

**Universidad Nacional Experimental
de los Llanos Occidentales
"EZEQUIEL ZAMORA"**



LA UNIVERSIDAD QUE SIEMBRA

**VICERRECTORADO
DE INFRAESTRUCTURA Y PROCESOS
INDUSTRIALES**

COORDINACIÓN DE ÁREA DE POSTGRADO

**ESTUDIO DE LA VARIABILIDAD DEL ÍNDICE
DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA
EN LA UNIDAD FISIAGRÁFICA PLANICIE
DEL ESTADO COJEDES, VENEZUELA**

**Autor: Jorge Luis Millano Tudare
Tutor: Franklin Javier Paredes Trejo**

SAN CARLOS, MAYO DE 2017

Universidad Nacional Experimental
de los Llanos Occidentales
"EZEQUIEL ZAMORA"



La Universidad que siembra

Vicerrectorado de Infraestructura y Procesos Industriales
Coordinación de Área de Postgrado
Postgrado de Doctorado en Ambiente y Desarrollo

**ESTUDIO DE LA VARIABILIDAD DEL ÍNDICE
DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA
EN LA UNIDAD FISIAGRÁFICA PLANICIE
DEL ESTADO COJEDES, VENEZUELA**

Requisito parcial para optar al grado de

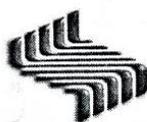
Doctor

AUTOR: Jorge Luis Millano Tudare

C.I: V-7.605.223

TUTOR: Franklin Javier Paredes Trejo

SAN CARLOS, MAYO 2017



UNIVERSIDAD NACIONAL
EXPERIMENTAL
DE LOS LLANOS OCCIDENTALES
"EZEQUIEL ZAMORA"



Coordinación Área de Postgrado

**ACTA DE PRESENTACIÓN / DEFENSA TRABAJO ESPECIAL DE GRADO,
TRABAJO DE GRADO, TESIS DOCTORAL**

Nosotros, miembros del jurado de:

Trabajo Especial de Grado	Trabajo de Grado	X	Tesis Doctoral
---------------------------	------------------	---	----------------

Titulado(a):

ESTUDIO DE LA VARIABILIDAD DEL ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA EN LA UNIDAD FISIOGRAFICA PLANICIE DEL ESTADO COJEDES, VENEZUELA.

Elaborado por el (la) participante:

Nombres y Apellidos	Cédula de Identidad
JORGE LUIS MILLANO TUDARE	C.I. V-7.605.223
TUTOR: Dr. FRANKLIN PAREDES TREJO	C.I. V-12.200.786

Como requisito parcial para optar al grado académico de: Doctor en Ambiente y Desarrollo, el cual es ofrecido en el programa de: Doctorado en Ambiente y Desarrollo, de la Coordinación de Postgrado del Vicerrectorado de Infraestructura y Procesos Industriales de la UNELLEZ – San Carlos, hacemos constar que hoy, 17 de mayo de 2017, a las 2:00 P.M., se realizó la presentación / defensa del mismo, acordando:

- APROBAR LA PRESENTACIÓN / DEFENSA DEL TRABAJO / TESIS.
- APROBAR LA PRESENTACIÓN / DEFENSA DEL TRABAJO / TESIS, OTORGANDO MENCIÓN PUBLICACIÓN.
- APROBAR LA PRESENTACIÓN / DEFENSA DEL TRABAJO / TESIS, OTORGANDO MENCIÓN HONORÍFICA.
- APROBAR LA PRESENTACIÓN / DEFENSA DEL TRABAJO / TESIS, OTORGANDO MENCIÓN PUBLICACIÓN Y HONORÍFICA.

Dando fe de ello levantamos la presente acta, la cual finalizó a las: 3:00 P.M.,

Dr. Juan Fernández Malina

C.I. 2.476.306

Jurado Principal – Coordinador (UNELLEZ)

Dra. Dulce María Pérez Díaz

C.I. 9.119.027

Jurado Principal (UNESR)

Dra. Ivís Quiroz Ruiz

C.I. 9.539.882

Jurado Principal (UNELLEZ)

Dr. José Tarcisio Pérez Veloz

C.I. 3.692.918

Jurado Principal (UNESR)

Dr. Víctor Vicente Vivas Sánchez

C.I. 3.997.256

Jurado Principal (UNELLEZ)



AGRADECIMIENTOS

A Dios, por su presencia en mi vida, vigilándome, protegiéndome, amándome y guiándome, dándome su perdón, su compasión y su auxilio divino.

A Marielsy Andreína, por suplir mis ausencias en nuestro hogar.

A Julio César Antonio⁺, mi hermano, quien en vida facilitó las herramientas tecnológicas requeridas y traducciones al idioma inglés.

A Franklin Javier, por su acompañamiento incondicional en el tránsito de la investigación científica, concretamente en la tutoría de esta tesis doctoral.

A Mariángela, por su disposición y disponibilidad en las traducciones requeridas.

A Douglas Coromoto, por su motivación hacia el altruismo académico desde mis inicios en la academia. Tu palabra ha sido oportuna en toda ocasión.

A Ernesto José y Norma, por recibirme en su casa a tiempo y a destiempo, brindándome el apoyo que necesité a nivel de computación e internet.

A Ivis Josefina y Magda, por motivarme permanentemente y ser cercanas en los momentos que más necesité de una mano amiga en esta etapa académica.

A Iraida Rafaela y su esposo Julio César, por compartir, sin interés alguno, sus conocimientos y experticia para robustecer las contribuciones académicas construidas y facilitar la información cartográfica y material bibliográfico pertinente.

A mis compañeros de trabajo: Juan José, Gerardo, Roselyn, Ana María, Norka, Pedro, Janeth, Rosita, Rosa Mildret, Pilar y Gustavo, por facilitar los equipos y materiales que necesité durante la academia y en la fase de tesis doctoral.

A todos los profesores por las orientaciones y consejos dados; en especial, al Dr. Edgar Jaimes, por su invaluable contribución en mi formación doctoral.

A mis compañeros de estudios doctorales, por los gratos momentos compartidos.

A Douglas Alcalá, por facilitar las fotografías de las coberturas analizadas.

A Enrique Coromoto, por el apoyo en los análisis estadísticos.

A Fedoski Josep, por su aporte en el arte final de la Tesis Doctoral y la elaboración de las diapositivas para la presentación y defensa de la misma.

A la UNELLEZ, por abrirme sus puertas y espacios para titularme Doctor en Ambiente y Desarrollo.

DEDICATORIA

¡A Jesucristo el Señor! A Él la alabanza, la gloria, la honra y el poder por los siglos de los siglos, amén.

A mi padre Antonio José Secundino⁺, ejemplo de responsabilidad, honestidad y dedicación. Eso sembraste en mi vida.

A mi madre Ofelia Augusta⁺, mamá por sobre todas las cosas, mujer emprendedora, maestra por excelencia y consejera espiritual. Tu legado me sostiene.

A Julio César Antonio⁺, este logro fue también tuyo. Tu amor de hermano perdurará por siempre en mí. Gracias por todo tú. Hasta el reencuentro en la patria celestial. Honraré tu nombre mientras viva.

A Marielsy Andreína, ferviente al compromiso adquirido ante el altar de Dios. Tu confianza me habla de tu fidelidad y amor incondicional. Feliz de tenerte a mi lado.

A Luis César Augusto, ángel de Dios, canal de bendiciones celestiales. Tu intercesión ante Dios ha hecho posible muchas cosas en lo personal, matrimonial y familiar.

A Luis César Andrés, amor de Dios humanizado. Con tu presencia he comprendido aún más, cuán grande y profundo es el amor de Dios Padre.

A María Andreína de la Luz y María Isabella de la Fe, regalos hermosos de Dios. Ustedes, junto a su hermano, reafirman el amor de Dios en mi vida. Llegaron para mantener la Luz y acrecentar la Fe en nuestro hogar.

A Armando Rafael, mi otro hermano, tu cercanía blindó la familiaridad millanera.

A Néstor Hugo, Fátima Albertina, María Calistra, Jorge Eliéser y José Alexander, su amistad y hermandad son verdaderas y fortalecen mi existencia.

A mi familia extendida, pilar fundamental en mi formación.

A mis amigos, tesoro heredado de Dios. Les llamo así, porque en ustedes se cumple la Palabra: “quien encuentra a un amigo, encuentra un tesoro”.

A la vida, que con su misterio, ha sido la mejor escuela para mi crecimiento personal, espiritual y profesional.

A Ud. estimado lector, investigador comprometido con la conservación y preservación del ambiente.

INDICE

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS	vii
RESUMEN	iix
SUMMARY	x
INTRODUCCIÓN	1
Capítulo I. EL PROBLEMA.....	4
1.1. Descripción ampliada de la fenología como tema de estudio.....	4
1.2. Formulación del problema a investigar	7
1.3. Importancia de la investigación	11
1.4. Objetivos de la investigación.....	12
1.4.1. Objetivo general.....	12
1.4.2. Objetivos específicos	12
Capítulo II. MARCO TEÓRICO	13
2.1. Antecedentes relevantes de la investigación.....	13
2.1.1. Contexto internacional	13
2.1.2. Contexto nacional	22
2.2. Fundamentos teóricos	22
2.2.1. La precipitación en el estado Cojedes.....	23
2.2.2. Sobre la estimación de precipitación a partir del producto 3B42RT	28
2.2.3. El Bosque Seco Tropical en el estado Cojedes	30
2.2.4. Características del sensor MODIS del satélite Terra	32
2.2.5. El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)	35
2.2.6. Aplicación del NDVI en el estudio de la dinámica de la vegetación	36
2.2.6.1. Modulación del verdor de la vegetación por el ENSO.....	38
2.2.6.2. Variabilidad estacional y temporal del verdor de la vegetación.....	39
2.2.6.3. Variabilidad de la vegetación en áreas protegidas.....	40
2.2.6.4. Monitoreo de áreas quemadas.....	42
Capítulo III. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	44
3.1. Tipo de investigación.....	44
3.2. Unidad de estudio.....	44
3.2.1. Puntos de cobertura.....	46
3.2.1.1. Descripción de la vegetación en los puntos de cobertura..	49

3.3. Materiales.....	49
3.3.1. Imágenes de NDVI derivadas de MODIS-Terra	49
3.3.2. Estimaciones de la precipitación derivadas del producto 3B42RT	50
3.4. Métodos.....	51
3.4.1. Análisis de los patrones temporales de la variabilidad de NDVI en la unidad fisiográfica planicie del estado Cojedes, Venezuela...51	
3.4.2. Análisis de los patrones espaciales de la variabilidad de NDVI en la unidad fisiográfica planicie del estado Cojedes, Venezuela . 51	
3.4.3. Relación de la dinámica temporal del NDVI con las precipitaciones en la unidad fisiográfica planicie del estado Cojedes, Venezuela. 52	
Capítulo IV. DESCRIPCIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	44
4.1. Análisis de los patrones temporales de la variabilidad de NDVI en la unidad fisiográfica planicie del estado Cojedes, Venezuela.....53	
4.2. Análisis de los patrones espaciales de la variabilidad de NDVI en la unidad fisiográfica planicie del estado Cojedes, Venezuela.....56	
4.3. Relación de la dinámica temporal del NDVI con las precipitaciones en la unidad fisiográfica planicie del estado Cojedes, Venezuela. 59	
4.3.1. Variabilidad temporal del NDVI y de la precipitación en los cinco tipos de cobertura estudiados.....59	
4.3.2. Interpretación de la relación entre el NDVI y la precipitación en los cinco tipos de cobertura estudiados..... 70	
4.4. Aportación social de la tesis doctoral	72
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	74
REFERENCIAS CONSULTADAS	75
ANEXO A.....	87

LISTA TABLAS Y FIGURAS

TABLAS

1. Efecto de escenarios de calentamiento y enfriamiento del Atlántico Subtropical sobre las lluvias en la ciudad de San Carlos. Período 1970-1983.....	25
2. Especificaciones generales del sensor MODIS.....	33
3. Formas de cobertura vegetal para la unidad fisiográfica planicie del estado Cojedes.....	47
4. Localización de los cinco tipos de cobertura analizados en la unidad fisiográfica planicie del estado Cojedes.....	47
5. NDVI promedio mensual para la UE en el período 02/2000 al 02/2016.....	54
6. Precipitación media mensual (expresada en mm/mes) en los cinco puntos de cobertura estudiados en el período 02/2000-02/2016.....	60
7. NDVI promedio mensual en los cinco puntos de cobertura estudiados en el período 02/2000-02/2016.....	61
8. Coeficiente de correlación de Pearson entre la precipitación total mensual y los valores promedios mensuales del NDVI en los cinco tipos de cobertura analizados en la UE para el lapso 02/2000-02/2016.....	70

FIGURAS

1. Zonas pluviométricas e isoyetas del estado Cojedes.....	24
2. Unidades fisiográficas del estado Cojedes.....	26
3. Pluviograma medio mensual del estado Cojedes.....	27
4. Diagrama de flujo simplificado para la obtención del producto 3B42RT.....	30
5. Sistema de escaneo del sensor MODIS.....	34
6. Ejemplo visual de la reflectividad en el infrarrojo cercano y en el rojo del espectro magnético, para una vegetación sana y otra poco saludable o enferma...37	
7. Unidad fisiográfica planicie del estado Cojedes y su ubicación relativa con respecto al territorio nacional.....	45
8. Ubicación de los cinco puntos de cobertura analizados dentro de la UE.....	48

9. Promedio mensual del NDVI máximo en la unidad de estudio para el período 02/2000 al 02/2016.....	57
10. Variación temporal mensual de la precipitación (panel superior) y el NDVI (panel inferior) para la cobertura Bosque Ralo con Chaparro durante el periodo 02/2000-02/2016.....	62
11. Variación temporal mensual de la precipitación (panel superior) y el NDVI (panel inferior) para la cobertura Bosque de Galería durante el periodo 02/2000-02/2016.....	64
12. Variación temporal mensual de la precipitación (panel superior) y el NDVI (panel inferior) para la cobertura Bosque Medio durante el periodo 02/2000-02/2016.....	65
13. Variación temporal mensual de la precipitación (panel superior) y el NDVI (panel inferior) para la cobertura Sabana Inundable durante el periodo 02/2000-02/2016.....	67
14. Variación temporal mensual de la precipitación (panel superior) y el NDVI (panel inferior) para la cobertura Matorral durante el periodo 02/2000-02/2016.....	68

UNIVERSIDAD NACIONAL EXPERIMENTAL
DE LOS LLANOS OCCIDENTALES “EZEQUIEL ZAMORA”
VICERRECTORADO DE INFRAESTRUCTURA Y PROCESOS INDUSTRIALES
COORDINACIÓN DE ÁREA DE POSTGRADO
PROGRAMA DE ESTUDIO “DOCTORADO EN AMBIENTE Y DESARROLLO”

**ESTUDIO DE LA VARIABILIDAD DEL ÍNDICE
DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA
EN LA UNIDAD FISIAGRÁFICA PLANICIE
DEL ESTADO COJEDES, VENEZUELA**

AUTOR: Jorge Luis Millano Tudare
TUTOR: Franklin Javier Paredes Trejo
AÑO: 2017

RESUMEN

La valoración de la dinámica vegetal a partir de mediciones basadas en satélites, a través de indicadores o índices para tal fin, es un tema que cada día cobra más interés en el campo científico. El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) es el indicador más utilizado para evaluar la vegetación a través del tiempo y en extensas regiones. Esta investigación tuvo como finalidad evaluar la utilidad del NDVI como un indicador biofísico en la unidad fisiográfica planicie del estado Cojedes, Venezuela, por desarrollarse allí más del 50% de las actividades agrícolas de la entidad regional. Esta unidad fisiográfica está cubierta por la zona de vida Bosque Seco Tropical. Se usaron series mensuales de NDVI derivadas del programa Terra-MODIS y estimaciones mensuales de precipitación basadas en el producto 3B42RTv7 difundido por la NASA, para 16 años (02/2000-02/2016). Con el apoyo estadístico, se describió la variabilidad temporal y espacial del NDVI y se relacionó la dinámica temporal del NDVI con las precipitaciones. Los resultados mostraron un patrón de variación fenológico asociado con los cambios estacionales de precipitación, donde los valores más altos de NDVI corresponden al período lluvioso y los valores más bajos de NDVI corresponden al período seco, y que el verdor de la vegetación responde mejor a la presencia/ausencia de lluvias en el período seco que en el lluvioso. Se demostró la utilidad del NDVI para monitorear la salud vegetal del Bosque Seco Tropical localizado en la unidad fisiográfica planicie del estado Cojedes.

Palabras clave: Bosque Seco Tropical, NDVI, fenología, verdor de vegetación, precipitación.

UNIVERSIDAD NACIONAL EXPERIMENTAL
DE LOS LLANOS OCCIDENTALES “EZEQUIEL ZAMORA”
VICERRECTORADO DE INFRAESTRUCTURA Y PROCESOS INDUSTRIALES
COORDINACIÓN DE ÁREA DE POSTGRADO
PROGRAMA DE ESTUDIO “DOCTORADO EN AMBIENTE Y DESARROLLO”

**STUDY OF THE VARIABILITY OF THE NORMALIZED
DIFFERENCE VEGETATION INDEX IN THE PLAIN
PHYSIOGRAFIC UNITY OF THE COJEDES
STATE, VENEZUELA**

AUTOR: Jorge Luis Millano Tudare
TUTOR: Franklin Javier Paredes Trejo
AÑO: 2017

SUMMARY

The assessment of plant dynamics starting from measurements based on satellites, through indicators or indexes for this purpose, it's an issue that is becoming more and more interesting in the scientific field. The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) is the most used indicator to evaluate vegetation over time and in extensive regions. The purpose of this work was to evaluate the usefulness of NDVI as a biophysical indicator in the physiographic unit of Cojedes State, Venezuela, which contain more than 50% of the agricultural activities of the regional entity. This physiographic unit is covered by the Tropical Dry Forest living area. Monthly NDVI series derived from the Terra-MODIS program and monthly precipitation estimates based on the 3B42RTv7 product released by NASA for 16 years (02 / 2000-02 / 2016) were used. With the statistical support, the temporal and spatial variability of the NDVI was described and the temporal dynamics of the NDVI was related to precipitations. The results showed a pattern of phenological variation associated with seasonal precipitation changes, where the highest values of NDVI correspond to the rainy season and the lowest values of NDVI correspond to the dry period, furthermore, the greenery of the vegetation responds better to the presence / absence of rainfall in the dry period than in the rainy season. The usefulness of the NDVI to monitor the vegetation health of the Tropical Dry Forest located in the plain physiographic unit of Cojedes State was demonstrated.

Keywords: Tropical Dry Forest, NDVI, phenology, greenery of vegetation, precipitation.

INTRODUCCIÓN

La vegetación es uno de los componentes más relevantes del ciclo hidrológico y un factor clave que determina la diversidad biológica dentro de una región geográfica determinada. Este componente depende en gran medida del aporte de humedad proveniente de la precipitación; por tanto, las lluvias excedentarias o las lluvias deficitarias durante el año pueden causar variaciones importantes en su actividad fotosintética, lo cual se ve reflejado en la intensidad del verdor de la vegetación (Kogan, 2000; De La Casa y Ovando, 2006). Y es, además, una variable que puede ser monitoreada desde el espacio a través de satélites provistos con sensores adecuados para tal fin.

El Índice de Diferencia de Vegetación Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés Normalized Difference Vegetation Index), es el indicador más usado en el monitoreo y la valoración del componente vegetal a lo largo del tiempo sobre amplias superficies de terreno (Alcaraz-Segura, Baldi, Durante y Garbulsky, 2008; Millano y Paredes, 2016a). El NDVI permite inferir el nivel de desarrollo o crecimiento de la vegetación en diferentes regiones al tiempo de proveer información valiosa sobre el efecto de la dinámica del funcionamiento y los patrones debidos a factores físicos, bióticos y perturbaciones antrópicas (Paruelo y Lauenroth, 1998; Gurgel, Ferreira y Luiz, 2003; Paruelo, 2008).

Por ello, la evaluación de la dinámica de la vegetación, a partir de datos derivados de satélites en regiones tropicales semiáridas, se ha hecho cada vez más importante para modelar el clima y monitorear las variaciones de la vegetación inducidas por El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) a escala interanual (Cramer y Fischer, 1996). La mayoría de las investigaciones en la que se han estudiado las variaciones estacionales y espaciales en la actividad vegetal como una función de las precipitaciones, se ha producido principalmente en África (Malo y Nicholson, 1990) y centra su atención en la modulación del NDVI por parte del ENSO (Azzali y Menenti, 2000). En consecuencia, comprender la interacción entre la vegetación y el clima, en particular su asociación con el cambio climático global y la desertificación, ha sido un tema de gran interés científico (Hall, Botkin, Strebel, Woods y Goetz, 1991). Dichos

fenómenos alteran la dinámica y funcionamiento de los ecosistemas (Iglesias, Barchuk y Grilli, 2010). Por otra parte, la relación entre la precipitación y el NDVI ha sido ampliamente investigada en diferentes ecosistemas áridos y semiáridos (Paruelo y Lauenroth 1998; Jobbágy, Sala y Paruelo, 2002; De La Casa y Ovando, 2006) y especialmente en áreas resguardadas o protegidas (Alcaraz-Segura, Baldi, Durante y Garbulsky, 2008); pero no se ha estudiado con suficiente detalle en la zona de vida Bosque Seco Tropical.

Hasta el presente, en Venezuela solo se han publicado dos trabajos relevantes en los que se han usado imágenes multitemporales de NDVI, para estudiar los patrones fenológicos de la vegetación. En principio, Chacón-Moreno (2004) investigó, a través del análisis de series de tiempo de imágenes NOAA, los patrones fenológicos de los principales ecosistemas de Los Llanos del Orinoco encontrando que las diferencias fenológicas entre los ecosistemas de sabana que conforman dicha región, están fuertemente relacionadas con las variables climáticas especialmente a las lluvias estacionales. Y recientemente, Millano y Paredes (2017) estudiaron la fenología de cinco tipos de cobertura en el Bosque Seco Tropical localizado en la parte centro-sur del estado Cojedes, analizando series de tiempo de imágenes Terra-MODIS, y hallaron que las fluctuaciones de los patrones fenológicos en las coberturas estudiadas, están asociadas a la estacionalidad de los periodos lluvioso y seco.

Toda la parte centro-sur del estado Cojedes es abarcada por la zona de vida Bosque Seco Tropical, la cual se caracteriza por presentar amplias planicies con una precipitación media anual de 1000 a 1800 mm y una temperatura media anual entre 22 y 29 °C. Esta zona ha sido delimitada como Unidad Fisiográfica Planicie en atención a su paisaje geomorfológico propio (Ministerio del Poder Popular para el Ambiente [MPPA], 2011). Dicha unidad fisiográfica se ha visto impactada por eventos pluviométricos extremos, como sequías y lluvias intensas y persistentes, causados en gran medida por el fenómeno océano-atmosférico ENSO (Millano, Paredes y Vivas, 2007; Paredes, Millano y Guevara, 2008; Trejo, Barbosa, Ruiz y Peñaloza-Murillo, 2016).

Bajo estas premisas, surgió la inquietud de evaluar la utilidad del NDVI como un indicador biofísico en la unidad fisiográfica planicie del estado Cojedes. La valoración de la dinámica vegetal a partir de mediciones basadas en satélites, específicamente NDVI, puede conducir a una mejor comprensión de la variabilidad espacial y temporal del componente vegetal en la zona de vida Bosque Seco Tropical localizado en la unidad fisiográfica planicie del estado Cojedes.

Esta Tesis Doctoral se organizó del siguiente modo: el Capítulo 1 esboza el Planteamiento del Problema, la Justificación y los Objetivos del Estudio; el Capítulo 2 lista los Antecedentes de la Investigación y los Fundamentos Teóricos; el Capítulo 3 describe los Aspectos Metodológicos; en el Capítulo 4 se presenta la Discusión y Análisis de los Resultados; y, por último, se muestran las Conclusiones de la investigación doctoral.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1. DESCRIPCIÓN AMPLIADA DE LA FENOLOGÍA COMO TEMA DE ESTUDIO

El estudio de la armonía biológica cíclica afronta grandes retos por causa de la complejidad de la dinámica propia de los ecosistemas tropicales. En especial, la investigación de patrones universales que den explicación a este proceso se dificulta por la diversidad de géneros y/o especies que poseen diferentes comportamientos biológicos. De ahí, la gran tarea de la fenología como ciencia que observa, contempla y/o ve el desarrollo de los organismos en su ciclo vital, analizando las vinculaciones existentes entre dicha evolución biológica y la variabilidad de las condiciones ambientales, tanto climáticas como edáficas y bióticas (Williams-Linera y Meave, 2002; Morante y Bello, 2012). Por lo tanto, los estudios fenológicos ayudan a la comprensión de la dinámica de los ecosistemas tropicales y a los procesos evolutivos que ocurren en ellos (Rathcke y Lacey, 1985; Van Schaik, Terborgh y Wright, 1993).

En dichos ecosistemas, el verdor de la vegetación es modificado por la aportación de humedad que proviene de la precipitación, tal como se precisó en la introducción de este documento; por ende, el exceso o déficit de lluvias, a lo largo de algún lapso de tiempo, puede ocasionar variaciones significativas en su actividad fotosintética. De allí que la precipitación es el elemento del clima que más incidencia tiene sobre la vida en la tierra. Dada su importancia, la existencia de tendencias a largo plazo determinará el funcionamiento de los ecosistemas tropicales, ya que producto de estas tendencias, aparecen cambios tanto en los totales de lluvia como en su distribución anual (Millano, Paredes y Vivas, 2007).

Lo anterior permite afirmar que la precipitación es naturalmente variable. Así, la sequía meteorológica se refleja por un déficit de precipitación en relación a la media de los registros pluviométricos de largo plazo. La persistencia de esta condición conduce a escasez de agua, tanto para los procesos naturales como para las actividades humanas, afectando el crecimiento de la vegetación y el rendimiento de

los cultivos bajo secano respectivamente. En efecto, una sequía prolongada o la ocurrencia de lluvias excedentarias en un determinado lugar, pueden incidir en la dinámica del intercambio de materia y energía de los ecosistemas y por ende, en la capacidad fotosintética de la vegetación que cubre dichas regiones geográficas, lo cual se manifiesta por cambios apreciables en la intensidad del verdor de la vegetación (De La Casa y Ovando, 2006, citado por Alvarez y Basanta, 2015).

Por consiguiente, la vegetación interactúa con el clima y guarda relación con el cambio climático y la desertificación. Por ello, es un indicador clave de la diversidad biológica dentro de una región geográfica (D'Odorico, Bhattachan, Davis, Ravi y Runyan, 2013). Hoy en día se sabe que estos fenómenos pueden afectar los patrones espaciales y temporales de la fenología vegetal, así como el flujo de energía, reciclaje de nutrientes y las interacciones entre las especies y su sucesión (Reyer, Leuzinger, Rammig, Wolf, Bartholomeus, Bonfante y Klein, 2013). Así pues, la dinámica de la vegetación requiere ser entendida en más detalle, especialmente en Latinoamérica por los ecosistemas que le caracterizan, para garantizar el manejo sustentable del elemento natural suelo, con énfasis especial en la conservación del patrimonio forestal, en la gestión integral de los recursos hídricos y en el aprovechamiento, manejo y conservación de todos los componentes de la diversidad biológica.

En la década del 70 aparece la tecnología satelital, comenzando así el monitoreo de la vegetación por medio de satélites a través de indicadores que fueron desarrollados precisamente, y valga la redundancia, para explorar la vegetación desde el espacio. Obviamente que con el pasar de los años, tanto los satélites como los indicadores fueron mejorados, los primeros en resolución espacial y temporal; y, los segundos, en precisión y adecuada interpretación. De estos indicadores, uno es el NDVI.

Las series temporales de NDVI con alta resolución temporal permiten monitorear diferentes variables biológicas relacionadas con la dinámica de la interceptación de radiación por parte de la vegetación terrestre; por tanto, el análisis del NDVI proporciona información relevante sobre la variabilidad anual y estacional del verdor vegetal, la fenología del ecosistema y la estabilidad (Fensholt y Proud, 2012).

También ha sido correlacionado con los parámetros biofísicos de vegetación incluyendo índice de área foliar, biomasa de hojas verdes, y la actividad fotosintética de la hoja (Curran, 1980). Sobre la base de lo descrito, se puede afirmar que la fenología es una disciplina de gran trascendencia en el entendimiento del comportamiento de la vegetación en amplias regiones geográficas.

La fenología, apoyada de series temporales del NDVI, puede ayudar al monitoreo del ciclo anual de lluvias con fines agropecuarios. De esta manera, el análisis de la dinámica vegetal puede mejorar, considerablemente, la comprensión sobre la variabilidad espacio-tiempo, y su análisis conjunto con variables climáticas (Duro, Coops, Wulder y Han, 2007) en los ecosistemas semiáridos tropicales y puede contribuir al manejo sustentable de los elementos ambientales presentes en ellos (e.g., suelo y agua). Esto último, conduce a mejoras significativas en el orden socioeconómico de las comunidades insertas en dichos ecosistemas (Alcaraz-Segura, Baldi, Durante y Garbulsky, 2008).

Estudios fenológicos se han realizado en diversas áreas geográficas que pueden sustentar lo descrito en el párrafo anterior, entre ellos: 1) Barbosa, Huetea y Baethgen (2006) y Schucknecht, Erasmi, Niemeyer y Matschullat (2013), determinaron que la variabilidad de la vegetación en los ecosistemas naturales en el nordeste de Brasil depende de los periodos de sequía, la profundidad del suelo y las actividades humanas; 2) Carrao, Sepulcre, Horion y Barbosa (2013) y Pereira, Justino, Malhado, Barbosa y Marengo (2014), encontraron que el ciclo agrícola, en las tierras de cultivo de secano en América Latina, se relaciona más con eventos de sequía a corto plazo que con sequías a largo plazo; y que además, el NDVI puede brindar información primaria para predecir los impactos de un déficit de precipitación en la variabilidad estacional del verdor de la vegetación; 3) Chacón-Moreno (2004), citado por Armenteras, González, Luque, López y Rodríguez (2016), evidenció que los patrones fenológicos en los ecosistemas de sabana en la región de los Llanos del Orinoco, Venezuela, están muy relacionados con las condiciones climatológicas ambientales, especialmente a las lluvias estacionales: las grandes fluctuaciones y el crecimiento de la vegetación en estos ecosistemas se asocian con el período de lluvias, mientras que

la disminución de los valores de NDVI está asociada con el período seco; y, 4) Iglesias, Barchuk y Grilli (2010), citados por Britos y Barchuk (2013), demostraron que en las zonas áridas argentinas, la dinámica del NDVI difiere en distintos sitios de acuerdo a la disponibilidad de agua; además, probaron el comportamiento estacional de la vegetación ante las variaciones del NDVI deduciendo una correlación entre la precipitación y este índice .

Con lo anteriormente esbozado, se puede inferir que los fenómenos climáticos (e.g., la sequía y la variabilidad del clima) y las actividades antropogénicas (e.g., la demanda del agua y el cambio de uso del suelo) son elementos que influyen en la fenología de la vegetación en los ecosistemas naturales, especialmente en algunos países latinoamericanos, alterando el crecimiento de la vegetación y la dinámica y el funcionamiento de los mismos. Todo esto refuerza que el análisis de la fenología en grandes áreas geográficas, a través de series temporales del NDVI, constituye un método adecuado para el conocimiento y manejo sustentable de ecosistemas tropicales en pro de la conservación de la diversidad biológica presente en ellos (Manson, Loneragan y Phinn, 2003; Berlanga-Robles y Ruiz-Luna, 2014).

A diferencia de otros países de América, la fenología, como disciplina para entender la dinámica de la vegetación en ecosistemas, es un área de investigación incipiente en Venezuela (Millano y Paredes, 2016a). En el fondo, la presente investigación doctoral conlleva en sí misma, la finalidad de profundizar en el conocimiento de la fenología del componente vegetal del Bosque Seco Tropical localizado en la unidad fisiográfica planicie del estado Cojedes.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA A INVESTIGAR

Las imágenes satelitales son alternativas y/o complementos buenos a la fotografía aérea y, junto a la información digital contenida en bancos de datos, brinda hoy día una puntual evaluación de las condiciones climatológicas y ambientales (Calas, 1999). Por ello, diversos países las utilizan para el monitoreo de áreas de desastre tanto naturales como los causados por la intervención directa o indirecta del ser humano (sequías, inundaciones, incendios, huracanes, etc.), así como también para el

monitoreo de la dinámica de la vegetación inducida por el ENSO y la evaluación de la variabilidad estacional y temporal del verdor de la vegetación debido a la relación causa-efecto entre la frecuencia y la duración de las sequías meteorológicas.

La vegetación, como indicador fundamental del estado de un ecosistema, desempeña un papel primordial en los ciclos del agua y del carbono, además de la información que suministra para la comprensión del cambio climático (Sobrino y Julien, 2011). Por otro lado, “la actividad fotosintética es una medida de la transformación de la energía radiante en energía química, y cualquier cambio observable en ella puede indicar alteraciones en el ambiente” (Baldi *et al.*, 2008, citados por Vázquez, Adema y Fernández, 2013, p. 77). No obstante, la valoración de dichos cambios, a escala de región o continental, es un trabajo arduo debido a la escasez de registros multitemporales y su reducida cobertura espacial.

En los últimos cuarenta años, la teledetección ha facilitado la investigación sobre la dinámica y distribución espacial de la vegetación a través de indicadores o índices para tal fin y como se ha expresado con anterioridad, el NDVI es uno de ellos. Este índice relaciona la información espectral de la región del rojo y el infrarrojo cercano del espectro electromagnético (Rouse, Haas, Schell y Deering, 1974; Chuvieco, 1996). Con el NDVI se puede observar el nivel de desarrollo o crecimiento de la vegetación en diferentes regiones pues es un índice espectral estimador de la fracción de la radiación fotosintéticamente activa interceptada por la vegetación y la productividad primaria (Paruelo, Epstein, Lauenrothy y Burke, 1997; Jobbágy, Sala y Paruelo, 2002). Posee una ventaja fundamental: sencillo de analizar o explicar; dicho de otra manera, fácil de interpretar, ya que sus valores varían entre -1 y $+1$, permitiendo inferir el estado de vitalidad vegetal de grandes áreas, al tiempo de revelar fenómenos de extenso rango de variación (Quevedo, Peixoto Filho, Oliveira y Paranho Filho, 2007). En zonas que presentan una estacionalidad bien definida en las precipitaciones, la dinámica del NDVI se representa como ondas que acompañan de manera estrecha la variación interanual del desarrollo o crecimiento de la vegetación (Hill y Donald, 2003).

La fenología de la cubierta vegetal también está relacionada con el NDVI, por lo cual se la puede analizar a través de una serie de tiempo obtenida por sensores remotos y estimar parámetros biométricos que caracterizan a las diferentes etapas de un ciclo fenológico (Reed *et al.*, 1994; Goetz 1997; Tieszen *et al.*, 1997; Boles 2004; Jönsson y Ecklund 2004; Mattar *et al.*, 2008 citados por Vázquez, Adema y Fernández, 2013).

De los sensores ópticos usados para el cálculo del NDVI (el americano NOAA-AVHRR o LANDSAT-TM, el ruso RESURS MSU-E, el francés SPOT HVR, el indio IRS-1C LISS-3, entre otros), el Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR), montado sobre la serie de satélites de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), es el sensor que provee mayor longitud de registros de NDVI desde 1978 pero con una resolución espacial de 8 km y un tiempo de revisita de 15 días (Los, Justice y Tucker, 1994; Baldi, Noretto, Aragón, Aversa y Paruelo, 2008; Al-Qinna, Hammouri, Obediat y Ahmad, 2011; Sobrino y Julien, 2011). Muchos son los trabajos que han utilizado las series de tiempo AVHRR-NDVI para estudiar la dinámica de la vegetación en climas tropicales semiáridos (Nicholson, Davenport y Malo, 1990; Fensholt, Rasmussen, Nielsen y Mbow, 2009), pero en pocos se han evaluado los patrones temporales y espaciales en gran detalle (Tucker, Newcomb y Dregne, 1994). La limitación de baja resolución se ha solucionado con la puesta en operación del satélite Terra por parte de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA, por sus siglas en inglés) del cual se deriva el producto estándar Terra - Moderate Resolution Imaging Spectroradiometry (Terra-MODIS) MOD09Q1. Este producto cuenta con valores de NDVI a una resolución espacial de 250 m con un intervalo temporal de 8 días a lo largo del año.

A propósito de los avances en tecnología satelital para percepción remota de la vegetación, cabe destacar que Venezuela envió al espacio el Satélite Miranda (satélite de observación remota, basado en sensores ópticos) en septiembre de 2012, desde la República Popular China, destinado a tomar fotografías digitales en alta resolución espacial sobre el territorio venezolano, con el objetivo, entre otros, de fomentar la

investigación con miras a optimizar el uso de los elementos naturales del ambiente y contribuir a la gestión y toma de decisiones relacionadas con la conservación, defensa, protección y mejora ambiental. Así, en los sistemas productivos, la información derivada del satélite permitirá implantar metodologías y programas para el seguimiento de los cultivos, en aspectos como vigorosidad, humedad y estado fenológico de la vegetación (Ministerio del Poder Popular para la Ciencia, Tecnología e Innovación [MPPCTI], 2012).

Como se señaló en la introducción, la relación entre la precipitación y el NDVI se ha investigado ampliamente en regiones áridas y semiáridas pero no en la zona de vida Bosque Seco Tropical. En el caso particular de Venezuela, esto se debe en gran medida a la inexistencia de series climatológicas de gran longitud y confiables. Solamente los registros de precipitación son abundantes y de gran amplitud temporal; sin embargo, la mayoría proveen información hasta finales de la década del 90; por ende, el estado Cojedes no escapa de esta realidad. En este contexto, se debe aprovechar la existencia del Satélite Venezolano Miranda y la de otros a nivel mundial, para hacer uso de la técnica de geoprocесamientos de imágenes satelitales a fin de conseguir información valiosa para la gestión ambiental de un lugar específico; y en el caso específico de la investigación doctoral que se presenta, para evaluar la utilidad del NDVI como un indicador biofísico en las planicies de la zona de vida Bosque Seco Tropical en el centro-sur del estado Cojedes, a partir de series temporales de imágenes satelitales derivadas del programa Terra-MODIS que provee información continua desde el año 2000, característica ésta y las de fácil acceso y excelente calidad de sus imágenes sin costo alguno, que lo posicionan como una mejor opción ante la información emanada del satélite Miranda en los actuales momentos.

Cabe preguntarse entonces, ¿la dinámica del NDVI, es decir, su variabilidad espacial y temporal, observada a través de series temporales de imágenes satelitales con alta resolución temporal, es suficientemente confiable como para estudiar la variabilidad espacial y temporal del funcionamiento de la vegetación y relacionarla,

además, con el patrón de lluvias en la zona de vida Bosque Seco Tropical ubicada en la unidad fisiográfica planicie del estado Cojedes de Venezuela?

1.3. IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN

La Constitución de la República Bolivariana de Venezuela ([CRBV], 1999), expresa en el Art. 127 que “Es un deber y un derecho de cada generación proteger y mantener el ambiente, para beneficio de ella misma y de las futuras generaciones.” Además, indica que es deber del Estado proteger el ambiente, los procesos ecológicos y áreas de particular importancia ecológica, señalando la necesidad de especial protección del agua, los suelos y el clima.

El gobierno nacional de la República Bolivariana de Venezuela se ha trazado el objetivo de “Fomentar la investigación y el desarrollo de capacidades, con miras a optimizar el uso de las imágenes para el estudio, seguimiento y planificación del territorio; así como el apoyo a los planes nacionales en materia de prevención de desastres” (MPPCTI, 2012), a propósito de la existencia del Satélite Miranda.

Una de las líneas de investigación del Doctorado Ambiente y Desarrollo de la Universidad Nacional Experimental de los Llanos Occidentales Ezequiel Zamora es la de Riesgos Naturales, donde esta investigación doctoral se enmarca plenamente (Universidad Nacional Experimental de los Llanos Occidentales Ezequiel Zamora [UNELLEZ], 2012).

En tal sentido, este estudio contribuye a materializar las aspiraciones claramente definidas con anterioridad y en conformidad de esos enunciados, puede afirmarse que tiene una alta pertinencia de carácter social.

La identificación de las variaciones espaciales y temporales en la dinámica de la vegetación en la unidad fisiográfica planicie del estado Cojedes, Venezuela, a través de series temporales de NDVI derivadas de imágenes satelitales, es de gran utilidad en la gestión ambiental para la adaptación ante la ocurrencia de fenómenos climáticos extremos (principalmente sequías), en la planificación del sector agrícola por las repercusiones económicas y sociales que dichas anomalías climáticas pudieran

ocasionar y un potente referencial para otras regiones del territorio venezolano y de otras latitudes.

1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1. Objetivo general

Evaluar la utilidad del NDVI como un indicador biofísico en la unidad fisiográfica planicie del estado Cojedes, Venezuela.

1.4.2. Objetivos específicos

Analizar los patrones temporales de la variabilidad de NDVI en la unidad fisiográfica planicie del estado Cojedes, Venezuela.

Analizar los patrones espaciales de la variabilidad de NDVI en la unidad fisiográfica planicie del estado Cojedes, Venezuela.

Relacionar la dinámica temporal del NDVI con las precipitaciones en la unidad fisiográfica planicie del estado Cojedes, Venezuela.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES RELEVANTES DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.1. Contexto internacional

El cambio climático global y la desertificación son fenómenos climáticos que cambian los patrones espaciales y temporales de la vegetación y la dinámica y funcionamiento de los ecosistemas. Por ello, en los últimos años ha aumentado la atención mundial por saber y/o comprender la interacción entre la vegetación y el clima (Hall, Botkin, Strebel, Woods y Goetz, 1991). Para analizar o estudiar esa variabilidad espacial y temporal del funcionamiento de la vegetación, se ha comprobado la idoneidad de las series temporales de imágenes satélites (Paruelo *et al.*, 1998 citados por Millano y Paredes, 2016b) y sus relaciones con variables climáticas (Chacón, 1999; Ballester, 2000; Duro *et al.*, 2007 citados por Millano y Paredes, 2016b) en regiones áridas que se caracterizan por presentar procesos ecosistémicos de lenta dinámica y alta variabilidad espacio-temporal (Iglesias, Barchuk y Grilli, 2010).

Las imágenes más usadas para tal fin han sido las de los sensores AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), SPOT-Vegetation (Sistema Probatorio de Observación de la Tierra), MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) y Landsat TM/ETM+ (Thematic Mapper / Enhanced Thematic Mapper plus), empleando los índices de vegetación como: el NDVI, clasificación supervisada, y componentes principales (Martín y Chuvieco, 1995; Cahoon *et al.*, 1999; Siljestrom y Moreno, 1995; Chuvieco *et al.*, 2005 citados por Manzo y López, 2013). De ellos tres, el uso del NDVI en el estudio de la dinámica de la vegetación, ha cobrado vigor para modelar el clima y monitorear la respuesta de la vegetación ante el cambio climático global (Millano y Paredes, 2016b). Del mismo modo, la relación entre la precipitación y el NDVI ha sido ampliamente investigada en distintos ecosistemas áridos y semiáridos (Paruelo y Lauenroth, 1998; Jobbágy *et al.*,

2002; Schmidt y Karnieli, 2002; Al-Bakri y Taylor, 2002; Rojas *et al.*, 2003; McR. Holm *et al.*, 2003; Scalón *et al.*, 2005; De La Casa y Ovando, 2006, todos citados por Millano y Paredes, 2016b) y particularmente en áreas protegidas (Alcaraz-Segura, Baldi, Durantem y Garbulsky, 2008).

En las décadas de los 70, 80 y 90, diversos autores estudiaron la relación entre la vegetación y el clima, e hicieron uso primordialmente de las imágenes AVHRR NDVI, entre los que se destacan: Rouse, Haas, Schell, Deerino y Harlan (1974); Monteith (1981); Turcker, Townshend y Goff (1985); Eastman, McKendry y Fulk (1995); Paruelo, Epstein, Laurenroth y Burke (1997); Yuan, Elvidge y Lunnetta (1998); Berlanga (1999); entre otros, citados por Gilabert, González-Piqueras y García-Haro (1997); Alcaraz-Segura, Baldi, Durante y Garbulsky (2008); y, Berlanga-Robles y Ruiz-Luna (2014); pero este análisis agrupará una serie de referentes a nivel internacional que resumen, en gran medida, tanto las premisas plasmadas en los párrafos anteriores como el estado del arte de la utilización del NDVI como indicador biofísico para estudiar y/o evaluar la dinámica y funcionamiento de ecosistemas existentes en el mundo a partir de 2000, año en que la NASA comenzó a distribuir las imágenes del sensor MODIS del satélite TERRA.

De La Casa y Ovando (2006), analizaron la relación entre la precipitación y ciertos indicadores agroclimáticos vinculados a la oferta de agua y a las condiciones térmicas con el NDVI durante la etapa inicial del ciclo de lluvias en Córdoba, Argentina, usando NDVI derivado del sensor AVHRR. Concluyeron que: a) La relación entre los valores acumulados de los indicadores agroclimáticos (precipitación, evapotranspiración e índice de crecimiento) y el NDVI durante la etapa inicial del ciclo de lluvias mostró un comportamiento no lineal en toda la región y período analizado; b) La evapotranspiración real estimada a partir de un procedimiento de balance hidrológico fue la variable independiente con mayor capacidad para explicar la variabilidad interanual del NDVI; y c) La utilización del NDVI a fin de expresar el comienzo del ciclo de lluvias en Córdoba, se consideró factible.

Por otra parte, Barbosa, Huete y Baethgen (2006) desarrollaron un trabajo donde se analizó la heterogeneidad espacial y la dinámica temporal de la región noreste de

Brasil (NEB), usando una serie de observaciones de 20 años de NDVI derivadas del NOAA AVHRR. Ellos hallaron: a) Fuertes oscilaciones estacionales en la temporada de crecimiento de la vegetación sobre el área de estudio de la NEB, con el NDVI máximo y las variaciones estacionales; b) Una tendencia al alza constante en el verdor de la vegetación durante el período 1984-1990, la cual fue fuertemente revertida en el período posterior 1991-1998; y, c) Los patrones de variabilidad de vegetación en la NEB fueron el resultado del impacto de la aridez ocurrida durante la última década del siglo 20. Como se puede observar, estos autores y los anteriores, no trabajaron con MODIS; sin embargo, hay una relación directa de estas investigaciones con el estudio que aquí se presenta, pues centraron su atención en el uso del NDVI.

Ahora bien, Alcaraz-Segura, Baldi, Durante y Garbulsky (2008) realizaron una investigación donde mostraron tres aproximaciones para evaluar cambios en el promedio anual, la estacionalidad, y la inestabilidad de la dinámica temporal (cambios abruptos) de la capacidad fotosintética de la vegetación en tres zonas de estudio: las áreas protegidas de Sudamérica, los parques nacionales españoles y dos parques naturales andaluces. Para cada análisis emplearon sendas bases de datos del NDVI. Encontraron que: a) Las áreas protegidas de Sudamérica y los parques nacionales de España mostraron tendencias significativas en la dinámica del NDVI, el cual varió en magnitud y sentido en función de su situación geopolítica y biogeográfica; y, b) Las series temporales de las imágenes de satélite constituyen una excelente herramienta para analizar los cambios en diferentes aspectos del funcionamiento de la vegetación y, por ende, para el conocimiento y la gestión de áreas protegidas.

Hüttich, Gessner, Herold, Strohbach, Schmidt, Keil y Dech (2009), realizaron un trabajo práctico sobre el uso del MODIS y Landsat para discernir entre los diferentes tipos de vegetación en el Kalahari del noreste de Namibia, África. El uso de series temporales interanuales a largo plazo proporcionó las mejores precisiones de clasificación de los tipos de vegetación, lo que significa que las observaciones fenológicas a largo plazo, incluyendo la variabilidad interestacional de la

precipitación, son útiles para una caracterización en profundidad de la vegetación semiárida.

Una contribución científica muy interesante fue la desarrollada por Van Leeuwen, Davison, Casady y Marsh (2010), quienes analizaron la relación entre el NDVI, precipitación y temperatura en dos ecosistemas específicos: desierto de Sonora (ubicado entre EEUU y México) e islas de cielo abierto boscosas (regiones montañosas con características muy particulares y diferentes de las áreas circundantes, que se les puede catalogar como ecosistemas cerrados). Estos autores notaron que, para el primer ecosistema, los diferentes tipos de vegetación tienen patrones espaciales y trayectorias fenológicas únicas e interanuales; y para el segundo, que los cambios estacionales de la vegetación bajo sus condiciones climáticas, derivados del MODIS, son apropiados para evaluar y monitorear la dinámica de dicha vegetación.

González, Menenti y Roig (2010), describieron la dinámica temporal de la vegetación de Mendoza, Argentina, mediante análisis de la fenología foliar regional con una serie de 108 imágenes mensuales de índice de vegetación NOAA-AVHRR NDVI, vinculando los ecosistemas con la vegetación. Llegaron a las siguientes consideraciones: a) El patrón fenológico describió el funcionamiento de la vegetación y su variabilidad geográfica; b) La vegetación respondió a un ciclo anual con matices de ligera bimodalidad; c) Los patrones con bajo contraste invierno-verano se presentaron en condiciones climáticas xéricas: el máximo vegetativo fue finalizando el verano; y, d) La disponibilidad hídrica aumentó dicho contraste disminuyendo el lapso de máxima expresión vegetativa. A pesar de no haberse empleado el sensor MODIS, este estudio guarda relación con esta investigación doctoral, pues se logró analizar los cambios de la vegetación en esa región argentina.

De igual manera, Iglesias, Barchuk y Grilli (2010), llevaron a cabo un estudio, con imágenes del sensor VEGETATION del satélite SPOT, cuyo objetivo fue caracterizar la dinámica espacio-temporal del NDVI como indicador del funcionamiento de la vegetación en bosques nativos de zonas áridas argentinas y relacionarla con el patrón de ocurrencia de las lluvias, en el lapso 1998-2003. El empleo del NDVI permitió:

a) Obtener valores de referencia del patrón de crecimiento vegetal en las tres reservas naturales estudiadas; b) Evidenciar el comportamiento estacional de la vegetación en las áreas protegidas; c) Observar los valores más altos y de mayor amplitud de onda del NDVI en la reserva natural más húmeda; y, d) Comprobar que existe una correlación entre los valores de precipitaciones y el NDVI y que esta correlación es mayor con un mes de retraso de la respuesta de la vegetación con respecto a las lluvias ocurridas.

Meneses-Tovar (2011), realizó un trabajo de interpretación de imágenes MODIS observando los cambios en la salud de la vegetación del bosque en México, durante el periodo 2004 – 2007, donde mostró la relación entre los indicadores de las funciones del bosque y el NDVI. Tomó la biomasa aérea como indicador de varios ecosistemas forestales para hacerle seguimiento al proceso de degradación de los mismos. A través de estudio, la autora concluyó que el NDVI puede ser usado como indicador en la medición de la degradación del bosque, “debido a que tiene un comportamiento que se puede conocer con anticipación” (p. 46).

Kariyeva y Van Leeuwen (2011), ejecutaron un estudio para detectar y caracterizar algunos de los principales factores ambientales que contribuyen a los patrones de respuesta de la vegetación a escala paisajística en Asia Central a lo largo del tiempo, a través de imágenes NDVI AVHRR. Encontraron que: a) La dinámica en el paisaje en ese continente, mostró fuertes relaciones con los factores ambientales en los grandes gradientes latitudinales y de elevación; y, b) Las variables climáticas de precipitación y temperatura, mostraron el mayor impacto sobre la dinámica de la vegetación, por lo cual infirieron que los cambios climáticos podrían afectar severamente el uso del agua y la producción agrícola.

De igual modo, Fuenteteja (2013), caracterizó el efecto de las sequías extremas sobre el vigor de uno de los principales e importantes sistemas forestales de la Península Ibérica: los encinares, haciendo uso de la teledetección. Aunque utilizó varios índices de vegetación en la investigación, el NDVI mostró mejor comportamiento en relación a la biomasa foliar en ramas. Este resultado permitió concluir que el uso del NDVI puede servir de referencia para instituir metodologías

de seguimiento multitemporal de los eventos de decadencia forestal causados por sequías extremas.

Vázquez, Adema y Fernández (2013), desarrollaron un trabajo donde caracterizaron la dinámica de la cobertura vegetal de la provincia de La Pampa por medio del análisis de series temporales de NDVI MODIS de largo plazo. Entre sus resultados destaca, el hecho de que: a) Detectaron aumentos del NDVI en concurrencia con la degradación de esos ambientes por arbustización, al oeste de la provincia; b) Identificaron disminuciones significativas del NDVI tanto en el sudeste como en el noreste, por cambio en el uso de la tierra respectivamente; y, c) Revelaron patrones temporales, su biometría típica, su variabilidad bajo condiciones de estrés hídrico.

Por otro lado, Britos y Barchuk (2013), caracterizaron los patrones espacio-temporales de la cobertura vegetal en relación con los usos del suelo, mediante el análisis de una serie temporal, entre 1984 y 2010, de NDVI Landsat TM en la llanura occidental, con un área aproximada de 500 mil ha, en la provincia de Córdoba, Argentina. Hallaron que la disminución de NDVI, producida por la alta ocurrencia de deforestaciones, conlleva la pérdida de nutrientes y agua por escurrimiento superficial; es decir, que el seguimiento retrospectivo del NDVI permitió evaluar el efecto de la deforestación en la dinámica de la vegetación a escala regional. He aquí otro estudio con satélite/sensor diferente al Terra/MODIS, pero que se relaciona con este trabajo doctoral.

Gamon, Huemrich, Stone y Tweedie (2013), en la investigación sobre la variación espacial y temporal en la productividad primaria de la tundra costera de Alaska, se trazaron el objetivo de cuantificar la dinámica espacio-temporal de la productividad de la tundra en respuesta a los cambios en los regímenes de temperatura y humedad. Utilizaron el NDVI MODIS como un indicador de la productividad de la vegetación basándose en observaciones de correlaciones significativas en el NDVI, la biomasa sobre el suelo y el índice foliar para la vegetación cercana a la tundra. Sus resultados mostraron que el uso del NDVI no es útil para evaluar el impacto del cambio climático en la producción de la vegetación

ártica. A simple vista, pareciese que este trabajo no tiene vinculación con la presente investigación; pero si la tiene de manera indirecta, ya que en él se evidencia la inutilidad del NDVI en estudios fenológicos en latitudes septentrionales, planteamiento éste que reafirma las premisas expuestas al comienzo de este capítulo.

En África, también se han realizado estudios en la temática que se aborda en esta investigación a nivel doctoral. Al respecto, Sonfack, Nzeukou, Lenouo, Siddi, Tchakoutio y Kaptue (2013), desarrollaron el trabajo titulado: Comparación entre la vegetación y la lluvia de eco-regiones bioclimáticas en África Central. Estos autores investigaron la relación entre el NDVI y las precipitaciones estimadas en el Proyecto de Climatología por Precipitación Global para cada eco-región estudiada (cuatro en total). Los resultados arrojaron que existe una fuerte similitud entre los patrones temporales del NDVI y la precipitación en las cuatro eco-regiones bioclimáticas, lo que demuestra que el NDVI puede ser considerado un indicador sensible de la variabilidad interanual de la precipitación.

El siguiente estudio ejecutado también en África fue realizado por Philippon, Martiny, Camberlin, Hoffman y Gond (2014). Ellos analizaron los patrones de la señal de ENSO durante el ciclo estacional para el conjunto de África durante las tres últimas décadas utilizando el NDVI. La investigación arrojó que el NDVI destaca el impacto del ENSO en la dinámica de la vegetación correlacionado con las precipitaciones, radiación solar y temperatura, por su alta resolución espacial y actualización frecuente con respecto a las bases de datos climáticas in situ.

Cartaya, Zurita, Rodríguez y Montalvo (2014), realizaron una investigación muy particular: a través de la clasificación supervisada, el análisis de componentes principales y el uso del NDVI, se propusieron evaluar la cobertura vegetal y usos de la tierra en áreas de interés ecológico en Manabí, Ecuador. Seleccionaron dos unidades de estudio: El Refugio de Vida Silvestre Marino Costera Pacoche y el Cantón Flavio Alfaro. Sobre la base de sus resultados, afirmaron que el uso del NDVI fue más adecuado para determinar la cobertura vegetal y usos de la tierra en dichas áreas geográficas. Tanto esta investigación como la anterior, se vinculan con esta

tesis doctoral, pues evalúan la utilidad del NDVI como un indicador del verdor de la vegetación en unidades geográficas determinadas.

Otra contribución científica que se vincula con la presente, a pesar de no haberse empleado el sensor MODIS es la de Ceroni, Achkar, Gazzano y Burgeño (2015). Ellos investigaron la evolución temporal del NDVI en el Uruguay, mediante imágenes SPOT para el período 1998-2012. En dicho trabajo, se evidenció claramente dos aspectos: a) La existencia de una diferenciación del NDVI a nivel estacional, tanto temporal como espacial; y, b) La tendencia de la productividad en el periodo de descenso. Además, los resultados mostraron los cambios continuos en la cobertura vegetal en el periodo de desarrollo de forestación y la agricultura.

Gaitán, Bran y Azcona (2015), desarrollaron una metodología de monitoreo basada en índices de vegetación de imágenes satelitales con el fin de evaluar la degradación de tierras en la Argentina, siendo el NDVI el más utilizado. Analizaron la tendencia del NDVI, derivado éste del sensor MODIS, en el periodo 2000-2014. Concluyeron que la metodología, usando el NDVI en conjunto con indicadores de campo y datos climáticos, se puede integrar a un sistema para monitorear las tierras a escala nacional.

De igual manera, Hutchinson, Jacquin, Hutchinson y Verbesselt (2015), realizaron un estudio para evaluar los cambios en la vegetación en tierras del departamento de defensa de los Estados Unidos, con el fin de aplicar principios de conservación y prácticas de manejo sostenible en dichas tierras de entrenamiento militar. Utilizaron series temporales de MODIS NDVI de 10 años. Los resultados indicaron que el uso del NDVI fue provechoso en la generación de información consistente y relativamente rápida para evaluar los terrenos militares y promover actividades ecológicas en esas tierras mediante el establecimiento de un sistema de gestión ambiental que garantice el uso sustentable de las mismas.

En el continente asiático, concretamente en China, Tang, Li, Zhu, Chen, Zhang y Xin (2015), llevaron a cabo un estudio de la fenología de la vegetación a largo plazo (1982 a 2012) en la montaña de Kinging al noreste de ese país, con el fin de conocer la respuesta de ese ecosistema al cambio climático. Utilizaron series temporales NDVI

del Grupo de Estudios de Mapeo y Modelado de Inventarios Globales (GIMMS). Resultados: a) Clasificaron tres eco-regiones en el ecosistema de estudio con sus patrones de variación fenológica en cada una de ellas al cambio climático; y, b) La temperatura y la precipitación se correlacionaron estrechamente con las variaciones de la fenología.

Un estudio bastante interesante que se efectuó en la India por Sruthi y Mohammed (2015), en el que se analizó el estrés de la vegetación con el cálculo de los valores de NDVI y la temperatura de la superficie terrestre, con el sensor Terra-MODIS, demostró que la correlación entre NDVI y la temperatura superficial del terreno proporciona información muy útil para el seguimiento de la sequía agrícola y un sistema de alerta temprana para los agricultores; en otras palabras, la vigilancia de la sequía agrícola (evaluación y gestión), se puede realizar con mayor precisión con el uso del NDVI MODIS.

Belenguer-Plomer (2016), combinó la información acerca del estado de la vegetación que ofrece el NDVI con datos de precipitación, para detectar anomalías negativas en la producción de alimentos en Cuerno de África. Empleó los NDVI MODIS mensuales y para la precipitación, el TAMSAT, durante el periodo 2001-2015. Entre los resultados, obtuvo dos importantes: a) La existencia de una relación directa entre los valores NDVI y la precipitación mensual, y, b) Que la principal causa de las anomalías en la vegetación, es la disminución de las precipitaciones durante los meses de producción agrícola.

Los investigadores Dildora, Toderich, Jarihani, Gafurov y Gismatulina (2016), evaluaron la dinámica temporal del ENSO y los patrones espaciales en las zonas áridas y semiáridas de Asia Central y su relación con los valores NDVI en el lapso temporal 1982-2011, derivados del AVHRR. Los resultados indicaron que existe una relación inversa muy fuerte entre El Niño y el NDVI y una relación directa, muy fuerte también, entre La Niña y el NDVI. Además, encontraron que dichas anomalías han influido en la productividad de la vegetación. Este es otro referente que, aunque utilizó el sensor AVHRR, es vinculante con esta tesis doctoral.

Recientemente, Ulsig, Nichol, Huemmrich, Landis, Middleton, Lyapustin, Mammarella, Levula y Porcar-Castell (2017), investigaron la utilidad del NDVI derivado de MODIS para inferir la actividad fotosintética y detectar transiciones estacionales en un bosque de coníferas boreales del sur de Finlandia, concluyendo que el producto MODIS NDVI estándar no permitió detectar variaciones interanuales en la actividad fotosintética de la vegetación. Esta investigación, al igual que la de Gamon, Huemmrich, Stone y Tweedie ya mencionada, mantiene la misma relación indirecta con este estudio.

Todo lo anterior es una síntesis de una revisión ampliada, de ninguna manera exhaustiva, del quehacer de la comunidad científica internacional con respecto al estudio de la variabilidad del NDVI y su relación con las precipitaciones en regiones principalmente áridas y semiáridas, a partir del presente milenio.

2.1.2. Contexto nacional

En contraste con el contexto internacional, en Venezuela es escasa la literatura relacionada con el estudio directo o indirecto de la dinámica de la vegetación y el funcionamiento de los ecosistemas sobre la base de teledetección. Ésta es un área naciente en el país. Los siguientes párrafos agrupan solo tres contribuciones nacionales que se han realizado sobre el tema que se estudia en esta tesis doctoral.

Primeramente, Chacón-Moreno (2004) analizó la fenología de los ecosistemas de sabana en la región de los Llanos del Orinoco a través de series temporales de NDVI del AVHRR de la NOAA. El objetivo fue elaborar un mapa de ecosistemas de la zona basado en el análisis de patrón temporal. Encontró que: a) Las diferencias en la fenología entre los ecosistemas están fuertemente relacionados con las condiciones climáticas ambientales, especialmente a las lluvias estacionales; b) Las grandes fluctuaciones y el crecimiento de la vegetación se asocian con el período de lluvias, mientras que la disminución de los valores de NDVI está asociada con el período seco; y, c) El análisis de las imágenes multitemporales NOAA-AVHRR NDVI, permitió establecer un vínculo entre los procesos ecológicos con componentes espaciales de los datos de teledetección.

Luego, Millano y Paredes (2016a) describieron e interpretaron información hemerobibliográfica sobre la variabilidad de la vegetación en Latinoamérica con el empleo de series temporales NDVI para conocer la fenología de ecosistemas existentes en esta región de América y saber cómo se ha manejado la vigilancia de eventos climáticos (sequías e inundaciones), el monitoreo de áreas verdes, las pérdidas forestales por deforestación o quema y la administración de áreas protegidas. Entre las consideraciones finales del estudio plasmaron que el análisis de la dinámica vegetal puede mejorar nuestra comprensión sobre la variabilidad espacio-tiempo en los ecosistemas semiáridos tropicales, su biodiversidad, flujo de energía, reciclaje de nutrientes y las interacciones entre las especies y sucesión; al tiempo de contribuir al manejo sustentable de los elementos ambientales presentes en ellos (e.g., suelo y agua).

Finalmente, estos mismos autores, Millano y Paredes (2017), realizaron otra investigación con el objetivo de identificar los patrones fenológicos en la cobertura vegetal en el Bosque Seco Tropical localizado en la parte centro-sur del estado Cojedes, analizando series mensuales de NDVI derivadas del programa Terra-MODIS. Los resultados mostraron una respuesta positiva y lineal del verdor de la vegetación a las variaciones estacionales de la precipitación al inicio de la estación lluviosa, pero fuera de este período la asociación entre el verdor de la vegetación y la lluvia es más débil y su correlación es no lineal. Concluyeron que el NDVI puede ser útil para monitorear la variabilidad temporal de la vegetación en esa región geográfica.

2.2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.2.1. La precipitación en el estado Cojedes

La distribución media anual de la precipitación en el estado Cojedes oscila entre 1100 mm y 1700 mm, con tres zonas pluviométricas bien definidas, tal como se muestra en la Figura 1.

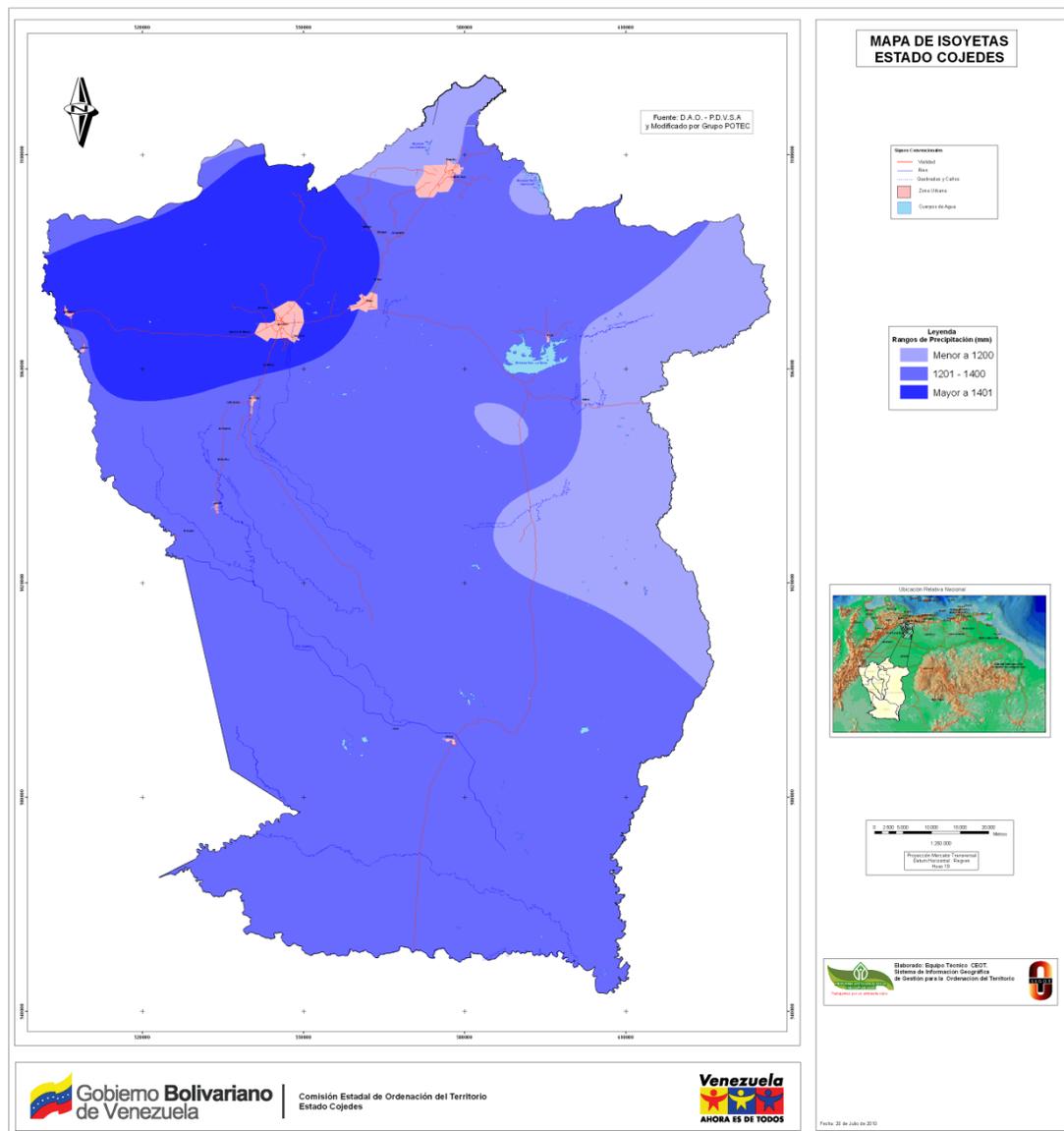


Figura 1. Zonas Pluviométricas e Isoyetas del estado Cojedes.
Fuente: Equipo Técnico POTEC estado Cojedes – SIGOT (2010) citado por MPPA (2011).

En el estado Cojedes, el comportamiento de las lluvias está supeditado a la dinámica de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) y a las perturbaciones de las variables macroclimáticas (VM) (Paredes y Guevara, 2007). De allí que, el enfriamiento del Atlántico Norte trae consigo una disminución de las precipitaciones mientras que el enfriamiento del Atlántico Sur, induce aumento de las lluvias en el

estado (Millano, Paredes y Vivas, 2007). Más aún, cuando las VM muestran fuertes anomalías, en Sudamérica se presentan aumento de las precipitaciones en la época húmeda o sequías fuertes en el período seco. En los últimos 15 años, eventos climáticos han abarcado grandes zonas, registrándose simultáneamente en algunos países, como ocurrió con la sequía de 2005 que afectó a Venezuela, Brasil y Colombia (Giddings y Soto, 2006).

De allí pues que Paredes (2009), destaca que en la evaluación de la influencia de algunas VM sobre las lluvias en ciertos lugares del estado Cojedes, se correlacionaron las anomalías de la precipitación mensual de 12 estaciones climatológicas con registros pluviométricos confiables (30 o más años de registros continuos, 10% o menos años incompletos y 2% o menos meses faltantes), con las anomalías de las VM en los océanos Pacífico Meridional y Atlántico Subtropical durante el periodo común 1970-1983, encontrándose que la relación más significativa se da entre la temperatura superficial del Atlántico Subtropical Norte y Sur, y las precipitaciones en la capital del estado: San Carlos con cuatro posibles escenarios (Tabla 1). Este autor resalta además, que las VM no se correlacionan fuertemente con las precipitaciones en el estado Cojedes; no obstante, “ciertos periodos lluviosos anormalmente húmedos coinciden con un Atlántico Norte muy caliente o un Atlántico Sur muy frío” (p. 163) (Tabla 1), hallazgo que concuerda con Millano, Paredes y Vivas (2007).

Tabla 1

Efecto de escenarios de calentamiento y enfriamiento del Atlántico Subtropical sobre las lluvias en la ciudad de San Carlos. Período 1970-1983.

Atlántico Norte	Atlántico Sur	Probabilidad *	Efecto
Caliente	Frío	1/3	Intensificación de las lluvias
Caliente	Caliente	17/168	Indefinido ¹
Frío	Caliente	13/56	Merma de las lluvias
Frío	Frío	1/3	Indefinido ¹

Nota: *se obtiene dividiendo el número de meses en que se dio el evento entre el total de meses; ¹: las respuestas de ambas porciones del Atlántico son contrarias, por lo que se presume que los efectos se contrarrestarán.

Fuente: Paredes (2009).

Por otra parte, la distribución de la precipitación media anual del estado Cojedes se presume que está asociada con la fisiografía del estado (Figura 2), pues la sucesión de montañas situadas al norte del estado, por efecto barrera orográfica vinculado a la Cordillera de la Costa, ocasiona que las corrientes de aire húmedo descarguen lluvias en el estrecho corredor en sentido noreste-suroeste. La región de menor precipitación puede ser entendida por la barrera producida por las Galeras del Pao (Millano, Paredes y Vivas, 2007; MPPA, 2011).

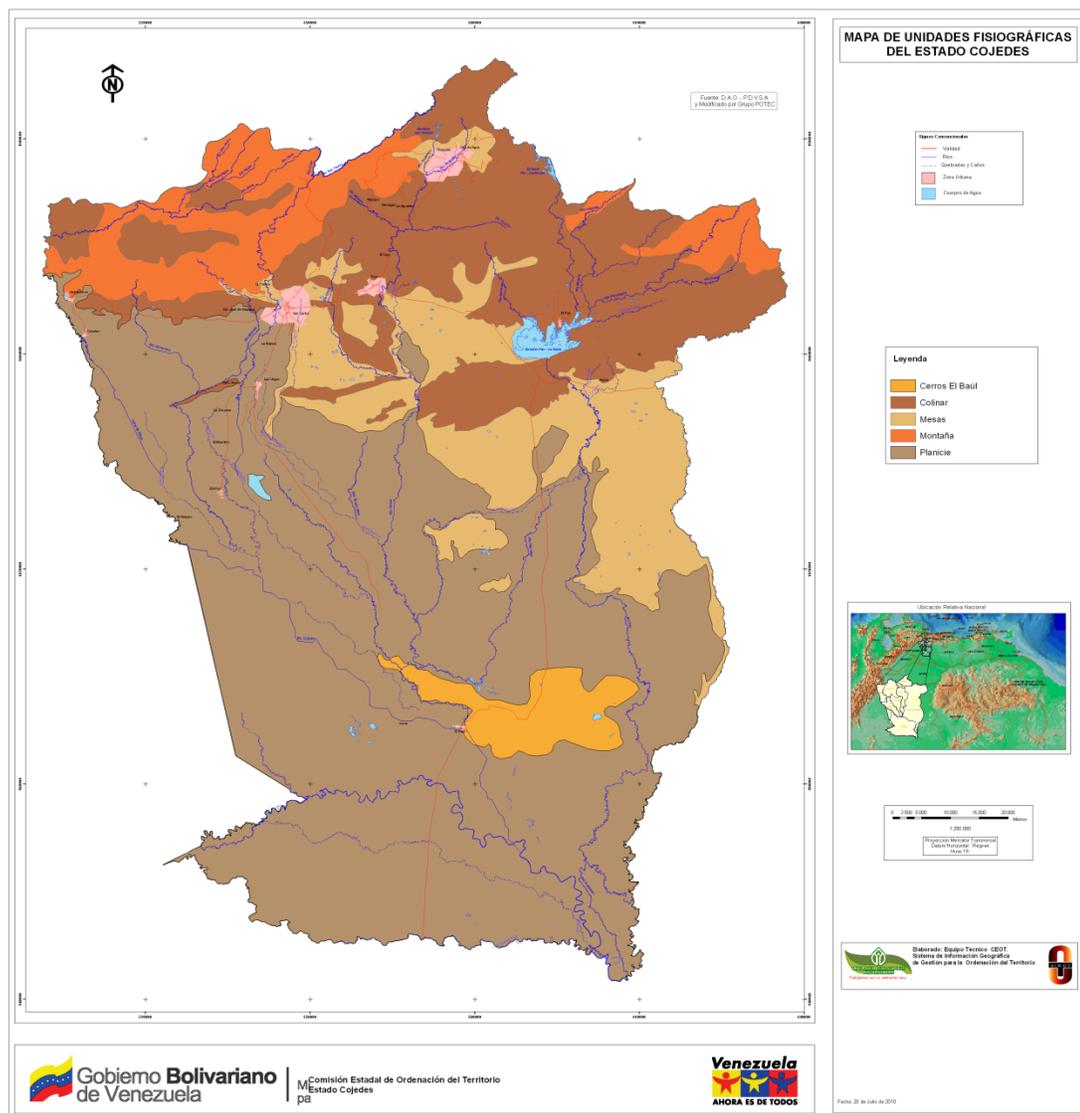


Figura 2. Unidades fisiográficas del estado Cojedes.

Fuente: Equipo Técnico POTEC estado Cojedes – SIGOT (2010) citado por MPPA (2011).

El estado Cojedes posee un régimen pluviométrico estacional: el periodo seco comprendido desde noviembre a abril, con un mínimo de precipitación en el mes de enero (7.7 mm); y, el periodo lluvioso de mayo a octubre con un máximo de precipitación en julio (208.4 mm) (Figura 3) (MPPA, 2011).

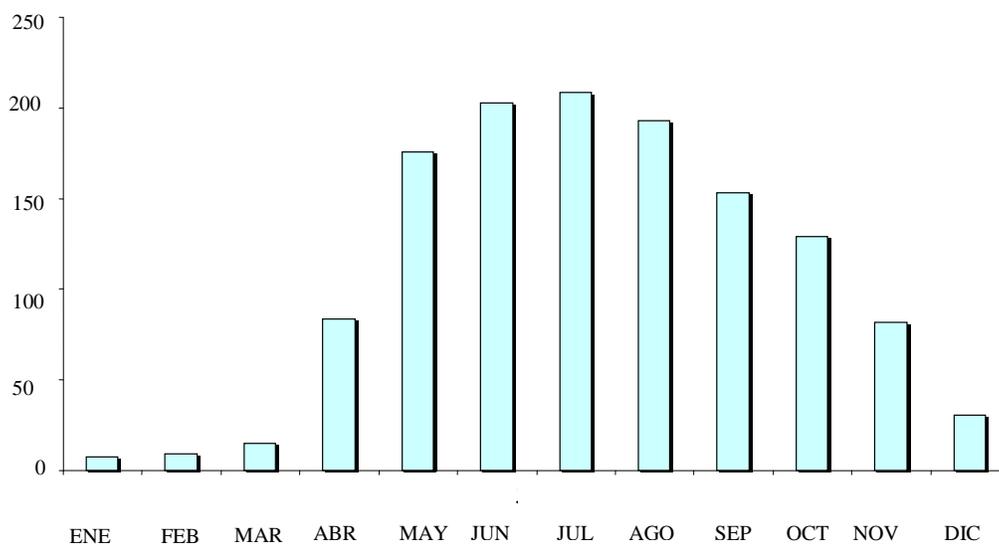


Figura 3. Pluviograma Medio Mensual del estado Cojedes. Periodo 1967-2000.
Fuente: Plan Integral de Manejo de Desechos y Residuos Sólidos del Estado Cojedes. Diagnóstico e Identificación de Problemas-Visión Regional (2007) citado por MPPA (2011).

Según el MPPA (2011), la distribución de la precipitación media mensual en el estado Cojedes, varía claramente de un mes a otro. Así pues, en enero la precipitación oscila entre 4.6 mm y 8.2 mm, identificándose la zona norte de los municipios Falcón y Ezequiel Zamora como las más húmedas. En el mes de febrero se observa un aumento de las lluvias y varían desde 4.5 mm hasta 12.5 mm, siendo el noroeste del municipio Lima Blanco con la mayor pluviosidad. Las lluvias se presentan en todo el estado Cojedes en el mes de marzo, variando entre 12.5 mm y 21.3 mm y con un núcleo de máxima precipitación exactamente en el noroeste de Lima Blanco y que se extiende en zonas de los municipios Ezequiel Zamora y Falcón. Abril registra aumentos en las precipitaciones entre 70 mm y 100 mm, sobre todo en el noroeste del estado y el núcleo de lluvias máximas se mantiene en el mismo lugar ya descrito.

Se inicia la temporada lluviosa en el mes de mayo con precipitaciones desde 152 mm a 192 mm. En este mes se establecen los siguientes núcleos de máxima pluviosidad: centro del municipio Falcón (168 mm), centro norte del municipio El Pao de San Juan Bautista (184 mm), y, gran parte del municipio Ezequiel Zamora (188 mm). En los meses de junio a septiembre se mantiene la lluvia en todos los municipios del estado, de manera significativa en el norte de Ezequiel Zamora con precipitaciones de 22 mm a 152 mm.

Las precipitaciones comienzan a mermar en el periodo comprendido entre octubre y diciembre; en noviembre específicamente, disminuyen drásticamente en todo el territorio del estado Cojedes y se instaura la temporada seca en diciembre en sentido suroeste-noreste.

Lo anterior, describió ampliamente el régimen pluviométrico y la distribución espacial de las precipitaciones en el estado Cojedes; sin embargo, es importante destacar la distribución de las lluvias extremas en el estado. Al respecto, Paredes (2009), en un estudio ejecutado para diversas estaciones climatológicas de Cojedes con registros confiables, determinó en forma general que, en registros de lluvia de una hora de duración y períodos de retorno de 5, 10 y 25 años, las tormentas de mayor intensidad se manifiestan en las siguientes localidades o núcleos respectivamente: alrededores del sector La Ceiba-Camoruco del municipio Ezequiel Zamora; periferias de la población de Las Vegas, municipio Rómulo Gallegos; y, perímetros del poblado Caño Benito en el municipio El Pao de San Juan Bautista.

2.2.2. Sobre la estimación de la precipitación a partir del producto 3B42RT

El producto satelital de investigación TRMM-3B42, versión 7, es creado por el proyecto Misión de Medición de las Precipitaciones Tropicales (TRMM, por sus siglas en inglés) de la NASA (<https://pmm.nasa.gov/data-access/downloads/trmm>) para la medición y estimación confiable y precisa de las precipitaciones tanto a escala mundial como a escala regional, las cuales son fundamentales para la aplicaciones de la meteorología, la hidrología y la gestión de los recursos hídricos, además de ofrecer información esencial para comprender el equilibrio de los intercambios mundiales de

energía y ciclo del agua, que impulsan la mayoría de los modelos hidrológicos y tienen un impacto directo en la circulación planetaria de la atmósfera (Sorooshian, 2004; Huffman, Adler, Bolvin, Nelkin, Hossain y Gebremichael, 2010; Behrangi, Khakbaz, Jaw, AghaKouchak, Hsu y Sorooshian, 2011; Parkes, Wetterhall, Pappenberger, He, Malamud y Cloke, 2013).

TRMM-3B42 tiene resolución temporal de 3 horas y resolución espacial de $0,25^\circ$ x $0,25^\circ$ en un cinturón mundial (dominio) que se extiende desde 50° S a 50° N; además, es el único producto corregido por observaciones pluviométricas a través de análisis completos de monitoreo y pluviometría del Centro de Climatología de Precipitación Global (GPCC) (Huffman, Bolvin, Nelkin, Wolff, Adler, Gu, Hong, Bowman y Stocker, 2007; Huffman, Adler, Bolvin, Nelkin, Hossain y Gebremichael, 2010), por lo que es capaz de describir la distribución espacial y la variación temporal de la precipitación con alta precisión. Más detalles se pueden ver en Huffman, Adler, Bolvin y Nelkin (2011); Huffman y Bolvin (2013) y Yong, Chen, Gourley, Ren, Hong, Chen y Gong (2014).

Aunque la estimación confiable y precisa de las precipitaciones regionales y globales sigue siendo un reto para la comunidad científica debido a la gran variabilidad en el espacio y el tiempo, el producto 3B42 es ampliamente utilizado en la parte continental de China y Estados Unidos, específicamente en regiones hidrológicas y afines (Dai, 2006; Shepherd, 2006; Tobin y Bennett, 2009; Jiang y Zipser, 2010; Li, Ngongondo, Xu y Gong, 2013) por su cobertura global, continuidad espacial y su potencial en la predicción de eventos extremos que causan peligros naturales y desastres (Tian, Peters-Lidard, Choudhury y García, 2007; Kidd y Huffman, 2011; Tapiador, Turk, Petersen, Hou, García-Ortega, Machado, Angelis, Salio, Kidd y Huffman, 2012).

La obtención de los datos de precipitación en formatos compatibles con cualquier Sistema de Información Geográfico (SIG), se canaliza a través del Centro Goddard de Vuelos Espaciales de la NASA, el cual posee una sede de distribución del producto 3B42RT (Figura 4).

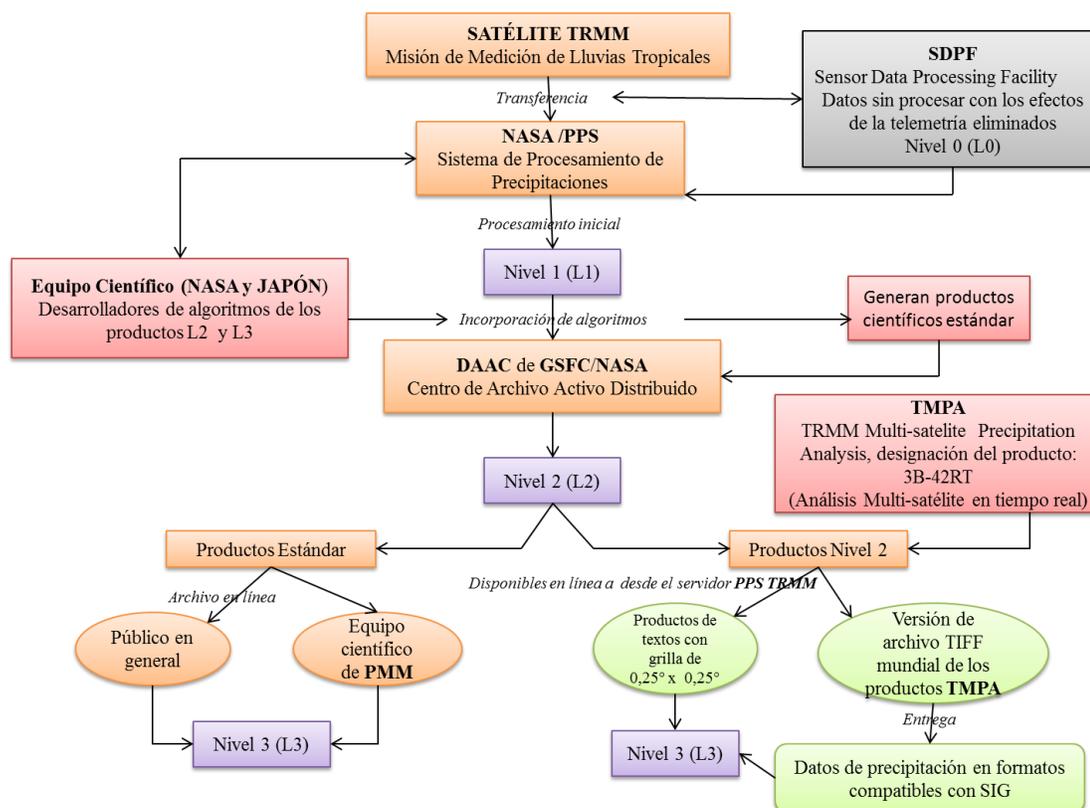


Figura 4. Diagrama de flujo simplificado para la obtención del producto 3B42RT
Elaboración Propia.

2.2.3. El Bosque Seco Tropical en el estado Cojedes

La superficie del estado Cojedes está cubierta primordialmente por tres zonas de vida según el sistema de clasificación climática de Holdrige: Bosque Seco Tropical, Bosque Húmedo Premontano y Bosque Húmedo Montano Bajo (MPPA, 2011). Esta investigación doctoral centra su atención en la primera, pues ésta ocupa la unidad fisiográfica planicie de Cojedes, objeto de estudio.

El Bosque Seco Tropical representa la formación boscosa dominante en el estado (73% aproximadamente de la superficie boscosa de Cojedes es habitada por este tipo de zona de vida). Comprende desde los llanos bajos inundables (cota por debajo de 100 msnm) hasta las colinas altas del norte de Cojedes (cota hasta los 500 msnm); es decir, la altura sobre el nivel del mar fluctúa entre 0-500 m. La precipitación media

anual varía entre 1000 mm y 1800 mm y una temperatura media anual que oscila entre 22°C y 29°C (Paredes, 2009; MPPA, 2011).

El origen de los suelos es generalmente aluvial. La mayor parte se destina al desarrollo pecuario extensivo en el piedemonte y montaña y al sur del estado Cojedes, mientras que en los municipios Tinaco y Pao prevalece el aprovechamiento pecuario más avanzado, dado a las condiciones de temperatura y precipitación que favorecen este tipo de uso. Las condiciones anteriormente descritas, acompañadas de suelos apropiados, hacen del Bosque Seco Tropical, espacios para el desarrollo de cultivos de ciclo corto como el arroz, maíz, sorgo, caraota, frijol en forma abundante. La actividad agrícola intensiva de cultivos como el tabaco, hortalizas (tomate y pimentón), ajonjolí, patilla y melón, se ubican en las riberas de los ríos. Prosperan las plantaciones de frutales tropicales, principalmente el mango. La zona de vida Bosque Seco Tropical es un potencial de maderas finas de explotación, entre ellas: Cedro, Caoba, Gateado, Apamate, Samán, Roble y Mijao (MPPA, 2011).

Según el MPPA (2011), en el Bosque Seco Tropical se pueden diferenciar dos tipos de bosques: el Alto Denso constituido por vegetación desplegada en territorios o zonas de bancos que muestran claros en la cobertura, en ocasiones, siendo sus especies más comunes el Apamate (*Tabebuia chrysanta*), Caoba (*Swietenia macrophylla*) y Roble (*Platymiscium pinnatum*), entre otras; y, el Bosque Bajo Denso compuesto primordialmente por arbustos, desarrollados en zonas de bajíos, forman el espacio o área transitoria entre el Bosque Alto Denso y las Sabanas, cuyas especies habituales son el Coco e' Mono (*Lecythis ollaria*), Bototo (*Cochlospermum vitifolium*) y Caruto (*Genipa americana*) principalmente. Estos elementos forestales y el resto de especies que conforman la cobertura vegetal de esta zona de vida, tienen valor comercial y valor protector; sin embargo, ha prevalecido el comercial hasta tal punto que el Bosque Seco Tropical “ha sido víctima de la mayor agresión de la explotación y el avance de la frontera agrícola” (MPPA, 2011, p. 99). En tal sentido, Zambrano, Márquez y Rodríguez (2013) reportaron, para el periodo 1990-2010, una pérdida del bosque seco en un 37%, situación ésta corroborada por Vivas, Rumbo, Paredes y La Cruz (2014), al estimar que se perdieron 6487 ha/año en el periodo

1990-2008, lo que equivale a unas 117 mil ha aproximadamente de disminución del área boscosa.

Así pues, de no normarse su aprovechamiento, las coberturas boscosas de la zona de vida del Bosque Seco Tropical, mermarán su función protectora y/o conservadora “sobre la evaporación de las aguas y su oferta de forraje para el ganado y fauna silvestre, especialmente en las zonas de banco (Bosque Alto Denso)” (MPPA, 2011, p. 99). Al respecto, Millano, Vivas y Hernández (2016), acotan que el estado Cojedes cuenta con el decreto del plan de ordenación de su territorio (POTEC) atendiendo a las realidades ecológicas, geográficas, poblacionales, sociales, culturales, económicas y políticas, de acuerdo con las premisas del desarrollo sustentable. De igual forma, la Ley de Bosques (2013), contempla la conservación del patrimonio boscoso mediante una política nacional de carácter forestal, la cual debe orientar el desarrollo en esta área con el principio de la permanencia en el tiempo de los bosques para beneficio de las generaciones actuales y futuras. Por lo tanto, es evidente la existencia de disposiciones legales nacionales y regionales para garantizar la administración y la protección del patrimonio natural, y en este caso específico, los bosques que habitan en el Bosque Seco Tropical localizado en la parte centro-sur del estado Cojedes.

2.2.4. Características del sensor MODIS del satélite TERRA

El satélite TERRA fue lanzado al espacio por la NASA, a través del Programa Sistema de Observación Terrestre (EOS, por sus siglas en inglés), en diciembre de 1999. A 705 Km de la superficie terráquea, TERRA posee la capacidad de registrar los cambios climáticos de la atmósfera con una precisión tal que permite el pronóstico a corto plazo. Este satélite contiene cinco sistemas de monitoreo (sensores) muy sensibles, entre ellos, el Espectrómetro de Imágenes de Resolución Moderada (MODIS, por sus siglas en inglés) (Rodríguez y Arredondo, 2005).

El sensor MODIS está a cargo del Centro Goddard de Vuelo Espacial de la NASA (NASA/GSFC, por sus siglas en inglés), y obtiene datos de cobertura terrestre y los cambios en el uso del suelo, dinámica de la vegetación y ocurrencia de fuegos, entre otros datos. Además, cuenta con una alta sensibilidad radiométrica (12 bit) en 36

bandas espectrales, en un rango de longitud de onda de 0,4 a 14 μm (<http://www.ghcc.msfc.nasa.gov/AMSR>). Por otro lado, MODIS es un explorador de barrido; es decir, un espejo móvil que oscila perpendicularmente a la dirección de la trayectoria con un ángulo de $\pm 55^\circ$ permite explorar una franja de terreno (swath) a ambos lados de la traza del satélite, cuyo ancho es de 2.330 km (Tabla 2). El sistema óptico es un telescopio con dos espejos fuera de su eje focal que direccionan la radiación incidente a cuatro sistemas ópticos reflectantes, uno para cada región espectral: visible, infrarrojo cercano, medio y térmico. La órbita de esta plataforma es helio-sincrónica y cuasi-polar con una inclinación de $98,2^\circ$ y 98° y una altitud media de 708 y 705 km respectivamente (NASA, 2008). El satélite Terra está programado para pasar de norte a sur cruzando el ecuador a las 10:30 de la mañana en su órbita descendente (Figura 5). Las primeras imágenes captadas por Terra se obtuvieron en febrero del año 2000 y monitorea la totalidad de la superficie terrestre cada 1 o 2 días dependiendo de la latitud (García-Mora y Mas, 2011).

Tabla 2

Especificaciones generales del sensor MODIS.

Órbita	Altitud: 708 km pasando en el ecuador a las 10:30 a.m. nodo descendente, heliosíncrona, casi polar, circular.
Tasa de escaneo	20,3 rpm, ortogonal a la órbita
Dimensiones de la franja escaneada	2.330 km (ortogonal) por 10 km (a lo largo de la órbita, al nadir)
Telescopio	17,78 cm diámetro con planos de desvío intermedarios
Tamaño	1,0 x 1,6 x 1,0 m
Peso	228,7 kg
Poder	162,5 W (promedio orbital)
Tasa de transferencia de datos	10,6 Mbps (pico); 6,1 Mbps (promedio orbital)
Codificación	12 bits
Resolución espacial	250 m (bandas 1-2) 500 m (bandas 3-7) 1000 m (bandas 8-36)
Vida útil	6 años

Fuente: <http://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php>, citado por García-Mora y Mas (2011).



Figura 5. Sistema de escaneo del sensor MODIS

Fuente: http://sos.noaa.gov/images/atmosphere/aqua_swath.jpg citado por García-Mora y Mas (2011).

En concreto, el instrumento MODIS mide la reflectancia que emite la Tierra en diferentes longitudes de ondas. Dicho sensor es distribuido por la NASA (<http://gimms.gsfc.nasa.gov/download/MODIS>), el cual provee valores de NDVI a una resolución espacial de 250 m con un intervalo temporal de 8 días a lo largo del año (i.e., 1, 9, 17, 25 y, así sucesivamente, hasta el día 361) desde el 2000 y hasta el presente (Huete, Didan, Miura, Rodriguez, Gao y Ferreira, 2002).

MODIS-Terra ha sido previamente corregido radiométricamente, geométricamente y por interferencia de nubes, cuerpos de agua y aerosoles. Más detalle técnico sobre este producto se encuentra en Whitcraft, Becker-Reshef y Justice (2015), así como también en el portal de la NASA <http://modis.gsfc.nasa.gov/about/scanmirror.php>.

2.2.5. El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

En general, un índice de vegetación es una composición de bandas espectrales capturadas por sensores a bordo de un satélite de teledetección. Esta composición exalta la vegetación a través de su respuesta espectral y minimiza los pormenores de otros elementos situados a la redonda de las aglomeraciones vegetales como el suelo y el agua, entre otros (Chuvienco, 2002; Meneses-Tovar, 2011). Por lo tanto, un índice de vegetación puede ser definido como un parámetro calculado a partir de los valores de la reflectancia a distintas longitudes de onda, y es particularmente sensible a la cubierta vegetal (Gilabert, González-Piqueras y García-Haro, 1997).

El NDVI se calcula por medio de los valores de intensidad de radiación de las bandas del espectro electromagnético que la vegetación emite o refleja. Su fundamento reside en precisar la densidad de color verde sobre el área geográfica de estudio, a través del análisis de los valores de longitudes de onda de la luz solar visible que absorbe la clorofila para su empleo en el proceso de la fotosíntesis (desde 0,4 μm hasta 0,7 μm), y la luz del infrarrojo cercano reflejado por las hojas (0,7 μm a 1,1 μm) (Simmon, 2015). Por ende, para su cálculo solo es necesaria la información conseguida por los sensores correspondientes a las bandas roja e infrarroja cercana del espectro electromagnético, que en el satélite/sensor Terra-MODIS, corresponden a las bandas 1 y 2 respectivamente. La expresión matemática es la siguiente:

$$NDVI = \frac{\text{Banda Infrarroja Cercana} - \text{Banda Roja}}{\text{Banda Infrarroja Cercana} + \text{Banda Roja}} = \frac{IRC - R}{IRC + R} \quad (2.1)$$

donde, IRC es la reflectividad en el infrarrojo cercano y R es la reflectividad en el rojo. Así pues, el rango de valores de las reflexiones espectrales se encuentra entre el

0 y el 1; ya que, tanto la reflectividad del infrarrojo cercano como la del rojo, son cocientes de la radiación reflejada sobre la radiación entrante en cada banda espectral. Por consecuencia, de estos rangos de valores, el NDVI varía su valor adimensional entre -1 y 1 para cada pixel de la imagen. Los valores negativos corresponden especialmente a las nubes, el agua y la nieve; los valores cercanos a cero conciernen a rocas y terrenos desnudos o sin vegetación; los valores moderados (0,2 a 0,3) representan terrenos con arbustos y prados. Finalmente, los valores altos (0,6 a 0,8) indican vegetación densa, húmeda y bien desarrollada, por lo general, bosques de zonas templadas y tropicales (Barbosa, 2004; Simmon, 2015).

En la realidad, la vegetación sana absorbe la mayor parte de la luz visible que recibe y a su vez también refleja una gran parte de la luz del infrarrojo cercano; en cambio, la vegetación poco saludable, o enferma, refleja la luz más visible y menos luz en el infrarrojo cercano (Figura 6). Por consiguiente, el NDVI mide el vigor y verdor de la vegetación (De La Casa y Ovando, 2006).

El NDVI posee un gran valor en términos ecológicos, ya que es un buen estimador de la fracción de la radiación fotosintéticamente activa interceptada por la vegetación (Monteith, 1981) y la productividad primaria neta aérea (Jobbágy, Sala y Paruelo, 2002) y una variable integradora del funcionamiento del ecosistema (Virginia y Wall, 2001), permitiendo conocer el estado de vigor vegetal de grandes superficies, detectando fenómenos de amplio rango de variación (Chuvieco, Riaño, Aguado y Cocero, 2002; Alcaráz-Segura, 2006; Quevedo, Peixoto, Oliveira y Paranho, 2007). Por todo ello, el NDVI es uno de los índices más usados, como ya se expresó con anterioridad, para evaluar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación en cualquier área geográfica.

2.2.6. Aplicación del NDVI en el estudio de la dinámica de la vegetación

El uso del NDVI ha sido extensivo en estudios a pequeña escala, y especialmente para analizar cambios globales en la vegetación. Dichos estudios permiten conocer el estado del vigor vegetal sobre grandes espacios y detectar fenómenos de amplio rango de acción para afrontar la vigilancia de eventos muy fugaces, así como la

previsión de desastres. Fenómenos como el progreso de la desertización en África, las pérdidas forestales en la Amazonia o el seguimiento de áreas vegetales en América, han sido analizados con este índice (Chuvienco, 1995; Lausch, Pause, Merbach, Zacharias, Doktor, Volk y Seppelt, 2013). Desde el punto de vista ambiental, el NDVI contribuye a evaluar las respuestas ecológicas frente a los cambios ambientales que ha experimentado el globo terrestre.

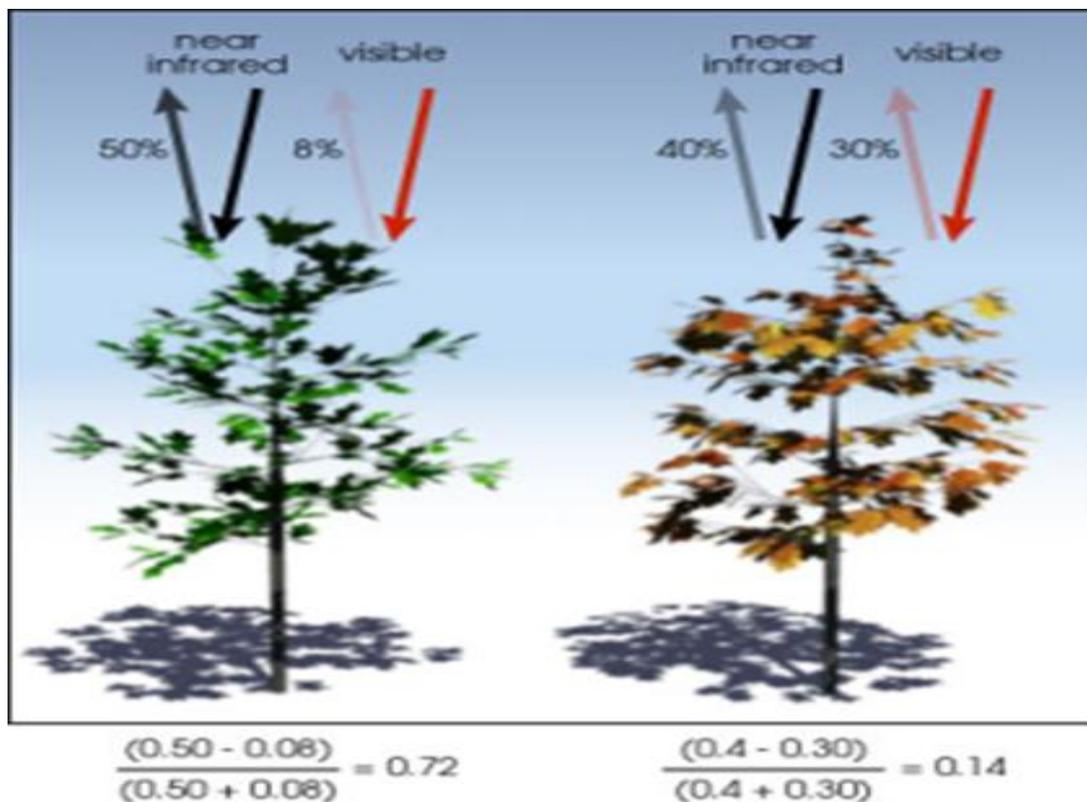


Figura 6. Ejemplo visual de la reflectividad en el infrarrojo cercano y en el rojo del espectro magnético, para una vegetación sana y otra poco saludable o enferma. Fuente: Simmon (2015).

Sobre la base de lo expresado en el párrafo precedente, en esta sección, se describirá e interpretará, sucintamente, información sobre la variabilidad de la vegetación en Latinoamérica con el empleo de series temporales del NDVI, para conocer la fenología de ecosistemas existentes en esta región de América y saber cómo se ha manejado la vigilancia de eventos climáticos (en particular, sequías e inundaciones), el monitoreo de áreas verdes, la pérdida forestal por deforestación o

quema y la administración de áreas protegidas, atendiendo a la preocupación mundial centrada en la región de América Latina por la acentuada correlación entre la expansión agrícola y la deforestación; esta última estimada en más del 90% (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO, por sus siglas en inglés], 2016). Se intuye entonces, que la degradación del bosque es una dificultad particularmente grave en las naciones en desarrollo. Cabe destacar, además, que esta área temática se enmarca en el Plan de la Patria 2013-2019 el cual contempla, respecto al cambio climático, el compromiso asumido por Venezuela en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, con su adhesión a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) y al Protocolo de Kyoto en 1994 y 2004 respectivamente (Ley del Plan de la Patria, 2013). En dicho plan se especifica como objetivo estratégico, el “continuar la lucha por la preservación, el respeto y el fortalecimiento del régimen climático”, compromiso ético importante como país petrolero (Sánchez y Reyes, 2015).

2.2.6.1. Modulación del verdor de la vegetación por el ENSO

La evaluación de la dinámica de la vegetación en regiones tropicales semiáridas, sigue siendo valiosa en el modelaje del clima y monitoreo de la variación de la vegetación causada por el ENSO (Philippon, Martiny, Camberlin, Hoffman y Gond, 2014). Al respecto, Pereira, Justino, Malhado, Barbosa y Marengo (2014), encontraron que el cambio de la capa terrestre en los ecosistemas naturales en el nordeste de Brasil, una región tropical semiárida, responde tanto a las condiciones climáticas oceánicas-atmosféricas (perturbaciones de ENSO) como a los patrones de uso antropogénicos de la tierra. Este hallazgo va en consonancia con los planteamientos de Barbosa, Huetea y Baethgen (2006). En efecto, los ecosistemas anteriormente mencionados han experimentado episodios de sequía persistentes y la degradación del ambiente en los últimos tiempos; esta conjunción hace que esta región de Brasil sea especialmente susceptible a las variaciones climáticas, lo cual se refleja en recurrentes problemas sociales relacionados con la disponibilidad de agua y

la producción primaria total (Barbosa, 1998; Schucknecht, Erasmi, Niemeyer y Matschullat, 2013). Los resultados del estudio de estos investigadores, sugieren que tanto las tendencias al alza como a la baja en el verdor de la vegetación en las últimas temporadas, podrían atribuirse a los efectos de la variabilidad del clima y al uso del suelo.

Van Leeuwen, Hartfield, Miranda y Meza (2013), examinaron a fondo la relación entre el aumento de la demanda del agua y la sequía, conjuntamente con la variabilidad del clima y el cambio de uso del suelo en Argentina, Bolivia, Chile, Paraguay, Uruguay, y partes de Perú y Brasil, junto a las montañas de los Andes, encontrando que los patrones de crecimiento han afectado la vegetación y el funcionamiento del ecosistema. A groso modo, estos autores infirieron que el ENSO tiene un impacto significativo en la productividad de la vegetación y fenología en el sureste y el noreste de Argentina, centro y sur de Chile y Paraguay.

2.2.6.2. Variabilidad estacional y temporal del verdor de la vegetación

La evaluación de la relación causa-efecto entre la frecuencia y la duración de las sequías meteorológicas y los cambios temporales en el verdor de la vegetación, también se ha realizado utilizando el NDVI. En este sentido, un estudio de Carrao, Sepulcre, Horion y Barbosa (2013), reveló que el ciclo agrícola a escala regional se relaciona más con eventos de sequía a corto plazo que se producen antes de la temporada de crecimiento de la vegetación, que con sequías a largo plazo; más aún, puede servir de información primaria para predecir los impactos de un déficit de precipitación en la variabilidad estacional del verdor de la vegetación. La investigación pone de manifiesto la importancia de evaluar los impactos del ENSO tanto en la sequía meteorológica como en la estimación de verdor relativo en la vegetación, inferencia ésta que concuerda con los resultados de un estudio posterior realizado por Pereira, Justino, Malhado, Barbosa y Marengo (2014).

Resultados similares fueron hallados por Chacón-Moreno (2004) citado por Armenteras, González, Luque, López y Rodríguez (2016), en un estudio sobre la fenología de los ecosistemas en la sabana venezolana: las diferencias en la fenología

en esos ecosistemas están fuertemente relacionadas con las condiciones climáticas ambientales, especialmente a las lluvias estacionales. En general, las grandes fluctuaciones en el verdor y el crecimiento de la vegetación en los ecosistemas de sabana se asocian con la ocurrencia del período de lluvias, mientras que la disminución de los valores de NDVI suele ser observado a lo largo del el período seco. Indirectamente, este aspecto también fue abordado por Smith, Chacón-Moreno, Jongman, Wenting y Loedeman (2006) citado por López-Hernández (2015).

Los hallazgos de Chacón-Moreno (2004) son consistentes con los de citados por Britos y Barchuk (2013), quienes llevaron a cabo una caracterización de la dinámica espacio-temporal del NDVI como indicador del funcionamiento de la vegetación en bosques de la zona árida argentina. Allí, el NDVI mostró una marcada estacionalidad para todos los años hidrológicos estudiados, permitiendo obtener valores de referencia del funcionamiento de estos ecosistemas en los distintos bosques xerofíticos bajo diferentes regímenes hídricos.

Ahora, donde las condiciones climáticas son estacionales, la evolución temporal del NDVI acompaña de manera estrecha la variación interanual del crecimiento de la vegetación en respuesta a los factores térmico e hídrico (Parplies, Dubovyk, Tewes, Mund y Schellberg, 2016). En este sentido, De La Casa y Ovando (2006) citado por Alvarez y Basanta (2015), evidenciaron la factibilidad de la utilización del NDVI para expresar el comienzo del ciclo de lluvias en cinco localidades situadas dentro de la provincia de Córdoba, Argentina. De nuevo, este hallazgo es consistente con los resultados de Pereira, Justino, Malhado, Barbosa y Marengo (2014) y los de Chacón-Moreno (2004) e Iglesia, Barchuk y Grilli (2010), mencionados con anterioridad.

2.2.6.3. Variabilidad de la vegetación en áreas protegidas

El análisis de la variabilidad de la vegetación a través de imágenes satelitales, se ha constituido en un método adecuado para el monitoreo y la gestión de áreas protegidas (Petrosillo, Semeraro, Zaccarelli, Aretano y Zurlini, 2013). Alcaraz-Segura, Baldi, Durante y Garbulsky (2008) citados por Gaitán, Bran y Azcona (2015), evaluaron cambios en el promedio anual, la estacionalidad y la inestabilidad

de la dinámica temporal (cambios abruptos) de la capacidad fotosintética de la vegetación, en algunas áreas protegidas de Sudamérica (Argentina, Bolivia, Brasil, Colombia, Ecuador, Perú, Paraguay y Venezuela) a través del NDVI. El análisis por países sugirió que las áreas protegidas de Paraguay, Bolivia y Argentina fueron las que mostraron el mayor porcentaje de cambio superficial negativos en el promedio anual de NDVI; mientras que Colombia, Ecuador y Brasil fueron los países con mayor porcentaje con cambios positivos dentro de sus áreas protegidas.

En cuanto a los biomas, el estudio arrojó que en los bosques húmedos la superficie con tendencias positivas también fue mayor que la de las negativas. En Colombia, la superficie con cambios positivos significativos fue mayor al 60% en estos ecosistemas; mientras que en Argentina y Paraguay, los bosques húmedos en áreas protegidas no presentaron cambios significativos. Los bosques secos, al contrario, presentaron una gran superficie de cambios negativos en Argentina, Bolivia y Paraguay, en los que la magnitud de las tendencias negativas superó a las positivas. En los arbustos, pastizales y sabanas las tendencias positivas fueron mucho más extendidas, pero la magnitud promedio de las tendencias negativas fue similar a la de las positivas. Nótese que esto último guarda relación con los resultados del estudio de Carrao, Sepulcre, Horion y Barbosa (2013).

Por otra parte, y de acuerdo a Manson, Loneragan y Phinn (2003) citados por Berlanga-Robles y Ruiz-Luna (2014), los bosques de mangle constituyen uno de los ecosistemas tropicales costeros más amenazados en la actualidad. Ellos son ecosistemas complejos y dinámicos caracterizados por sus altos niveles de diversidad biológica y productividad. Además, constituyen áreas de refugio y crianza para una amplia variedad de peces y fauna silvestre, desempeñan un papel fundamental en la protección de la línea de costa, la prevención de inundaciones, el mantenimiento de la calidad del agua y la recarga de agua de los mantos freáticos. Berlanga-Robles y Ruiz-Luna (2014), analizaron las tendencias de cambio del bosque de mangle del sistema lagunar Teacapán-Agua Brava en México, basadas en series de NDVI. Produjeron mapas temáticos de los humedales del sistema para generar los cambios a

nivel de paisaje. En todos los periodos analizados, el bosque de mangle mostró tendencias de cambio negativas.

2.2.6.4. Monitoreo de áreas quemadas

En materia de incendios, por más de dos décadas se ha usado tecnologías de percepción remota e imágenes de satélite para identificar áreas quemadas, cuyos principios se basan en la respuesta espectral de los depósitos de ceniza y carbón, provenientes de la combustión del material vegetal (Pereira, Sá, Sousa, Silva, Santos y Carreiras, 1999, citado por Ireland y Petropoulos, 2015). En México, cada año se presentan cuantiosos incendios forestales favoreciendo la deforestación de amplias extensiones de bosques templados, selvas tropicales y matorrales, además de favorecer al calentamiento global y disminución de la calidad de los servicios ambientales (Giglio, Schroeder y Justice, 2016). Con base a estas consideraciones, Manzo y López (2013), realizaron un estudio ajustando los índices espectrales pre y post-incendio NBR (Normalized Burn Ratio) y BAI (Burned Area Index) derivados del sensor MODIS, además del NDVI. Los resultados representaron una alternativa para examinar el patrón de distribución espacial y temporal de las áreas quemadas, así como identificar zonas de atención prioritaria en materia de incendios.

Por otro lado, el inicio y dispersión de los incendios en diferentes coberturas forestales se atribuye no sólo al uso tradicional del fuego en las actividades agrícolas y pecuarias (Ochoa-Gaona y González-Espinosa, 2000, citado por Mouillot, Schultz, Yue, Cadule, Tansey, Ciais y Chuvieco, 2014), sino también a la presencia de fenómenos meteorológicos como los huracanes que generan gran cantidad de material vegetal combustible (Ellis, Kainer, Sierra-Huelsz, Negreros-Castillo, Rodríguez-Ward y DiGiano, 2015), en combinación con periodos prolongados de sequía e incrementos de temperatura, ocasionados por la presencia del ENSO (Dildora, Toderich, Jarihani, Gafurov y Gismatulina, 2016). Esta situación ha dado lugar al monitoreo de extensas superficies quemadas de manera sistemática, proporcionando información espacial y temporal de gran utilidad para elaborar programas de reforestación y vigilancia de quemas agropecuarias.

En resumen, el empleo de técnicas de teledetección, específicamente basada en series temporales del NDVI, se ha incrementado en los últimos tiempos para examinar los cambios del funcionamiento o la actividad de los ecosistemas. La incidencia del cambio climático en la variabilidad de la vegetación demanda ser comprendida en todo el mundo, especialmente en América Latina por los ecosistemas que le caracterizan, así como para garantizar el manejo sustentable de los mismos, con énfasis en la conservación del patrimonio forestal, en la gestión integral de los recursos hídricos y en el aprovechamiento, manejo y conservación de la diversidad biológica (Millano y Paredes, 2016a). Sin embargo, en un contexto general, se requieren estudios más detallados basados en el uso de sensores a bordo de satélites con mayor resolución espacial.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

Se trató de una investigación no experimental, retrospectiva según el corte en el tiempo de estudio, correlacional según su finalidad, explicativa de acuerdo a el nivel de profundidad y amplitud de las variables estudiadas, cuantitativa según la naturaleza de los datos o información obtenida, de campo según el lugar donde se realizó la investigación; y, evolutiva en función a la evaluación del objeto que se estudió (Narváez, 1997; Balestrini, 2006; Pérez, 2006; Palella y Martins, 2006; Hernández, Fernández y Baptista, 2014).

3.2. UNIDAD DE ESTUDIO

A los efectos de la presente investigación, la Unidad de Estudio (UE) se ubica en la zona central y sur del estado Cojedes, entre las coordenadas $68^{\circ}58'48''\text{O}$ y $67^{\circ}51'00''\text{O}$, y $8^{\circ}31'48''\text{N}$ y $9^{\circ}43'48''\text{N}$, aproximadamente (Figura 7), la cual comprende la unidad fisiográfica planicie (Figura 2), cubriendo parte de los municipios Anzoátegui, Ezequiel Zamora, Rómulo Gallegos, Tinaco y Pao de San Juan Bautista y la totalidad de los municipios Ricaurte y Girardot. Forma parte de los Llanos Ondulados Centrales, Llanos Altos Centrales y las Llanuras Deltáicas Continentales (MPPA, 2011). La planicie abarca una superficie de 771.502 ha, “que representa el 55% de la superficie total de Estado. Se caracteriza por extensiones planas con desniveles inferiores a 10 m y pendientes que varían desde menores a 1 hasta 20%” (MPPA, 2011, p. 14); además, en ella, “dominan los aluviones con estabilidad baja a muy baja y presencia de acuíferos continuos de alto rendimiento y recarga” (MPPA, 2011, p. 15). Por otro lado, “morfogenéticamente esta unidad corresponde a medios de acumulación con problemas de inundación y excesos de agua por la acción fluvial que varían de fuerte a moderada dependiendo de la posición topográfica” (MPPA, 2011, p. 14).

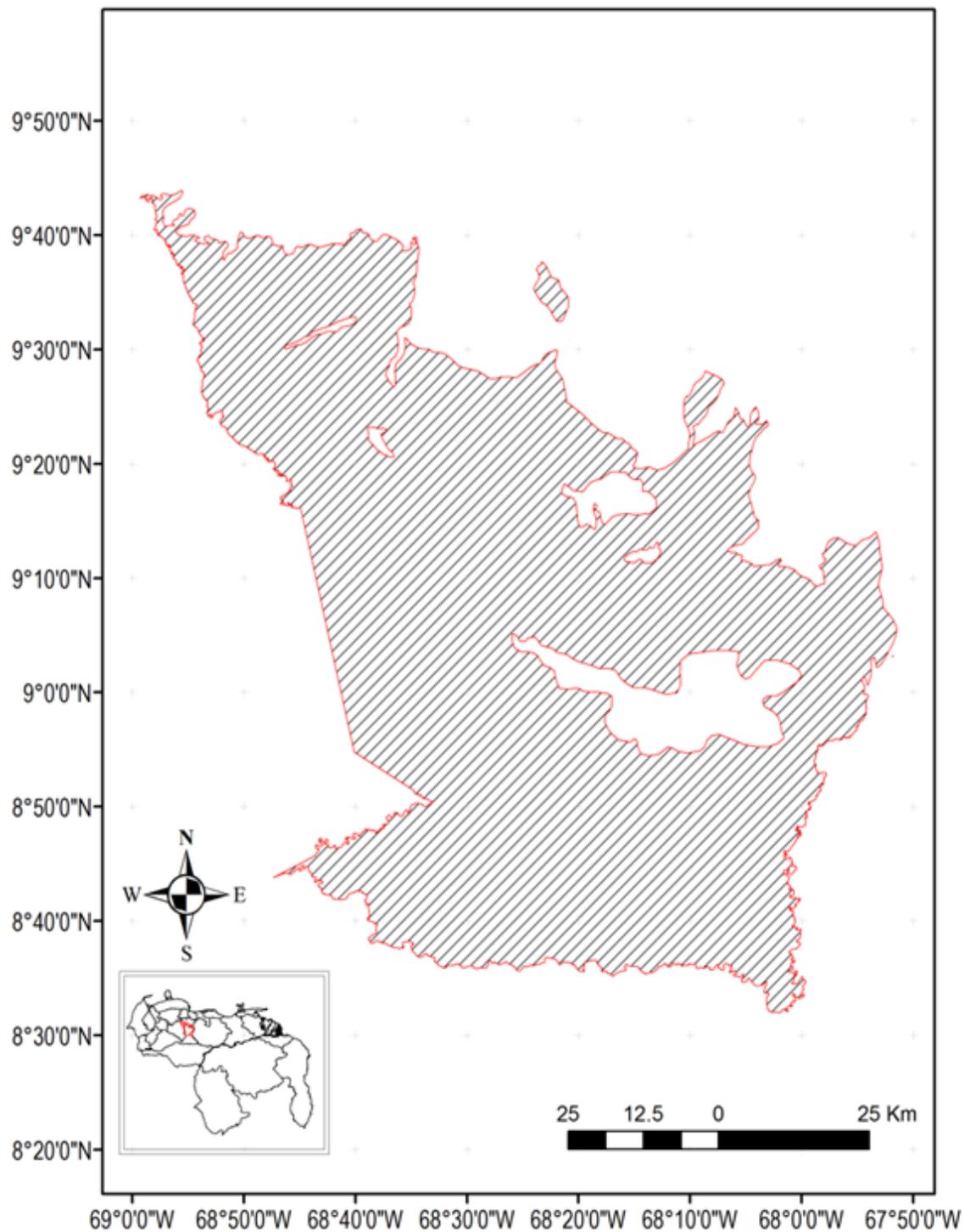


Figura 7. Unidad Fisiográfica Planicie del estado Cojedes y su ubicación relativa con respecto al territorio nacional.
Fuente: Adaptado del MPPA (2011).

En esta fisiografía, la vegetación prevaleciente es de gramíneas asociadas con bosques de estrechos tamaños conocidas con el nombre de matas; así como también la sabana agrupada o asociada con palmas principalmente Palma Llanera (*Copernicia tectorum*). Además, se encuentra la Curata (*Curatella americana*), ChaparroManteco (*Byrsonima crassifolia*) y el Alcornoque (*Bowdichia virgilioides*) constituyendo lo que se conoce como sabana de chaparros.

Estas sabanas llaneras han sido afectadas, tradicionalmente, por incendios provocados en la temporada de verano o periodo seco, para limpiar potreros como propósito primordial (Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables [MARNR], 1990); en cambio, en las sabanas abiertas, libre generalmente de árboles y palmas, predominan los pastos naturales, como la Paja Chigüirera (*Paspalum fasciculatum*), Lamedora (*Leersia hexandra*), Paja Velluda (*Trachypogon plumosus*), Paja Cabezona (*Paspalum virgatum*), entre otras (MARNR, 1990; MPPA, 2011; Vivas, Rumbo, Paredes y La Cruz, 2014). Otras formas de cobertura vegetal presentes en esta región se muestran en la Tabla 3.

Cabe destacar que esta UE fue seleccionada porque allí se concentra más del 50% de las actividades agrícolas del estado Cojedes (Fundación La Salle Campus Cojedes [FLASA-Cojedes], 2005; MPPA, 2011; Instituto Nacional de Estadística [INE], 2011; Vivas, Rumbo, Paredes y La Cruz, 2014; Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar [IGVSB], 2014); generándose con ellas, la pérdida de la cobertura boscosa tal como se planteó en el capítulo anterior en la sección 2.2.3.

3.2.1. Puntos de cobertura

Con la finalidad de identificar los patrones fenológicos de la vegetación existente en la UE, se seleccionaron cinco tipos de cobertura que estuviesen lo suficientemente distanciados unos de otros de tal forma que no se solaparan en la cobertura vegetal, pues se encuentran distribuidas geográficamente lo largo y ancho de la región, ni en la pluviometría respectiva. Los cinco tipos de cobertura seleccionados se describen en la Tabla 4 y se visualizan en la Figura 8.

Tabla 3

Formas de cobertura vegetal para la unidad fisiográfica planicie del estado Cojedes.

Formas de vegetación	Ubicación	Uso asociado
Bosque Ralo	Margen derecha del río Cojedes.	
Sabanas con Chaparros y Matas	Vertiente izquierda de la parte alta de la microcuenca del Caño Onoto, afluente del río Camoruco.	
Bosques Densos	Cuenca media y baja del río Cojedes en las aproximaciones del canal de riego (piloto)	
Bosque de Galería	Entre la margen derecho del río Camoruco y el canal de riego y también se encuentra en la vertiente izquierda de la cuenca media del río San Carlos.	Pastos intensivos y semi – intensivos,
Bosque Medio	Disperso en pequeñas unidades en la cuenca del río San Carlos, específicamente a la margen derecha y en la confluencia del río Pao con el río Portuguesa.	cultivos de riego, cultivos mecanizados
Sabanas Inundables	Margen derecha del río San Carlos en las adyacencias del sector El Muertico, Campo Alegre, así como a ambos lados de la confluencia de los ríos Portuguesa y Pao.	bajo riego y cultivos medio.
Bosque Ralo con Chaparro	Entre las microcuencas de las quebradas: La Catalda, Las Minas, Camoruquito, las cuales pertenecen a la subcuenca del río Camoruco.	
Matorrales	Confluencia del río Portuguesa y río Pao, margen derecha del río Portuguesa y margen izquierda del Caño Igués.	

Fuente: Adaptado de PDVSA (2001) y Equipo POTEK (2008) citado por MPPA (2011).

Tabla 4

Localización de los cinco tipos de cobertura analizados en la unidad fisiográfica planicie del estado Cojedes.

N°	Cobertura	Coordenadas Geográficas	
		Canoa	Regven
P1	Bosque ralo con chaparro	09°37'25,69''N	09°37'14,24''N
		68°41'00,08''O	68°41'06,96''O
P2	Bosque de galería	09°26'59,10''N	09°26'47,65''N
		68°23'53,57''O	68°24'00,42''O
P3	Bosque medio	09°07'49,44''N	09°07'37,99''N
		67°53'23,59''O	67°53'30,37''O
P4	Sabana inundable	08°55'54,29''N	08°55'42,81''N
		68°32'42,39''O	68°32'49,23''O
P5	Matorral	09°00'50,71''N	09°00'39,24''N
		68°34'14,39''O	68°34'21,25''O

Elaboración Propia.

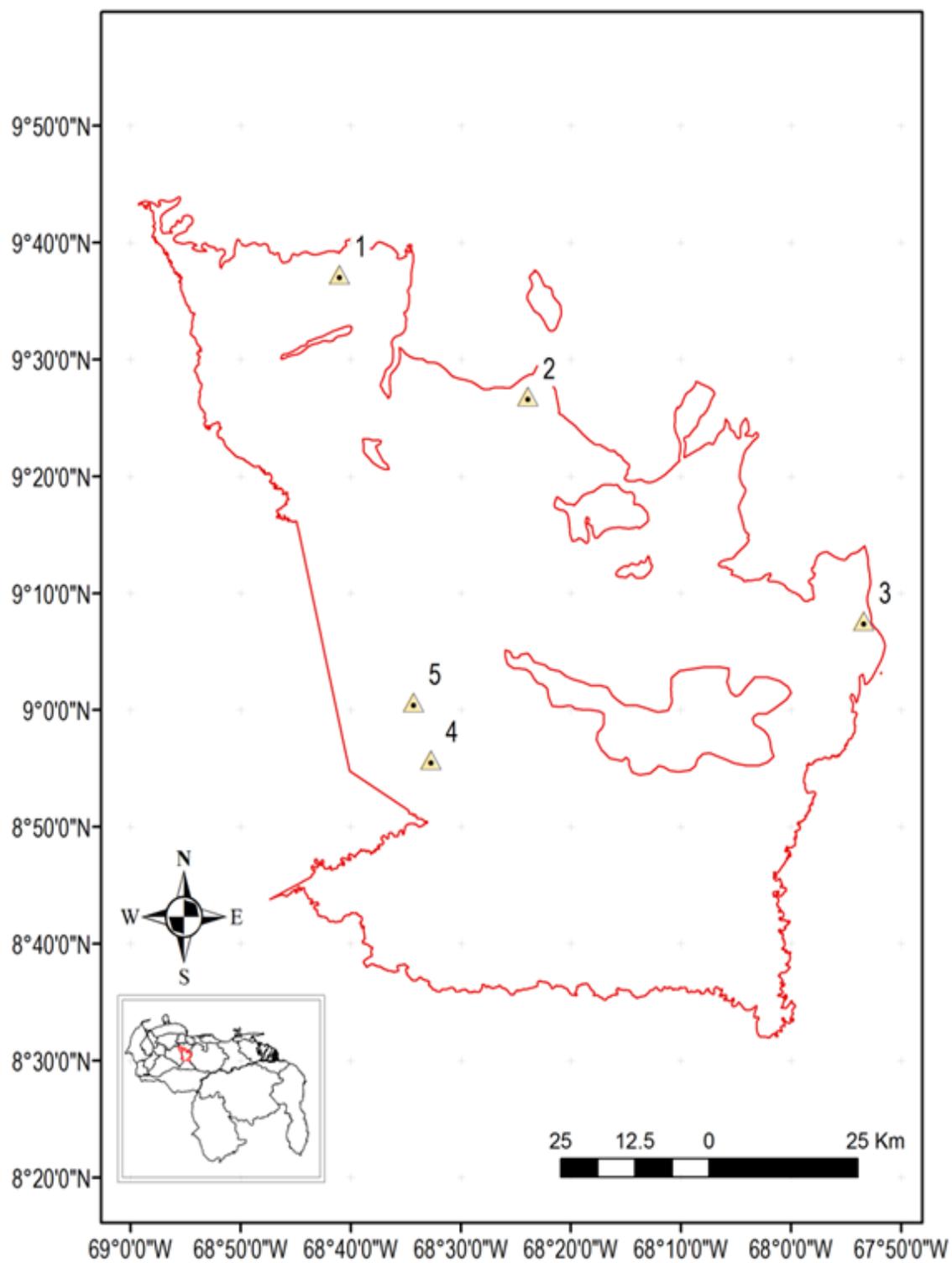


Figura 8. Ubicación de los cinco puntos de cobertura analizados dentro de la UE.
Fuente: Adaptado del MPPA (2011).

3.2.1.1. Descripción de la vegetación en los puntos de cobertura

Las sucintas descripciones que a continuación se precisan de los puntos de cobertura analizados en esta investigación, se derivan del Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales para la Ordenación del Territorio (MARNOT, 2007), citado por el MPPA (2011, Pp. 100-135):

Entre los tres primeros puntos de cobertura se tiene: a) El Bosque ralo con chaparro que “se caracteriza por una densidad de cobertura menor del 50% de asociación de bosques y matorrales, con una fuerte intervención por conucos agrícolas”; b) El Bosque de galería que es una “formación vegetal pluriestratificada que se desarrollan en las planicies aluvionales o de desborde de los cursos de agua (márgenes y áreas de influencia freática)”; y, c) El Bosque medio que es “una formación vegetal natural generalmente pluriestratificada ... predominan formas de vida arbórea, donde la altura del dosel del bosque está entre los 15 – 25 m de altura y la densidad de cobertura se interrumpe entre el 50% y 75%”.

Los dos últimos puntos de cobertura estudiados fueron: d) La Sabana inundable que se caracteriza por ser una “vegetación constituida por una mayor proporción de sabanas a lo largo de ríos y quebradas que la atraviesan”; y, e) El Matorral que es una “comunidad vegetal dominada por elementos mayormente arbustivos y arbóreos bajos, con dosel irregular, aproximadamente entre 3 a 8 metros de altura, término aplicado a las comunidades secundarias (ej. Bosques muy degradados)”.

3.3. MATERIALES

3.3.1. Imágenes de NDVI derivadas de Terra-MODIS

En este estudio se usaron series temporales de NDVI para el período 02/2000-02/2016, derivado de la reflectancia superficial del producto estándar Terra-MODIS MOD09Q1 distribuido por la NASA (disponibles en <https://gimms.gsfc.nasa.gov>), bajo formato de archivo GeoTIFF y con una cobertura mundial de 180° O a 180° E y 80° N a 60° S, a una resolución espacial de 250 m, intervalo temporal de 8 días a lo

largo de cada año del lapso establecido y previamente corregidas radiométricamente, geométricamente y por interferencia de nubes, cuerpos de agua y aerosoles, por la misma NASA. Cabe destacar que aunque el MODIS fue lanzado al espacio en diciembre de 1999, sus primeras imágenes iniciaron a partir de febrero de 2000, lo que justifica plenamente el comienzo del periodo temporal seleccionado para este estudio. Dicho periodo culminó en febrero de 2016, fecha corte establecida para el procesamiento de los datos correspondientes. Asimismo, la alta resolución espacial del MODIS-Terra fue la característica clave en la escogencia de las series temporales de sus imágenes satelitales para la ejecución de esta tesis doctoral.

Para el periodo de estudio arriba indicado, cada raster del producto MOD09Q1 fue cortado usando como máscara un archivo shapefile de la UE. Esta tarea se realizó con el software libre SAGA GIS (www.saga-gis.org). De esta forma, se contó con un raster de la UE cada 8 días. Estos últimos fueron agregados mensualmente tomando como criterio de agregación, el NDVI máximo a nivel de pixel. Es decir, se obtuvo un raster con el NDVI máximo para cada mes i ($i = 1...12$) y año k ($k = 2000...2016$). Finalmente, se generaron 193 raster de NDVI máximo (uno por mes).

Es menester acotar que el NDVI utilizado en esta investigación fue procesado y producido por el Grupo de Estudios de Mapeo y Modelado de Inventarios Globales (GIMMS) del Centro Goddard de Vuelos Espaciales de la NASA, con el financiamiento del Proyecto de Monitoreo Agrícola Global por el Servicio Agrícola Exterior (FAS, por sus siglas en inglés) del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés) (NASA, 2008).

3.3.2. Estimaciones de la precipitación derivadas del producto 3B42RT

Las estimaciones de precipitación mensual, expresadas en mm, fueron extraídas del producto satelital 3B42RT versión 7 de la NASA, aplicando un procedimiento similar descrito en la sección precedente. El 3B42RT es un producto de precipitación cuadrículada con un área de cobertura de 60° N – 60° S en tiempo real; además, posee resolución temporal de 3 horas y resolución espacial de $0,25^{\circ}$ x $0,25^{\circ}$ dentro del cinturón mundial (dominio) de 50° S a 50° N y corregido previamente mediante

observaciones pluviométricas, descripciones éstas también expresadas en el capítulo anterior. La UE no cuenta con estaciones pluviométricas bien distribuidas espacialmente, ni completas a lo largo del periodo analizado (Paredes, 2009), por esta razón se usó el producto arriba mencionado, el cual ha sido aplicado en muchas investigaciones (Su *et al.*, 2008; Wu *et al.*, 2012; Yong *et al.*, 2010; citados por Chen, 2013).

3.4. MÉTODOS

Esta investigación se desarrolló por fases, tres en total, vinculadas a los tres objetivos específicos que se plantearon en la sección 1.4.2. Pues bien, en cada fase se aplicaron métodos los cuales se detallan a continuación:

3.4.1. Análisis de los patrones temporales de la variabilidad de NDVI en la unidad fisiográfica planicie del estado Cojedes, Venezuela

Se calculó, inicialmente, el NDVI máximo promedio mensual para toda la UE desde 02/2000 hasta 02/2016. Para obtener un valor del NDVI representativo, solo se consideraron aquellas imágenes que presentaron un porcentaje de cobertura de nubes inferior al 20%. Los meses donde no se cumplió este criterio, no fueron tomados en cuenta para este análisis. Luego, tomando como referencia esta serie de tiempo y suponiendo que la muestra proviene de una población con distribución normal de Gauss para considerar que la media es representativa de los datos, se computó el promedio aritmético, la desviación estándar, el valor mínimo, el valor máximo y la amplitud de variación del NDVI. Estos atributos resumen la mayor parte de la variabilidad temporal de la dinámica del NDVI de un área (Paruelo, Piñeiro, Oyonarte, Alcaraz, Cabello y Escribano, 2005).

Para cada año del período de estudio establecido, los valores mínimos y máximos corresponden a los valores extremos encontrados, “el NDVI medio indica el valor promedio de funcionamiento del ecosistema en el período estudiado” (Iglesias, Barchuk y Grilli, 2010, p. 48) y la desviación estándar muestra qué tan agrupados están los datos; es decir, si hay mucha variabilidad o no, alrededor de la media o

promedio aritmético. Por otro lado, la amplitud responde a la diferencia entre los valores máximos y mínimos de NDVI registrados por año durante el período de tiempo establecido.

Finalmente, se describió de qué manera varió el NDVI, año por año, en el período de estudio.

3.4.2. Análisis de los patrones espaciales de la variabilidad de NDVI en la unidad fisiográfica planicie del estado Cojedes, Venezuela

Primeramente se calculó el NDVI máximo promedio mensual en cada pixel dentro la UE desde 02/2000 hasta 02/2016, generándose 12 mapas, uno por cada mes de año. Luego, dichos mapas se ordenaron de acuerdo a su ocurrencia: desde enero y hasta diciembre sucesivamente. Seguidamente, se hizo un manejo en ArcGis 10 con superposición de diferentes capas temáticas (hidrología, vegetación y uso actual de las tierras) haciendo uso de la herramienta análisis espacial de dicho programa. Las referidas capas temáticas fueron proporcionadas por el Sistema de Información Geográfico para el Ordenamiento Territorial (SIGOT) del MPPA (Hoy Ministerio del Poder Popular para el Ecosocialismo y Agua). Por último, se describió la variación del verdor de la vegetación a lo largo del período de estudio.

3.4.3. Relación de la dinámica temporal del NDVI con las precipitaciones en la unidad fisiográfica planicie del estado Cojedes, Venezuela

Se extrajo, previamente, los valores mensuales de NDVI máximo y de precipitación en cada punto de cobertura (Tabla 4), desde 02/2000 hasta 02/2016. Ambas series fueron arregladas en pares mensuales. Luego, se calculó el coeficiente de correlación de Pearson para cada mes del año. Los resultados fueron analizados con énfasis en la magnitud de la correlación y su signo. La significancia estadística fue verificada por medio de una prueba t de Student de dos vías a un nivel de confianza del 95% (De La Garza, Morales y González, 2013; Ruiz, M., 2016).

CAPÍTULO IV

DESCRIPCIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. ANÁLISIS DE LOS PATRONES TEMPORALES DE LA VARIABILIDAD DE NDVI EN LA UNIDAD FISIOGRAFICA PLANICIE DEL ESTADO COJEDES, VENEZUELA

A nivel general, el comportamiento temporal del NDVI a lo largo del período considerado corresponde directamente al régimen climático que impera en la UE (establecido previamente tal como se indica en la sección 4.3.1.), fundamentalmente en su relación con el elemento de la precipitación (Tabla 5). Es notorio que los valores promedio mensuales más bajos de NDVI se registraron en el período seco y los valores promedio mensuales más altos en el período lluvioso. De hecho, el NDVI evidenció una marcada estacionalidad para todos los años estudiados. Resultancia ésta que coincide con la de Iglesias, Barchuk y Grilli (2010). Los valores NDVI indicaron un buen funcionamiento de la vegetación, mejor decir, una cobertura de vegetación activa en todos los años (NDVI por encima de 0,400); a excepción del año 2010 con un valor mínimo de 0,398 pero muy próximo a aquél y como era de esperarse, los valores más altos se observaron en el período lluvioso y en las temporadas de transición. La estacionalidad pluviométrica es clara, evidente y concuerda con los valores mayores y crecientes del NDVI.

En los 16 años de estudio, los valores promedio mensuales mínimos de NDVI se registraron en el mes de marzo, en pleno período seco, a excepción de los años 2006, 2011, 2012 y 2015 que se observaron en febrero, un mes antes. Dichos años cuentan con un solo valor referencial de NDVI en el período señalado debido a la presencia de nubes en la UE; quizás este hecho pudiese explicar tal eventualidad. El valor más bajo recayó en el año 2010, año en que, según Millano y Paredes (2013), el territorio venezolano experimentó una fuerte sequía desde agosto de 2009. Le siguen los años 2001, 2002 y 2003 que de acuerdo a Paredes (2012) y Quiroz (2016), también fueron años con severas sequías meteorológicas.

Tabla 5

NDVI promedio mensual para la UE en el período 02/2000 al 02/2016.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Media	Desviación Estándar	Mín	Máx	Amplitud
2000	NA	*	0,503	*	*	0,778	0,801	0,773	0,788	*	0,766	0,709	0,731	0,105	0,503	0,801	0,300
2001	0,630	0,505	0,453	*	0,697	0,738	0,808	0,799	0,795	0,780	0,748	0,743	0,700	0,121	0,453	0,808	0,360
2002	0,724	0,572	0,450	*	*	*	0,767	0,795	0,819	0,777	0,773	0,718	0,711	0,121	0,450	0,819	0,370
2003	0,618	0,517	0,438	*	*	*	0,789	0,819	*	0,790	0,787	0,723	0,685	0,144	0,438	0,819	0,380
2004	0,662	0,549	0,452	*	*	0,751	0,789	0,753	0,778	0,755	0,762	0,734	0,699	0,112	0,452	0,789	0,340
2005	0,679	0,592	0,490	*	*	0,818	0,787	0,812	0,788	*	0,742	0,744	0,717	0,111	0,490	0,818	0,330
2006	0,674	0,572	*	*	*	0,795	0,770	0,799	0,777	*	0,769	0,738	0,737	0,078	0,572	0,799	0,230
2007	0,674	0,569	0,471	*	*	0,769	0,781	0,783	0,790	*	0,772	0,721	0,703	0,113	0,471	0,783	0,310
2008	0,643	0,522	0,453	*	*	0,755	0,775	0,796	0,815	0,775	0,776	0,750	0,706	0,125	0,453	0,815	0,360
2009	0,659	0,608	0,509	*	*	*	0,769	0,805	0,803	0,776	0,747	0,691	0,707	0,100	0,509	0,805	0,300
2010	0,574	0,449	0,398	*	0,733	*	0,782	0,776	0,780	0,764	0,751	0,757	0,676	0,147	0,398	0,782	0,460
2011	0,724	0,601	*	*	*	*	0,793	0,790	0,775	0,754	0,762	0,775	0,747	0,063	0,601	0,793	0,190
2012	0,686	0,570	*	*	0,743	0,801	0,763	0,791	0,784	0,764	0,744	0,697	0,734	0,069	0,570	0,801	0,230
2013	0,630	0,525	0,450	*	0,684	0,768	0,791	0,798	0,800	0,756	0,744	0,725	0,697	0,117	0,450	0,800	0,350
2014	0,613	0,494	0,427	*	*	0,731	0,794	0,811	0,789	0,778	0,763	0,715	0,692	0,135	0,427	0,811	0,380
2015	0,644	0,538	*	*	*	0,685	0,804	0,797	0,791	0,772	0,746	0,727	0,723	0,088	0,538	0,804	0,270
2016	0,618	0,459															

NA: No aplica. No entra en el período de estudio.

*Meses con más de 20% de nubosidad. Los valores de NDVI promedio mensual no se tomaron en cuenta.

Régimen climático en la UE: Periodo de transición Período seco Período lluvioso

Elaboración Propia.

Por su parte, los valores promedio mensuales máximos fluctuaron entre los meses de julio y septiembre, a excepción de los años 2005 y 2012 que se observaron en junio finalizando la transición entre los períodos seco y lluvioso, pero con mínimas diferencias con respecto a los valores del mes de agosto (pleno período lluvioso) respectivamente. Curiosamente, 2005 y 2012 también experimentaron fuertes sequías (Paredes, 2012 y Millano, 2013; respectivamente). Probablemente este comportamiento se debe al estrés hídrico presente en la UE en esos años y que con la ocurrencia de las primeras precipitaciones en la transición de seco a lluvioso, la vegetación recuperó su verdor rápidamente. Los meses de julio y agosto presentaron, esencialmente, los NDVI promedio mensuales mayores en el lapso estudiado; siendo 2002 y 2003, los años con el valor más alto de forma simultánea, seguidos de 2005, 2008 y 2014 respectivamente.

Por otro lado, los valores promedio mínimos y máximos de NDVI fueron muy variables en los años considerados, resultado cónsono con los de Iglesias, Barchuk y Grilli (2010). Los años 2001, 2002, 2003, 2005, 2009, 2014 y 2015 evidenciaron valores promedio máximos de NDVI notablemente superiores a la media durante el período lluvioso; resultado inesperado pues todos ellos, a excepción de 2014, fueron años secos; es decir, con fuertes sequías. Esta anomalía pudiese estar sujeta a la presencia de eventos climáticos como tormentas tropicales y NIÑA. Los años 2001, 2002, 2003, 2004, 2007, 2008, 2010, 2013 y 2014 registraron valores promedio mínimos de NDVI preclaramente por debajo de la media casualmente en marzo, justamente en la mitad del período seco. Nótese que 2001, 2002, 2003 y 2014, coinciden en poseer, al mismo tiempo, los valores promedio mínimos y máximos de NDVI.

Los años 2003, 2005, 2009 y 2014 agrupan los valores de NDVI en un 95% dentro de 2σ ; el resto de los años están fuera de este rango, lo que estadísticamente es aceptable por la gran variabilidad de los valores NDVI entre el mínimo y el máximo, tal como se expresó a comienzo del párrafo anterior. Esta tendencia va en relación con la amplitud de los NDVI. Por lo general, la amplitud es menor en los años secos en virtud del estrés hídrico de la vegetación; sin embargo, no se observa una

disminución considerable del NDVI promedio en los años secos del período de estudio. Los años con menor amplitud de NDVI fueron: 2007, 2000, 2009, 2015, 2006, 2012 y 2011, en orden numérico descendiente. De igual manera, 2001, 2002, 2003, 2014 y 2010 fueron los años con mayor amplitud, años éstos que se indicaron líneas arribas con sequías severas, exceptuando a 2014. Obviamente se deduce que 2011 y 2010 posee la menor y mayor amplitud respectivamente. Iglesias, Barchuk y Grilli (2010), también llegaron a esta misma consideración.

Finalmente, se evidencia que la magnitud de los atributos examinados obedece a la disponibilidad de agua; y en el caso concreto del atributo amplitud de NDVI, su variación entre años es considerable; es doble entre 2010 y 2006, 2010 y 2012, 2003 y 2011; y, 2014 y 2011. Esta particularidad pudiese entenderse por la presencia de años muy secos o en su defecto, muy húmedos entre sí.

La variabilidad de los valores promedio mensuales de NDVI descrita anteriormente a lo largo del período de estudio, evidencia el crecimiento de la vegetación de la UE y sirve de base para relacionarla con el comportamiento pluviométrico de dicha zona o área geográfica.

4.2. ANÁLISIS DE LOS PATRONES ESPACIALES DE LA VARIABILIDAD DE NDVI EN LA UNIDAD FISIOGRAFICA PLANICIE DEL ESTADO COJEDES, VENEZUELA

En líneas generales y al igual como se indicó en el análisis temporal en la sección precedente, el comportamiento espacial del NDVI en el período de estudio está en correspondencia continua con el régimen climático de la unidad fisiográfica planicie del estado Cojedes, esencialmente con la precipitación (Figura 9). A simple vista, los meses de febrero, marzo y abril presentaron los valores más bajos de NDVI (coloración amarillenta) y los meses de julio, agosto y septiembre registraron los valores más altos (coloración verdosa más intensa). Los 12 mapas en conjunto, muestran que las tendencias ascendente y descendente en el verdor de la vegetación responden, en gran medida, al período seco y al período de lluvia: El mes de marzo es el mes con los NDVI más bajos y el mes de agosto con los NDVI más altos, resultado

éste consistente con el del análisis temporal. La modulación del NDVI por parte de las lluvias es un resultado consistente con los de Barbosa, Huete y Baethgen (2006) para la región nordeste de Brasil, gran parte del cual es semiárido.

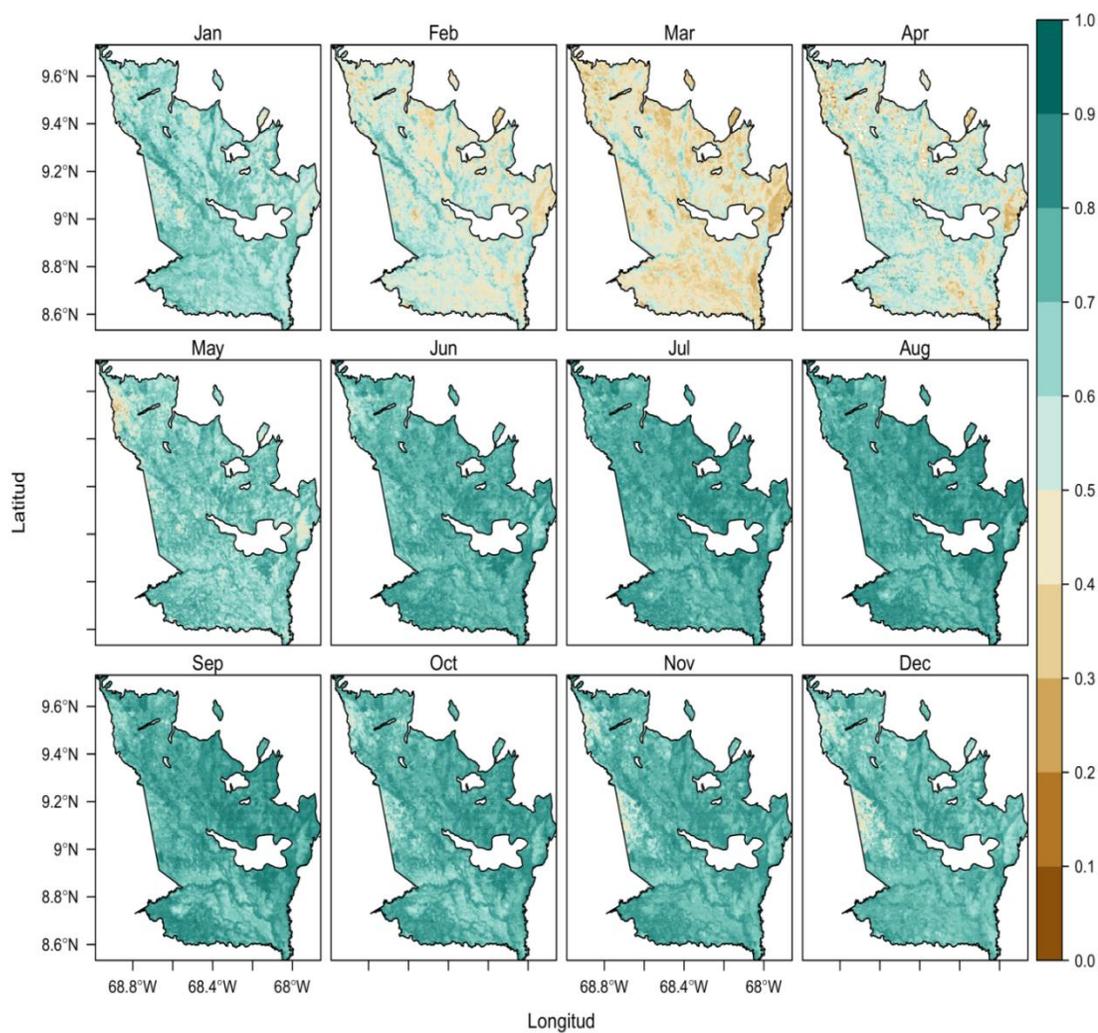


Figura 9. Promedio mensual del NDVI máximo en la unidad de estudio para el período 02/2000 al 02/2016.

Nota: Período seco: Febrero, marzo y abril. Período lluvioso: Julio, agosto y septiembre. Resto de meses: Meses de transición entre un período y otro.

Elaboración Propia.

Los valores más altos de NDVI, reflejados en las zonas de más intensidad de verdor, se observan en las partes norte y sur de los cerros de El Bául (centro-este), alrededor de los ríos y en el extremo inferior izquierdo de la planicie. La primera

zona, en la parte norte, corresponde a Bosques Medios decretados como Áreas Bajo Régimen de Administración Especial (ABRAE) bajo la figura de áreas con vocación forestal, y a plantaciones con vocación forestal; la parte sureña, pertenece al bosque Los Caballos, un bosque natural y el más protegido en el estado Cojedes (Vivas, I. 2017. Com. Personal), ubicado en Hato Piñero. La segunda y la tercera zona, corresponden a los Bosques de Galería presentes en los ríos: Cojedes, San Carlos, Tinaco, Pao y Portuguesa; y al Bosque de Galería de Caño Igüés respectivamente. Este comportamiento era esperable, pues los bosques de galería están asociados a los cursos de agua. En efecto, la dinámica del NDVI estaría explicada por la disponibilidad natural de agua y a la poca intervención antropogénica en estas áreas, a excepción del bosque Los Caballos que es un bosque natural tal como expresó anteriormente.

Los valores más bajos de NDVI están reflejados en las zonas de menor intensidad de verdor incluyendo las de color amarillo ocre. De manera general, estas zonas corresponden a Bosques Bajos, Bosques Ralos con Chaparro, Sabanas Inundables y Matorrales, todas intervenidas. El estrés hídrico, aunado a la presencia de especies deciduas en los bosques y el factor antropogénico, son elementos esenciales que pudiesen justificar este comportamiento.

La parte centro-oeste de la UE corresponde a lo que antiguamente fue la reserva forestal de Turén y que en la actualidad no tiene bosque; está intervenida y sometida a un uso intenso agrícola con cultivos de riego cruzados con Bosques Bajos y Ralos, pues sus suelos son buenos y bien drenados (Vivas, I. 2017. Com. Personal). También hay cultivos mecanizados bajo riego. El mismo caso se presenta en la zona norte y oeste de la planicie, aunque aquí solo hay cultivo de riego.

En la parte centro-norte y sur-este de la planicie, se consigue el Bosque Ralo con Matorrales. Este tipo de bosque está muy intervenido y afectado principalmente por incendios como medida agropecuaria para erradicar maleza y vectores (garrapatas) (Alcalá, D. 2017. Com. Personal). Hay cultivos semipermanentes y ganadería intensiva y extensiva. Específicamente, la zona centro-norte está muy influenciada por la dinámica urbana de la ciudad de San Carlos (Vivas, I. 2017. Com. Personal).

El área que se encuentra en el centro-este, justo al este de los cerros de El Baúl, es donde el NDVI registra sus valores mínimos. Allí predominan Sabana Inundable y Matorrales, con suelos clasificados como vertisoles con dos características relevantes: Pendiente plana (0-3 %) y pobres a muy pobres drenados (MPPA, 2011). Es una zona con alta actividad de ganadería extensiva. El estrés hídrico y las actividades pecuarias muy probablemente influyen en la disminución de los valores del NDVI.

Finalmente, en la zona central de la planicie se evidencia una clara variabilidad del NDVI. En toda ella, hay ganadería intensiva y extensiva cruzadas por Bosques de Galería (Vivas, I. 2017. Com. Personal).

A juzgar por los resultados, la variabilidad espacial del NDVI en la planicie del estado Cojedes en el período de estudio, está asociada a la estacionalidad de la ocurrencia de las lluvias; sin embargo, es posible que los cambios en el estado de la vegetación, podría relacionarse, potencialmente, con las actividades antropogénicas. Esta consideración fue sugerida por Barbosa, Huete y Baethgen (2006) en el nordeste de Brasil, donde esta característica fue observada.

4.3. RELACIÓN DE LA DINÁMICA TEMPORAL DEL NDVI CON LAS PRECIPITACIONES EN LA UNIDAD FISIOGRÁFICA PLANICIE DEL ESTADO COJEDES, VENEZUELA

4.3.1. Variabilidad temporal del NDVI y de la precipitación en los cinco tipos de cobertura estudiados

El análisis de las series de precipitación mensual en los puntos de cobertura estudiados (Tabla 4), arrojó que el período seco corresponde a los meses: febrero, marzo y abril; el período lluvioso va de julio a septiembre. Por lo tanto, los demás meses del año se tomaron como meses de transición entre un período y otro, lo cual es consistente con lo indicado por Paredes (2009) para la UE (Tabla 6). Dichas series de precipitación mensual se muestran en las Figuras 10, 11, 12, 13 y 14, en los paneles superiores. Cada curva revela la variación estacional de la precipitación en los puntos de cobertura estudiados respectivos.

Tabla 6

Precipitación media mensual (expresada en mm/mes) en los cinco puntos de cobertura estudiados en el período 02/2000-02/2016.

Mes	P1	P2	P3	P4	P5
Enero	12,766	7,330	3,207	6,808	7,343
Febrero	5,238	4,533	1,922	4,976	4,990
Marzo	33,494	30,917	12,092	36,171	37,839
Abril	83,991	80,949	68,197	85,802	83,956
Mayo	228,251	219,504	194,481	242,471	236,247
Junio	214,204	221,305	196,052	267,544	256,625
Julio	300,287	326,744	309,277	383,881	367,505
Agosto	235,439	244,679	254,233	258,273	253,685
Septiembre	168,272	182,406	184,517	192,836	188,109
Octubre	136,342	144,094	131,361	203,618	182,505
Noviembre	144,041	134,271	111,255	109,298	121,866
Diciembre	42,821	33,569	25,589	25,875	30,847

Nota: Celdas en color rosa indican el período seco; las de color azul indican el período lluvioso; y, las de color verde indican los meses de transición entre un período y otro.

Elaboración Propia.

Para el análisis de los patrones mensuales de variabilidad del NDVI a lo largo de la UE para el período 02/2000-02/2016, se tomaron en cuenta los NDVI promedios mensuales en cada punto de cobertura estudiados (Tabla 7). Dichos patrones mensuales de variabilidad del NDVI se expresan en las mismas figuras indicadas en el párrafo anterior, en los paneles inferiores. Las cinco curvas allí trazadas siguen variaciones temporales similares, pero difieren claramente en amplitud. En escala estacional, muestran picos (meses de aumento de NDVI) y valles (meses de disminución de NDVI) en los períodos lluvioso y seco, respectivamente; los picos aparecieron durante julio, agosto, septiembre y octubre; mientras que los valles ocurrieron durante febrero, marzo y abril. Las variaciones en los valores de NDVI entre las curvas reflejan, posiblemente, el efecto de la variabilidad de las precipitaciones en la dinámica de la vegetación, que pudiese ser indicativo de

cambios ambientales. Resultado éste que concuerda con los hallazgos de Barbosa, Huete y Baethgen (2006).

Tabla 7

NDVI promedio mensual en los cinco puntos de cobertura estudiados en el período 02/2000-02/2016.

Mes	P1	P2	P3	P4	P5
Enero	0,597	0,823	0,580	0,677	0,489
Febrero	0,484	0,732	0,427	0,590	0,396
Marzo	0,412	0,681	0,355	0,479	0,347
Abril	0,433	0,748	0,395	0,679	0,502
Mayo	0,608	0,832	0,691	0,724	0,629
Junio	0,667	0,867	0,733	0,771	0,672
Julio	0,636	0,869	0,794	0,796	0,693
Agosto	0,669	0,891	0,803	0,790	0,686
Septiembre	0,675	0,884	0,837	0,775	0,693
Octubre	0,698	0,869	0,787	0,774	0,657
Noviembre	0,700	0,867	0,734	0,766	0,668
Diciembre	0,685	0,857	0,695	0,742	0,591

Nota: Celdas en color rosa indican el período seco; las de color azul indican el período lluvioso; y, las de color verde indican los meses de transición entre un período y otro.

Elaboración Propia.

En el Bosque Ralo con Chaparro las precipitaciones variaron desde 5 mm hasta 301mm; recayendo el valor mínimo (5,238 mm) en el mes de febrero (entrada del período seco) y el mayor valor (300,287 mm) en el mes de julio (entrada del período lluvioso). Entre los meses abril y noviembre, hubo ocurrencias de lluvias; es decir, saliendo del período seco comenzaron las precipitaciones y perduraron hasta los meses octubre y noviembre (meses de transición entre el período lluvioso y el seco), con sus fluctuaciones respectivas. Se destaca que en la estación transitoria entre seco y lluvioso, el mes de mayo tuvo la mayor precipitación (228,251 mm); en el período lluvioso lo hubo en el mes de julio (300,287 mm) como se indicó al principio del

párrafo. En la transición de lluvioso a seco, noviembre registró el mayor valor de precipitación: 144,041 mm (Figura 10 panel superior).

Por otra parte, en este bosque se observó que los valores del NDVI variaron de +0,412 a +0,700 a lo largo del período de estudio; el menor valor correspondió al mes de marzo (en pleno período seco) y el mayor, al mes de noviembre (período de transición) (Figura 10 panel inferior). Es notorio que el NDVI varió de +0,600 a +0,700 en los meses de transición entre los períodos seco y lluvioso, durante el lluvioso y en los meses de transición entre las estaciones de lluvia y seca, a excepción de enero que tuvo un valor de +0,597; es decir, desde mayo hasta diciembre. Ocurrió una disminución considerable de los valores del NDVI durante el período seco (entre +0,400 y +0,500). Esta respuesta sugiere que el Bosque Ralo con Chaparro tiende a intensificar su verdor al término del período seco, conservándolo hasta final del año.

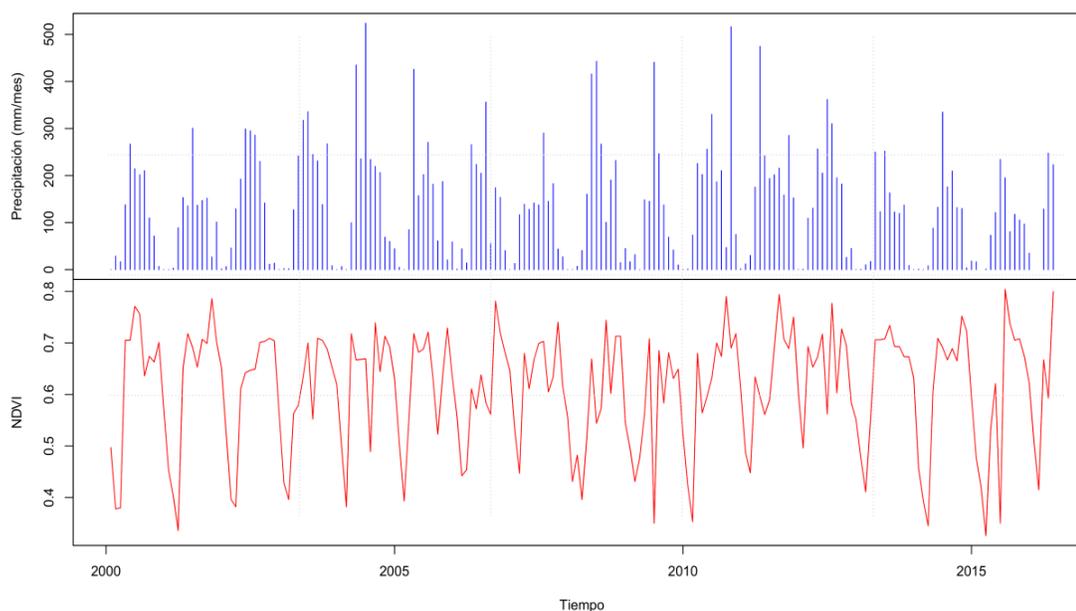


Figura 10. Variación temporal mensual de la precipitación (panel superior) y el NDVI (panel inferior) para la cobertura Bosque Ralo con Chaparro durante el periodo 2000-2016.

Nota: Cada barra del panel superior corresponde a un valor mensual de precipitación. Elaboración Propia.

A juzgar por estos resultados, en la cobertura Bosque Ralo con Chaparro se observa una clara tendencia asociada a la estacionalidad de las lluvias: en el período lluvioso, entre julio y septiembre, e incluyendo la transición de seco a lluvia (mayo y junio) y la transición de lluvioso a seco (octubre, noviembre y diciembre), los valores de NDVI se mantienen por encima de +0,600, pero justo cuando los valores de la precipitación comienzan a disminuir en el período de transición de lluvia a seco y comenzando el período seco propiamente dicho, disminuyen también los valores de NDVI. Es necesario destacar que aunque en los meses de diciembre, enero y febrero la disminución de lluvia es drástica (42,821 mm; 12,766 mm y 5,238 mm respectivamente), el NDVI se mantiene entre +0,480 y +0,600. Este hecho puede estar asociado a riegos por la actividad agrícola propia de este tipo de cobertura, ya que la precipitación es mínima en este período.

Ahora bien, la variación de la precipitación en la cobertura Bosque de Galería fue muy similar a la del Bosque Ralo con Chaparro: el valor pluviométrico más alto se mantiene en el mes de julio, en este caso con 326,744 mm; el valor mínimo en febrero con 4,533 mm. Llama la atención que los valores de precipitación desde el mes de noviembre y hasta el mes de mayo (transición de lluvioso a seco y todo el período seco) son relativamente más bajos que en la cobertura anterior, y desde el mes de junio y hasta el mes de octubre los valores de lluvia son relativamente más altos (Figura 11 panel superior).

Similar comportamiento del NDVI se observó también en este bosque (Figura 11 panel inferior). En los meses de transición entre los períodos seco y lluvioso y viceversa, y en el período lluvioso, los valores del NDVI estuvieron entre +0,800 y +0,900, siendo agosto el mes con el valor más alto: +0,891. A diferencia de la cobertura anterior, el NDVI más alto se presenta en el período lluvioso. En los meses transitorios octubre, noviembre y diciembre, prácticamente el NDVI mantuvo su valor. Los valores más bajos de NDVI (entre +0,650 y +0,750) están en el período seco. Los valores NDVI son más altos que los observados en el Bosque Ralo con Chaparro. Esta variación pudiese ser modulada por la disponibilidad de agua en el

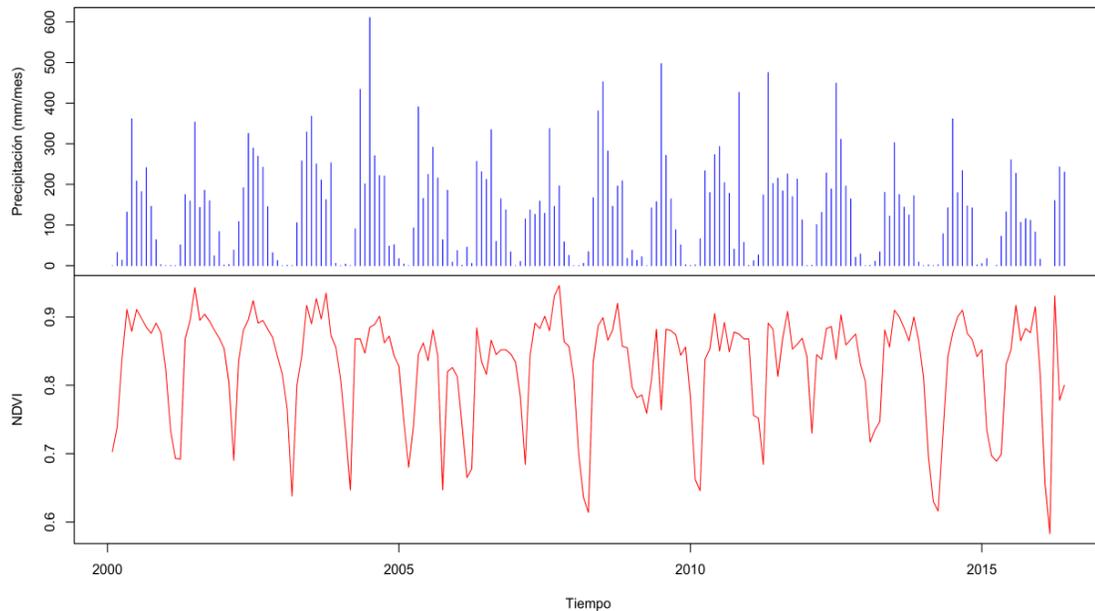


Figura 11. Variación temporal mensual de la precipitación (panel superior) y el NDVI (panel inferior) para la cobertura Bosque de Galería durante el periodo 2000-2016.

Nota: Cada barra del panel superior corresponde a un valor mensual de precipitación. Elaboración Propia.

suelo, por desarrollarse este tipo de bosque en las áreas aledañas a los cursos de agua como se indicó en el capítulo anterior. Este resultado coincide con los de Chacón (1999).

A diferencia del Bosque Ralo con Chaparro, la descripción y discusión de lo encontrado en el Bosque de Galería, permite considerar que a pesar de la variabilidad de la precipitación en dicha cobertura, los valores de NDVI se mantienen por encima de +0,700 a excepción del mes de marzo que está en +0,681; una diferencia que permite ser despreciada y establecer que en toda la cobertura, los NDVI alcanzan valores mayores a +0,700, valores que pueden ser considerados altos. En los meses de diciembre a abril, en los cuales se reportan los valores más bajos de la precipitación, el NDVI varía entre +0,700 y +0,900. Esto se fundamenta por estar el Bosque de Galería asentado en una posición geomorfológica en continua disponibilidad de agua a través de la mesa freática (MPPA, 2011).

La tercera cobertura estudiada es el Bosque Medio. La precipitación promedio mensual varió entre 1,900 mm y 310 mm: el mes de febrero tuvo el valor mínimo (1,922 mm) y el mes de julio el valor máximo (309,277 mm). Como puede observarse en la Figura 12 en el panel superior, la precipitación mínima se registró comenzando el período seco y la precipitación máxima comenzando el período lluvioso. En dicho bosque, las precipitaciones con valores más altos se presentaron entre mayo y noviembre; es decir, desde la transición de período seco a lluvioso hasta la mitad de la transición de lluvioso a seco, abarcando el período lluvioso obviamente. Hay un detalle que vale la pena mencionar: en la transición de lluvioso a seco, hubo una disminución contundente de la precipitación de noviembre a diciembre, de 111,255 mm a 25,889 mm; tendencia que se mantuvo acentuadamente hasta el comienzo del período seco (Febrero con 1,922 mm como se indicó anteriormente). Sin embargo, en marzo y abril, se observó un aumento de la precipitación a pesar de la permanencia de dicho período.

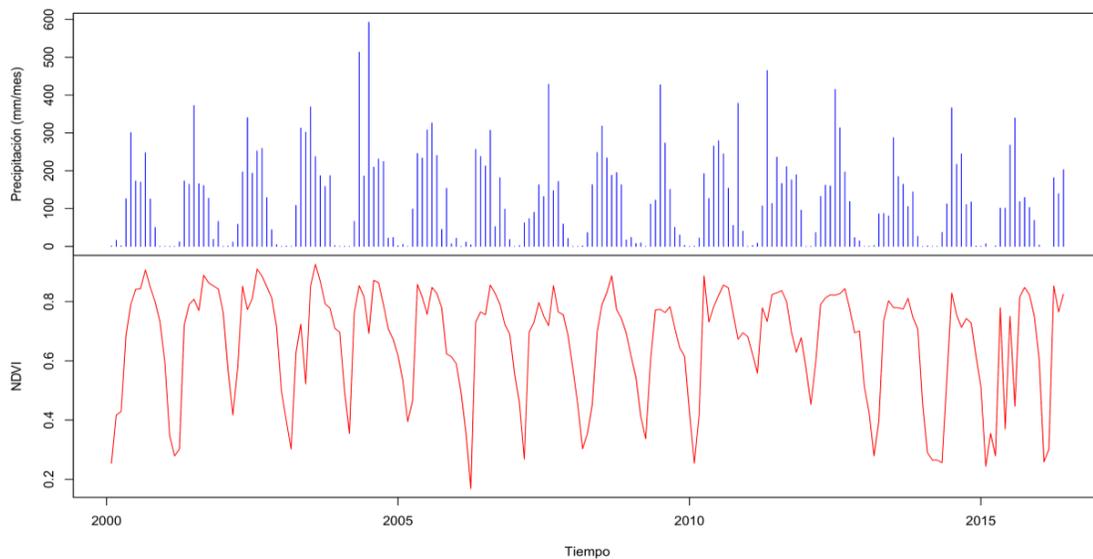


Figura 12. Variación temporal mensual de la precipitación (panel superior) y el NDVI (panel inferior) para la cobertura Bosque Medio durante el periodo 2000-2016. Nota: Cada barra del panel superior corresponde a un valor mensual de precipitación. Elaboración Propia.

En cuanto al NDVI, se observa que sus valores son más altos entre mayo y diciembre, lo cual coincide con el Bosque Ralo de Chaparro y el Bosque de Galería (aunque éste incluye a enero), Específicamente, el rango de variabilidad del NDVI es mayor que en las 2 coberturas anteriores: entre +0,650 y +0,850; es decir, 0,1 puntos por encima de aquellos. El valor más alto sucede en septiembre: 0,837, saliendo del período lluvioso. Se nota una disminución muy marcada del NDVI en el período seco: entre +0,350 y +0,450, probablemente debido al déficit de humedad en el suelo; que es donde proviene el agua que sustenta el bosque (Figura 12 panel inferior).

En esta cobertura estudiada, Bosque Medio, se advierte una relación entre la variabilidad del NDVI y el régimen pluviométrico, tal como se observó en la primera cobertura: Bosque Ralo con Chaparro. Los valores de NDVI se mantuvieron por encima de +0,600 y hasta +0,850 desde mayo y hasta diciembre; o sea, durante los meses de transición antes del período lluvioso, durante dicho período, y posterior a él, a excepción de enero; pues justo en ese mes el NDVI comenzó a disminuir hasta el mes de marzo, conjuntamente con la disminución de las precipitaciones. Entendiéndose con esto, que en la finalización de la transición de lluvioso a seco y en el período seco, los valores del NDVI fueron los más bajos en esta cobertura. Se infiere entonces que, la disminución de los valores de NDVI en los meses ya mencionados, es ocasionada por la falta de agua en el suelo para mantener la productividad (estrés por déficit de agua en el suelo). Este hallazgo está en concordancia nuevamente con los de Chacón (1999).

La Sabana Inundable es la siguiente cobertura analizada en la UE. El registro de los valores NDVI guarda mucha relación con el Bosque de Galería: los NDVI de mayo a diciembre están entre +0,700 y +0,800 con valores muy cercanos entre ellos, julio tiene el más alto registro: +0,796. En el período seco, los valores distan unos de otros entre +0,450 y +0,700, observándose una marcada disminución del NDVI en la mitad de este período (marzo), a diferencia de lo observado en el Bosque de Galería. Todos los meses de transición registraron valores por encima de +0,700, a excepción de enero (+0,677) (Figura 13 panel inferior).

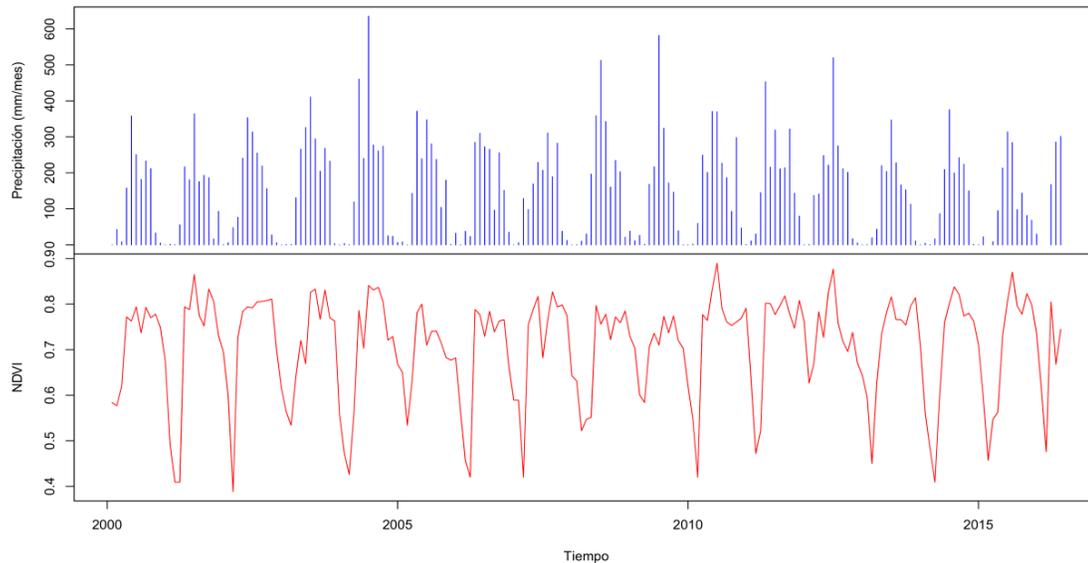


Figura 13. Variación temporal mensual de la precipitación (panel superior) y el NDVI (panel inferior) para la cobertura Sabana Inundable durante el periodo 02/2000-02/2016.

Nota: Cada barra del panel superior corresponde a un valor mensual de precipitación. Elaboración Propia.

En cuanto a la pluviometría, en esta cobertura se observó valores más altos en la mayoría de sus meses que en el Bosque Medio. Particularmente, desde abril y hasta octubre hubo precipitaciones considerables; en otras palabras, saliendo del período seco y hasta la mitad de la estación de transición de lluvioso a seco; siendo los meses de junio, julio y agosto con los valores más altos: 267,544 mm; 383,881 mm; y, 258,273 mm respectivamente. Obviamente el mes de julio registró la más alta pluviometría, y como dato curioso, este mismo mes ostenta el valor de NDVI más alto. Los meses de diciembre, enero, febrero y marzo, registraron los valores más bajos: 25,875 mm; 6,808 mm; 4,976 mm; y, 36,171 mm respectivamente (Figura 13 panel superior).

De acuerdo a lo discutido en los dos párrafos precedentes se puede intuir, para la cobertura Sabana Inundable, que a pesar de la disminución considerable de la lluvia en los meses de diciembre, enero, febrero y marzo (mitad de la transición de lluvioso

a seco y período seco), los valores de NDVI, en esos mismos meses, se mantienen por encima de +0,500, incluyendo a marzo que presentó un NDVI de +0,479 (por ser su valor muy cercano a +0,500). El comportamiento observado pudiese estar impulsado por la estacionalidad de la inundación que sufre esta cobertura, resultado éste que vuelve a coincidir con los de Chacón (1999).

El Matorral, última cobertura estudiada, responde diferente a las demás coberturas en cuanto a la variabilidad del NDVI: estos valores se mantienen en el período lluvioso aunque hay una ligera disminución (prácticamente despreciable) en la mitad del mismo en agosto. Los meses de transición que siguen a la temporada lluviosa, mantienen el valor del NDVI muy cerca del máximo registrado en julio y septiembre (+0,693), con un repunte en noviembre que no ocurrió en las otras vegetaciones. El período seco es marcado: los valores NDVI disminuyen notoriamente (Figura 14 panel inferior).

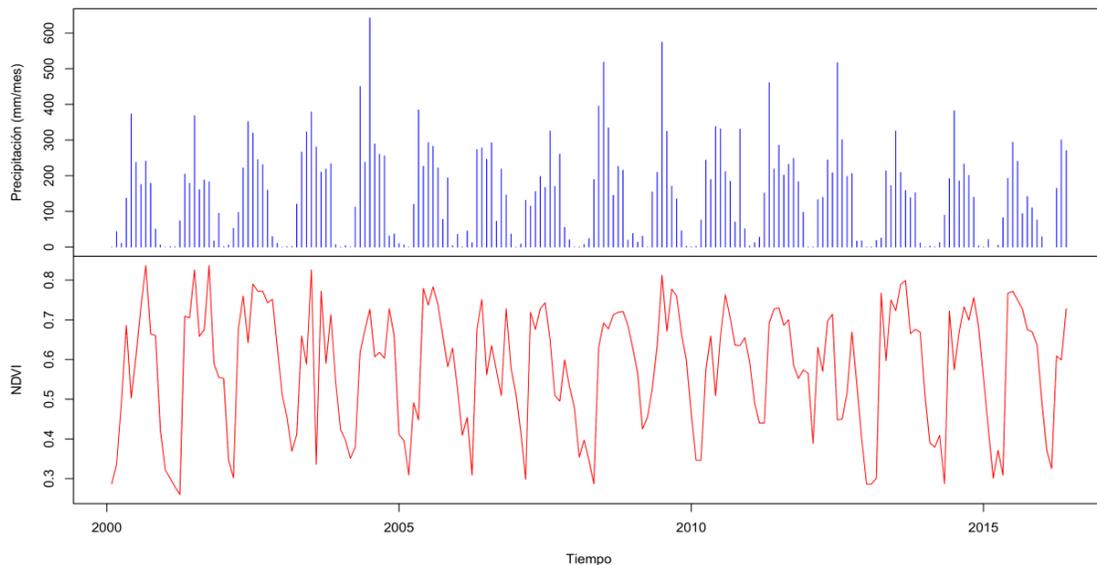


Figura 14. Variación temporal mensual de la precipitación (panel superior) y el NDVI (panel inferior) para la cobertura Matorral durante el periodo 2000-2016.

Nota: Cada barra del panel superior corresponde a un valor mensual de precipitación.
Elaboración Propia

Pluviométricamente, esta cobertura se caracteriza por una variabilidad entre 7 mm y 370 mm durante el período de estudio. Al igual que la Sabana Inundable, el Matorral registró las mayores precipitaciones entre mayo y noviembre; el mes de julio tuvo el máximo (367,505 mm), seguido de junio y agosto con 256,625 mm y 253,685 mm respectivamente (Figura 14 panel superior). Es de hacer notar que, al igual que la cobertura anterior, el mes de julio registró también el máximo valor de NDVI, conjuntamente con el mes de septiembre, tal como se precisó con anterioridad. Los meses de diciembre, enero, febrero y marzo registraron las más bajas precipitaciones con valores de 30,847 mm; 7,343 mm; 4,990 mm; y, 37,839 mm respectivamente. Por deducción, el valor mínimo pluviométrico lo tiene febrero.

A juzgar por los resultados, en el Matorral, los valores pluviométricos disminuyen significativamente en la temporada de transición de lluvioso a seco pero los valores de NDVI se mantienen entre +0,600 y +0,700. Ahora bien, la lluvia sigue disminuyendo notoriamente hasta el comienzo del período seco y la tendencia del NDVI cambia radicalmente y sus valores disminuyen sustancialmente, de tal manera que los meses de febrero y marzo registran los valores más bajos en comparación con las otras coberturas. Este particular rasgo, pudiese ser atribuido a la intervención humana que suele afectar a este tipo de cobertura (e.g., incendios provocados) (MPPA, 2011; Vivas, Rumbo, Paredes y La Cruz, 2014).

En resumen, las cinco coberturas tuvieron su mínimo valor pluviométrico promedio mensual en el mes de febrero y su máximo valor en el mes de julio, valores que corresponden al comienzo de los períodos seco y lluvioso respectivamente. El valor mínimo de NDVI promedio mensual se registró en el mes de marzo en todas las coberturas, en pleno período seco; en cambio, los valores máximos promedios mensuales de NDVI se registraron entre los meses de julio y noviembre (sólo uno en este mes). En todo caso, dichos valores máximos estuvieron dentro del período lluvioso. Todo esto muestra un patrón de variación fenológico asociado con los cambios estacionales de precipitación, donde los valores más altos de NDVI corresponden al período lluvioso y los valores más bajos de NDVI corresponden al período seco. Además, la distribución media mensual de la precipitación a lo largo

del período de estudio genera condiciones de disponibilidad de agua que dependen, entre otras cosas, de las características geomorfológicas y uso del suelo donde se desarrollan las coberturas analizadas.

4.3.2. Interpretación de la relación entre el NDVI y la precipitación en los cinco tipos de cobertura estudiados

Tal como se concretó al final de la sección precedente, los valores promedios mensuales de NDVI se asocian directamente con la precipitación total mensual en las cinco coberturas estudiadas. En otras palabras, los valores de NDVI aumentan con la ocurrencia de las precipitaciones; no obstante, hay meses donde esta asociación es inversamente proporcional; es decir, éstos disminuyen a pesar de la ocurrencia de las lluvias (Tabla 8). Aunque el coeficiente de correlación de Pearson muestra un valor absoluto bajo en algunas las vegetaciones estudiadas, la relación lineal entre estas variables (NDVI y precipitación) fue estadísticamente significativa; particularmente, en aquellos casos donde el coeficiente fue mayor en magnitud a 0,400.

Tabla 8

Coefficiente de correlación de Pearson entre la precipitación total mensual y los valores promedios mensuales del NDVI en los cinco tipos de cobertura analizados en la UE para el lapso 02/2000-02/2016.

Meses	Bosque Ralo con Chaparro	Bosque de Galería	Bosque Medio	Sabana Inundable	Matorral
Enero	0,187	-0,250	0,118	0,315	0,336
Febrero	0,308	0,413	0,031	0,348	0,622
Marzo	0,535	0,395	0,203	0,213	0,395
Abril	0,675*	0,553*	0,864*	0,617*	0,325
Mayo	0,391	0,401	0,421	0,550	0,346
Junio	-0,247	0,408	0,123	0,021	-0,733*
Julio	-0,278	-0,079	-0,274	0,261	-0,015
Agosto	-0,220	-0,331	-0,368	0,072	-0,345
Septiembre	0,262	0,366	0,100	0,376	0,232
Octubre	-0,009	0,494	0,087	0,375	-0,399
Noviembre	-0,188	-0,079	-0,349	-0,190	0,071
Diciembre	0,279	0,494	0,455	0,319	0,040

* Valores con mayor magnitud para la cobertura mostrada

Elaboración Propia

Inicialmente hay que destacar que en todas las coberturas la correlación de Pearson arrojó valores positivos y negativos, en mayor cantidad los primeros que los segundos y principalmente en los cinco primeros meses del año (se observa un valor negativo en enero del Bosque de Galería que pasa desapercibido); destacándose la Sabana Inundable con todos sus valores prácticamente positivos. Esto sugiere que la asociación lineal entre la precipitación y el NDVI es fundamentalmente directa a lo largo de cada año del período de estudio; es decir, al aumentar la lluvia, aumenta el NDVI.

Así pues, las asociaciones positivas con alta magnitud se presentan en el mes de abril (salida del período seco), a excepción de Matorral que se registró en febrero (entrada al período seco). En este sentido, el Bosque Medio es la cobertura con la mayor fuerza correlacional directa, seguida del Bosque Ralo con Chaparro que registra, conjuntamente con la Sabana Inundable, un segundo mes contiguo con alta correlación directa: marzo y mayo respectivamente. Probablemente este hecho se explica porque las coberturas están prácticamente en la temporada de transición entre el período seco y el período lluvioso, comienzan las lluvias y la vegetación responde rápidamente ante ella y recupera verdor. De igual forma, la cobertura Matorral presenta en el mes de febrero una alta asociación directa, aunque posee otra de mayor fuerza pero de manera indirecta (mes de junio). Aunque en febrero está comenzando el período seco, posiblemente la presencia de quebradas o la cercanía a las riberas de ríos y hasta quizá algún riego para cultivos agrícolas, mantenga la humedad en el suelo y origine que el verdor aumente en la vegetación.

Las asociaciones negativas se notan, en las cinco coberturas, en el segundo semestre de año a partir del mes de junio y hasta diciembre; o sea, en el período lluvioso y temporada de transición de lluvioso o seco. En su mayoría, estos valores son muy bajos, más cercanos a cero que a -1, por lo que la correlación es muy débil. Matorral es la única cobertura con una fuerte correlación lineal indirecta, la cual se registra en el mes de junio como se expresó en el párrafo anterior. Esta eventualidad guarda amplia relación con lo explicado en el párrafo anterior en referencia a esta cobertura.

En definitiva, el Bosque Medio y el Matorral son las coberturas que presentan mayor correlación entre los valores NDVI y la ocurrencia y/o disminución de las lluvias.

Los resultados muestran que el verdor de la vegetación responde mejor a la presencia/ausencia de lluvias en el período seco que en el lluvioso. Lo anterior coincide marcadamente con los resultados de Chacón-Moreno (2004, pág. 50) en ecosistemas de los Llanos del Orinoco, Venezuela, quien señaló que “valores altos de NDVI durante la estación seca indican la presencia de vegetación verde y en plena producción para ecosistemas como la sabana semiestacional que permanece con disponibilidad de agua de forma natural en esta época”. No obstante, debe tenerse en cuenta que las propiedades físicas de los suelos en las locaciones seleccionadas para el análisis de las coberturas, podrían jugar un papel clave en el balance de humedad del suelo. Bajo esta hipótesis, la acción sinérgica precipitación-suelo explicaría en gran medida la variación estacional del verdor de la vegetación. El análisis de esta relación está fuera del alcance del presente estudio, por lo que debiese estudiarse en investigaciones futuras.

4.4. APORTACIÓN SOCIAL DE LA TESIS DOCTORAL

La Tesis Doctoral constituye un aporte relevante al estudio fenológico de la dinámica de la zona de vida Bosque Seco Tropical en la geografía regional, por medio de satélites a través de un indicador que puede explorar la cobertura vegetal desde el espacio. En este caso específico, la investigación ha mostrado como el NDVI, siendo una variable biofísica, captura notablemente la modulación que hace la precipitación sobre el verdor de la vegetación en la unidad fisiográfica planicie del estado Cojedes.

En virtud de lo anteriormente expresado y a juzgar por los resultados, el NDVI podría ser una valiosa herramienta para los tomadores de decisiones a nivel gubernamental a fin de elaborar programas de gestión ambiental focalizados en el manejo sustentable del suelo, en la conservación del patrimonio forestal, en la gestión integral de los recursos hídricos y en el aprovechamiento, manejo y conservación de

la diversidad biológica en esta importante zona de la entidad regional. Todo ello, conduce a mejoras considerables en el orden socioeconómico de las poblaciones y asentamientos campesinos establecidos en dicha unidad fisiográfica y sus repercusiones nacionales e internacionales. En este sentido, las instituciones de educación superior, concretamente la UNELLEZ-San Carlos, se perfilan como centros de apoyo y/o acompañamiento de dichas poblaciones y asentamientos campesinos en el uso del NDVI para monitorear la salud vegetal de sus cultivos y plantaciones forestales, si es el caso.

Por otra parte, el trabajo que sustentó esta Tesis Doctoral representa el punto de partida para la creación de una nueva línea de investigación dentro del Programa de Estudios de Postgrado “Doctorado en Ambiente y Desarrollo” de la UNELLEZ, sincronizada con las necesidades de los diferentes escenarios académicos, productivos, culturales, sociales, políticos y comunitarios del estado cojedeño. Dicha línea de investigación pudiera incorporarse a instituciones universitarias hermanas como la Universidad Nacional Experimental Simón Rodríguez (UNESR) y el Instituto Universitario de Tecnología del Mar (IUTEMAR) de FLASA, ambas con núcleo en San Carlos-Cojedes. Asimismo, sirve de base para promover futuras investigaciones relacionadas con la fenología a nivel de pregrado en la carrera de Licenciatura en Educación, mención Biología, y en los Programas de Estudios de Postgrado Maestría en Educación Ambiental y Maestría en Ingeniería Ambiental de la UNELLEZ y de otros centros de educación universitaria.

Por último, esta Tesis Doctoral puede servir de referencia para desarrollar estudios afines en el área fenológica en otros ecosistemas situados dentro o fuera del estado Cojedes.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La utilización del NDVI derivado de Terra-MODIS facilitó el análisis de patrones de variabilidad temporal y espacial del componente vegetal en el Bosque Seco Tropical localizado en la región geográfica delimitada para esta investigación doctoral.

El análisis de series temporales de imágenes satelitales durante 16 años consecutivos, permitió detectar fluctuaciones de los patrones fenológicos en las coberturas estudiadas, asociadas a la estacionalidad de los períodos seco y lluvioso.

Los resultados obtenidos indicaron que la evolución temporal y espacial del NDVI y de las precipitaciones, están moderadamente bien acoplados en los cinco tipos de cobertura vegetal seleccionadas en la UE; además, podrían contribuir en la delineación de unidades ecológicas, de acuerdo con los patrones fenológicos de sus coberturas vegetales, en otras áreas geográficas de los llanos venezolanos.

Las coberturas analizadas responden distintamente en intensidad de verdor ante la aportación de humedad procedente de las lluvias, lo cual es coherente con investigaciones previas en esta área de estudio.

La intensidad del verdor de la vegetación podría vincularse a la dinámica edafoclimática del paisaje llanero, donde la secuencia de bancos, bajíos y posiciones intermedias conduce a diferencias texturales y de drenaje de los suelos, típicas de tales ecosistemas.

Este trabajo demostró que el NDVI puede ser utilizado como un indicador biofísico de la modulación de las precipitaciones sobre el verdor de la vegetación, en los períodos seco y lluvioso en la unidad fisiográfica planicie del estado Cojedes, a nivel local y regional.

Se recomienda continuar con esta línea de investigación en la medida en que se disponga de más datos para ampliar el período temporal evaluado, incorporando otras variables climáticas, edáficas y geomorfológicas tales como: temperatura, textura del suelo y elevación del suelo, respectivamente. Asimismo, es necesario tener presente también el retraso en la respuesta de la vegetación frente al estímulo hídrico.

REFERENCIAS CONSULTADAS

- Alcaraz-Segura, D. 2006. Caracterización del funcionamiento de los ecosistemas ibéricos mediante teledetección. *Ecosistemas*, 2006/1.
- Alcaraz-Segura, D., Baldi G., Durante, P. y Garbulsky, M. 2008. Análisis de la dinámica temporal del NDVI en áreas protegidas: tres casos de estudio a distintas escalas espaciales, temporales y de gestión. *Ecosistemas* 17(3): 108-117.
- Al-Qinna, M., Hammouri, N., Obediat, M. y Ahmad, F. 2011. Drought analysis in Jordan under current and future climates. *Climatic Change* 106: 421-440.
- Alvarez, C. y Basanta, M. 2015. Manejo sustentable de sistemas agrícolas en la región central de Córdoba: una experiencia de largo plazo en INTA EEA Manfredi. *Revista de Investigaciones Agropecuarias* 41(2): 215-222.
- Armenteras, D., González, T., Luque, F., López, D. y Rodríguez, N. 2016. Methodology for Evaluating the Quality of Ecosystem Maps: A Case Study in the Andes. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 5(8): 144. Recuperado de: <https://goo.gl/HY4eyh>.
- Azzali, S. y Menenti, M. 2000. Mapping vegetation–soil–climate complexes in southern Africa using temporal Fourier analysis of NOAA-AVHRR NDVI data. *International Journal of Remote Sensing* 21: 973–996.
- Ballestrini, M. 2006. Como se elabora el Proyecto de Investigación (7a ed). Venezuela: BL Consultores Asociados, C.A. Pp. 125-136.
- Baldi, G., Noretto, M., Aragón, R., Aversa, F. y Paruelo, J. 2008. Long-term satellite NDVI datasets: evaluating their ability to detect ecosystem functional changes in South America. *Sensors* 8: 5397-5425.
- Barbosa, H. 1998. Spatial and temporal analysis of vegetation index derived from AVHRR-NOAA and rainfall over Northeastern Brazil during 1982–1985. Master degree dissertation in Remote Sensing (in Portuguese). Divisão de Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos-SP, Brazil.
- Barbosa, H. 2004. Vegetation dynamics over the Northeast region of Brazil and their connections with climate variability during the last two decades of the twentieth century. Doctoral degree dissertation in Soil, Water, and Environmental Science at the University of Arizona. Tucson, Arizona.
- Barbosa, H., Huete, A. y Baethgen, W. 2006. A 20-year study of NDVI variability over the Northeast Region of Brazil. *Journal of Arid Environments* 67: 288–307.
- Behrangi, A., Khakbaz, B., Jaw, T., AghaKouchak, A., Hsu, K. y Sorooshian, S. 2011. Hydrologic evaluation of satellite precipitation products over a mid-size basin, *J. Hydrol.* 397(3): 225–237.

- Berlanga-Robles, C. y Ruiz-Luna, A. 2014. Análisis de las tendencias de cambio del bosque de mangle del sistema lagunar Teacapán-Agua Brava, México. Una aproximación con el uso de imágenes de satélite Landsat. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 23(1): 29-46.
- Belenguer-Plomer, M. 2016. Time series analysis of precipitation and vegetation to detect food production anomalies in the Horn of Africa. The case of Lower Shabelle (Somalia). *Revista de Teledetección* 47: 41-50.
- Britos, A. y Barchuk, A. 2013. Dinámica de la cobertura vegetal y los usos de la tierra a través de modelos de no-equilibrio. *Revista de la Asociación Argentina de Ecología de Paisajes* 4: 13-38.
- Calas, S. 1999. Imágenes Satelitales para Monitoreo de Desastres y Otras Aplicaciones. [documento en línea]. En http://neutron.ing.ucv.ve/revista-e/No7/Susana%20Calas%5Cimágenes_satelitales.htm [Consulta: abril 15, 2013].
- Carrao, H., Sepulcre, G., Horion, S., y Barbosa, P. 2013. A multitemporal and non-parametric approach for assessing the impacts of drought on vegetation greenness: a case study for Latin America. *EAR Se L eProceedings* 12(1): 8-24.
- Cartaya, S., Zurita, S., Rodríguez, E. y Montalvo, V. 2014. Comparación de técnicas para determinar cobertura vegetal y usos de la tierra en áreas de interés ecológico, Manabí, Ecuador. *UD y la Geomática* 9: 5-17.
- Ceroni, M., Achkar, M., Gazzano, I. y Burgeño, J. 2015. Estudio del NDVI mediante análisis multiescalar y series temporales utilizando imágenes SPOT, durante el período 1998-2012 en el Uruguay. *Revista de Teledetección* 43: 31-42.
- Chacón-Moreno, E. 2004. Mapping savanna ecosystems of the Llanos del Orinoco using multitemporal NOAA satellite imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 5: 41-53.
- Chen, S. 2013. Evaluation of the Successive V6 and V7 TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis Over the Continental United. [documento en línea]. En: <https://www.researchgate.net/publication/258302861> [Consulta: enero 12, 2017].
- Chuvieco, E. 1995. Fundamentos de Teledetección Espacial (2ª ed.). Ediciones RIALP S.A., Madrid, España. Pp. 305-307.
- Chuvieco, E. 1996. Fundamentos de Teledetección Espacial (3ª ed.). Ediciones RIALP S.A., Madrid, España. Pp. 23-24, 46-48, 63-64, 174-183, 209-256, 229-330, 370-385.
- Chuvieco, E. 2002. Teledetección Ambiental: La observación de la Tierra desde el Espacio. Ariel Ciencia, Barcelona, España. p. 427.
- Chuvieco, E., Riaño, D., Aguado, I. y Cocero, D. 2002. Estimation of fuel moisture content from multitemporal analysis of Landsat Thematic Mapper reflectance data: applications in fire danger assessment. *Int. J. Remote Sensing* 23: 2145-2162.

- Cramer, W. y Fischer, A. 1996. Data requirements for global terrestrial ecosystem modeling. In: Walker, B., Steffen, W. (Eds.), *Global Change and Terrestrial Ecosystems*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, Pp. 529–565.
- Curran, P. 1980. Multispectral photographic remote sensing of vegetation amount and productivity. In: *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Remote Sensing of the Environment*. Ann Arbor, MI, Pp. 623–637.
- Dai, A. 2006. Precipitation characteristics in eighteen coupled climate models. *Clim.* 19(18): 4605–4630.
- De La Casa, A. y Ovando, G. 2006. Relación entre la precipitación e índices de vegetación durante el comienzo del ciclo anual de lluvias en la provincia de Córdoba, Argentina. *RIA* 35(1): 67-85.
- De La Garza, J., Morales, B. y González, B. 2013. *Análisis estadístico multivariante. Un enfoque teórico y práctico*. McGrawHill/Interamericana Editores, S.A. de C.V. México, D.F. Pp. 41-326.
- Dildora, A., Toderich, K., Jarihani, A., Gafurov, D. y Gismatulina, L. 2016. Monitoring of vegetation condition using the NDVI/ENSO anomalies in Central Asia and their relationships with ONI (very strong) phases. In *SPIE Remote Sensing* (pp. 1000512-1000512). International Society for Optics and Photonics. Recuperado de: <https://goo.gl/Kx0LtE>.
- D’Odorico, P., Bhattachan, A., Davis, K., Ravi, S. y Runyan, C. 2013. Global desertification: drivers and feedbacks. *Advances in Water Resources* 51: 326-344.
- Duro, D., Coops, N., Wulder, M. y Han, T. 2007. Development of a large area biodiversity monitoring system driven by remote sensing. *Progress in Physical Geography* 31(3): 235-260.
- Ellis, E. A., Kainer, K. A., Sierra-Huelsz, J. A., Negreros-Castillo, P., Rodríguez-Ward, D. y DiGiano, M. 2015. Endurance and adaptation of community forest management in Quintana Roo, Mexico. *Forests* 6(11): 4295-4327. Recuperado de: <https://goo.gl/1RUoP5>.
- FAO. 2016. *El Estado de los bosques del mundo 2016. Los bosques y la agricultura: desafíos y oportunidades en relación con el uso de la tierra*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Roma. 119 pp.
- Fensholt, R., Rasmussen, K., Nielsen, T. y Mbow, C. 2009. Evaluation of earth observation based long-term vegetation trends—intercomparing NDVI time series trend analysis consistency of Sahel from AVHRRR GIMMS, Terra MODIS and SPOT VGT data. *Remote Sens. Environ.* 113: 1886-1898.
- Fensholt, R. y Proud, S. 2012. Evaluation of earth observation based global long term vegetation trends—Comparing GIMMS and MODIS global NDVI time series. *Remote sensing of Environment* 119: 131-147.

- Fuenteteja, M. 2013. Caracterización del efecto de las sequías sobre el vigor de encinares mediante teledetección. Trabajo de Grado de Maestría. Universidad de Zaragoza, España. 153 pp.
- FLASA-Cojedes. 2005. I Simposium de Ecología de los Llanos Centro Occidentales. Fundación La Salle de Ciencias Naturales Campus Cojedes. Memorias [Datos en CD]. Disponible: Dirección de Investigaciones Agropecuarias y de Extensión (EDIAGRO), San Carlos, estado Cojedes. 39 pp.
- Gaitán, J., Bran, D. y Azcona, C. 2015. Tendencia del NDVI en el período 2000-2014 como indicador de la degradación de tierras en Argentina: ventajas y limitaciones. *AGRISCIENTIA* 32(2): 83-93.
- Gamon, J., Huemmrich, K., Stone, R. y Tweedie, C. 2013. Spatial and temporal variation in primary productivity (NDVI) of coastal Alaskan tundra: Decreased vegetation growth following earlier snowmelt. *Remote Sensing of Environment* 129: 144-153.
- García-Mora, T. y Mas, J. 2011. Evaluación de imágenes del sensor MODIS para la cartografía de la cobertura del suelo en una región altamente diversa de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 63(1): 83-94.
- Giglio, L., Schroeder, W. y Justice, C. O. 2016. The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products. *Remote Sensing of Environment* 178: 31-41. Recuperado de: <https://goo.gl/WT5ahx>.
- Gilabert, M., González-Piqueras, J. y García-Haro, J. 1997. Acerca de los índices de vegetación. *Revista de Teledetección* 8: 35-45.
- Giddings L. y Soto M. 2006. Teleconexiones y precipitación en América del Sur. *Revista de Climatología* 6: 13-20.
- González, M., Menenti, M., y Roig, F. 2010. Patrones fenológicos de la Provincia de Mendoza, Argentina, mediante serie temporal de imágenes NOAA-AVHRR NDVI GAC. *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica* 45(3-4): 343-362.
- Gurgel, H., Ferreira, N. y Luiz, A. 2003. Estudo da variabilidade do NDVI sobre o Brasil, utilizando-se a análise de agrupamentos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 7(1): 85-90.
- Hall, F., Botkin, D., Strelbel, D., Woods, K. y Goetz, S. 1991. Large-scale patterns of forest succession as determined by remote sensing. *Ecology* 72: 628-640.
- Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, P. 2014. *Metodología de la Investigación*. Editorial Mc Graw Hill 6ta. Edición, 613 pp.
- Hill, M. y Donald, G. 2003. Estimating spatio-temporal patterns of agricultural productivity in fragmented landscapes using AVHRR NDVI time series. *Remote Sens. Environ.* 84: 367-384.
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E., Gao, X. y Ferreira, L. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sens. Environ.* 83(1): 195-213.

- Huffman, G., Adler, R., Bolvin, D., Nelkin, E., Hossain, F. y Gebremichael, M. 2010. The TRMM multi-satellite precipitation analysis (TMPA). In *Satellite Rainfall Applications for Surface Hydrology*; Springer: Dordrecht, The Netherlands. Pp. 3–22.
- Huffman, G., Bolvin, D., Nelkin, E., Wolff, D., Adler, R., Gu, G., Hong, Y., Bowman, K. y Stocker, E. 2007. The TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. *J. Hydrometeorol* 8: 38–55.
- Huffman, G., Adler, R., Bolvin, D. y Nelkin, E. 2011. Highlight of version 7 TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA), paper presented at the 5th International. Precipitation Working Group Workshop, Workshop Program and Proceedings, 11–15 Oct., Hamburg, Germany, edited by C. Klepp and G. Huffman, Reports on Earth Syst. Sci., 100/2011, Max-Planck-Institute for Meteorologie, Pp. 109–110.
- Huffman, G. y Bolvin, D. 2013. TRMM and Other Data Precipitation Data Set Documentation, Lab. for Atmos., NASA Goddard Spac Flight Cent. and Sci. Syst. And Appl. [Available at: http://precip.gsfc.nasa.gov/pub/trmmdocs/3B42_3B43_doc.pdf.]
- Hutchinson, J., Jacquin, A., Hutchinson, S. y Verbesselt, J. 2015. Monitoring vegetation change and dynamics on US Army training lands using satellite image time series analysis. *Journal of environmental management* 150: 355-366.
- Hüttich, C, Gessner, U., Herold, M., Strohbach, B., Schmidt, M., Keil, M. y Dech, S. 2009. On the suitability of MODIS time series metrics to map vegetation types in dry savanna ecosystems: A case study in the Kalahari of NE Namibia. *Remote Sensing of Environment* 1: 620-643.
- Iglesias, M., Barchuk, A. y Grilli, M. 2010. Dinámica estacional e interanual del NDVI en bosques nativos de zonas áridas argentinas. *Revista de Teledetección* 34: 44-54.
- IGVSB. 2014. Atlas de la República Bolivariana de Venezuela. Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar. [documento en línea]. En: <http://www.igvsb.gob.ve> [Consulta: abril 08, 2017].
- INE. 2011. Síntesis Estadística Estatal. Instituto Nacional de Estadística. [documento en línea]. En: <http://www.ine.gov.ve/documentos/see/sintesisestadistica2011/estados/cojedes/index.htm> [Consulta: abril 08, 2017].
- Ireland, G. y Petropoulos, G. 2015. Exploring the relationships between post-fire vegetation regeneration dynamics, topography and burn severity: A case study from the Montane Cordillera ecozones of western Canada. *Applied Geography* 56: 232-248.

- Jiang, H. y Zipser, E. J. 2010. Contribution of tropical cyclones to the global precipitation from eight seasons of TRMM data: Regional, seasonal, and interannual variations, *J. Clim.* 23(6): 1526–1543.
- Jobbágy, E., Sala, O. y Paruelo, J. 2002. Patterns and controls of primary production in the Patagonian steppe: a remote sensing approach. *Ecology* 83(2): 307-319.
- Kariyeva J. y Van Leeuwen. 2011. Environmental Drivers of NDVI-Based Vegetation Phenology in Central Asia. *Remote Sensing of Environment* 3: 203-246.
- Kidd, C. y Huffman, G. 2011. Global precipitation measurement, *Meteorol. Appl.* 18(3): 334–353.
- Kogan, F. 2000. Global drought detection and impact assessment from space. In: Wilhite, D.A. (Ed.), *Drought: A Global Assessment*, vol. 1. Rutledge, London.
- Lausch, A., Pause, M., Merbach, I., Zacharias, S., Doktor, D., Volk, M. y Seppelt, R. 2013. A new multiscale approach for monitoring vegetation using remote sensing-based indicators in laboratory, field, and landscape. *Environmental monitoring and assessment* 185(2): 1215-1235.
- Ley del Plan de la Patria. 2013. Segundo Plan Socialista de Desarrollo Económico y Social de la Nación 2013 - 2019. *Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela*, 6.118 (Extraordinario), Diciembre 4, 2013.
- Li, L., Ngongondo, C., Xu, C. y Gong, L. 2013. Comparison of the global TRMM and WFD precipitation datasets in driving a large-scale hydrological model in Southern Africa, *Hydrol. Res.*, doi:10.2166/nh.2012.175.
- López-Hernández, D. 2015. Phosphorous cycling and biogeochemistry in a Venezuelan-flooded savanna. *Chemistry and Ecology* 31(5): 389-401. Recuperado de: <https://goo.gl/v4vE7f>.
- Los, S., Justice, C. y Tucker, C. 1994. A global 1x1 degree NDVI data set for climate studies derived from the GIMMS continental NDVI data. *International Journal of Remote Sensing* 15: 3493–3518.
- Malo, A. y Nicholson, S. 1990. A study of rainfall and vegetation dynamics in the African Sahel using normalized difference vegetation index. *Journal Arid Environments* 19: 1–24.
- Manson F., Loneragan N. y Phinn S. 2003. Spatial and temporal variation in distribution of mangroves in Moreton Bay, subtropical Australia: a comparison of pattern metrics and change detection analyses based on aerial photographs. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 56: 1-14.
- Manzo Delgado, L. y López García, J. 2013. Detección de áreas quemadas en el sureste de México, utilizando índices pre y post-incendio NBR y BAI, derivados de compuestos MODIS. *GeoFocus. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica* 13(2): 66-83.

- MARNR. 1990. Atlas de Vegetación del estado Cojedes. Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables. Serie Informes Técnicos Zona 8. Guanare. 120 pp.
- Meneses-Tovar, C. 2011. El índice normalizado diferencial de la vegetación como indicador de la degradación del bosque. *Unasyuva* 238(62): 39-46.
- Millano, J., Paredes, F. y Vivas, I. 2007. Efecto de la Oscilación Meridional (ENSO) y la temperatura superficial del océano Atlántico sobre la distribución espacio-temporal de las lluvias en el estado Cojedes. *Revista Agrollanía* 4: 103-116.
- Millano, J., Vivas, I. y Hernández, E. 2016. El cambio climático en el plan de ordenación territorial del estado Cojedes. Trabajo presentado a las XI Jornadas de Investigación y Postgrado y III Encuentro Internacional de Investigadores “Ciencia para la paz y el desarrollo”, realizado en Punto Fijo, Venezuela, del 2 al 4 de noviembre de 2016. Publicada en actas.
- Millano, J. y Paredes, F. 2013. Influencia del Fenómeno El Niño/Oscilación del Sur (ENSO) sobre la Precipitación en la Cuenca del Río Caroní, Estado Bolívar, Venezuela. *Revista Agrollanía* 10: 93-99.
- Millano, J. y Paredes, F. 2016a. Variabilidad de la Vegetación con el Índice de Diferencia Normalizada (NDVI) en Latinoamérica. *Novum Scientiarum* 2(4): 33-44.
- Millano, J. y Paredes, F. 2016b. La dinámica de la vegetación ante el cambio climático en América Latina basada en técnicas de teledetección. Trabajo presentado al 1er Congreso Internacional de Investigación en Educación y II Jornada Producción Intelectual de Profesores Investigadores de la FaCE–UC “Retos, Alternativas y oportunidades”, realizado en Valencia, Venezuela, del 17 al 19 de octubre de 2016. Publicado en actas.
- Millano, J. y Paredes, F. 2017. Patrones fenológicos de cinco tipos de cobertura en Bosque Seco Tropical, Sur-Cojedes, Venezuela. *Revista Agrollanía* 14 [En prensa].
- Monteith, J. 1981. Climatic variation and the growth of crops. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 107: 749-774.
- Morante, C. y Bello, P. 2012. Estudio fenológico de árboles forestales en el bosque de galería de la UNELLEZ San Carlos, estado Cojedes. *Revista Agrollanía* 9: 90-99.
- Mouillot, F., Schultz, M., Yue, C., Cadule, P., Tansey, K., Ciais, P. y Chuvieco, E. 2014. Ten years of global burned area products from spaceborne remote sensing—A review: Analysis of user needs and recommendations for future developments. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 26: 64-79. Recuperado de: <https://goo.gl/bXL9BO>.

- MPPA. 2011. Plan de Ordenación del Territorio del Estado Cojedes. Diagnóstico Físico Natural y Socioeconómico. Capítulo I: Caracterización Físico Natural del Estado Cojedes. Ministerio del Poder Popular para el Ambiente [Datos en CD]. Disponible: Dirección Estatal Cojedes, Pp. 14-96.
- MPPCTI. 2012. Satélite Miranda. Ministerio del Poder Popular para la Ciencia, Tecnología e Innovación. [documento en línea]. En: www.mcti.gob.ve/satelites/miranda/ [Consulta: abril 6, 2013].
- Narváez, R. 1997. Orientaciones prácticas para la elaboración de informes de investigación. 2da. Edición. Universidad Nacional Experimental Politécnica Antonio José de Sucre. Vicerrectorado Puerto Ordaz. Pp. 34-41.
- NASA. 2008. MODIS Web. Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio, por sus siglas en inglés. [documento en línea]. En: <http://modis.gsfc.nasa.gov/data/> [Consulta: marzo 14, 2017].
- Nicholson, S., Davenport, M. y Malo, A., 1990. A comparison of the vegetation response to rainfall in the Sahel and East Africa, using normalized difference vegetation index from NOAA AVHRR. *Climatic Change* 17: 209–241.
- Palella S. y Martins, F., 2006. Metodología de la investigación cuantitativa (2a ed.). Fondo Editorial de la Universidad Pedagógica Experimental Libertador. Caracas. Venezuela. Pp. 93-100.
- Paredes, F. 2009. Nociones Elementales de la Climatología e Hidrología del Estado Cojedes. Serie Investigación. Publicaciones del Área de Estudios de Postgrado. San Carlos. Venezuela. Pp. 137-173.
- Paredes, F. 2012. Sistema para la alerta temprana de sequías meteorológicas en Venezuela. Tesis Doctoral. Universidad de Carabobo, Bárbula, Venezuela. 175 pp.
- Paredes F., Millano, J. y Guevara, E. 2008. Análisis espacial de las sequías meteorológicas en la región de los Llanos de Venezuela durante el período 1961-1996. *Revista de Climatología* 8: 15-27.
- Paredes F. y Guevara E. 2007. Influencia de variables macroclimáticas sobre el régimen pluviométrico del Estado Cojedes, Venezuela. *Revista Ingeniería UC*. 14(3): 49-56.
- Parkes, B., Wetterhall, F., Pappenberger, F., He, Y., Malamud, B. y Cloke, H. 2013. Assessment of a 1-hour gridded precipitation dataset to drive a hydrological model: A case study of the summer 2007 floods in the Upper Severn, UK, *Hydrol. Res.* 44(1): 89–105.
- Parplies, A., Dubovyk, O., Tewes, A., Mund, J. y Schellberg, J. 2016. Phenomapping of rangelands in South Africa using time series of RapidEye data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 53: 90-102. Recuperado de: <https://goo.gl/dUp2Tz>.

- Paruelo, J. 2008. La caracterización funcional de ecosistemas mediante sensores remotos. *Ecosistemas* 17(3): 4-22.
- Paruelo, J., Epstein, H., Lauenrothy, W. y Burke, W. 1997. ANPP estimates from NDVI for the Central Grassland Region of the U.S. *Ecology* 78: 953-958.
- Paruelo, J., Piñeiro, G., Oyonarte, C., Alcaraz, D., Cabello, J. y Escribano, P. 2005. Temporal and spatial patterns of ecosystem functioning in protected arid areas in southeastern Spain. *Applied Vegetation Science* 8: 93-102.
- Paruelo, J. y Lauenroth, W. 1998. Interannual variability of NDVI and its relationship to climate for North American shrublands and grasslands. *Journal of Biogeography* 25: 721-733.
- Pereira, M., Justino, F., Malhado, A., Barbosa, H. y Marengo, J. 2014. The influence of oceanic basins on drought and ecosystem dynamics in Northeast Brazil. *Environmental Research Letters* 9(12): 124013.
- Pérez, A. 2006. Guía metodológica para anteproyectos de investigación (2a ed.). FEDUPEL, Caracas, Venezuela. Pp. 19-24.
- Petrosillo, I., Semeraro, T., Zaccarelli, N., Aretano, R. y Zurlini, G. 2013. The possible combined effects of land-use changes and climate conditions on the spatial-temporal patterns of primary production in a natural protected area. *Ecological indicators* 29: 367-375.
- Philippou, N., Martiny, N., Camberlin, P., Hoffman, M. T. y Gond, V. 2014. Timing and patterns of the ENSO Signal in Africa over the last 30 years: insights from Normalized Difference Vegetation Index data. *Journal of Climate* 27(7): 2509-2532.
- Quevedo, E., Peixoto, G., Oliveira, P. y Paranho, A. 2007. Estudo da Variabilidade do NDVI dos Bairros da Bacia Hidrográfica do Prosa - Campo Grande - MS como suporte para avaliação da qualidade ambiental. In: I Simpósio de Recursos Hídricos do Norte e Centro Oeste. Cuiabá. A busca pelo usos sustentável do recursos hídricos das regiões do Norte e Centro-Oeste. Pp. 1-11.
- Quiroz, I. 2016. Patrones de circulación oceánicos y atmosféricos relacionados con las sequías severas en Venezuela. Tesis Doctoral, UNELLEZ, San Carlos. 126 pp.
- Rathcke, B. y Lacey, E. 1985. Phenological patterns of terrestrial plants. *Annual Review of Ecology and Systematics* 16: 179-214.
- Reyer, C., Leuzinger, S., Rammig, A., Wolf, A., Bartholomeus, R., Bonfante, A. y Klein, T. 2013. A plant's perspective of extremes: terrestrial plant responses to changing climatic variability. *Global change biology* 19(1): 75-89. Recuperado de: <https://goo.gl/bJJpu1>.
- Rodríguez, O. y Arredondo, H. 2005. Manual para el manejo y procesamiento de imágenes satelitales obtenidas del sensor remoto MODIS de la NASA, aplicado en estudios de ingeniería civil. Trabajo de Grado. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. 230 pp.

- Rouse, J., Haas, R., Schell, J. y Deering, D. 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS, NASA SP-351, Third ERTS-1 Symposium, vol. 1. NASA, Washington, DC, pp. 309–317.
- Ruiz, M. 2016. Estadística aplicada a experimentos y mediciones. Editorial Díaz de Santos, S. A. España. Pp. 77-85.
- Sánchez, L. y Reyes, O. 2015. Medidas de adaptación y mitigación frente al cambio climático en América Latina y el Caribe: Una revisión general. Recuperado de: <https://goo.gl/5OZVVQ>.
- Schucknecht, A., Erasmi, S., Niemeyer, I. y Matschullat, J. 2013. Assessing vegetation variability and trends in north-eastern Brazil using AVHRR and MODIS NDVI time series. *Eur. J. Remote Sens* 46: 40-59.
- Simmon, R. (10 de noviembre de 2015). El Índice de Diferencia Normalizada de Vegetación (NDVI) y su interpretación [Mensaje en un blog]. Mundo SIG Un blog de Educación Ambiental sin fronteras.org. Recuperado de <https://mundosigs.wordpress.com/2015/11/10/el-indice-de-diferencia-normalizada-de-vegetacion-ndvi-y-su-interpretacion/>
- Sobrino, J. y Julien, Y. 2011. Global trends in NDVI-derived parameters obtained from GIMMS data. *International Journal of Remote Sensing* 32: 4267-4279.
- Shepherd, J. M. 2006. Evidence of urban-induced precipitation variability in arid climate regimes, *J. Arid Environ.* 67(4): 607–628.
- Sonfack, R., Nzeukou, A., Lenouo, A., Siddi, T., Tchakoutio, S. A. y Kaptue, A. 2013. Comparison between vegetation and rainfall of bioclimatic ecoregions in Central Africa. *Atmosphere* 4: 411-427.
- Sorooshian, S. 2004. Commentary-GEWEX (Global Energy and Water Cycle Experiment) at the 2004 joint scientific committee meeting, *GEWEX Newsl* 14(2): 2.
- Sruthi, S. y Mohammed M. 2015. Agricultural Drought Analysis Using the NDVI and Land Surface Temperature Data; a Case Study of Raichur District. *Aquatic Procedia* 4: 1258 – 1264.
- Tang, H., Li, Z., Zhu, Z., Chen B., Zhang B. y Xin X. 2015. Variability and Climate Change Trend in Vegetation Phenology of Recent Decades in the Greater Khingan Mountain Area, Northeastern China. *Remote Sensing of Environment* 7: 11914-11932.
- Tapiador, F., Turk, J., Petersen, W., Hou, A., García-Ortega, E., Machado, L., Angelis, C., Salio, P., Kidd, C. y Huffman, G. 2012. Global precipitation measurement: Methods, datasets and applications, *Atmos. Res.* 104: 70–97.
- Tian, Y., Peters-Lidard, C., Choudhury, B. y García, M. 2007. Multitemporal analysis of TRMM-based satellite precipitation products for land data assimilation applications, *J. Hydrometeorol.* 8(6): 1165–1183.

- Tobin, K. y Bennett, M. 2009. Using SWAT to model streamflow in two river basins with ground and satellite precipitation data, *J. Am. Water Resour. Assoc.* 45(1): 253–271.
- Trejo, F., Barbosa, H., Ruiz, I. y Peñaloza-Murillo, M. 2016. Meso Scale Oceanic Atmospheric Circulation Patterns Linked with Severe and Extensive Droughts in Venezuela. *Revista Brasileira de Meteorologia* 31(4): 468-489.
- Tucker, C., Newcomb, W. y Dregne, H., 1994. AVHRR data sets for determination of desert spatial extent. *International Journal of Remote Sensing* 15: 3547–3565.
- Universidad Nacional Experimental de los Llanos Occidentales Ezequiel Zamora [UNELLEZ]. 2012. Propuesta de Programa para el Doctorado en Ambiente y Desarrollo. San Carlos: Autor.
- Ulsig, L., Nichol, C., Huemmrich, K., Landis, D., Middleton, E., Lyapustin, A., Mammarella, I., Levula, J. y Porcar-Castell, A. 2017. *Remote Sensing* 9: 49-69.
- Van Leeuwen, W., Davison, J., Casady, G. y Marsh, S. 2010. Phenological Characterization of desert sky island vegetation communities with remotely sensed and climate time series data. *Remote Sensing* 2: 388-415.
- Van Leeuwen, W., Hartfield, K., Miranda, M. y Meza, F. 2013. Trends and ENSO/AAO driven variability in NDVI derived productivity and phenology alongside the Andes mountains. *Remote Sensing* 5: 1177-1203.
- Van Schaik, C., Terborgh, J. y Wright, S. 1993. The phenology of tropical forests: adaptive significance and consequences for primary consumers. *Annual Review of Ecology and Systematics* 24: 353-377.
- Vázquez P., Adema, E. y Fernández, B. 2013. Dinámica de la fenología de la vegetación a partir de series temporales de NDVI de largo plazo en la provincia de La Pampa. *Ecología Austral* 23: 77-86.
- Venezuela. 1999. Constitución de la República Bolivariana de Venezuela. Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela N° 36.860. Caracas, diciembre 15.
- Venezuela. 2013. Ley de Bosques. Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela, N° 40.222. Caracas, Agosto 06.
- Virginia, R. y Wall, D. 2001. Principles of Ecosystem function. En: Levin, S.A. (ed.) *Encyclopedia of Biodiversity*, pp. 345-352. Academic Press, San Diego, USA.
- Vivas, I. Rumbo, L. Paredes, F. y La Cruz, F. 2014. Caracterización de cambios en cobertura boscosa en el estado Cojedes entre 1990 y 2008. *Revista Unellez de Ciencia y Tecnología* 33: 46-52.
- Whitcraft, A., Becker-Reshef, I. y Justice, C. 2015. Agricultural growing season calendars derived from MODIS surface reflectance. *Internacional Journal of Digital Earth* 8(3): 173-197.

- Williams-Linera, G. y Meave, J. 2002. Patrones fenológicos. [documento en línea]. En:https://www.researchgate.net/profile/Jorge_Meave/publication/281348224_Patrones_fenologicos/links/55ed3cff08ae21d099c74924.pdf [Consulta: febrero 17, 2017].
- Yong, B., Chen, B., Gourley, J., Ren, L., Hong, Y., Chen, X. y Gong, L. (2014). Intercomparison of the Version-6 and Version-7 TMPA precipitation products over high and low latitudes basins with independent gauge networks: Is the newer version better in both real-time and post-real-time analysis for water resources and hydrologic extremes? *Journal of Hydrology* 508: 77-87.
- Zambrano, S., Márquez, R. y Rodríguez, J. 2013. Identificación preliminar de áreas prioritarias para la conservación de bosques secos en el estado Cojedes (Venezuela), utilizando técnicas de sensoramiento remoto. Ediciones IVIC. X Congreso Venezolano de Ecología. Mérida, P. 23.

ANEXO A

FOTOS DE LOS CINCO TIPOS DE COBERTURA ESTUDIADAS



Foto 1. Bosque Ralo con Chaparro. Cerca de El Baúl, a la altura de Hato Piñero.
Fuente: MPPA Seccional Cojedes.



Foto 2. Bosque de Galería. Río Tinaco al suroeste del asentamiento campesino Casupal, municipio Pao de San Juan Bautista.
Fuente: <http://www.google-earth.es>



Foto 3. Bosque Medio. En la sabana de Piñero.
Fuente: MPPA Seccional Cojedes.



Foto 4. Sabana Inundable. De Caño Benito hacia abajo, en el sector Sucre-Palmita-Chiverí-Guásimo Mayita-La Cruz-El Socorro.
Fuente: MPPA Seccional Cojedes.



Foto 5. Matorral. Cerca de Caño Benito.
Fuente: MPPA Seccional Cojedes.