes de onda en donde es máxima la radiación solar. Dentro de esta región, suelen distinguirse tres bandas elementales, que se denominan azul (A: 0,4 – 0,5  $\mu\text{m}$ ), verde (V: 0,5 – 0,6  $\mu\text{m}$ ), y rojo (R: 0,6 – 0,7  $\mu\text{m}$ ), en razón de los colores primarios que nuestros ojos perciben a esas longitudes de onda.

*Infrarrojo cercano* (IRC: 0,7 a 1,3  $\mu\text{m}$ ). También se denomina infrarrojo próximo, reflejado o fotográfico, puesto que parte de él puede detectarse a partir de películas dotadas de emulsiones especiales. Resulta de especial importancia por su capacidad para discriminar masas vegetales y concentraciones de humedad.

*Infrarrojo medio* (IRM: 1,3 a 8  $\mu\text{m}$ ). En esta región se entremezclan los procesos de reflexión de la luz solar y de emisión de la superficie terrestre. En el primer caso, hablamos de infrarrojo de onda corta (Short Wave Infrared, SWIR), que se sitúa entre 1,3 y 2,5  $\mu\text{m}$  y resulta una región idónea para estimar el contenido de humedad en la vegetación o los suelos. La segunda región de interés está comprendida entre 3 y 5  $\mu\text{m}$ , y suele denominarse más propiamente como infrarrojo medio (IRM), siendo determinante para la detección de focos de alta temperatura (incendios o volcanes activos)

*Infrarrojo lejano o térmico* (IRT: 8 a 14  $\mu\text{m}$ ), que incluye la porción emisiva del espectro terrestre, en donde se detecta el calor proveniente de la mayor parte de la cubiertas terrestres.

*Microondas* (M, por encima de 1 mm), con gran interés por ser un tipo de energía transparente a la cubierta nubosa.

## Radiación Electromagnética

La naturaleza de la radiación electromagnética puede ser explicada por medio de dos modelos complementarios; el modelo de onda el cual asume que la misma se produce en forma de ondas que resultan de oscilaciones en los campos eléctrico y magnético en las inmediaciones de los objetos y se desplazan por el espacio a la velocidad de la luz. Las ondas se definen fundamentalmente por su longitud o distancia entre dos picos de onda. El modelo de partícula asume que la energía viaja como un flujo de electrones discretos: los fotones. La energía transportada por cada fotón depende de la longitud de onda (Lizana, sf).

Para que pueda generarse una observación remota de la superficie terrestre es necesario que el sensor detecte un flujo energético proveniente de esta. Ese flujo tiene una intensidad determinada, proveniente de, o dirigida a, una unidad de superficie y con una dirección concreta. Lo que precisamente mide el sensor es la radiancia, la cual se define como el total de energía radiada en una determinada dirección por unidad de área y por ángulo sólido de medida. Se cuantifica en vatios por metro cuadrado y estereorradián ( $\text{W/m}^2 \text{ sr}^{-1}$ ) (Chuvieco, 2008). La proporción de flujo incidente que es reflejado, absorbido y transmitido depende de las características de la superficie que se observa y de la longitud de onda a la que sea observado. A partir de medidas de laboratorio, puede obtenerse unas curvas de reflectividad espectral para las principales cubiertas terrestres, lo cual se denomina signatura o firmas espectrales, (Chuvieco, 2008), constituyendo una marca de identidad de los objetos, resultando así fácil por ejemplo distinguir entre suelo y vegetación, e incluso entre diferentes tipos de suelo o diferentes tipos de vegetación (Sigmur, 2006).

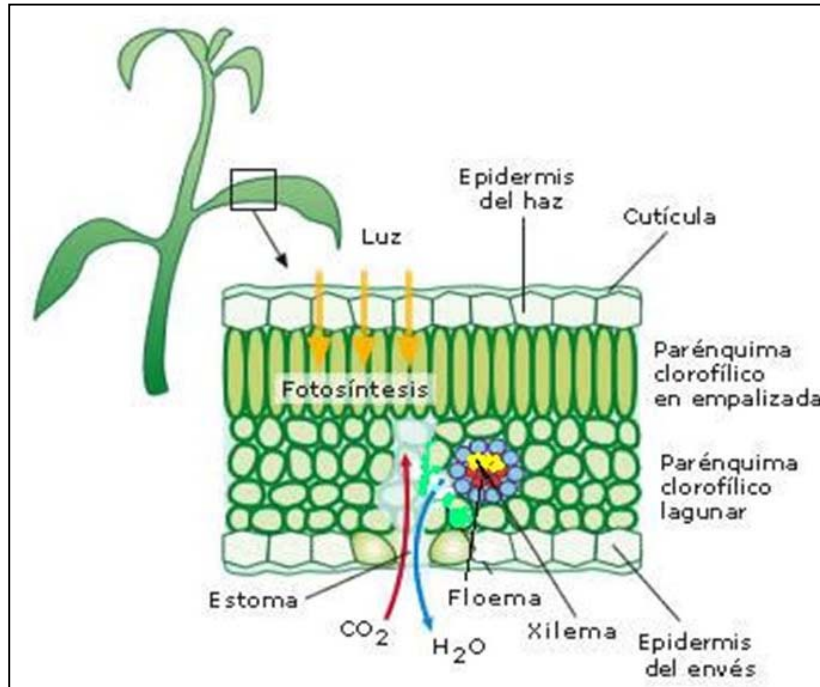
Algunas cubiertas tienden a presentar una respuesta uniforme en distintas longitudes de onda, mientras otras ofrecen un comportamiento mucho más selectivo; por ejemplo, la nieve presenta una reflectividad alta y constante en las bandas del visible, pues refleja la mayor parte de la energía incidente en esas longitudes de onda y de ahí su color blanco (Chuvieco, 2008); en el caso del agua esta absorbe la mayor parte de la energía que recibe, pues es el único elemento superficial capaz de



transmitir radiación hacia abajo, tanto más según longitudes de onda mayores, por lo que su reflectividad es muy baja (Chuvienco, 2008; Sigmur, 2006).

En el caso de caso de la vegetación sana, esta presenta un comportamiento muy cromático, con bajos valores de reflectividad en el espectro visible (Chuvienco, 2008), aunque con un pico en el color verde pues la clorofila absorbe el rojo y el azul reflejando más en el verde (Sigmur, 2006).

Las hojas de las plantas están compuestas, en esencia, de cuatro capas (Fig. 2): la epidermis superior e inferior, el parénquima en empalizada y el mesófilo esponjoso. La epidermis juega un importante papel en la regulación térmica de la planta y en el intercambio de gases. El parénquima alberga los cloroplastos, mientras que en el mesófilo tiene lugar los intercambios gaseosos necesarios durante el proceso de fotosíntesis y respiración celular (Campbell y Reece, 2007).



**Figura 2. Diagrama de la sección transversal de una hoja típica**

Los estudios realizados a partir de espectro-radiómetros en laboratorio (Colwell, 1974; Curran, 1980; Gates *et al.*, 1965; Knipling, 1970; Lusch, 1989; en Chuvieco, 2008), muestran curvas espectrales que varían en relación con el tipo de hoja, si bien se puede establecer patrones generales, marcados por la baja reflectividad en el visible, alta en el infrarrojo cercano y baja, con presencia de algunos máximos relativos, en el infrarrojo de onda corta. La baja reflectividad en la porción visible del espectro se debe al efecto absorbente de los pigmentos de la hoja, principalmente las clorofilas, xantofila y carotenos (65, 29 y 6 %,

aunque la proporción puede variar mucho), particularmente en la banda roja y azul, mientras que se refleja la verde, y causa el color con el que nuestros ojos perciben la vegetación vigorosa. Cuando se aproxima la caída otoñal de las hojas, la clorofila ejerce una menor influencia, lo que explica su mayor reflectividad en la banda roja y, en definitiva, su color amarillento (verde + rojo). La elevada reflectividad en el infrarrojo cercano se debe, por un lado, a la baja absorción de las clorofilas, y por otro lado, a la estructura interna de la hoja, cuyas cavidades internas dispersan la mayor parte de la radiación incidente en el infrarrojo cercano (Gates *et al.*, 1965; Horler *et al.*, 1983; en Chuvieco, 2008). Por ello, la hoja sana ofrece una alta reflectividad en esta banda, en contraste con la baja reflectividad que presenta en el espectro visible, especialmente en la banda roja. Dado que la estructura de la hoja es muy variada según las especies, esta banda también resulta idónea para discriminar entre plantas, incluso entre aquellas que no podrían separarse en el espectro visible (Chuvieco, 2008). Algunos científicos sugieren que la tensión de la humedad o madurez natural de la hoja causa esas cavidades internas para colapsar como plantas marchitas. Otros sugieren que sea causado por el deterioro de las células muertas antes que cambios físicos en las cavidades.

La caracterización espectral de las masas vegetales constituye una de las tareas más interesantes en teledetección, sin embargo todavía ofrece notables dificultades como consecuencia de los múltiples factores que influyen en la radiancia que finalmente detecta el sensor. Estos factores se pueden dividir en tres grandes grupos (Belward, 1991; Colwell, 1974; Gausman, 1977; Guyol *et al.*, 1983; Sellers, 1989; en Chuvieco, 2008):

- Los relacionados con la reflectividad de la hoja, que suele ser el elemento más visible desde una plataforma espacial. Los factores más destacados son la presencia de pigmentos, la estructura celular y el contenido de humedad.
- Las características geométricas de la planta, principalmente su área foliar, la forma de las hojas, su distribución en la planta, la geometría del dosel, la importancia de componente leñoso, entre otros.
- Finalmente, habría que considerar aquellos aspectos derivados de la situación geográfica de la planta: pendiente, orientación, asociación con otras especies, reflectividad del sustrato, geometría de plantación, condiciones atmosféricas, entre otros.

En el caso del suelo, sus propiedades espectrales son relativamente simples, la transmisión es nula, por tanto toda la energía se absorbe o se refleja. La reflectividad es relativamente baja para todas las bandas aunque aumentando hacia el infrarrojo. En general, la reflectividad del suelo va a depender del contenido de humedad, su textura, la composición química y mineralógica, y el contenido de materia orgánica. La fuerte correlación entre muchos de los factores que influyen sobre la respuesta espectral del suelo, imposibilita el que puedan sacarse conclusiones claras del análisis de una imagen de unas zonas cuyas características edáficas se desconocen. Sin embargo, se ha comprobado que las áreas de suelo desnudo de una misma imagen siguen una serie de pautas conocibles. La más estudiada es que al hacer una representación gráfica con la reflectividad en el rojo en abscisas y la reflectividad en el infrarrojo cercano en ordenadas, las zonas de suelo desnudo aparecen formando una línea que se conoce como línea del suelo (Lizana, sf).

Finalmente, los materiales de construcción poseen un comportamiento similar en las distintas longitudes de onda (Chuvieco, 2008).

**Interacción de la atmósfera con la energía electromagnética**

La atmosfera es un factor importante al considerar los flujos de radiación entre el sol y la superficie terrestre y entre esta y los satélites. En el espacio exterior no hay pérdida de radiación por interferencia con ningún medio material, mientras que los gases y aerosoles que componen la atmósfera tienen un efecto triple sobre la radiación (Sigmur, 2006):

*Absorción.* Cada uno de los gases atmosféricos tiene la capacidad para absorber radiación en diferentes longitudes de onda, los principales son: Ozono que absorbe radiación ultravioleta (UV); Dióxido de Carbono que absorbe radiación en  $13 - 17,5\mu$ ; Vapor de agua que absorbe radiación en  $5,5 - 7\mu$  y por encima de  $27\mu$ .

Esto deja por otro lado regiones del espectro en las que no se produce absorción, son las denominadas ventanas atmosféricas. Por lo tanto la teledetección sólo va a ser en principio viable en estas ventanas, las principales aparecen en: Visible e Infrarrojo cercano ( $0.3 - 1.35\mu\text{m}$ ); Infrarrojo cercano de onda corta ( $1.5 - 1.8\mu$ ;  $2 - 2.4\mu$ ); Infrarrojo medio ( $2.9 - 4.2\mu$ ;  $4.5 - 5.5\mu$ ); Infrarrojo térmico ( $8 - 14\mu$ ); Microondas, por encima de  $20 \mu$  la atmósfera es prácticamente transparente.

La aparición de partículas sólidas o líquidas es un problema, además de que reflejan gran parte de la radiación solar que reciben. Las nubes emiten su propia radiación en el infrarrojo térmico, diferente a la terrestre debido a su menor temperatura, con lo que ocultan la superficie terrestre en ambas regiones del espectro. Debido a la saturación de vapor de agua del aire dentro de las nubes su capacidad de absorber radiación en la banda de absorción del vapor de agua dependerá de su espesor.

*Dispersión.* Es el mecanismo por el cual la radiación electromagnética es reflejada o refractada por gases o partículas en la atmósfera, disminuyendo la radiancia directa y aumentando la difusa. Debido a la elevada variabilidad espacio-temporal de algunos de los gases y de los aerosoles resulta difícil establecer modelos generales para cuantificar su influencia final en una imagen.

*Emisión.* Cuando se trabaja en el infrarrojo térmico, el objetivo fundamental es estimar la temperatura de la superficie terrestre, sin embargo los datos que llegan al satélite incluyen emisión tanto de la superficie como de las diferentes capas de la atmósfera. Resulta difícil distinguir un efecto del otro, sin embargo se han hecho avances significativos en este sentido.

## Corrección de imágenes satelitales (procesamiento preliminar)

Cualquier imagen adquirida por un sensor remoto, presenta una serie de alteraciones radiométricas y geométricas. El preprocesamiento de las imágenes consiste en eliminar cualquier anomalía detectada en la imagen, y con estas operaciones se tiende a disponer los datos en la forma más cercana posible a una adquisición idónea, por ejemplo, situándolos sobre su posición geográfica correcta (georreferenciación), o reconstruyendo la radiancia por el sensor a partir de los ND (números digitales) de la imagen.

En el caso concreto de las imágenes espaciales, las deformaciones más frecuentes pueden agruparse en:

- Distorsiones originadas por la plataforma
- Distorsiones provocadas por la rotación terrestre
- Distorsiones por el sensor
- Distorsiones provocadas por la atmósfera.

Algunos de estos problemas se solventan rutinariamente en los centros encargados de la recepción de las imágenes. Otros, sin embargo persisten por lo cual es necesario



aplicar una serie de técnicas para subsanarlos. Por ejemplo, las correcciones atmosféricas son vitales para modelar parámetros físicos a partir de la imagen, generar índices espectrales, o abordar estudios multi-temporales. En este último caso, también son necesarias las correcciones geométricas, sobre todo cuando se pretende relacionar a imagen con algún tipo de información auxiliar.

#### *Correcciones radiométricas*

Este es un término muy genérico que designa aquellas técnicas que modifican los ND originales, con objeto de acercarlos a los que tendría la imagen de una recepción ideal. Dentro de este concepto va incluido el tratamiento de los problemas radiométricos derivados del mal funcionamiento del sensor, junto a la obtención de magnitudes físicas y corrección atmosférica de los datos.

En cuanto al cálculo de reflectividades, la conversión de los ND almacenados en una imagen original a variables físicas es un paso previo que resulta de gran utilidad en múltiples fases de la interpretación de imágenes, ya que permite trabajar con variables físicas de significado estándar, comparables en un mismo sensor a lo largo

del tiempo, entre distintos sensores y entre la teledetección espacial y otros métodos de detección de energía electromagnética.

La reflectividad o la temperatura son variables físicas, cuya obtención requiere resolver satisfactoriamente la acción de varios factores, como la del propio sensor (calibrado de las radiancias), para lo que es imprescindible contar con información de la entidad que lo gestiona, otras a las condiciones de observación (ángulos de iluminación y adquisición), y otras a elementos ambientales (efecto atmosférico y topográfico, iluminación procedente de otras cubiertas) (Chuvieco, 2008).

#### *Cálculo de reflectividades*

La reflectividad por ser definida como la relación entre la energía reflejada y la incidente, por tanto varía entre 0 (superficie perfectamente absorbente) y 1 (superficie perfectamente reflectora); y como se mencionó anteriormente, la reflectividad de una cubierta no sólo depende de sus características físicas y químicas sino también de las condiciones de observación. Además, no es constante sino que se modifica en las distintas bandas del espectro, por lo que se le añade el calificativo de espectral, acotando su medida a un determinado rango de longitudes de onda (Chuvieco, 2008).

Para conocer la reflectividad de una superficie es preciso relacionar dos magnitudes: la energía reflejada y la incidente. A partir de los datos medidos por el sensor podemos obtener la primera, ya que la radiancia espectral medida por este es consecuencia de la reflexión de la radiación solar por el suelo. Esa medición se codifica en un valor numérico (ND), de acuerdo a unos coeficientes de calibración específicos para cada sensor (Chuvieco, 2008). Al conocerse tales coeficientes, puede realizarse el proceso inverso, obteniendo los valores de radiancia espectral detectada por el sensor a partir de los ND:

$$L_{sen, k} = a_{0, k} + a_{1, k} \text{ND}_k \quad (1)$$

Donde  $L_{sen, k}$ , corresponde a la radiancia espectral recibida por el sensor en la banda  $k$  (en  $\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{mm}^{-1}$ );  $a_{0, k}$  y  $a_{1, k}$  son los coeficientes de calibración para esa banda, y  $\text{ND}_k$  corresponde al nivel digital de la imagen en la misma banda. Estos coeficientes son proporcionados por los organismos responsables de los sensores o programas.

La radiancia que llega al sensor, es una función de la irradiancia solar, la reflectividad de la cubierta y las condiciones de adquisición, asumiendo que la

superficie terrestre tiene un comportamiento lambertiano (superficies que reflejan la energía uniformemente en todas las direcciones a diferencia de las superficies especulares que lo hacen en el mismo ángulo incidente):

$$L_{sen, k} = \frac{E_{0,k} \cos\theta_i \rho^*_k}{D\pi} \quad (2)$$

Donde  $E_{0,k}$  es la irradiancia solar en el techo de la atmósfera (para esa banda del espectro), conocida a partir de las tablas solares;  $\rho^*_k$  es la reflectividad aparente de la cubierta en esa banda  $k$ ;  $\theta_i$  es el ángulo cenital del flujo incidente, formado por la vertical y los rayos solares que es el complementario del ángulo de elevación solar;  $D$  es el factor corrector de la distancia Tierra-Sol, calculado como:

$$D = (1 + 0,01674 (\text{sen}(2\pi(J - 93,5) / 365)))^2 \quad (3)$$

Donde  $J$  indica el número de día del año y el seno se asume en radianes. Ese factor varía entre 0,983(3 de enero) en el perihelio y 1,017 (4 de julio) en el afelio. A partir de la ecuación anterior, puede calcular la reflectividad aparente como:

$$\rho^*_k = \frac{D\pi L_{sen,k}}{E_{0,k} \cos\theta_i} \quad (4)$$

En resumen, para convertir ND a reflectividades se requiere, en primer lugar, transformarlos a valores de radiancia ( $L_{sen,k}$ ), a partir de los coeficientes de calibrado del sensor, para luego obtener de esta radiancia la reflectividad ( $\rho_k^*$ ), conociendo la irradiancia solar ( $E_0$ ) y la fecha de adquisición de la imagen (de la que se estima  $D$  y el ángulo cenital  $\Theta_i$ ).

Esta reflectividad aparente asume que la observación se realiza para una atmósfera transparente, verticalmente, sobre suelo plano y superficies perfectamente lambertianas.

### *Correcciones atmosféricas*

La radiancia que recibe el satélite no es la misma que sale del suelo, siendo esta última la que interesa ya que representa la reflectividad de la cubierta, no la influida por la atmósfera, la cual no afecta por igual a los dos componentes del cálculo de reflectividad: flujo descendente (denominador) y ascendente (numerador), ya que el espesor de la atmósfera que atraviesan es distinto. Además, hay que considerar que a la irradiancia directa hay que añadirle la difusa (Chuvienco, 2008).

El cálculo de la radiancia que recibe el satélite, es consecuencia de los siguientes parámetros (Gilbert *et al.*, 1994 en Chuvieco, 2008):

$$L_{sen, k} = L_{su, k} T_{k,o} + L_{a,k} \quad (5)$$

Donde  $L_{su,k}$  es la radiancia que sale de la superficie;  $T_{k,o}$  la transmisividad de la atmósfera para el flujo ascendente, y  $L_{a,k}$  la radiancia aportada por la dispersión atmosférica. La transmisividad en la dirección ascendente depende del espesor óptico de ozono ( $T_{oz, k}$ ), de aerosoles ( $T_{a, k}$ ), y del espesor óptico molecular ( $T_{r, k}$ ) para esa misma banda, y el ángulo de observación ( $\Theta_o$ ):

$$T_{k,o} = \exp((- T_{oz, k} - T_{a, k} - T_{r, k} ) / \cos \Theta_o) \quad (6)$$

El ángulo de observación sólo debe considerarse cuando la adquisición no es vertical, o para ángulo de apertura muy amplios. Respecto del flujo incidente, tampoco resulta fidedigno el parámetro indicado en (4), ya que la irradiancia que

llega al suelo ( $E_{su, k}$ ) no es la que medimos en el techo de la atmósfera ( $E_{0, k}$ ), sino que también está afectada por la atmósfera y por el componente de la luz difusa:

$$E_{su, k} = E_{0, k} \cos \Theta_i T_{k, i} + E_{d, k} \quad (7)$$

Donde  $E_{0, k}$  y  $\cos \Theta_i$  tienen el mismo significado de (4);  $T_{k, i}$  es la transmisividad atmosférica que afecta el rayo incidente, y  $E_{d, k}$  es la irradiancia difusa, como consecuencia de la dispersión de Rayleigh y Mie, que también depende de las condiciones de la atmósfera.

La transmisividad del rayo incidente tiene una expresión similar a la que afecta al flujo reflejado, cambiando el ángulo de observación por el de incidencia ( $\Theta_i$ ):

$$T_{k, i} = \exp((-T_{oz, k} - T_{a, k} - T_{r, k}) / \cos \Theta_i) \quad (8)$$

En suma, para conocer la reflectividad real de la cubierta en una determinada banda  $k$  ( $\rho_k$ ), definida por:

$$\rho_k = \frac{D\pi L_{su, k}}{E_{su, k}} \quad (9)$$

Resolviendo a partir de la (5) y (7):

$$\rho_k = (D\pi((L_{sen,k} - L_{a,k}) / T_{k,o})) / (E_{o,k} \cos\theta_i T_{k,i} + E_d) \quad (10)$$

En definitiva, para calcular la reflectividad de la superficie necesitamos remover los efectos atmosféricos que suponen estimar la transmisividad de la atmósfera (ascendente  $T_{k,i}$ , y descendente  $T_{k,o}$ ), la irradiancia difusa ( $E_{d,k}$ ) y la radiancia atmosférica debida a la dispersión ( $L_{a,k}$ ).

Los procedimientos para abordar estas correcciones con precisión son muy laboriosos y requieren datos sobre las condiciones de la atmósfera en el momento de tomar la imagen, que no suelen estar disponibles. Además, el efecto de la atmósfera 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.



Hasta el momento, las correcciones atmosféricas se han abordado siguiendo cuatro procedimientos (King *et al.*, 1999; Robin, 1998; Sobrino, 2000; en Chuvieco, 2008):

- A partir de medidas *in situ*, ya sean referidas a perfiles de la composición atmosférica mediante radiosondeos, o mediciones en terreno.
  
- A partir de imágenes de otros sensores, que permitan estimar el estado de la atmósfera en el momento de adquisición de las imágenes.
  
- A partir de modelos físicos de transferencia radiativa, que suelen basarse en una serie de atmósferas estándar.
  
- A partir de datos de la propia imagen. Este sería, sin duda, el método más operativo, pues no requeriría información externa y facilitaría una corrección completa de los datos.

#### *Correccionales del sombreado topográfico*

La reflectividad es muy dependiente de los ángulos de incidencia y observación. Los efectos derivados del gradiente y dirección de la pendiente son bastante notorios, especialmente en las zonas en sombra. Esta corrección se puede abordar con cierta garantía gracias a la creciente disponibilidad de modelos digitales de elevación

(MDE), los cuales permiten homogenizar la señal de la misma cubierta independientemente de la vertiente en que se encuentre.

Una manera sencilla de eliminar el efecto topográfico sería realizar un simple cociente entre dos bandas de la misma imagen. Pero si se puede disponer de un MDE de similar resolución espacial que la imagen y bien ajustado a la imagen, se puede estimar la variación introducida en la reflectividad por el efecto topográfico a partir de modelar las condiciones de iluminación en el momento de adquirirse la imagen. Para ello, necesitamos en primer lugar calcular el ángulo de incidencia ( $\gamma_i$ ) en una vertiente, que depende de los ángulos solares y de pendiente (Civco, 1989; Colby, 1991; Conese *et al.*, 1993; en Chuvieco, 2008):

$$\cos \gamma_i = \cos \theta_i \cos \theta_p + \sin \theta_i \sin \theta_p \cos (\phi_a - \phi_o) \quad (11)$$

Donde  $\gamma_i$  corresponde al ángulo de incidencia,  $\theta_i$  indica el ángulo cenital solar,  $\theta_p$  el gradiente de la pendiente,  $\phi_a$  el ángulo acimutal solar y  $\phi_o$  el ángulo de orientación de la pendiente. Estos cuatro ángulos pueden obtenerse del MDE y de la fecha y hora de adquisición de la imagen.

A partir de haber calculado el ángulo de incidencia, pueden plantearse distintos métodos para compensar la diferencia de radiación incidente entre vertientes (Chuvieco, 2008).

### **Cuenca hidrográfica**

Entre las conceptualizaciones genéricas de Cuencas Hidrográficas, puede citarse “Unidades biogeográficas comprendidas al interior de una divisoria de aguas y que se prestan a un manejo sistémico del ambiente abarcando todos sus componentes y sus interacciones con los factores sociales, culturales y económicos” (García-Duran, 2005).

### **Sistema de información geográfica (SIG)**

Un SIG es un software específico que permite crear consultas interactivas, integrar, analizar y representar de una forma eficiente cualquier tipo de información geográfica

referenciada asociada a un territorio, conectando mapas con bases de datos. Este tipo de sistemas facilita la visualización de los datos obtenidos en un mapa con el fin de reflejar y relacionar fenómenos geográficos de cualquier tipo, con el fin de resolver problemas complejos de planificación y gestión (CEA, 2010).

### **Uso y cobertura terrestre**

Estos constituyen dos terminologías separadas. La cobertura terrestre se refiere a las características físicas de la superficie terrestre, capturadas en la distribución de vegetación, agua, suelo y otras características físicas que incluyen aquellas creadas por la actividad antrópica, como los asentamientos. Mientras que el uso terrestre se refiere a la manera en que la tierra ha sido utilizada por los humanos y su hábitat, por lo general con énfasis en el papel funcional de la tierra para el desempeño de las actividades económicas. De tal manera que el patrón de uso/cobertura de la tierra de una región es el resultado de los factores naturales y económicos y de su utilización por el hombre en tiempo y espacio (Dimiyati *et al.*, 1996)

Con los sensores remotos y las técnicas de SIG, el mapeo del uso y cobertura terrestre ha generado una herramienta útil y detallada para una mejor selección de áreas para el desarrollo de una actividad en particular en una región dada (Reis et al., 2003).

### **Sensores remotos e índices de vegetación**

Un índice de vegetación (IV) puede ser definido como un parámetro calculado a partir de los valores de la reflectancia a distintas longitudes de onda, y que es particularmente sensible a la cubierta vegetal, minimizando la influencia de perturbaciones como las debidas al suelo y a las condiciones atmosféricas (Gilabert *et al.*, 1997).

El índice de vegetación “ideal” ha sido definido por Jackson *et al.*, (1983 en Gilabert *et al.*, 1997) como “aquel particularmente sensible al brillo y color del suelo y poco afectado por la perturbación atmosférica, los factores medioambientales y las geometrías de la iluminación y de la observación”. Claramente el ideal IV no existe y

los índices de vegetación definidos hasta ahora tienen en común el uso de los valores de reflectividad en las zonas espectrales del rojo e infrarrojo cercano, ya que se puede decir que el 90 por ciento de la información relativa a la vegetación está contenida en estas dos bandas, y es el motivo por el cual algunos autores definen los IVs restringiéndolos a combinaciones de estas dos bandas solamente: la roja, fuertemente correlacionada con el contenido de clorofila y la infrarrojo, controlada por el LAI (*leaf area index* o índice de superficie foliar) (Gilabert *et al.*, 1997). Otras aplicaciones de sensores remotos sobre vegetación están basadas además en la región ultravioleta.

Un índice de vegetación simple puede ser debido a los cambios en los rangos del espectro mencionados arriba, dividiendo la medida de la reflectancia del infrarrojo por la del rojo. A mayor contraste entre las medidas del rojo e infrarrojo mayor vigor vegetal presentará la cubierta observada (más alta será la relación entre los sitios donde hay vegetación). Bajos valores de contraste significan una vegetación enferma hasta llegar a zonas sin vegetación (suelo y agua), cuyo resultado de la relación es muy pequeño. (Extraído en [http://www.biblioteca.udep.edu.pe/BibVirUDEP/tesis/pdf/1\\_59\\_185\\_24\\_508.pdf](http://www.biblioteca.udep.edu.pe/BibVirUDEP/tesis/pdf/1_59_185_24_508.pdf)).

Es bien conocido que la reflectancia de las plantas en el espectro de luz cambia con el tipo de planta, el contenido de agua en los tejidos y otros factores intrínsecos (Chang *et al.*, 2016 en Xue y Su, 2017). La reflectancia de las plantas en el espectro electromagnético es determinada por las características químicas y morfológicas de la superficie de los órganos o las hojas (Zhang y Kovacs, 2012 en Xue y Su, 2017).

La emisión de las plantas en las regiones del infrarrojo medio ha sido ampliamente estudiada en el dosel de las plantas. Los índices de vegetación basados en estos rangos pueden ser atribuidos a varias características pertenecientes al crecimiento y vigor de la planta relacionados con el contenido de agua, los pigmentos, el contenido de carbohidratos, el contenido de proteínas, de compuestos aromáticos, entre otros (Foley *et al.*, 1998 en Xue y Su, 2017). Las diferentes aplicaciones dependen de los picos de reflectividad para compuestos específicos dentro de las regiones del visible e infrarrojo cercano/medio (Batten, 1998; Burns y Ciurczak, 2007; en Xue y Su, 2017). La reflectancia de las plantas en el rango del infrarrojo térmico (8-14  $\mu\text{m}$ ) sigue la ley de la radiación de los cuerpos negros (Karwa, 2017 en Xue y Su, 2017), la cual permite interpretar la emisión de las plantas como la relacionada a la temperatura de la misma. Los índices obtenidos de ese rango del espectro pueden ser usados como un aproximación para evaluar la dinámica de los estomas que regula la tasa de transpiración de las plantas, por lo tanto esto puede ser usado como un indicador del estatus del agua en la planta (Prashar y Jones, 2016 en Xue y Su, 2017) y también

pueden emplearse como indicadores del grado de estrés biótico y abiótico de las plantas (Mahlein *et al.*, 2012; Oerke *et al.*, 2014; en Xue y Su, 2017).

Todo lo anterior demuestra que la interpretación cuantitativa de la información de los sensores remotos de vegetación constituye una tarea compleja, por lo que muchos estudios han limitado la interpretación extrayendo información de la vegetación usando bandas individuales o grupos de bandas individuales para el análisis. Los investigadores frecuentemente combinan la data obtenida de las bandas del rojo y del infrarrojo cercano de diferentes maneras de acuerdo a los objetivos particulares (Foley *et al.*, 1998 en Xue y Su, 2017). Este tipo de combinación presenta muchas desventajas (por ejemplo la falta de sensibilidad) por usar bandas individuales o un grupo limitado de bandas para detectar, por ejemplo, la biomasa. Esta limitación es particularmente evidente cuando se trata de aplicar estos índices de vegetación en lugares con doseles heterogéneos, como el que se puede encontrar en un cultivo de hortalizas (Hoffmann *et al.*, 2015 en Xue y Su, 2017)

La combinación mixta de suelos, malezas, cultivos y las plantas de interés, dificultan la distinción de una zona en particular y la aplicación de un VI simple, específicamente cuando la vegetación de interés tiene diferentes IV debido a la variabilidad espacial, o los IVs de otros tipos de vegetación (malezas y cultivos),



resultan ser similares a la vegetación de interés. Esto complica el proceso de eliminación de imágenes y filtrado. Sin embargo, se han desarrollado varias técnicas y algoritmos de análisis de imágenes para abordar estos problemas. A pesar de que hay muchas consideraciones como se describió anteriormente, la construcción del algoritmo simple VI podría muchas veces brindar herramientas simples y efectivas para medir el estado de la vegetación en la superficie de la Tierra (Hoffmann *et al.*, 2015 en Xue y Su, 2017).

Uno de los índices más usados a partir de información multiespectral como una relación normalizada entre la banda del rojo y del infrarrojo es el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) (Karnieli *et al.*, 2005 en Xue y Su, 2017). El empleo directo de este índice es para caracterizar el crecimiento y el vigor del dosel, por lo que muchos estudios lo han comparado con el Índice de Área Foliar (LAI) (Sripada *et al.*, 2005 en Xue y Su, 2017), donde el LAI es definido como el área de un solo lado de la hoja por área de suelo (Zhang *et al.*, 2012 en Xue y Su, 2017).

### Índice de Vegetación de diferencia normalizada NDVI

Este índice ampliamente usado fue propuesto por Rouse *et al.* (1974), y se expresa como:

$$\text{NDVI} = \frac{\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{R}}}{\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{R}}}$$

Donde:  $\rho_{\text{NIR}}$  es la reflectancia corregida en el infrarrojo cercano y  $\rho_{\text{R}}$  es la reflectancia corregida en el rojo.

Puesto a que corresponde a un índice normalizado, su intervalo de variación queda comprendido entre -1 y +1. El NDVI posee una respuesta sensible a la vegetación verde inclusive en lugares con baja cobertura vegetal. Además es frecuentemente usado en investigaciones relacionadas con evaluaciones de vegetación global y regional y fue demostrado que no sólo está relacionado con la estructura del dosel y LAI sino que también está relacionado a la fotosíntesis del dosel (Gamon *et al.*, 1995; Grace *et al.*, 2007; en Xue y Su, 2017). Entre las desventajas de este índice, está que es sensible a los efectos del brillo y color del suelo, a la atmósfera, a la nubosidad y a las sombras de las nubes, y a las sombra del dosel, por lo que requiere calibración (Xue y Su, 2017).

En cuanto a la interpretación de este índice, el valor cero representa el aproximado donde empieza la usencia de vegetación, y los valores negativos representan superficies sin vegetación. Valores muy bajos, del orden de 0,1 corresponden a áreas rocosas, arenosas o nevadas. Valores de 0,2 a 0,3 pueden corresponder a áreas pobres

con arbustos o pasturas naturales. A partir de estos valores se pueden establecer umbrales que permitan comparar imágenes (Muñoz, 2013). Este índice además de permitir identificar la presencia de vegetación verde en la superficie y caracterizar su distribución espacial, también permite evaluar la evolución de su estado a lo largo del tiempo. Esto está determinado fundamentalmente por las condiciones climáticas. La interpretación de este índice debe considerar asimismo los ciclos fenológicos y de desarrollo anuales para distinguir las oscilaciones naturales de la vegetación de los cambios en la distribución espacial causado por otros factores.

Por ser sensible a la reflectividad del suelo sobre el que se sitúa una planta, por ejemplo, en una zona con baja densidad de vegetación, la reflectividad de un pixel en la banda infrarroja y en la banda roja, vendrían determinados fundamentalmente por el suelo, con una pequeña variación debida a la presencia de vegetación, por lo que el resultado del índice de esta zona sería similar al del suelo desnudo, siendo imposible detectar la presencia de vegetación, siendo esto un problema bastante grave cuando la cubierta vegetal es inferior del 50 por ciento (Muñoz, 2013).

Índice de Suelo Ajustado SAVI

Este índice es establecido por Huete (1988) debido a la sensibilidad al suelo que presenta el NDVI y el Índice de Vegetación Perpendicular (PVI), y se expresa como:

$$SAVI = \frac{(\rho_n - \rho_r) * (1 + L)}{\rho_n + \rho_r + L}$$

Donde:  $\rho_n$  es la reflectancia corregida en el infrarrojo cercano y  $\rho_r$  es la reflectancia corregida en el rojo.  $L$  es la constante de compensación.

Este índice mejora la sensibilidad del NDVI al suelo de fondo, donde  $L$  es el parámetro de la condición del suelo que mejora la sensibilidad. El valor de  $L$  va de 0 a 1, Huete (1988) recomienda tomar un valor igual a 1 para densidades de vegetación bajas, 0,5 para valores intermedios y 0.25 para alta densidad. En condiciones de entornos ambientales comunes, un valor de 0,5 para  $L$  es apropiado (Gilabert *et al.*, 1997). Cuando  $L$  es cercano a 0, el valor de SAVI se hace igual al NDVI. Para mantener el mismo rango de variación que el NDVI, el resultado debe multiplicarse por  $1+L$  (Muñoz, 2013).

A partir del momento de la introducción del SAVI, los índices de vegetación toman un mayor auge y son numerosos los que se introducen nuevos, la mayor parte de ellos correspondiendo a modificaciones sucesivas del SAVI (se denominan por

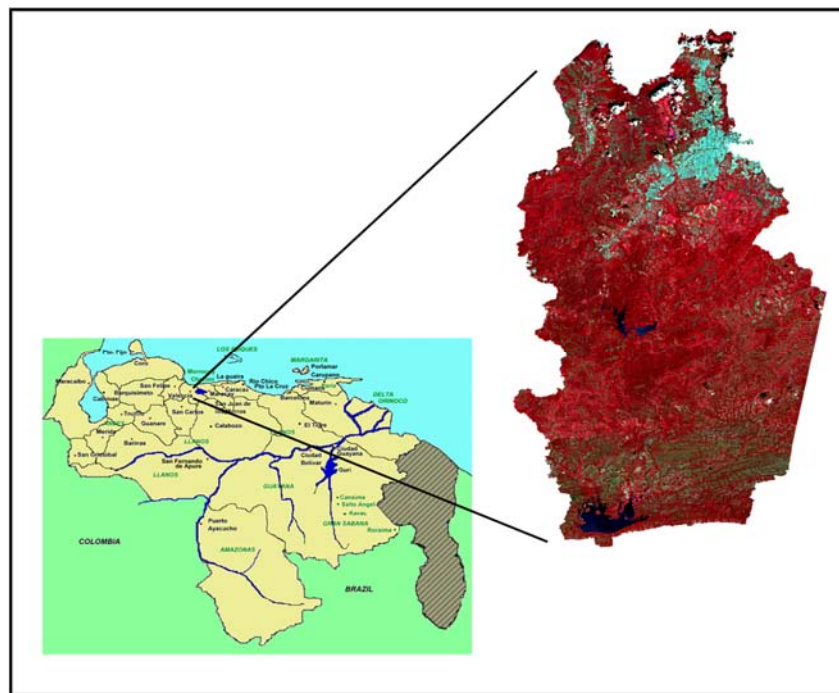
ello la “familia SAVI”), al objetivo de optimizar el valor del parámetro  $L$  para darle una aplicabilidad más general (Gilabert *et al.*, 1997)

Al emplearse el índice SAVI, dos coberturas vegetales de igual actividad fotosintética, pero suelos muy diferentes, aparecerán con igual o similar índice SAVI, a diferencia de lo que puede suceder en el NDVI clásico (Muñoz, 2013).

La información sobre la vegetación a partir de imágenes de sensores remotos se interpreta principalmente por las diferencias y los cambios de las hojas verdes de las plantas y las características espectrales del dosel. Los procesos más comunes de validación son a través correlaciones directas o indirectas entre los IVs obtenidos y las características de la vegetación medidas in situ, tales como la evaluación de la cobertura vegetal, LAI, biomasa, crecimiento y vigor (Xue y Su, 2017).

### **Descripción general del área de estudio**

La cuenca hidrográfica del río Pao (Fig. 3) está situada en la zona centro-occidental de la cordillera de la costa en la parte norte-central del estado Carabobo ubicada geográficamente en el flanco sur de la cordillera (FLSCN, sf-a).



**Figura 3. Ubicación de la cuenca del río Pao (imagen de la cuenca mostrada en falsos colores con la combinación R-G-B y obtenida de <https://earthexplorer.usgs.gov/>)**

Geología regional

La cuenca del río Pao, está cercana por el sur a las fallas de La Victoria, Valencia y a otras fallas normales, transversales al cinturón tectónico de la Cordillera de la Costa, que está localizado dentro del marco tectónico del Caribe meridional, del sistema de fallas activas rumbodeslizantes (transcurrentes dextrales) de rumbo este-oeste y noreste-suroeste que geodinámicamente las asocia a la placa Suramericana (FLSCN, sf-a), moviéndose a una velocidad comprendida entre 1.5 y 0.6 cm/año según Schubert (1993 en FLSCN, sf-a).

## Geomorfología

La cordillera de la costa tiene un rumbo aproximado N08E, pasando en algunos tramos a ser este-oeste. La cuenca está ubicada fisiográficamente en el flanco sur de la cordillera, separada de la Serranía del interior por una gran depresión con rumbo aproximadamente paralelo al de las cadenas montañosas que la bordean y limitan. Esta depresión es de origen tectónico y es consecuencia de un gran sistema de fallas longitudinales, siendo mayor la falla de La Vitoria y cuya prolongación hacia la zona de Tocuyito se ha determinado geofísicamente (FLSCN. (sf-a).

Con respecto del drenaje, este es en su mayor parte dendrítico, como corresponde a formas de relieve pronunciadas, con la particularidad que en las cuencas del estado Carabobo, las pendientes montañosas son más suaves, por lo tanto no se observan encajamientos pronunciados de la red fluvial, siendo totalmente lo contrario que la de los ríos que drenan hacia el mar Caribe (FLSCN, sf-a).

## Clima

Venezuela se caracteriza por ser un país con un clima tropical según la Clasificación Climática de Köppen, esto debido a su ubicación al norte de Suramérica. Para el estado Carabobo las características se mantienen muy parecidas a las del territorio nacional, donde las temperaturas se mantienen dentro de los 20 °C y 26 °C durante todo el año, con una temperatura media anual de 26.5 °C, con variaciones entre 32.3 °C como máxima promedio anual, hasta 20.08 °C como mínima promedio anual, y la precipitación media anual con un valor de 463 mm.

En el caso específico de la cuenca del río Pao, según la clasificación de Köppen, se encuentra dentro de un Clima Tropical de Sabana (Aw), presentando diferentes características a lo largo del área, entre ellas: temperaturas altas todo el año, el mes más frío por encima de los 18 °C, y las precipitaciones con algún mes por debajo de



los 60 mm. En la parte más al norte cercana al Lago de Valencia, se presenta igualmente un Clima Tropical de Sabana (Aw), pero con herbazales y bosques tropófilos semi-secos (Aw), con un sólo máximo de precipitación al año y de siete a seis meses lluviosos. Al sur del estado, hacia los sectores en donde se encuentran las subcuencas Paya y Pirapira, el clima se mantiene como Tropical de Sabana, con herbazales y bosques tropófilos semi-secos (Aw), con un sólo máximo de precipitación al año y de ocho a siete meses de lluvia (FLSCN, sf-a).

## Hidrología

Carabobo tiene tres hoyas hidrográficas: la del Caribe, la del Lago de Valencia y la del Sur, las cuales se encuentran conformadas por un gran número de ríos permanentes e intermitentes que recorre gran parte de la superficie del estado. Particularmente, el río Pao, se encuentra dentro de la Hoya del Sur y vierte sus aguas en el río Portuguesa, el cual forma parte de la cuenca del río Orinoco (FLSCN, sf-a).

La cuenca Alta y Media del río Pao, presenta una superficie de 2684 Km<sup>2</sup>. Dentro de esta cuenca fueron construidos tres embalses: El Pao-Cachinche, La Balsa y Guataparo, siendo el de menor dimensión. La cuenca del río Pao está conformada por subcuencas y microcuencas cuyas denominaciones derivan de acuerdo al nombre del curso de agua principal (FLSCN, sf-a).

## Hidrografía

El paisaje es montañoso, conformado por filas y cerros de poca altitud en toda la zona, permitiendo un patrón dendrítico en cuanto al drenaje, con ramificaciones arborescentes en la que los tributarios se unen a la corriente principal, formando ángulos agudos. Las pendientes van de inclinadas a fuertemente inclinadas, entre 30 y 45 %, los cuales son valores representados en las curvas de nivel existentes en el área, las cuales van desde 400 m.s.n.m en los cauces de los ríos y cercanías al embalse Pao-Cachinche y los máximos valores pueden alcanzar los 900 m.s.n.m en las partes más altas de las filas.

Las nacientes de las quebradas y ríos se inician con la escorrentía a través de las diferentes filas y cerros que se encuentran en el área de estudio; entre los que se encuentran las filas: Los Aguacates, Piedra Pintada, Palmarote, Candelero, San Pedro, Las Araguatas, San José y el Cerro Taparo.

## CAPÍTULO III

### MARCO METODOLÓGICO

#### TIPO DE INVESTIGACIÓN

La ejecución de este proyecto de investigación está enmarcada en el tipo de investigación **descriptiva**. Al respecto Hernández-Sampieri *et al.*, (2014) define a este tipo de investigación como:

“Con los estudios descriptivos se busca especificar las propiedades, las características y los perfiles de personas, grupos, comunidades, procesos, objetos o cualquier otro fenómeno que se someta a un análisis. Es decir, únicamente pretenden medir o recoger información de manera independiente o conjunta sobre los conceptos o las variables a las que se refieren, esto es, su objetivo no es indicar cómo se relacionan estas.” (p. 92).

En esta investigación se desea emplear una metodología basada en las herramientas SIG y sensores remotos con la finalidad de obtener mapas que muestren los índices biofísicos y el uso y cobertura terrestre de la CRP, lo cual va a permitir la descripción física y geográfica, y realizar análisis espacio temporales de la cuenca.

## DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

De acuerdo a la estrategia de ejecución de esta investigación, la misma puede ser clasificada como una investigación de tipo **no experimental**.

Henández-Sampieri *et al.* (2014) establece que “Los experimentos manipulan tratamientos, estímulos, influencias o intervenciones (denominadas variables independientes) para observar sus efectos sobre otras variables (las dependientes) en una situación de control” (p. 129). En contraparte, para esta investigación no se van a evaluar los efectos de variables independientes sobre variables dependientes sino que el empleo de herramientas metodológicas para el procesamiento y análisis de imágenes satelitales van a permitir observar las características de la cobertura terrestre de la CRP tal y como se presentan en el tiempo. Siendo así, esto se adapta a un tipo de investigación no experimental con enfoque longitudinal, que de acuerdo a

Hernández-Sampieri *et al.* (2014) son aquellas que se encargan de “analizar los cambios al paso del tiempo del tiempo de un evento, comunidad, proceso, fenómeno o contexto” (p. 154)

## **TECNICAS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN**

Esta investigación se llevó a cabo mediante la obtención y procesamiento de imágenes satelitales a través del Satélite Landsat 8 OLI, durante la temporada seca de los años 2015, 2016 y 2017.

## **ETAPAS DE LA INVESTIGACIÓN**

1. Selección de imágenes satelitales
2. Procesamiento preliminar de las imágenes satelitales
3. Estimación de los índices biofísicos a partir de las imágenes satelitales
4. Análisis espacio temporal del uso y cobertura de la tierra

## **1º Etapa Selección de imágenes satelitales**

Los datos satelitales multiespectrales fueron obtenidos del satélite Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) and Thermal Infrared Sensor (TIRS) C1 Level -1, desde la página web del Departamento Geológico de los Estados Unidos de Norte América, U. S. Geological Survey USGS, Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, Global Visualization Viewer ( <https://earthexplorer.usgs.gov/>). Este satélite lanzado en febrero 2013 colecta imágenes de la tierra cada 16 días y a diferencia del los Landsat 7 ETM+ este incluye dos nuevas bandas espectrales, el azul profundo (banda 1) y un nuevo infrarrojo (banda 9). Dos bandas térmicas (TIRS) que captura data con una mínima resolución de 100 m, pero se registra y se entrega con el producto de datos OLI de 30 m de resolución (USGS, 2015).

Las imágenes obtenidas estuvieron comprendidas entre los años 2014 a 2017 durante la temporada seca (de noviembre a abril para Venezuela), con el fin de evitar la interferencia que los factores climáticos ejercen sobre la calidad de las imágenes durante la temporada de lluvia. La escena de toma fue PATH= 05 y ROW= 53 para todas las imágenes, que además fueron descargadas en formato TIF. Las imágenes poseen una corrección estándar de terreno Nivel 1. Esta corrección ofrece una precisión sistemática radiométrica y geométrica mediante la incorporación de puntos

de control terrestre y el empleo de un modelo de elevación digital (DEM) (USGS, 2015).

## **2º Etapa Procesamiento preliminar de las imágenes satelitales**

### **Corrección geométrica, atmosférica y radiométrica**

El procedimiento preliminar de las imágenes consistió en el apilamiento de las bandas espectrales, la creación de la subescena que corresponde a la obtención de una menor área, siendo el área de interés que para este estudio es la CRP. Por último, se le realizaron correcciones topográficas, atmosféricas y radiométricas a las imágenes. Al realizar las correcciones radiométricas se transforma el número digital (ND), que originalmente contiene la imagen, a valores de reflectancia ( $\rho$ ), siendo necesario para el cálculo de los índices biofísicos. Se empleó el software ERDAS IMAGINE 2014, módulo ATCOR 3 Derive Terrain File para las correcciones topográficas, y el módulo ATCOR 3 Workstation para las correcciones atmosféricas y radiométricas.

### 3° Etapa Estimación de los índices biofísicos

Se empleó el software ARCGIS 10 para esta etapa, y dentro de este software se empleó la caja de herramientas con el modelo SEBAL versión 1.0 (SEBAL, 2002). El modelo posee las ecuaciones para el cálculo de los índices de vegetación NDVI, SAVI. Como ya se mencionó anteriormente, estos índices requieren de la reflectancia corregida en la banda roja y la banda infrarroja, que para el satélite Landsat 8 OLI corresponden a B4 y B5 respectivamente. Para el índice SAVI se empleó un valor de 0,5 para el parámetro  $L$  de la ecuación, el cual es el factor de corrección del efecto suelo llamado “línea de suelo”.

El NDVI se calculó mediante la siguiente expresión:

$$\text{NDVI} = \frac{B5 - B4}{B5 + B4}$$

Donde: B5 es la reflectancia corregida en el infrarrojo cercano y B4 es la reflectancia corregida en el rojo.

El SAVI se calculó mediante la siguiente expresión:



$$SAVI = \frac{(B5 - B4) + (1 + 0,5)}{B5 + B4 + 0,5}$$

Donde: B5 es la reflectancia corregida en el infrarrojo cercano y B4 es la reflectancia corregida en el rojo. L es la constante de compensación promedio, 0,5.

#### **4º Etapa Análisis espaciotemporal del uso y cobertura de la tierra**

En esta etapa y siguiendo la metodología empleada en Rawat y Kumar (2015), para poder analizar el cambio en el uso y cobertura de la tierra, primero hay que realizar la clasificación y detección del uso y cobertura. Fueron establecidas siete tipos de coberturas terrestres sobre la CRP:

- Vegetación: considerada aquella de tipo natural o primaria.
- Urbano: correspondiente a los parches de urbanismos presentes en la CRP, siendo predominante la cobertura de la Gran Valencia.
- Cuerpos de agua: dentro de la CRP existen tres significativos cuerpos de agua, los cuales son, de norte a sur, Dique de Guataparó, Embalse Pao Cachimche y Embalse la Mariposa.

- Suelo descubierto: correspondiente a zonas erosionadas por factores naturales, es decir sin efectos de actividad antrópica.
- Agropecuario: el sector agropecuario es la parte del sector primario compuesta por el sector agrícola (agricultura) y el sector ganadero (ganadería). Estas zonas fueron de fácil reconocimiento por el patrón de parcelamiento.
- Nubes y sombras: las imágenes con notable presencia de nubes fueron descartadas, sin embargo debido a la relativamente amplia zona de estudio, se hizo inevitable poder descartar algunas imágenes que presentaron algunas nubes.

La clasificación de las imágenes en la interfaz ENVI 5.3 fue realizada mediante el criterio de Clasificación Supervisada, la cual:

Se basa en la disponibilidad de *áreas de entrenamiento*. Se trata de áreas de las que se conoce *a priori* la clase a la que pertenecen y que servirán para generar una *signatura espectral* característica de cada una de las clases. Se denominan *clases informacionales* en contraposición a las *clases espectrales* que genera la clasificación no supervisada. Las áreas de entrenamiento deben ser lo más homogéneas posibles y en las que sepamos lo que había el día que se tomó la imagen. Otra posibilidad es utilizar fotografía aérea o información de otro tipo (Lizana, sf).

Si bien no se realizaron recorridos terrestres para saber *a priori* las clases de cobertura terrestre dentro de la CRP al momento de realizar la clasificación supervisada de las imágenes satelitales, la herramienta empleada para darle validez a tal procedimiento consistió en el empleo de la interfaz Google Earth Pro 7.3, la cual permitió hacer un recorrido digital por toda la superficie de la CRP para el reconocimiento de la zona, realizando una visualización por fecha de acuerdo a la fecha de la imagen descargada a ser clasificada, permitiendo de esta manera tener mayor certeza al momento de seleccionar los píxeles dentro de las áreas de entrenamiento de las siete clases de cobertura establecidas.

La técnica estadística seleccionada para la clasificación supervisada fue la de Máxima Verosimilitud:

El clasificador de máxima verosimilitud (o máxima probabilidad) asume que los datos siguen una función de distribución normal para asignar la probabilidad de que un píxel cualquiera pertenezca a cada una de las clases. El píxel se asigna de este modo a la clase a la que es más probable que pertenezca. Este método puede usarse de forma automática, o puede establecerse algún criterio que permita asignar píxeles a una clase sólo si la probabilidad correspondiente es superior a determinado umbral. Permite por otro lado definir algún tipo de criterio para medir la calidad de la asignación (Lizana, sf).

Posterior a la clasificación, se realizó la validación de la misma, esto no es más que una manera de medir el error de clasificación. “Un método simple o apropiado de

evaluación de los errores es utilizar la matriz de confusión de clases. Con este tipo de análisis, se obtiene, no sólo una caracterización del error cometido, sino también una medida sobre la adecuación de las clases consideradas a la realidad y de los parámetros utilizados para caracterizarlas” (Lizana, sf).

Los parámetros que surgen de la matriz de errores y la fórmula para calcularlos son (Willington *et al.*, 2013):

*Precisión global*

$$P = \frac{\sum_{i=1}^m x_{ii}}{N}$$

*Coficiente de Kappa*

$$K = \frac{N \sum_{i=1}^m x_{ii} - \sum_{i=1}^m x_{i\Sigma} x_{\Sigma i}}{N^2 - \sum_{i=1}^m x_{i\Sigma} x_{\Sigma i}}$$

Donde:

**m** = Número total de clases,

**N** = Número total de píxeles en las **m** clases de referencia

$\chi_{ii}$  = elementos de la diagonal principal de la matriz de confusión  
 $\chi_{\Sigma i}$  = suma de los píxeles de la clase  $i$  de referencia  
 $\chi_{i\Sigma}$  = suma de los píxeles clasificados como la clase  $i$

Valores por encima de 95 por ciento de precisión global y de 0.95 de índice de Kappa fueron considerados apropiados para aceptar el resultado de la clasificación, de lo contrario la clasificación era repetida hasta lograr los valores deseados.

Se realizó un análisis comparativo con la finalidad de determinar la existencia de diferencias de los valores de los índices de vegetación durante las tres temporadas secas estudiadas. Para ello, fueron seleccionados cuarenta puntos sobre la cuenca (Fig. 4). La selección de los mismos se basó en tomar en cuenta los diferentes tipos de coberturas, sin que ellos cayesen sobre nubes o sombras, de tal manera que se establecieron ocho puntos sobre cada tipo de cobertura. Posteriormente, se extrajeron los valores de NDVI y SAVI y mediante la interfaz STATGRAPHICS se realizó la comparación de los índices de vegetación durante las tres temporadas seca por medio de un análisis ANOVA.

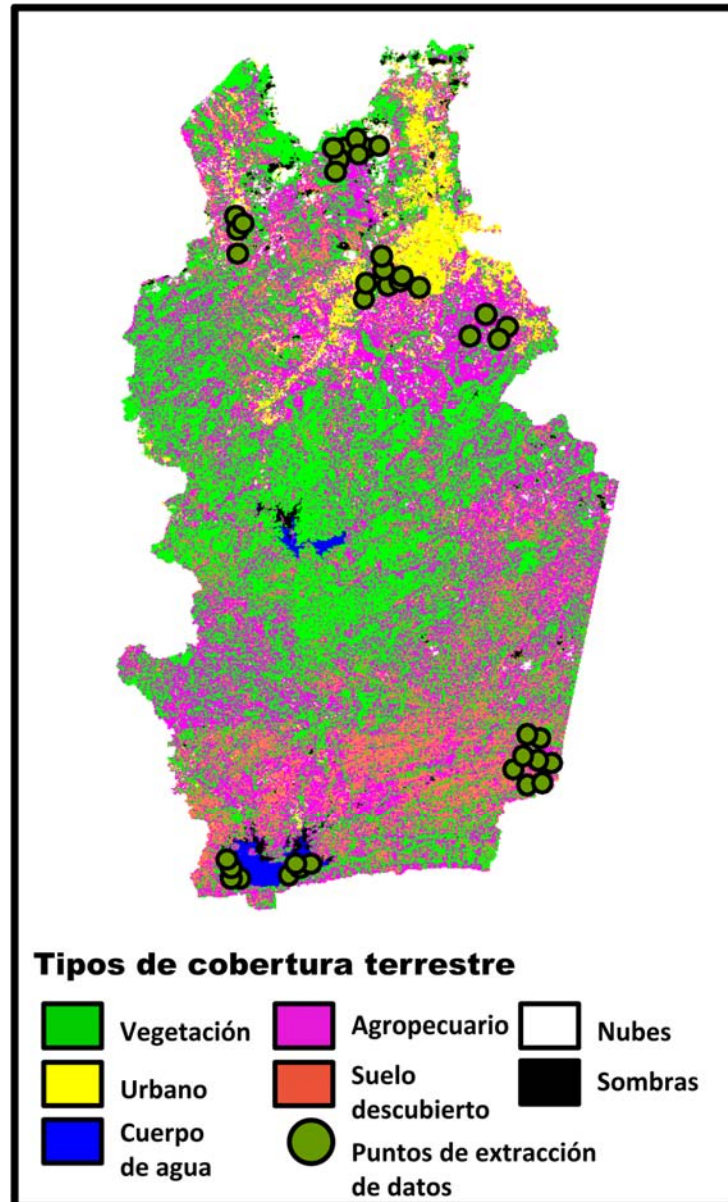


Figura 4. Distribución de los puntos de muestreo para el análisis espacio temporal de los índices biofísicos en la cuenca del río Pao

## **CAPÍTULO IV**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **Etapa 1 Resultados de la selección de las imágenes satelitales de la cuenca del río Pao a ser requeridas, empleando el satélite Landsat 8 OLI TIRS**

Se obtuvo un total de doce imágenes satelitales, las cuales pueden ser identificadas mediante (Tabla I): a) el Código de identificación de la escena, b) la fecha de adquisición, c) el tiempo al centro de la escena, d) la cobertura de nubes (%), e) el ángulo del azimuth solar y f) el ángulo de elevación solar. Para cada imagen la información se muestra como, por ejemplo, aparece para la primera imagen: LC80050532014316LGN01; 2014/11/12; 14:52:50.5774170Z; 15.81; 142.68492382; 54.98539565. Además, toda esta información fue requerida para realizar el procesamiento preliminar de las imágenes.

La temporada seca en Venezuela comprende los meses de noviembre a abril, sin embargo las imágenes de algunos meses no fueron seleccionadas por la mayor presencia de nubes, pues los sensores pasivos no penetran nubosidades y la data capturada durante días nublados no es inútil (Xue y Su, 2017). Se incorporó la imagen de mayo 2015 por su baja nubosidad, y de manera general se puede observar que la cobertura de nubes estuvo por debajo del 34 por ciento.

**Tabla I. Características de las imágenes satelitales Landsat 8 OLI TIRS Level**

**1**

Nº	1	2	3	4	5	6
1	LC800505320143 16LGN01	2014/11/12	14:52:50.5774170Z	15.81	142.68492382	54.98539565
2	LC800505320150 47LGN01	2015/02/16	14:52:25.3403540Z	14.30	127.23837494	53.49663651
3	LO800505320150 63LGN01	2015/03/04	14:52:20.8131940Z	4.10	119.09567247	57.19634293
4	LC800505320151 27LGN00	2015/05/07	14:51:42.9263048Z	14.87	71.76182284	64.97078757
5	LC800505320153 35LGN01	2015/12/01	14:52:45.6211550Z	20.28	145.30936420	51.10086493
6	LC800505320160 18LGN02	2016/01/18	14:52:41.9378520Z	7.14	138.18717201	48.77313915
7	LC800505320160 50LGN01	2016/02/19	14:52:30.0350720Z	28.27	125.99185017	54.13437034
8	LC800505320160 66LGN01	2016/03/06	14:52:29.6401600Z	14.13	117.54328980	57.89289550
9	LC800505320163 54LGN02	2016/12/19	14:52:51.3231530Z	17.75	144.49808212	48.65149145
10	LC800505320170 04LGN01	2017-01-04	14:52:48.8599710Z	26.50	141.67998258	48.08578886
11	LC800505320170 36LGN00	2017/02/05	14:52:36.7938800Z	34.24	131.71526933	51.40580723
12	LC800505320171 16LGN00	2017/04/26	2017:116:14:51:40. 4070190	30.86	79.19484065	65.24877827



1: Código de identificación de la escena. 2: Fecha de adquisición. 3: tiempo al centro de la escena. 4: Cobertura de nubes (%). 5: Ángulo del azimuth solar. 6: Ángulo de elevación solar

## **Etapa 2 Procesamiento preliminar de las imágenes satelitales**

Antes de realizar la estimación de los índices de vegetación, se obtuvieron las correcciones topográficas, atmosféricas y radiométricas de las doce imágenes satelitales. En la Figura 5 se observa la imagen de fecha 12 Noviembre 2014 como una muestra del procesamiento preliminar realizado, específicamente se observa cómo luce la reflectancia en porcentaje de la imagen de la cuenca en la banda 4 y la banda 5, las cuales son las necesarias en la ecuación del índice NDVI y SAVI.

## **Etapa 3 Estimación de los índices biofísicos a partir de las imágenes satelitales**

En las Figuras 6 y 7 se pueden observar el resultado de los índices NDVI y SAVI, respectivamente, sobre las doce imágenes empleadas. Respecto a la escala de los índices representada en gama de color gris, se nota que el NDVI muestra tres tonos para las coberturas terrestres, a diferencia de lo que se puede observar con respecto a SAVI, quien demostró mayor gama de color gris, lo que

denota una mayor variación en los valores del índice SAVI sobre la superficie de la cuenca.

El patrón de respuesta de ambos índices sobre las doce imágenes de la CRP responde a lo siguiente (Extraído en [http://www.biblioteca.udep.edu.pe/BibVirUDEP/tesis/pdf/1\\_59\\_185\\_24\\_508.pdf](http://www.biblioteca.udep.edu.pe/BibVirUDEP/tesis/pdf/1_59_185_24_508.pdf)):

- El agua tiene reflectancia  $\rho_R > \rho_{NIR}$ , por lo tanto valores negativos de NVDI.
- Las nubes representan valores similares para  $\rho_R$  y  $\rho_{NIR}$ , por lo que su NVDI es cercano a cero.
- El suelo descubierto y con vegetación rala presenta valores positivos aunque no muy elevados.
- La vegetación densa, húmeda y bien desarrollada presenta los mayores valores de NVDI.

La percepción remota sobre la vegetación provee de una valiosa información para aplicaciones en monitoreo ambiental, conservación de la biodiversidad, agricultura, silvicultura, infraestructuras urbanas verdes, entre otros, por medio de la evaluación en los cambios de sus patrones, gracias a las propiedades espectrales de las plantas (Xue y Su, 2017).

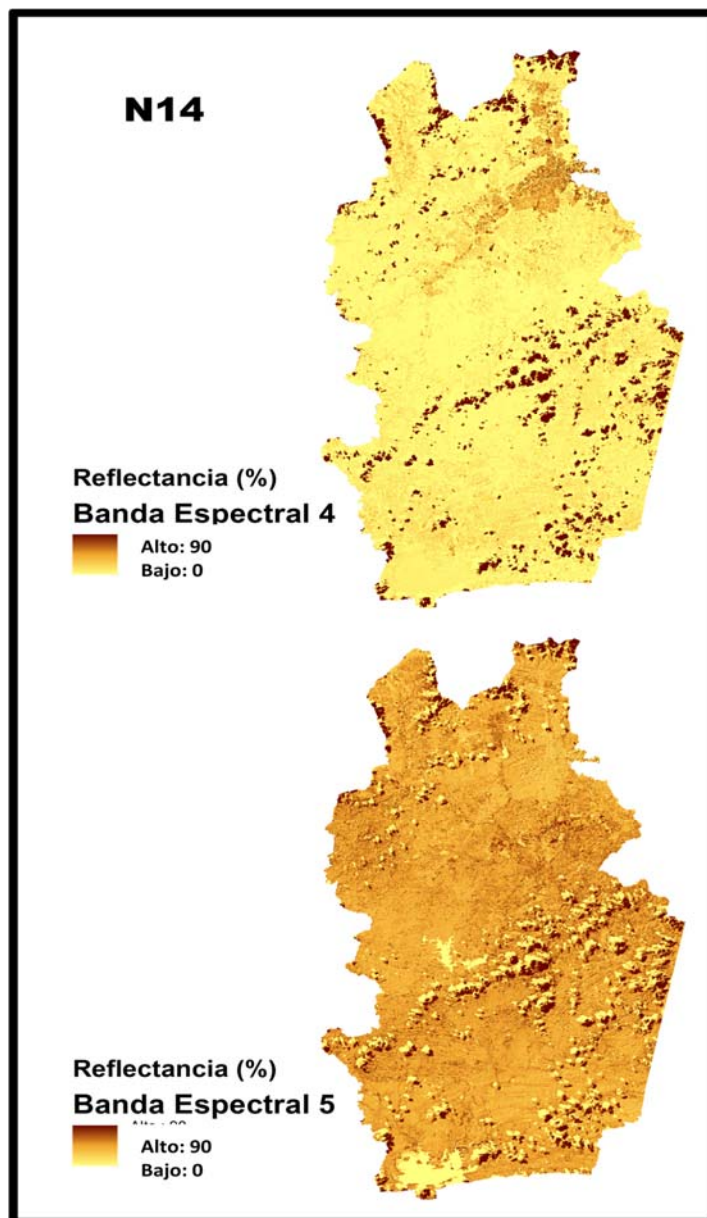


Figura 5. Reflectancia (%) en la bandas espectrales 4 (roja) y 5 (infrarrojo cercano) de la imagen Noviembre 2014 del Satélite Landsat 8 OLI TIRS Level 1

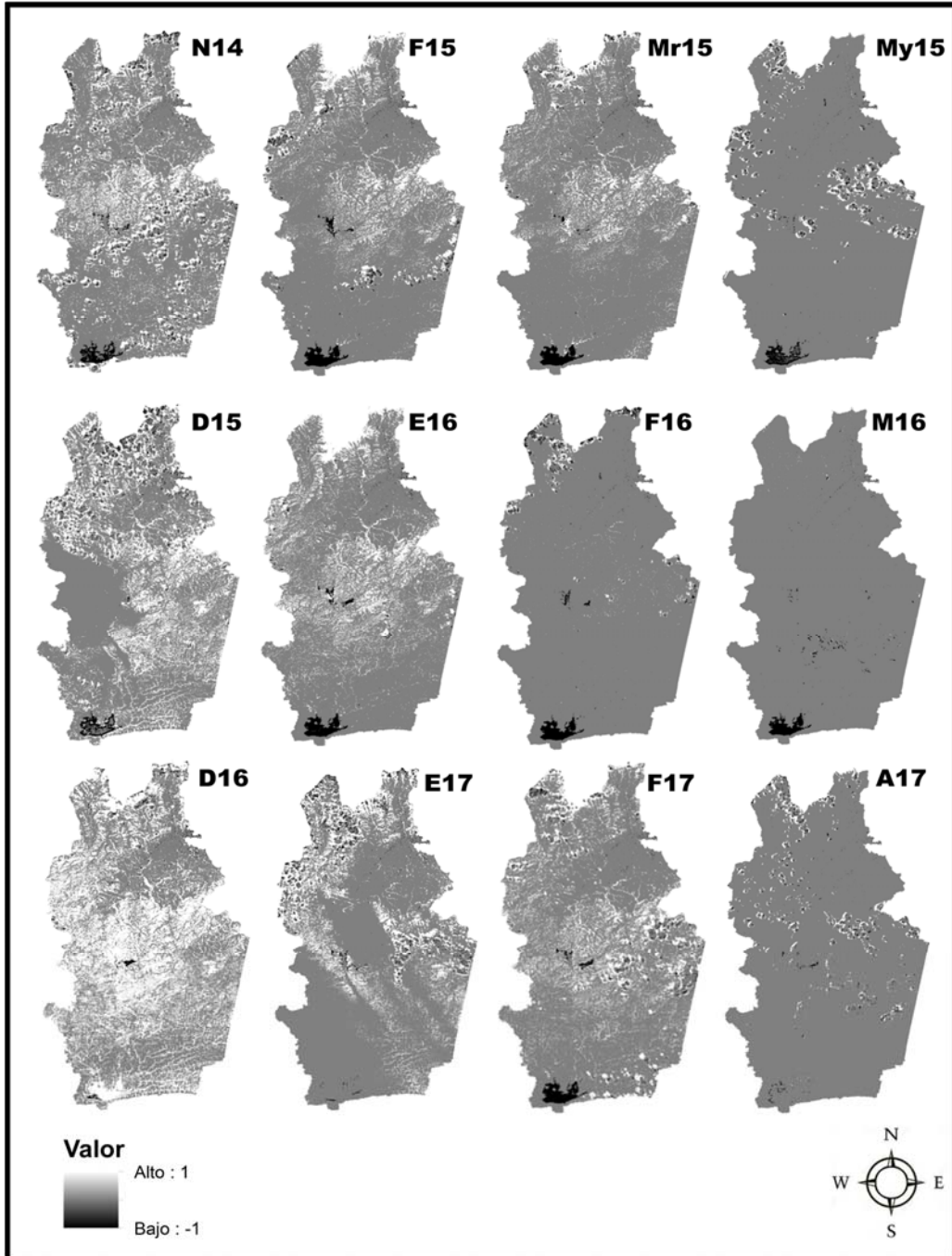


Figura 6. Índice NDVI en la cuenca del río Pao

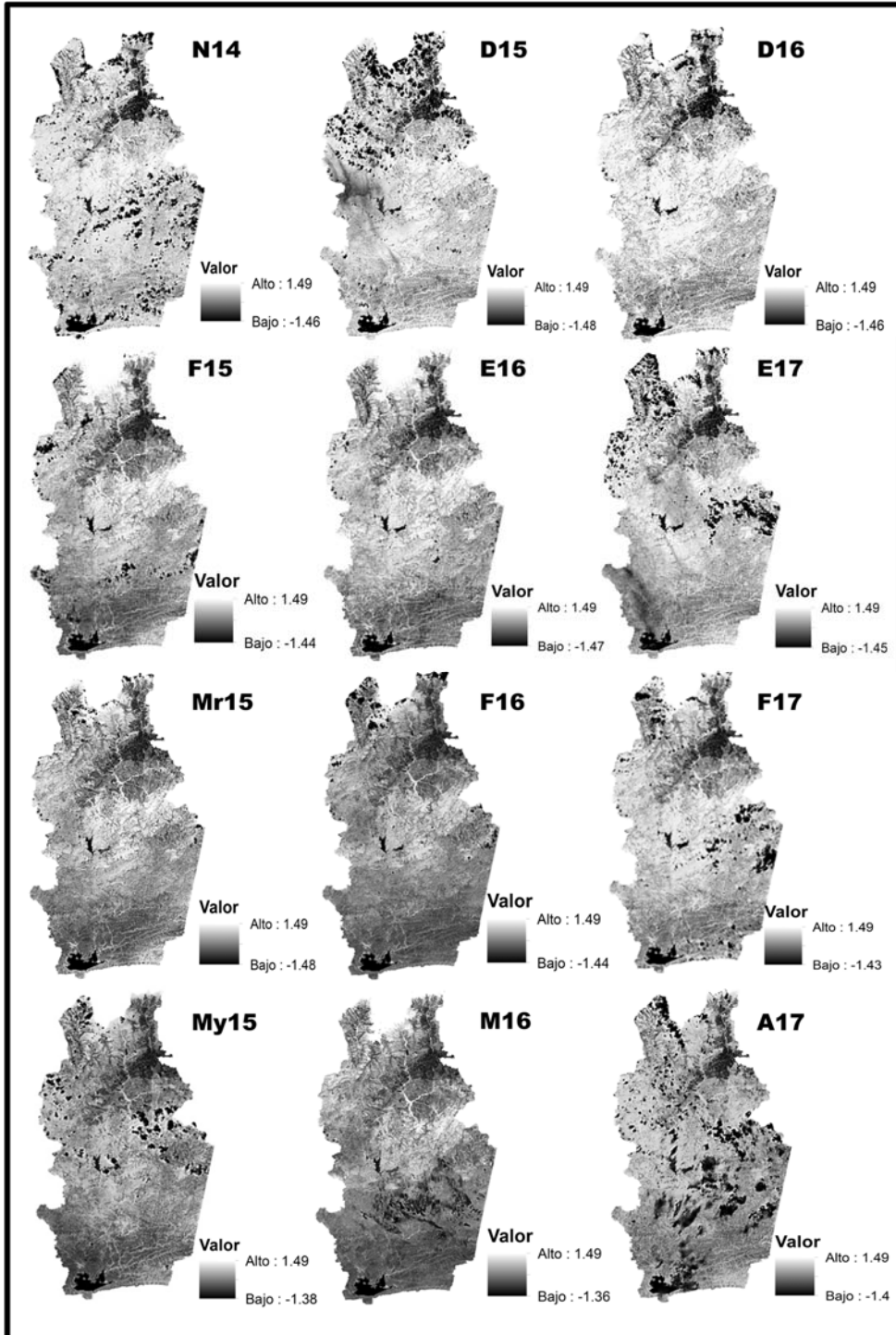


Figura 7. Índice SAVI en la cuenca del río Pao

#### **Etapa 4 Análisis espacio temporal del uso y cobertura de la tierra**

Como se mencionó anteriormente, en la Figura 7 se observa una mayor variación en los valores del índice SAVI, esto también se ve representado al observar el resumen estadístico arrojado por la prueba ANOVA para NDVI (Tabla II) y SAVI (Tabla III), en donde de manera general, hubo mayor varianza entre los valores de SAVI, por lo que se puede decir que SAVI mostró información más detallada sobre la condición de la vegetación ubicada sobre la extensión de la cuenca. Esto además, pudo haberse debido a que SAVI es un índice en el que el efecto del suelo tiene poca interferencia sobre el resultado del índice (Huete, 1988) a través de la variable de compensación  $L$ , para la cual se empleó un valor de 0.5 como es recomendado para entornos comunes (Gilabert *et al.*, 1997). Sin embargo, para un área en particular, un valor de  $L$  apropiado, puede ser derivado de un análisis de múltiples imágenes a través de un pixel que no varíe mucho en el tiempo (SEBAL, 2002)

**Tabla II. Resumen estadístico del índice NDVI en la cuenca del río Pao**

Temporada seca	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Mínimo	Máximo
2014-2015	160	-0.0375	0.474342	-1264.91%	-1.0	1.0
2015-2016	160	-0.0625	0.458155	-733.047%	-1.0	1.0
2016-2017	160	0.05625	0.39249	697.761%	-1.0	1.0
Total	480	-0.0145833	0.445103	-3052.14%	-1.0	1.0

**Tabla III. Resumen estadístico del índice SAVI en la Cuenca del Río Pao**

Temporada seca	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Mínimo	Máximo
2014-2015	160	0.706543	0.656762	92.9543%	-1.28571	1.48485
2015-2016	160	0.571787	0.676342	118.286%	-1.28571	1.48052
2016-2017	160	0.799283	0.559412	69.9892%	-1.2	1.48
Total	480	0.692538	0.638476	92.1937%	-1.28571	1.48485

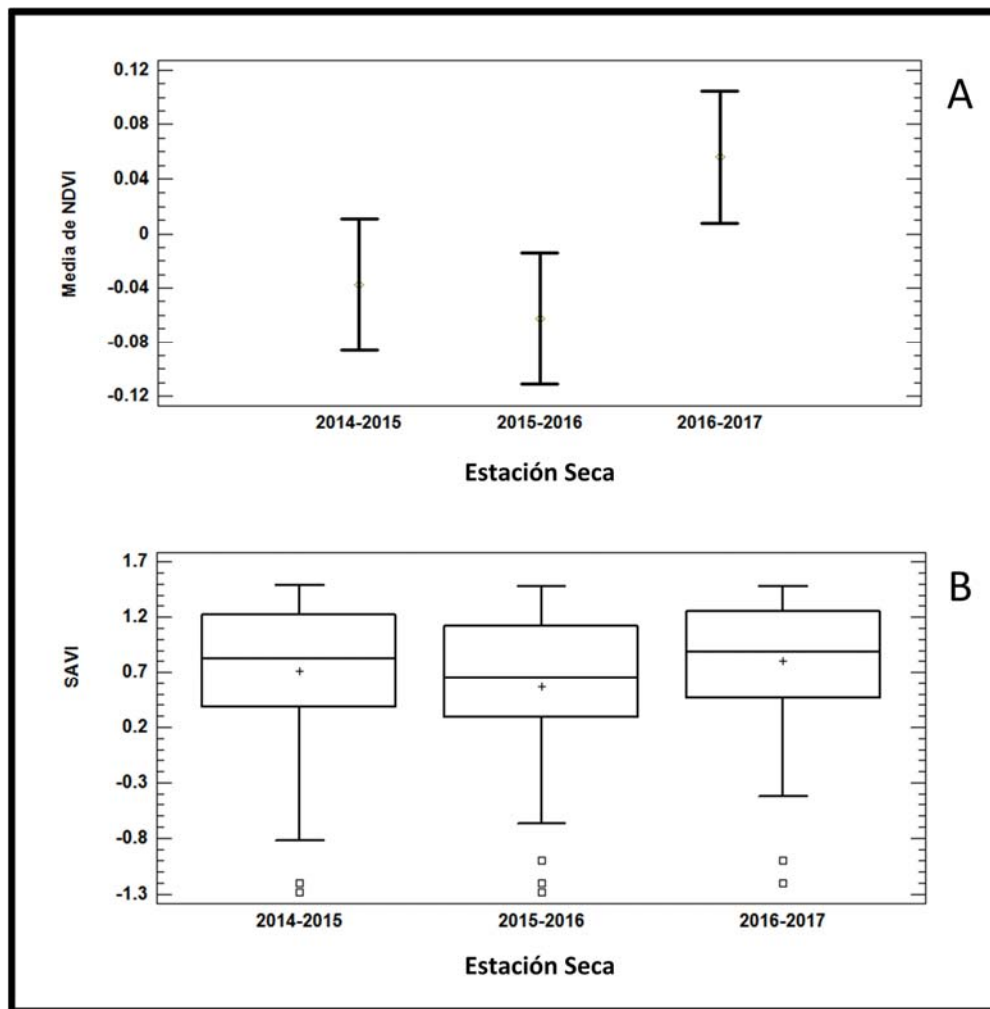
En la Figura 8 se puede observar el estadístico comparativo de los dos índices de vegetación sobre los cuarenta puntos de muestreo durante las tres temporadas secas, en donde se puede notar la ausencia de diferencia significativa entre los años comparados, excepto el resultado de la media de NDVI de la temporada 2016-2017 respecto de los dos años anteriores. De manera general, se puede decir que la falta de una diferencia marcada durante los tres años estudiados, sea debido a la cercanía

entre ellos y a la baja cantidad de temporadas secas estudiadas. De modo que incrementando la cantidad de años evaluados y además realizando un análisis comparativo por cada tipo de cobertura, podría extraerse mayor cantidad de información para un análisis espacio-temporal de la cuenca, cuya información sea calibrada con mediciones de terreno, tal y como lo menciona Muñoz (2013)

Con respecto de la clasificación supervisada de la cobertura terrestre, se observa, en la Figura 9, la variación de las mismas en las doce imágenes. De manera cualitativa, se observan variaciones significativas en los cambios de la cobertura terrestre, sin embargo de esta manera no es posible asumir con certeza el cambio real en el tiempo, pues esto pudo haber estado influenciado por las características *per se* de cada tipo de cobertura, las cuales en algunos meses contribuyeron al solapamiento de unas con otras. Por ejemplo, dependiendo del estadio fenológico de los cultivos, cuando las plantas poseen un desarrollo avanzado, sus características espectrales se asemejan las que posee la vegetación primaria. En otros momentos del año cuando las tierras agrícolas están aradas, sus características espectrales se asemejan a la de aquellas superficies con suelo descubierto por acción natural. En cuanto a la cobertura urbana, esta es muy diversa de modo que aparecen parches urbanos en zonas atípicas. Esto puede ser debido a que la firma espectral de distintas cubiertas presentan cierta variabilidad debido a una serie de factores externos que modifican el comportamiento



espectral teórico, de modo que se dificulta la discriminación de unas superficies sobre otras (Chuvienco, 2008).



**Figura 8. Análisis comparativo de los índices biofísicos durante las tres temporadas secas en la cuenca del río Pao. A: Media del índice NDVI. B: Diagrama de cajas del índice SAVI**

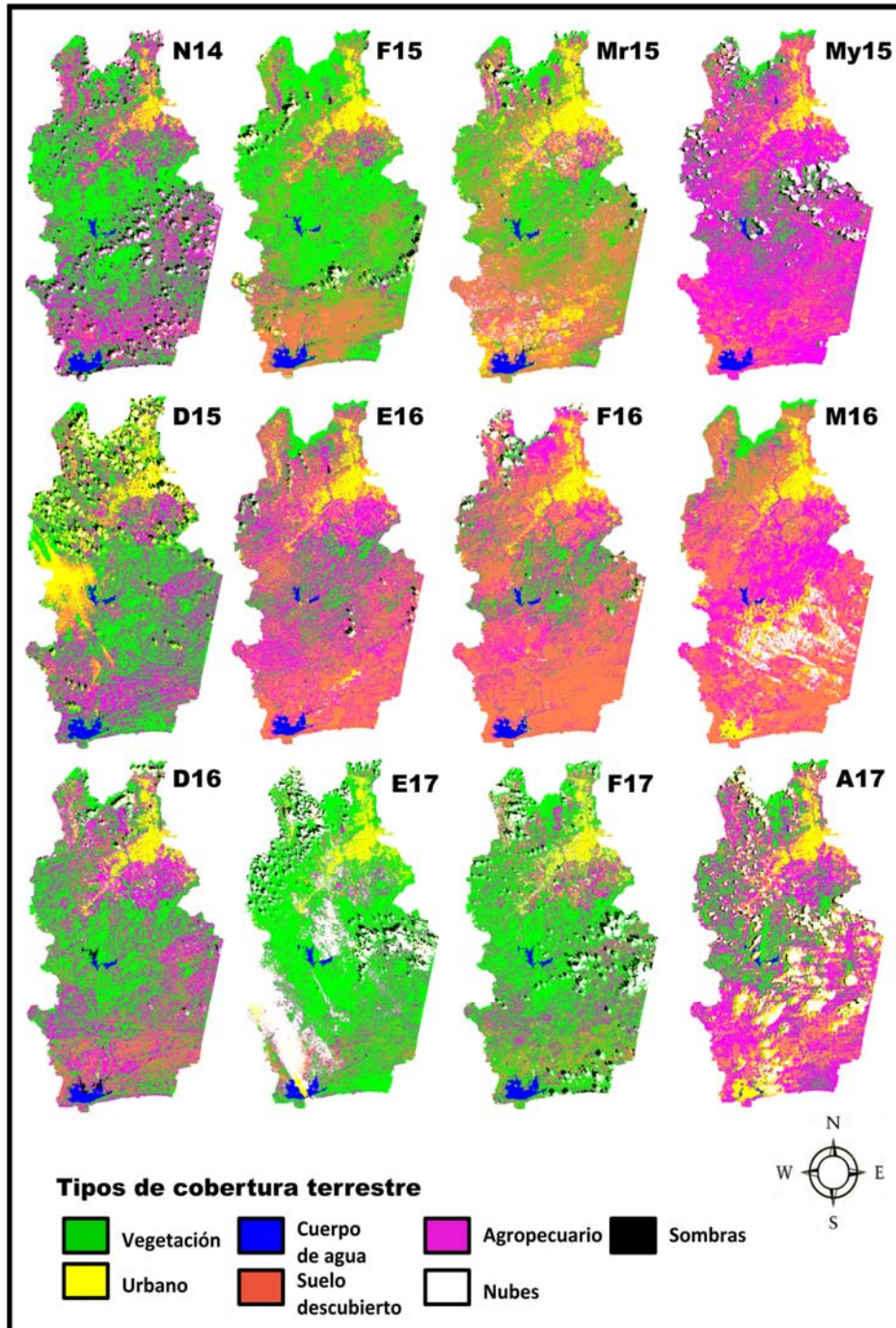


Figura 9. Clasificación Supervisada de la cobertura terrestre en la cuenca del río Pao

Al observar la tabla IV, notamos a través de los valores de la Precisión Global y del Índice de Kappa que la aplicación de la herramienta de Clasificación Supervisada resultó con valores satisfactorio por encima del 97%, de modo que esto además demuestra que el solapamiento entre distintas coberturas no fue debido a errores cometidos ni sobre la adecuación de las clases consideradas a la realidad (Lizana, sf).

**Tabla IV. Estadísticos generados de la clasificación supervisada en la cuenca del río Pao**

Imagen	Precisión global (%)	Coefficiente de Kappa
N 14	99,768	0,997
F 15	98,341	0,980
Mr 15	99,546	0,995
My 15	99,306	0,992
D 15	99,085	0,989
E 16	100	1,0
F 16	99,877	0,999
Mr 16	99,876	0,999
D 16	99,255	0,991
E 17	98,220	0,979
F 17	97,280	0,968
A 17	100	1.0

## **CAPÍTULO V**

### **CONCLUSIONES**

- Se obtuvo un total de doce imágenes satelitales, cuatro para cada estación seca, las cuales abarcaron los años 2014 al 2017. El porcentaje de cobertura de nubes estuvo entre 4 y 34 por ciento.
- Las características obtenidas de cada imagen satelital, a través de la información que provee el sensor, fueron estrictamente necesarias para la realización del procesamiento preliminar de las imágenes, específicamente para la obtención de la reflectancia en las bandas 4 y 5 requeridas para calcular los índices NDVI y SAVI.
- El índice SAVI mostró una mayor variabilidad de valores, de modo que esto representó información más detallada sobre la cobertura terrestre de la cuenca del río Pao.

- No se observó diferencias significativas entre las tres temporadas secas evaluadas, a excepción de la media de NDVI de la temporada 2016-2017 con respecto de las dos temporadas anteriores.
- Las características *per se* de los cinco tipos de cobertura terrestre establecidos sobre la CRP pudieron haber influenciado las diferencias observadas en el patrón de cobertura terrestre durante el tiempo evaluado

## **RECOMENDACIONES**

Para darle continuidad y extraer mayor información sobre el uso de índices biofísicos sobre la cuenca del río Pao, se recomienda realizar un análisis comparativo por cada tipo de cobertura terrestre, además incrementando la cantidad de años de estudio. También podría ser útil hacer un análisis comparativo que además incluya la temporada de lluvia. Además, se recomienda reforzar los resultados mediante la extracción de información obtenida directamente de campo.

## BIBLIOGRAFÍA

- Arthur-Endsley, K. (2016). The Tasseled Cap Transformation and Band Ratios: Applications for Urban Studies [Mensaje de un blog]. K Arthur Endsley. Recuperado de: <http://karthur.org/2015/tasseled-cap-and-band-ratios-for-urban-studies.html>
- Bonilla-Moreno, M. (2017). La influencia del cambio poblacional en el paisaje natural. Veracruz, México: Inecol. Recuperado de: <http://www.inecol.mx/inecol/index.php/es/ct-menu-item-25/ct-menu-item-27/159-la-influencia-del-cambio-poblacional-en-el-paisaje-natural>
- Butt, A., Shabbir, R., Ahmad, S. y Aziz, N. (2015). Land use change mapping and analysis using Remote Sensing and GIS: A case study of Simly watershed, Islamabad, Pakistan. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 18(2), 251-59. Recuperado de: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110982315000332>
- Campbell, N. y Reece, J. (2007). *Biología*. Madrid, España: Panamericana
- CEA. (2010). ¿Qué es un SIG?. Andalucía, España: Sistemas de Información Geográfica, tipos y aplicaciones empresariales. Recuperado de: <http://sig.cea.es/SIG>.
- Chuvieco, E. (2008). 3º Ed. Teledetección Ambiental: La observación de la Tierra desde el Espacio. Barcelona. Ariel Ciencia. 584 pp. ISBN 978-84-344-8073-3.
- Decreto N° 2.320 del 05/06/1992. Gaceta Oficial N° 35.112 del 14/12/1992. Declaratoria de la Zona Protectora – Cuenca alta y media río Pao.

- Decreto N° 1.358 del 5/06/1996. Gaceta Oficial N° 35.997 del 10/07/1996. Plan de Ordenamiento y Reglamento de Uso de la Zona Protectora – Cuenca alta y media del río Pao, Estados Carabobo y Cojedes.
- Deng, C. y Wu, C. (2012). BCI: A biophysical composition index for remote sensing of urban environments. *Remote Sensing of Environment*, 127(2012), 247-59. Recuperado de: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S003442571200363X>
- Deng, Y., Wu, C., Li, M. y Chen, R. (2015). RNDSI: A ratio normalized difference soil index for remote sensing of urban/suburban environments. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 39(2015), 40-48. Recuperado de: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0303243415000422>
- Dimiyati, M., Mizuno, K., Kobayashi, S. y Kitamura, T. (1996). An analysis of land use/cover change using the combination of MSS Landsat and land use map, a case study in Yogyakarta, Indonesia. *International Journal of Remote Sensing*, 17(5), 931-44. Recuperado de: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431169608949056>
- FLSCN. (sf-a). Cuenca río Pao. Subcuencas del río Paya y PiraPira. Recuperado de: <http://www.proyectocuencas.uc.edu.ve/Documentos/Informe%20CUENCA%20RIO%20PAO%20VERSION%20FINAL%20EMLDLC.pdf>
- FLSCN. (sf-b). Capítulo 1: Los Modelos de Manejo Integral de Cuencas. Venezuela. Recuperado de: <http://www.proyectocuencas.uc.edu.ve/Documentos/1%20Articulo%20SUBP1%20FLASA%2013022013.pdf>
- Foley, J.A., Defries, R., Asner G.P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S.R., Chapin, F.S., Coe, M.T., Daily, G.C., Gibbs, H.K., Helkowski, J.H., Holloway, T., Howard, E.A., Kucharik, C.J., Monfreda, C., Patz,

J.A., Prentice, I.C., Ramankutty, N., y Snyder, P.K. (2005). Global consequences of land use. *Science*, 309, 570–74. Recuperado de: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16040698>

- García-Duran, G. (2005). Propuesta de clasificación y manejo de cuencas hidrográficas fronterizas. I Seminario/ Talle sobre Cuencas Hidrográficas Regionales. Fundación Río Urbano, Bogotá. Recuperado de: [www.riourbno.org](http://www.riourbno.org)
- Gilabert, M. A, González-Piqueras, J. y García-Haro, J. (1997). Acerca de los índices de Vegetación. *Revista de Teledetección* (8).
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C. y Baptista Luicio, P., (2014) Mitología de la investigación. México: Mac Graw Hill.
- Huete, A. (1998). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment* 25(3), 295-239.
- Hung, M. C. (2002). Urban land cover analysis from satellite images. FIEOS Conference Proceedings. Recuperado de: <http://www.isprs.org/proceedings/XXXIV/part1/paper/00099.pdf>
- Lizana, C. (sf). Capitulo 10: Teledetección. Recuperado de: [ftp://ftp.unsj.edu.ar/agrimensura/Fotogrametria/Unidad1/DOC4\\_Clasificacion\\_de\\_imagenes.pdf](ftp://ftp.unsj.edu.ar/agrimensura/Fotogrametria/Unidad1/DOC4_Clasificacion_de_imagenes.pdf)
- Muñoz, P. (2013). Apuntes de Teledetección: Índices de Vegetación. Centro de Información de Recursos Naturales. Recuperado de: [https://www.researchgate.net/publication/327558326\\_Apuntes\\_de\\_Teledeteccion\\_Indices\\_de\\_vegetacion](https://www.researchgate.net/publication/327558326_Apuntes_de_Teledeteccion_Indices_de_vegetacion)
- Rawat, J. S., y Kumar M. (2015). Monitororing land use/cover change using semote sensing and GIS techniques: A case study of Hawalbag block, district Almora, Uttarakhand, India. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and*



*Space Science*, 18(1), 251-59. Recuperado de:  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110982315000034>

- Reis, S., Nisnci, R., Uzun, B., Yalcin, A., Inan, H. y Yomralioglu, T. (2003). Monitoring land-use changes by GIS and Remote Sensing Techniques: case study of Trabzon. 2° FIG Regional Conference. Recuperado de:  
[https://www.fig.net/resources/proceedings/fig\\_proceedings/morocco/proceedings/TS18/TS18\\_6\\_reis\\_el\\_al.pdf](https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/morocco/proceedings/TS18/TS18_6_reis_el_al.pdf)
- Ridd, M. (1995). Exploring a V-I-S (vegetation-impervious-surface-soil) model for urban ecosystem analysis through remote sensing: Comparative anatomy for cities. *International Journal of Remote Sensing*, 16, 2165-85. Recuperado de:  
<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431169508954549>
- Rouse, J., Haas, R., Schell, J. y Deering, D. (1974). "Monitoring vegetation systems in the great plains with erts", NASA Special Publication .
- SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land). (2002). Advanced Training and Users Manual, Idaho Implementation. Funded by a NASA EOSDIS/Synergy grant from the Raytheon Company through The Idaho Department of Water Resources.
- Sigmur. 2006. Universidad de Murcia. SIG y Teledetección. Murcia – España. Recuperado de: <https://www.um.es/geograf/sigmur/teledet/tema02.pdf%20>
- USGS (United States Geological Survey). (2015). Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) and Thermal Infrared Sensor (TIRS) Level-1 Data Products. Recuperado de: <https://lta.cr.usgs.gov/L8>
- Willington, E., Nolasco, M. y Bocco, M. (2013). Clasificación supervisada de suelos de uso agrícola en la zona central de Córdoba (Argentina): comparación de distintos algoritmos sobre imágenes Landsat. Congreso Argentino de Agroinformática, CAI 2013.

- Xian, G. y Crane, M. (2006). An analysis of urban thermal characteristics and associated land cover in Tampa bay and Las Vegas using satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 104, 147–156. Recuperado de: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425706001799>
- Xue, J. y Su, B. (2017). Significant Remote Sensing Vegetation Indices: A Review of Developments and Applications. *Hindawi Journal of Sensors*. Recuperado de: <https://www.hindawi.com/journals/js/2017/1353691/>
- Yuan, F., y Bauer, M. (2007). Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 106(3), 375–386. Recuperado de: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425706003191>