

# EVALUACIÓN DE MODELOS DE COMBUSTIBLE FORESTAL DEL BOSQUE SECO TROPICAL DEL PARQUE NATURAL REGIONAL LOS BESOTES - VALLEDUPAR, CESAR.

*Carlos Daniel Castillo de Luque*<sup>1</sup>, *Arnaldo Luis Calderón Torres*<sup>2</sup>, *Karina Paola Torres Cervera*<sup>3</sup>,  
*Paul Klement Arias Ruidias*<sup>4</sup>, *Pedro Juan Torres Flores*<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Ingeniero Ambiental y Sanitario, Universidad Popular del Cesar. [cddcastillo@unicesar.edu.co](mailto:cddcastillo@unicesar.edu.co)

<sup>2</sup>Ingeniero Ambiental y Sanitario, Estudiante, Universidad Popular del Cesar, [arnaldolcalderon@unicesar.edu.co](mailto:arnaldolcalderon@unicesar.edu.co)

<sup>3</sup>Ingeniera Ambiental y Sanitario, Magíster en Medio ambiente y Desarrollo. Docente Universidad Popular del Cesar. Valledupar. [karinaportres@unicesar.edu.co](mailto:karinaportres@unicesar.edu.co)

<sup>4</sup>Ingeniero Ambiental y Sanitario. Valledupar, Colombia. [pkarias@unicesar.edu.co](mailto:pkarias@unicesar.edu.co)

<sup>5</sup>Licenciado en Matemáticas y física, Especialista en Educación matemáticas. Docente de la Universidad Popular del Cesar. Valledupar. [pedrotorres@unicesar.edu.co](mailto:pedrotorres@unicesar.edu.co)

## RESUMEN

El desarrollo de modelos matemáticos han ayudado a explicar comportamiento sociales, económicos y ambientales, para este caso, la construcción de un modelo de combustible de la vegetación del Parque Natural Regional Los Besotes se convierte en fundamental para la toma de decisiones y la gestión del territorio, por lo cual, esta investigación se centró en desarrollarlo mediante imágenes satelitales de la plataforma Landsat 7 ETM+ C2 L1, datos del periodo 2011 a 2020, con el cual se obtuvieron dos modelos de combustibles, resaltando el constituido con los indicadores EVI de Jung, SAVI y ARVI, ya que poseen características atípicas con la morfología del terreno y consideran variables físicas externas en sus fórmulas. Los modelos fueron predichos a una probabilidad inferior a Alpha ( $p\text{-value} < 0,05$ ), lo que indica una excelente predicción de la combustión vegetal.

**Palabras clave:** Modelo Matemático, Indicadores Vegetativos, Combustible, EVI, SAVI, ARVI

Recibido: 21 de febrero de 2023. Aceptado: 24 de Julio de 2023

*Received: February 21, 2023. Accepted: July 24, 2023*

## EVALUATION OF FOREST FUEL MODELS OF THE TROPICAL DRY FOREST OF LOS BESOTES REGIONAL NATURAL PARK - VALLEDUPAR, CESAR

### ABSTRACT

*The development of mathematical models have helped to explain social, economic and environmental behavior, for this case, the construction of a fuel model of the vegetation of the Los Besotes Regional Natural Park becomes essential for decision making and land management, therefore, this research focused on developing it through satellite images from the Landsat 7 ETM+ C2 L1 platform, data from the period 2011 to 2020, with which two fuel models were obtained, highlighting the one made up of Jung's EVI, SAVI and ARVI indicators, since they have atypical characteristics with the morphology of the terrain and consider external physical variables in their formulas. The models were predicted at a probability lower than Alpha ( $p\text{-value} < 0.05$ ), indicating an excellent prediction of plant combustion*

**Keywords:** *Mathematical Model; Vegetative Indicators; Fuel; EVI; SAVI; ARVI*

*Cómo citar este artículo: C. Castillo, A. Calderón, K. Torres C, P. Arias, P. Torres. "Evaluación de modelos de combustible forestal del bosque seco tropical del Parque Natural Regional Los Besotes - Valledupar, Cesar.", Revista Politécnica, vol.19, no.38 pp.54-77, 2023. DOI:10.33571/rpolitec.v19n38a4*

## 1. INTRODUCCIÓN

El Cambio Climático ha intensificado los efectos antrópicos que se manifiestan en afectaciones para el desarrollo de la biodiversidad en el planeta, los incendios forestales quizá son los eventos más catastróficos y permanentes porque les toma poco tiempo para lograr una considerable devastación. En referencia a esto, se han desarrollado investigaciones para tratar de gestionar eficientemente el riesgo del desastre y su puesta en práctica requiere primero de demostrar que tan efectivo y eficaz es planificar sobre estas.

Los Bosques Secos Tropicales (BST) es uno de los ecosistemas más amenazados en Colombia, de 9 millones de hectáreas solo queda el 8% de esta [1], siendo las actividades agrícolas y ganaderas y el progresivo aumento de la línea urbanística los principales responsables de su reducción [2], pero también se resalta la gran responsabilidad que tienen los incendios forestales y las repercusiones ocasionadas sobre la biodiversidad [3].

Los fuegos forestales pueden ser provocados u originados de manera natural, sin embargo, un porcentaje importante de los casos registrados de incendios son antrópicos [4], por actividades frecuentes como lo son quemaduras sobre los ecosistemas para el control de plagas, fuegos no controlados para la preparación del suelo y la acumulación de residuos o basuras que facilitan la ignición vegetal entre otros [5]; naturalmente se presenta la ignición vegetal a consecuencia de la combinación de biocombustibles por derivados aceitosos, el aire seco y los altos registros de temperatura [6].

El Parque Natural Regional (PNR) Los Besotes, ubicado al norte de Valledupar y localizado en las mencionadas regiones ha sufrido consecuencias devastadoras en su flora y fauna a consecuencia de incendios forestales cuyo origen se supone es producto de personas inescrupulosas [7]. En el año 2016 en este lugar se registró el incendio más devastador de la historia del departamento del Cesar, donde las llamas consumieron más de 2.000 hectáreas de BST y el costo de su atención para el control del fuego tuvo un valor equivalente a los trescientos cuarenta y ocho millones de pesos [8].

Esta investigación trata la temática de construcción de modelo de combustible para el Parque Natural Regional Los Besotes, para esto, se propuso evaluar mediante sistema de información geográfico los cambios de diez años de estudio desde 2011 hasta 2020, especialmente para los meses febrero y marzo, que presentan antecedentes de conflagración para este lugar.

Esta investigación fue desarrollada en tres objetivos específicos, el primero consto en Determinar La Salud Ecosistémica Del Parque Natural Regional Los Besotes Mediante El Cálculo De Índice De Vegetación De Diferencia Normalizado (NDVI) Índice De Vegetación Mejorado (EVI), Índice De Vegetación Ajustado Al Suelo (SAVI), Índice De Vegetación Resistente A La Atmósfera (ARVI), Índice De Clorofila Verde (GCI), Índice De Pigmentación Insensible A La Estructura (SIPI) Y El Índice De Calcinación Normalizado (NBR).

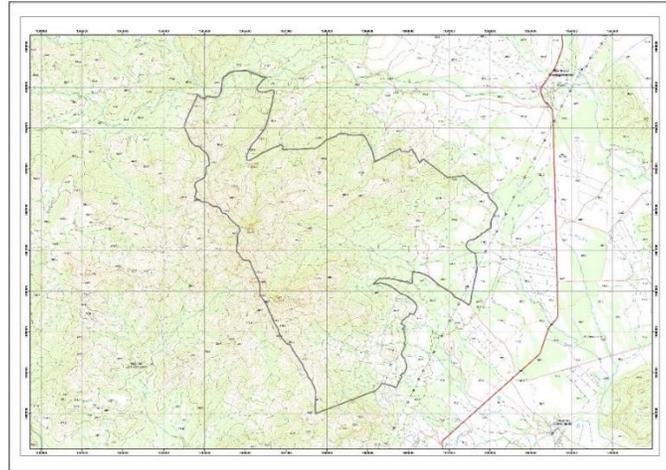
Seguidamente se propuso Construir El Modelo De Combustible Forestal Del Parque Natural Regional Los Besotes Mediante La Comparación De Los Indicadores NDVI, EVI, SAVI, ARVI, GCI, SIPI, NBR y dNBR.

Por último, se logró Zonificar El Modelo De Combustible Forestal Del Parque Natural Regional Los Besotes Para La Simulación De Propagación De Incendios Como Indicador De Alerta Temprana.

## 2. MATERIALES Y METODO

El Parque Natural Regional (PNR) Los Besotes, está ubicado a 10 kilómetros al norte de la ciudad de Valledupar, capital del departamento del Cesar; el cual está comprendido por un área de 4316,3 hectáreas de extensión que fue priorizada por la Corporación Autónoma Regional del Cesar para su eventual declaratoria como área natural protegida, debido tanto a la riqueza e importancia de las poblaciones de flora y fauna allí presentes [9], las cuales son representativas de la ecología regional y en la cual se destaca la gran variedad

de especies en aves que permiten el turismo ornitológico (aviturismo), este tipo de entornos priorizados cumplen funciones ambientales de prestación de bienes y servicios sin los cuales es inimaginable el bienestar y el desarrollo de la sociedad [10].



**Figura 1.** Parque Natural Regional Los Besotes

Fuente: Extraído del Estudio Básico Para La Declaratoria De Un Área Natural Protegida En La Región De Los Besotes (Municipio De Valledupar) Y Formulación De Su Plan De Manejo (2011)

Como se muestra en la figura 1, el Parque Natural Regional Los Besotes, se encuentra ubicado sobre las primeras estribaciones de la Sierra Nevada de Santa Marta, alcanzando su máxima altitud en el denominado “Cerro Boquinete” o “Cerro de Los Cóndores” a los 1680 msnm, lugar donde se ubica la divisoria de aguas entre la quebrada Aguas Blancas y el arroyo Sabana de las Minas. Su límite inferior alcanza aproximadamente a 190 msnm, más exactamente en el camino que conduce del Relleno Sanitario de Los Corazones a la finca conocida como “Buenavista”.

En su mayoría el área está cubierta por amplias zonas de “matorrales espinosos” y remanentes de “bosque seco tropical” en diferentes estados sucesionales, y en menor grado por relictos de bosque ripario original, enclavados en zonas de difícil acceso y en las márgenes de las diferentes corrientes hídricas que surcan el área, así como por praderas naturales de gramíneas que se ubican en su porción de mayor altitud.



**Figura 2.** Localización del Parque Natural Regional Los Besotes

Fuente: Elaborado por los Autores (2021) a partir de la referencia presentada en el Estudio Básico Para La Declaratoria De Un Área Natural Protegida En La Región De Los Besotes (Municipio De Valledupar) Y Formulación De Su Plan De Manejo (2011)

Es importante mencionar que esta área se ubica al interior de la Reserva Forestal “Sierra Nevada de Santa Marta” establecida por la Ley 2 de 1959, y que el Plan de Ordenamiento Territorial del municipio de Valledupar y el artículo 92 del código de zonificación y normas urbanísticas de Valledupar la clasifica como “Suelo rural localizado dentro de la reserva forestal”, para su correspondiente ordenación por parte del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. No obstante, a esta disposición municipal, es oportuno observar que la propuesta de CORPOCESAR de establecer la zona de estudio como área natural protegida es totalmente pertinente, a pesar de la existencia de dicha Reserva Forestal

## 2.1 FASES DE DESARROLLO

Fase 1: Determinación De La Salud Ecosistémica Del Parque Natural Regional Los Besotes Mediante El Cálculo De Índice De Vegetación De Diferencia Normalizado (NDVI) Índice De Vegetación Mejorado (EVI), Índice De Vegetación Ajustado Al Suelo (SAVI), Índice De Vegetación Resistente A La Atmósfera (ARVI), Índice De Clorofila Verde (GCI), Índice De Pigmentación Insensible A La Estructura (SIPI) Y El Índice De Calcinación Normalizado (NBR)

### Actividad 1: Obtención y Especificación Del Insumo Satelital

**Descripción:** la información para el desarrollo de esta investigación se obtuvo de plataformas como el Earth Data del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), representativas de un lapso de estudio de diez años a partir del 2011 al 2020. Las imágenes descargadas tenían una resolución con sensor OLI y TIRS de 30 metros. La información complementaria y de referencia espacial del PNR Los Besotes se obtuvo mediante suministro de la Oficina de Subdirección de Ambiente de la Corporación Autónoma Regional del Cesar (CORPOCESAR) donde se especificó la cobertura vegetal, clasificación de los predios y otros elementos que integran su paisaje.

### Actividad 2: Clasificación De Los Índices

**Descripción:** para calificar el estado de salud ecosistémica del PNR Los Besotes se realizó la implementación de los índices NDVI, EVI, SAVI, GCI, SIPI, NBR y dNBR, conforme a las formulaciones matemáticas correspondiente a cada uno de estos y de las bandas satelitales correspondientes a cada uno de estos.

**Tabla 1.** Clasificación de los valores de los indicadores vegetativos

Clasificación	Valor del Indicador
Especie vegetal muerta u objetos inanimados	-1 – 0
Planta Enferma	0 – 0,33
Planta Medianamente Sana	0,33 – 0,66
Planta Muy Sana	0,66 – 1

Fuente: Curso Teledetección Aplicada a la Agricultura de Precisión. [11]

### Actividad 3: Estandarización De Los Resultados

**Descripción:** con los resultados obtenidos se realizó la calificación de los indicadores vegetativos y también una sumatoria ponderada de factores de los valores del NDVI, EVI, SAVI, GCI, SIPI y NBR para obtener un valor representativo de la salud ecosistémica del PNR Los Besotes.

$$MP = \frac{p_1X_1 + p_2X_2 + \dots + p_NX_N}{p_1 + p_2 + \dots + p_N}$$

Dónde,  $X_1, X_2, \dots, X_N$  son el conjunto de datos representativos de los indicadores vegetativos y  $p_1, p_2, \dots, p_N$  son los pesos representativos de cada indicador vegetativo.

---

Fase 2: Construcción Del Modelo De combustible Forestal Del Parque Natural Regional Los Besotes Mediante La Comparación De Los Indicadores NDVI, EVI, SAVI, ARVI, GCI, SIPI, NBR y **dNBR**

#### **Actividad 4: Descripción De Las Coberturas Vegetales**

**Descripción:** De acuerdo con el Estudio Básico Para La Declaratoria De Un Área Natural Protegida En La Región De Los Besotes (Municipio De Valledupar) Y Formulación De Su Plan De Manejo de CORPOCESAR, se realizó investigación y descripción de las coberturas vegetales del mencionado lugar para poder tener un referente que ayudó a indagar respecto a la probabilidad de focos incendiarios y la densidad vegetativa. Las coberturas vegetales del PNR Los Besotes son:

- Bosque Ripario
- Bosque Ripario sobre laderas fuertemente escarpadas
- Bosque Seco Tropical
- Bosque Seco Tropical en Recuperación
- Matorral Espinoso Tropical
- Matorral Espinoso Tropical en Recuperación
- Pajonales
- Pasto con Árboles y Arbustos
- Pastos Manejados
- Varillales

Cada una de estas coberturas fue evaluada y caracterizada según el resultado de los indicadores vegetativos evaluados en la primera etapa.

#### **Actividad 5: Análisis de Varianza De Los Indicadores Vegetativos**

**Descripción:** Se realizó el Análisis de Varianza (ANOVA) del Índice De Vegetación De Diferencia Normalizado (NDVI) Índice De Vegetación Mejorado (EVI), Índice De Vegetación Ajustado Al Suelo (SAVI), Índice De Vegetación Resistente A La Atmósfera (ARVI), Índice De Clorofila Verde (GCI) y el Índice De Pigmentación Insensible A La Estructura (SIPI) y del Índice De Calcinación Normalizado (NBR) para realizar la comparación de media de los modelos (tratamientos).

#### **Actividad 6: Regresión Múltiple De Los Indicadores Vegetativos**

**Descripción:** Se realizó una regresión múltiple del Índice De Vegetación De Diferencia Normalizado (NDVI) Índice De Vegetación Mejorado (EVI), Índice De Vegetación Ajustado Al Suelo (SAVI), Índice De Vegetación Resistente A La Atmósfera (ARVI), Índice De Clorofila Verde (GCI) y el Índice De Pigmentación Insensible A La Estructura (SIPI) (como variables independientes) respecto al Índice De Calcinación Normalizado (NBR) (como variable dependiente), para definir el modelo de combustible del PNR Los Besotes.

#### **Fase 3: Zonificación Del Modelo De Combustible Forestal Del Parque Natural Regional Los Besotes Para La Simulación De Propagación De Incendios Como Indicador De Alerta Temprana**

##### **Actividad 7: Mapa De los indicadores Vegetativos**

**Descripción:** se hizo representación gráfica del Índice De Vegetación De Diferencia Normalizado (NDVI) Índice De Vegetación Mejorado (EVI), Índice De Vegetación Ajustado Al Suelo (SAVI), Índice De Vegetación Resistente A La Atmósfera (ARVI), Índice De Clorofila Verde (GCI) y el Índice De Pigmentación Insensible A La Estructura (SIPI) y del Índice De Calcinación Normalizado (NBR)

##### **Actividad 8: Mapas Del Modelo De Combustible**

**Descripción:** Se hizo representación gráfica del Modelo de Combustible conforme a los cambios obtenidos con el Análisis de Varianza (ANOVA) y su análisis de ponderación superpuesta de los indicadores vegetativos presentados.

## RESULTADOS Y ANALISIS

### 3.1 Determinación De La Salud Ecosistémica Del Parque Natural Regional Los Besotes.

Mediante El De Índice De Vegetación De Diferencia Normalizado (NDVI) Índice De Vegetación Mejorado (EVI), Índice De Vegetación Ajustado Al Suelo (SAVI), Índice De Vegetación Resistente A La Atmósfera (ARVI), Índice De Clorofila Verde (GCI), Índice De Pigmentación Insensible A La Estructura (SIPI) Y El Índice De Calcinación Normalizado (NBR)

Para el desarrollo de esta primera actividad se accedió al servicio de información digital satelital del Servicio Geológico de los Estados Unidos de América del cual se obtuvieron diez imágenes satelitales de la plataforma Landsat 7 ETM+ C2 L1

**Tabla 2. Información General de las Imágenes Satelitales**

Nº	Fecha	Peso (KB)	ID
1	06 de marzo de 2011	360.315	LE07_L1TP_008053_20110306_20200910_02_T1
2	08 de marzo de 2012	349.113	LE07_L1GT_008053_20120308_20200909_02_T2
3	07 de febrero de 2013	356.521	LE07_L1TP_008053_20130207_20200908_02_T1
4	26 de febrero de 2014	350.988	LE07_L1TP_008053_20140226_20200906_02_T1
5	01 de marzo de 2015	345.126	LE07_L1TP_008053_20150301_20200905_02_T1
6	03 de marzo de 2016	359.313	LE07_L1TP_008053_20160303_20200902_02_T1
7	22 de marzo de 2017	336.147	LE07_L1TP_008053_20170322_20200831_02_T1
8	21 de febrero de 2018	362.078	LE07_L1TP_008053_20180221_20200830_02_T1
9	12 de marzo de 2019	345.129	LE07_L1TP_008053_20190312_20200826_02_T1
10	14 de marzo de 2020	367.789	LE07_L1TP_008053_20200314_20200822_02_T1

#### Obtención Y Especificación Del Insumo Satelital

El periodo de estudio seleccionado fue limitado por la ausencia de información referente a años anteriores al año 2011 y posteriores al año 2020, sin embargo, conforme a las investigaciones antecedidas a esta se puede manifestar que las muestras son suficientes para poder explicar la situación que se quiere desarrollar con esta investigación.

En fin, al descargar las imágenes se obtienen los archivos presentados en la 2, las cuales son representadas en las siguientes cartografías elaboradas mediante la combinación de las bandas 3 (Rojo), 2 (Verde) y 1 (Azul) de la imagen satelital, con la cual se obtiene un color natural, por lo tanto, el resultado es el mostrado a continuación:

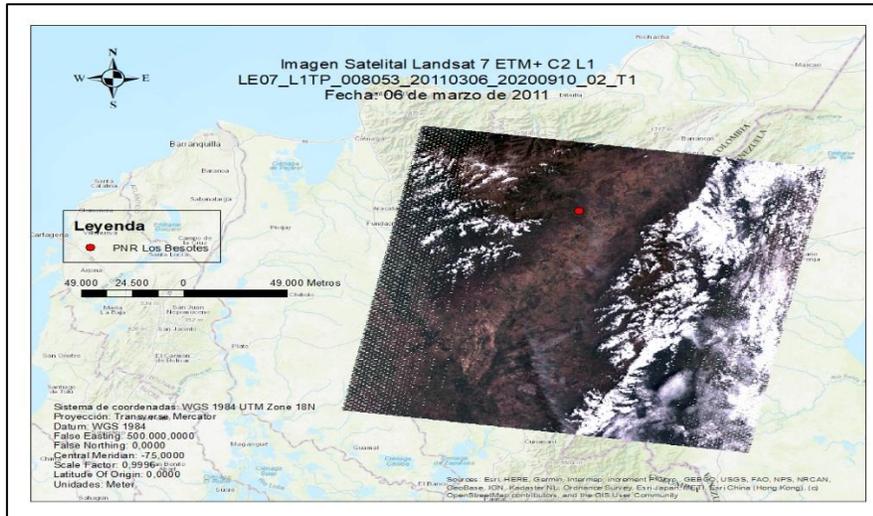
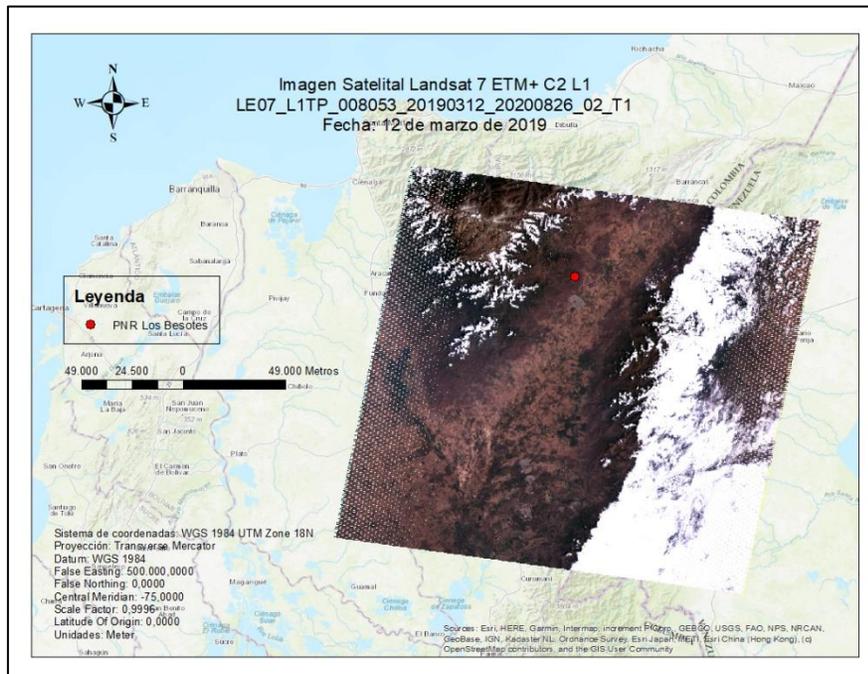


Figura 3. Imagen Satelital Landsat 7 ETM + C2 L1 del año 2011





Es de aclarar que todas las proyecciones de esta información se trabajaron en un datum geográfico del modelo WGS 1984 localizado en la UTM zona 18 Norte, franja en donde se encuentra localizada el área de interés y que, en parte, facilitó trabajar considerando que las imágenes descargadas, por naturaleza, proceden con el mismo sistema de proyección de coordenadas.

En la figura 7, se presenta el mapa de coberturas vegetales clasificadas del Parque Natural Regional Los Besotes.

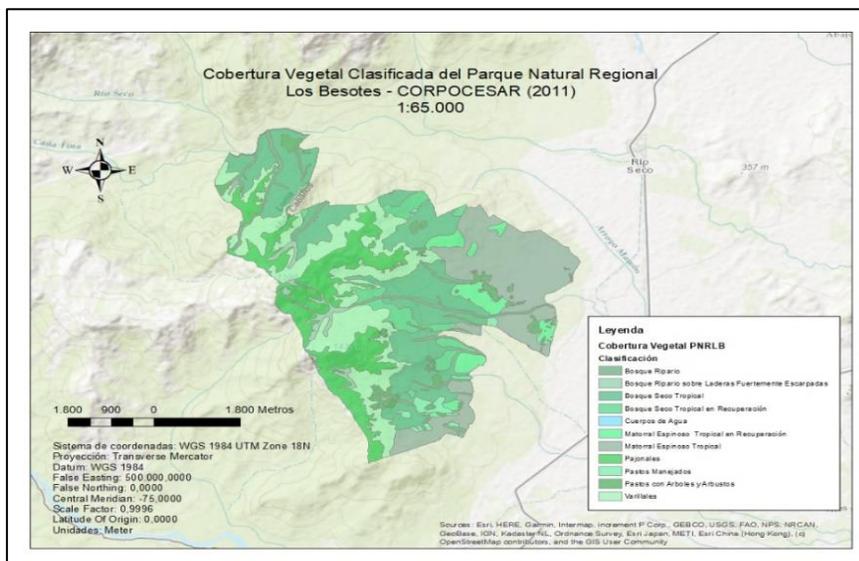


Figura 7. Cobertura Vegetal del Parque Natural Regional Los Besotes

Fuente: Tomado por los Autores (2022) de la Oficina de Subdirección de Ambiente de la Corporación Autónoma Regional del Cesar (CORPOCESAR)

Para establecer si se podía construir un modelo de combustible o no, se hizo un análisis de varianza preliminar, incluyendo todas las variables, sin embargo, fue no significativo, pero, al separar las variables de acuerdo con su distribución o la posición de los polígonos en el terreno se encontró que se podían construir dos modelos.

El primero constituido por el EVI, ARVI Y SAVI y el segundo por GCI, SIPI Y NDVI.

### Clasificación De Los Índices

Para la clasificación de los índices vegetativos y de combustión vegetal se emplearon las bandas 1 (azul) ,2 (verde) ,3 (rojo),4 (infrarrojo cercano) y 5 (infrarrojo de onda corta), que constituyen las imágenes satelitales del satélite Landsat 7 ETM+ C2 L1. Como este procedimiento se desarrolló en ArcMap, las expresiones matemáticas expuestas en el marco teórico fueron expresadas en las nociones de escritura del Álgebra de Mapas del ArcTool Box de ArcMap. Estos se ven así como se muestra en la tabla 3:

Tabla 3. Nociones de las Fórmulas de los Indicadores

N.º	Indic.	Fórmula
1	NDVI	$\text{Float}(B4 - B3) / \text{Float}(B4 + B3)$
2	EVI	$2.5 + (\text{Float}(B4 - B3) / (\text{Float}(B4) + \text{Float}(B3 * 6) - \text{Float}(B1 * 7.5) + 1))$ <i>No funcionó el primer método de A. Huete, K. Didan, T. Miura, EP Rodríguez, X. Gao, LG Ferreira (2002).</i> $2.5 + ((\text{Float}(B4 - B3) / (\text{Float}(B4) + \text{Float}(B3 * 2.4) + 1)))$ <i>Método de Jung (2008). Si funcionó.</i>
3	SAVI	$\text{Float}(B4 - B3) / ((\text{Float}(B4 + B3 + 0.5)) * (1.5))$
4	ARVI	$\text{Float}(B4 - (2 * B3) + B1) / \text{Float}(B4 + (2 * B3) + B1)$

5	GCI	$(\text{Float}(B4)/\text{Float}(B2)) - 1$
6	SIPI	$\text{Float}(B4 - B3)/\text{Float}(B4 - B1)$
7	NBR	$\text{Float}(B4 - B5)/\text{Float}(B4 + B5)$

Fuente: Adaptado por los Autores, 2022.

Para mayor precisión de los datos se realizaron los cálculos utilizando números decimales, *Float*.

Las "B" presentadas las tablas anteriores es una sigla equivalente a "Banda", sin embargo, se observan otras variables en juego, estas se explican en la tabla 4:

Tabla 4. Composición de las Bandas y otras Variables

N.º	Indic.	Composición de Bandas
1	NDVI	Composición de Bandas 4 y 3 para obtener NDVI
2	EVI	Composición de Bandas 4, 3 y 1 para obtener EVI con G=2,5; L=1; C1=6; C2=7,5
3	SAVI	Composición de Bandas 4 y 3 para obtener SAVI con L=0,5
4	ARVI	Composición de Bandas 4, 3 y 1 para obtener ARVI
5	GCI	Composición de Bandas 4 y 2 para obtener GCI
6	SIPI	Composición de Bandas 4, 3 y 1 para obtener SIPI
7	NBR	Composición de Bandas 5 y 4 para obtener NBR

Fuente: Adaptado por los Autores, 2022.

Los valores G, L, C1 y C2, son variables que implican criterios de inclinación y refracción, que son valores obtenidos experimentalmente por los autores de cada indicador.

Hay que tener en cuenta que para cada una de las imágenes que se compilan en los 10 años de estudio se realizó la obtención de los 7 indicadores presentados en las tablas anteriores, por lo tanto, se esperaba inicialmente obtener 70 imágenes, las cuales se compilan en una sola mediante una evaluación multicriterio de sumatoria ponderada que finalmente deriva en 8 indicadores que representan los cambios surtidos en la vegetación

Para la clasificación de los índices vegetativos y de combustión vegetal se emplearon las bandas 1 (azul) ,2 (verde) ,3 (rojo),4 (infrarrojo cercano) y 5 (infrarrojo de onda corta), que constituyen las imágenes satelitales del satélite Landsat 7 ETM+ C2 L1.

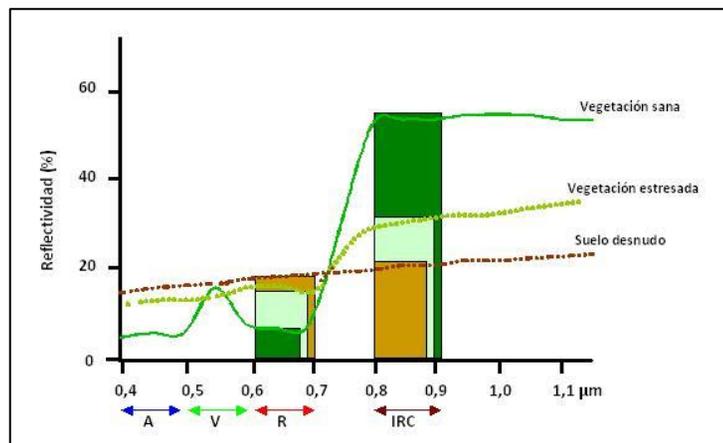


Figura 8. Clasificación de la Vegetación por Reflectividad  
Fuente: Tomado por los Autores (2022) del EarthExplore

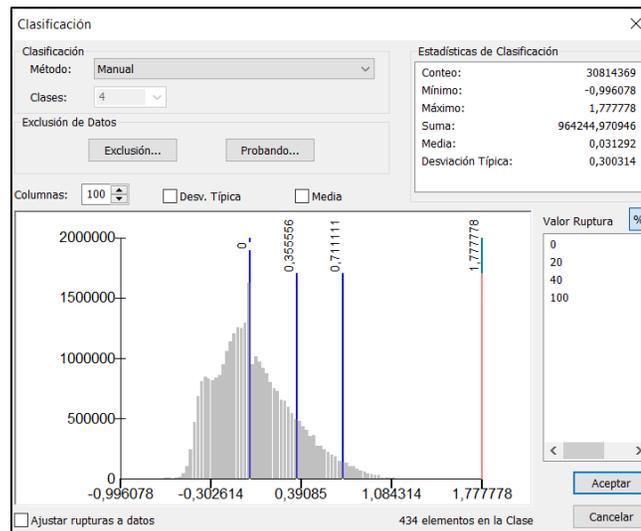


Figura 9. Clasificación de categorías manuales

Fuente: Elaborado por los Autores, 2022.

Realizando la categorización del Índice de Salud Ecosistémico respecto a los indicadores se obtiene lo siguiente, como se muestra en la figura 10:

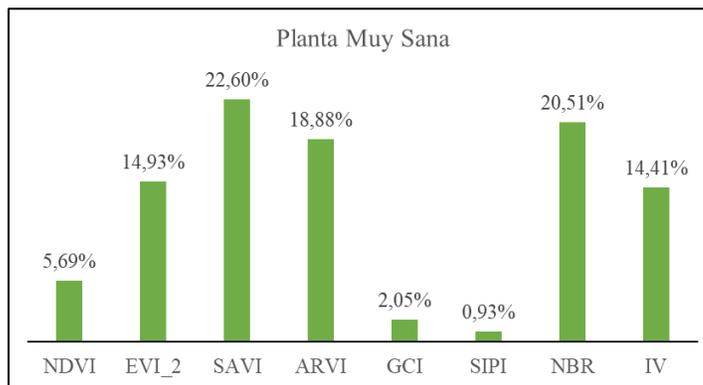


Figura 10. Categoría del Índice Vegetativo (IV) para Plantas muy Sanas

Indicadores como el SAVI explican mejor el resultado del indicador vegetativo para la categoría de Plantas muy Sanas, aunque también hay importantes tendencias del ARVI y EVI.

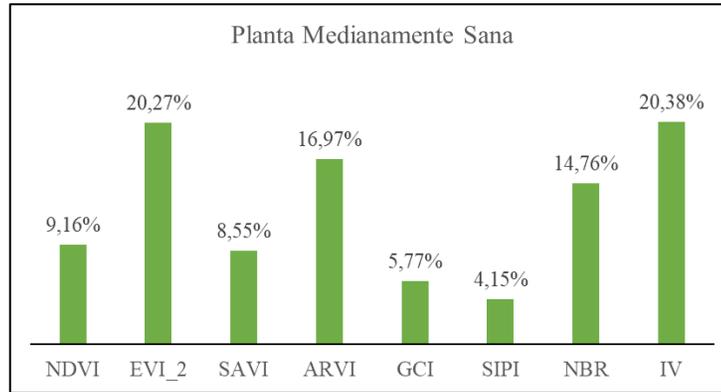


Figura 11. Categoría del Índice Vegetativo (IV) para Plantas Medianamente Sana

Las plantas medianamente Sanas tienen mayor incidencia del EVI y del ARVI que los demás indicadores, lo que significa que son importantes para explicar esta categoría.

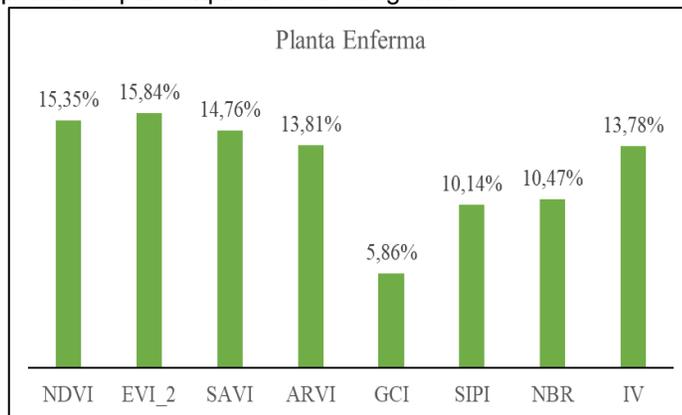


Figura 12. Categoría del Índice Vegetativo (IV) para Plantas Enfermas

Las plantas enfermas son explicadas notoriamente por la mayoría de los indicadores principalmente por el EVI, NDVI, SAVI y ARVI, por lo cual explicarían bien esta categoría.

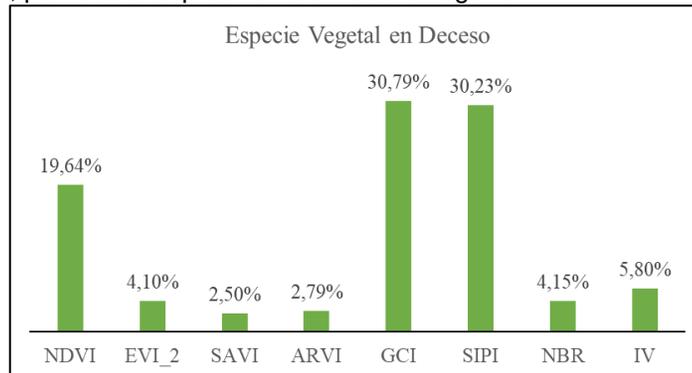


Figura13. Categoría del Índice Vegetativo (IV) para Especies Vegetales en Deceso

Como se observa en la figura 13, el GCI y el SIPI son los indicadores vegetativos que tienen mayor correlación con la situación de especies vegetales en deceso, por lo tanto, conformar un grupo con estas variables puede ser importante para tratar de explicar esta categoría. Otra variable que exalta es el NDVI, que tiene valor porcentual similar a los valores explicados para las categorías anteriores, este puede ser considerado medianamente, sin embargo, se debe avanzar en el análisis estadístico para conocer la incidencia de estos.

Por otra parte, el análisis multianual del NBR presenta el siguiente resultado en la figura 14:

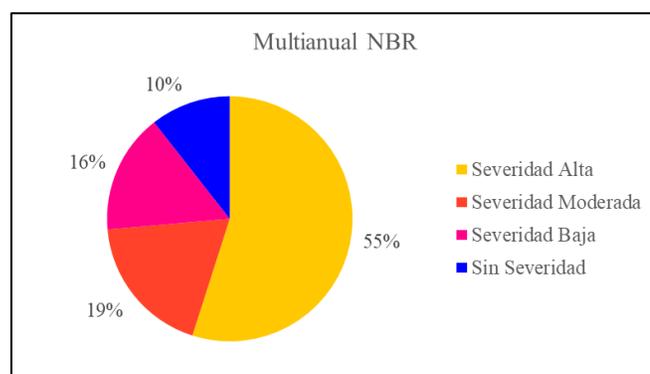


Figura14. Resultado NBR Multianual

De manera combinada, mayoritariamente la clase predominante sobre las coberturas vegetativas del Parque Natural Regional Los Besotes es de Severidad Alta en un 55%, siendo un reflejo del máximo daño sufrido por la combustión de la biomasa. Solo el 10% de la vegetación de este lugar se mantiene sin severidad.

### 3.2 Construcción Del Modelo De Combustible Forestal Del Parque Natural Regional Los Besotes Mediante La Comparación De Los Indicadores NDVI, EVI, SAVI, ARVI, GCI, SIPI, NBR Y DNBR

#### Descripción De Las Coberturas Vegetales

Para construir el modelo es necesario definir cual clase de cobertura vegetal es más tendencial a la combustión por sus propiedades intrínsecas de propagar y aumentar las conflagraciones. Este procedimiento se realiza mediante ArcMap de la siguiente manera:

Se procede a trabajar con las capas de cobertura vegetal. Como este es un archivo vectorial se coloca todas las propiedades de simbología y la conglomeración o unión de todas las capas en una sola consolidada y se procede a convertir en Raster usando el ArcTool Box y se obtiene un archivo definido para esto:

Puesto que son 11 categorías, la idea de hacer la reclasificación es obtener 1 raster para cada categoría: 1 para el Bosque Ripario, Bosque Ripario sobre Laderas Fuertemente Escarpadas, Bosque Seco Tropical, Bosque Seco Tropical en Recuperación, Matorral Espinoso Tropical en Recuperación, Matorral Espinoso Tropical, Pajonales, Pastos con Árboles y Arbustos, Pastos Manejados y Varillales. Las áreas de la cobertura vegetal se muestran en la tabla 5:

**Tabla 5. Coberturas Vegetales del Parque Natural Regional Los Besotes**

N	Abreviatura	Cobertura Vegetal	Área (Ha)
1	BR	Bosque Ripario	5,43
2	BRR	Bosque Ripario sobre Laderas Fuertemente Escarpadas	11,94
3	BST	Bosque Seco Tropical	93,23
4	BSR	Bosque Seco Tropical en Recuperación	5,09
5	CA	Cuerpos de Agua	0,06
6	MER	Matorral Espinoso Tropical en Recuperación	0,09
7	MET	Matorral Espinoso Tropical	0,33
8	PA	Pajonales	2,05
9	PAA	Pastos con Árboles y Arbustos	4,96
10	PM	Pastos Manejados	4,5

11	VA	Varillales	0,21
----	----	------------	------

Fuente: Elaborado por los Autores (2022) de la Oficina de Subdirección de Ambiente de la Corporación Autónoma Regional del Cesar (CORPOCESAR)

El resultado de la superposición entre los resultados de los modelos de combustible de importante severidad y de las coberturas vegetales se obtienen los siguientes resultados, como s muestra en la figura 15:

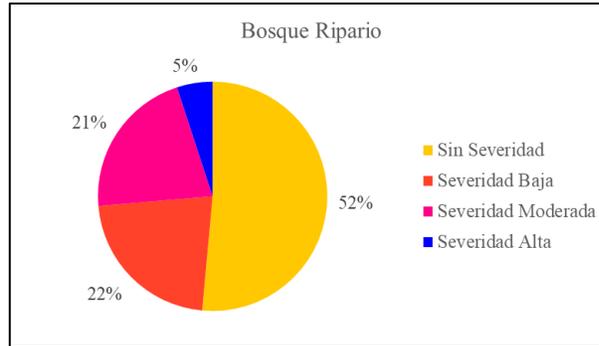


Figura 15 Análisis de Combustión del Bosque Ripario

Como se aprecia, de acuerdo con el modelo multianual de combustión y su correlación con las coberturas vegetales, el Bosque Ripario tiene un 5% de severidad alta por conflagraciones y fuegos de consumo de biomasa, sin embargo, el Bosque Ripario se correlaciona mayoritariamente con la inexistencia de Severidad.

Este resultado no implica probabilidades, sino la información interpolada de la extensión de conflagraciones conjuntas multianuales en las coberturas del plan de manejo del Parque Natural Regional Los Besotes.

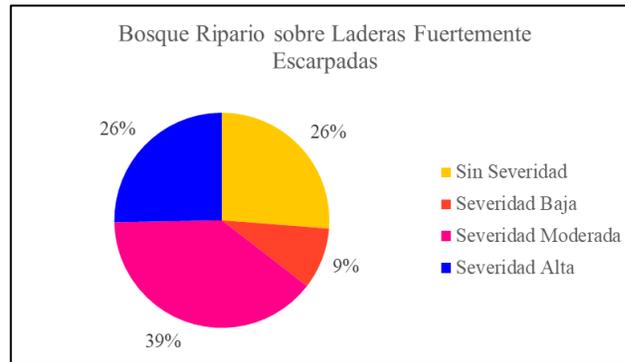


Figura16. Análisis de Combustión del Bosque Ripario sobre Laderas Fuertemente Escarpadas

Como se aprecia, los Bosque Riparios en Laderas fuertemente Escarpadas tienen mayor tendencia a una Severidad Alta, sin embargo, en igual proporción no tienen severidad, pero un porcentaje mayor posee severidad moderada.

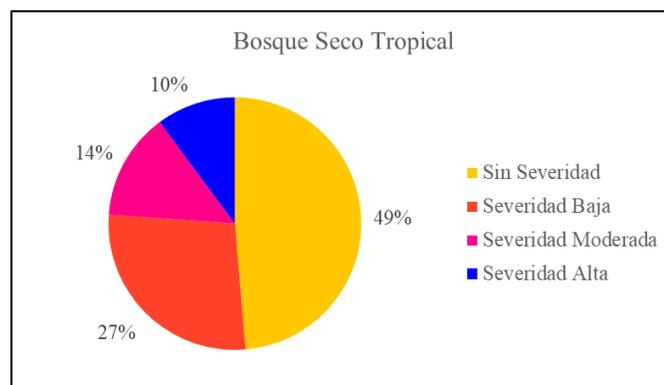


Figura 17. Análisis de Combustión del Bosque Seco Tropical

El Bosque Seco Tropical posee un porcentaje bajo de severidad alta y alto de cero severidades, sin embargo, existe una proporción importante en la severidad baja y moderada. Este comportamiento es de mucho análisis porque el BST es muy relevante y este es un buen indicador que ayuda a comprender la dinámica de los eventos sucedidos conglomerados en la serie tiempo de estudio.

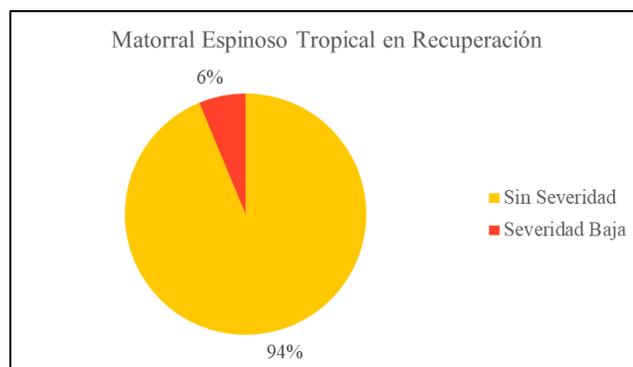


Figura18. Análisis de Combustión del Matorral Espinoso Tropical en Recuperación

Esta cobertura presenta solo dos categorías de correlación, puesto que sus áreas distribuidas se han expuesto a pocos eventos incendiarios. Mayoritariamente posee mayoritariamente poca severidad.

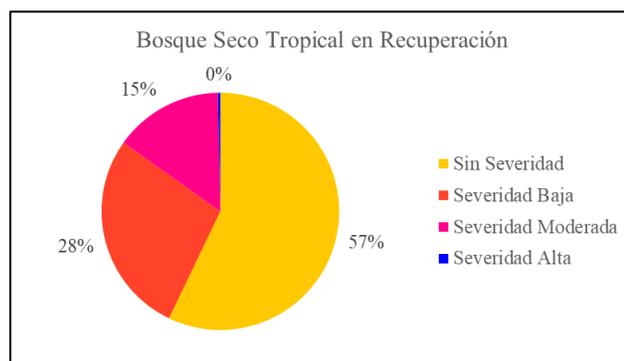


Figura 19. Análisis de Combustión del Bosque Seco Tropical en Recuperación

Además, se denota que las coberturas de BST en recuperación se encuentran en espacios seguros para las categorías de severidad alta, sin embargo, no la limita a la exposición de situaciones porque existen otras categorías en donde predomina la severidad baja y parte de la moderada.

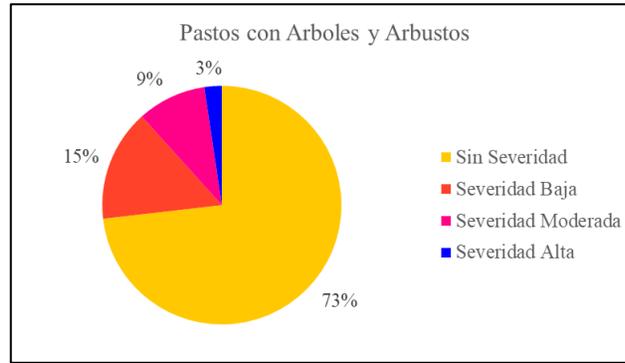


Figura 20. Análisis de Combustión de Pastos con Árboles y Arbustos

Esta cobertura tiene un alto porcentaje de no severidad, sin embargo, acumula otro porcentaje alcanzando hasta la categoría de severidad alta, o bien sea, que cabe la probabilidad de combustionar y afectar de manera relevante.

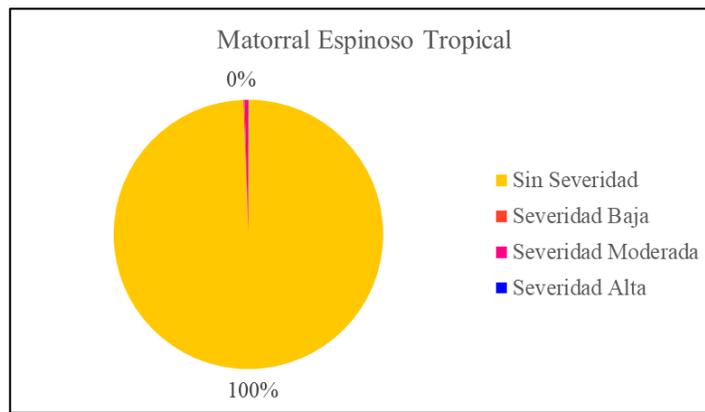


Figura 21. Análisis de Combustión del Matorral Espinoso Tropical

El Matorral Espinoso Tropical se encuentra absolutamente dentro de la categoría de No Severidad. Este resultado es importante porque esto significaría que este componente estructural ecosistémico es íntegro y funcional en sus aspectos.

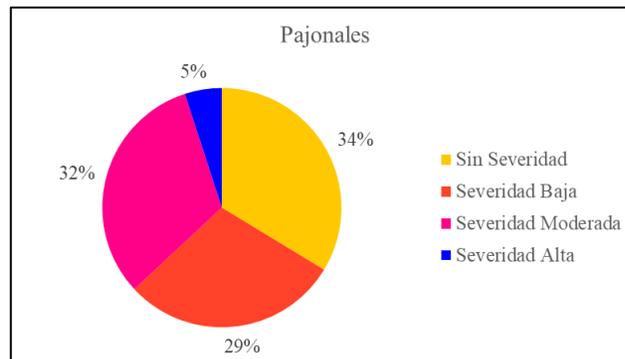


Figura 22. Análisis de Combustión de Pajonales

Para esta cobertura se observa similares proporciones entre los valores de no severidad y de severidad moderada, sin embargo, es mayor los casos de eventos que han afectado la vegetación en diferentes categorías de daño. Para severidad alta, solo el 5% de estos han sido impactados.

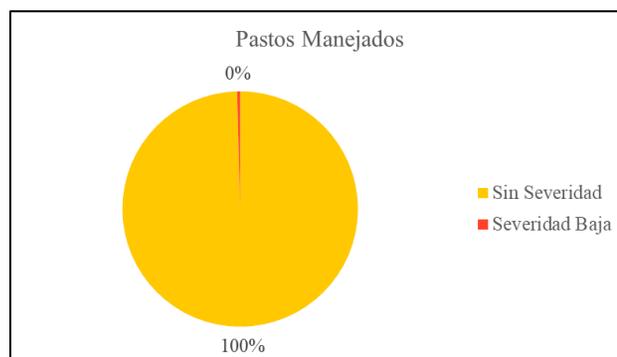


Figura 23. Análisis de Combustión de los Pastos Manejados

Al igual que el Matorral Espinoso Tropical los Pastos Manejados tienen menor impacto por severidad de daños en combustión de biomasa.

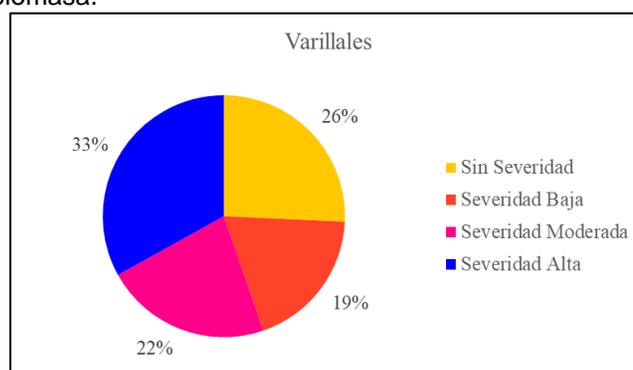


Figura 24. Análisis de Combustión de los Varillales

Este relicto es el que tiene mayor contenido de biomasa y por lo tanto tiene una distribución más enriquecida de las categorías de severidad. Por lo tanto, la severidad alta es mayor y es razonable, así como otras categorías como la moderada y la baja.

#### Análisis De Varianza De Los Indicadores Vegetativos

En principio, se planteó realizar Regresión Lineal Múltiple de la variable dependiente NRB respecto a las variables independientes NDVI, EVI, SIPI, SAVI, ARVI y GCI, sin embargo, se notaron diferencias claves en los datos y también en los aspectos de zonificación geográfica lo cual permitió definir que existen dos modelos de combustible para distintos aspectos de aporte, uno con base al estrés de la biomasa y otro respecto a la funcionalidad por variables físicas externas.

Las relaciones del ANOVA se hicieron para los valores de los indicadores y para los valores de los grupos de los indicadores, logrando significancia del modelo para este aspecto, consiguiendo que el valor crítico de la F-calculada sea menor que el de la F-tabulada a un 95% del intervalo de confianza del modelo de regresión lineal múltiple global. Así mismo, se realizó el ANOVA para los indicadores NDVI, GCI y SIPI, los resultados también fueron significativos para conformar y correlacionar los grupos evaluados, logran la aceptación al 95% del intervalo de confianza.

#### Regresión Múltiple De Los Indicadores Vegetativos

Consiguiendo esto se procedió a realizar la Regresión Lineal Múltiple para constituir los modelos de combustible.

### 3.3 ZONIFICACIÓN DEL MODELO DE COMBUSTIBLE FORESTAL

Mapas De Los Indicadores Vegetativos

Indicadores Modelo De Combustible

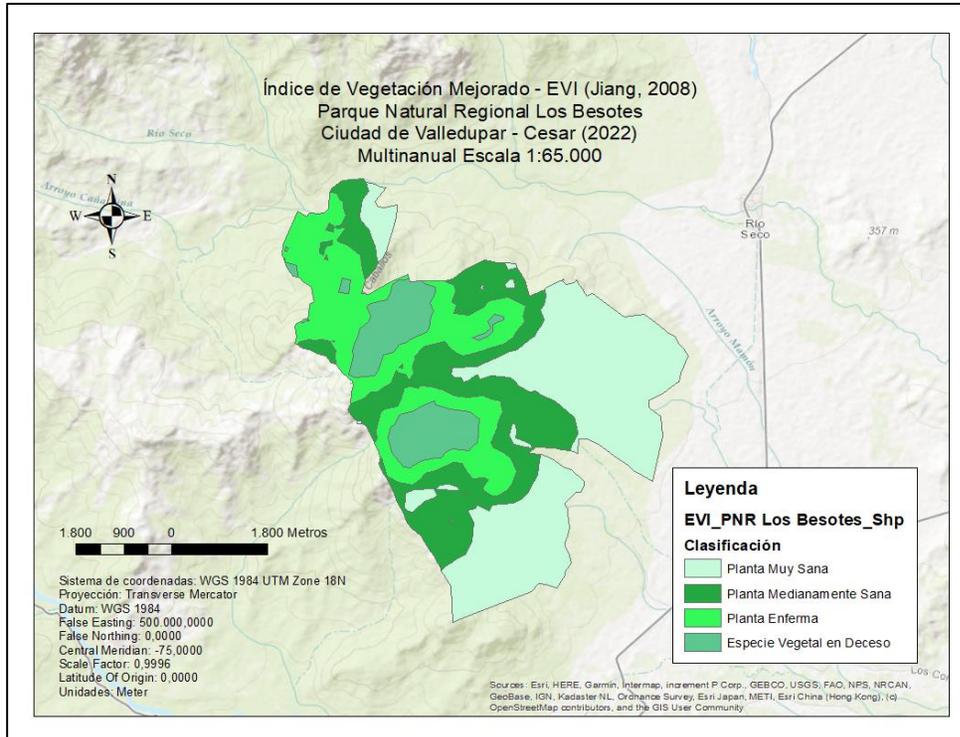


Figura 25. Representación Geográfica del Índice de Vegetación Mejorada – EVI de Jiang del Parque Natural Regional Los Besotes

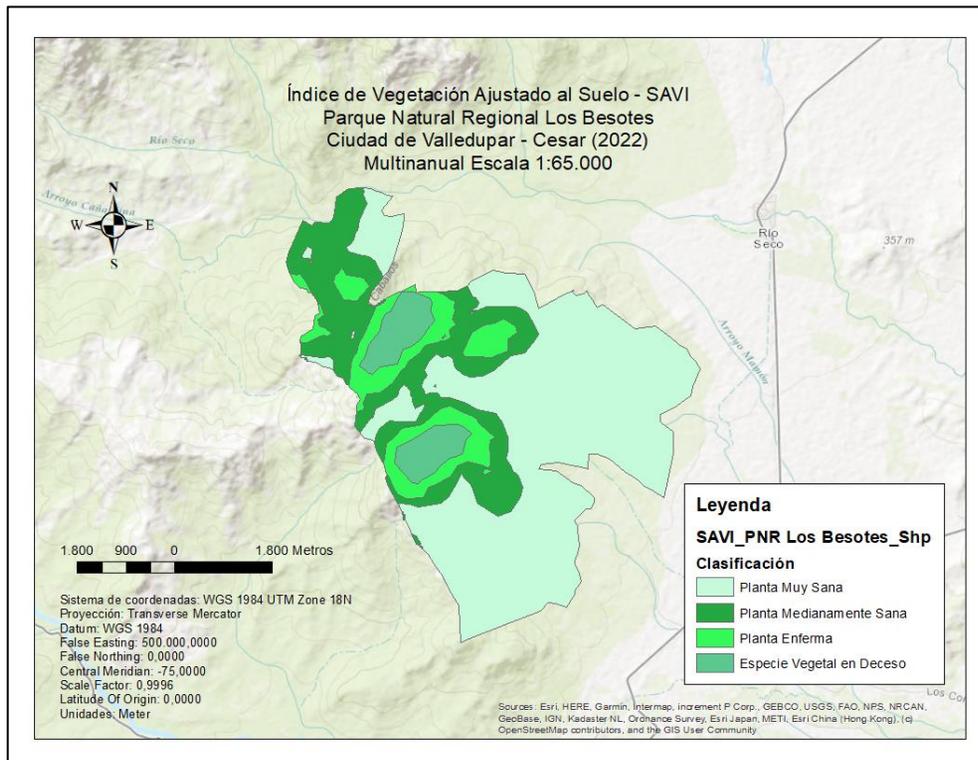


Figura 26. Representación Geográfica del Índice de Vegetación Ajustado al Suelo – SAVI del Parque Natural Regional Los Besotes

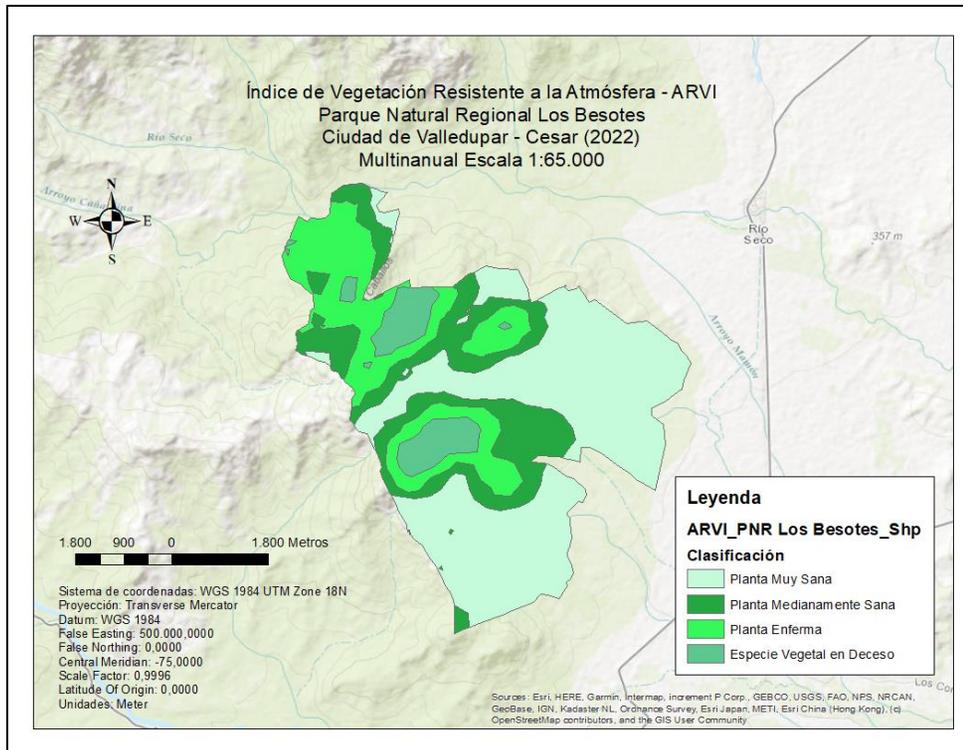


Figura 27. Representación Geográfica del Índice de Vegetación Resistente a la Atmósfera – ARVI del Parque Natural Regional Los Besotes

La primera relación es la similitud que existen entre la zonificación de las clases categóricas, que fue el primer indicio que se tuvo para poder definir que existían dos modelos de combustibles diferentes y que estos razonaban en las consideraciones de variables físicas externas que pueden incidir en la definición del modelo.

Además, siendo que estos tres primeros indicadores tuvieron más influencia en la definición del índice vegetativo, considerando que este último incluyó la variable del Índice de Calcinación Normalizado – NBR, por lo tanto, se considera que este primer modelo tiene una significancia particular para explicar hasta el 14% de la variación de los eventos o situaciones combustibles en la zona de estudio, dato estadístico obtenido de los análisis de relación practicado en la primera fase de esta investigación.

Otra característica que se resalta de este primer modelo es que al incluir variables físicas en sus fórmulas matemáticas de aplicación también concentran gran información en zonas correlativamente especiales y difícil acceso por su topografía y pendientes agrestes, esto, en parte también tiene un significado importante porque la mayoría de los eventos se han propagado con mayor frecuencia en esas zonas de distribución donde es posible encontrar plantas más enfermas.

## Indicadores Modelo De Combustible 2

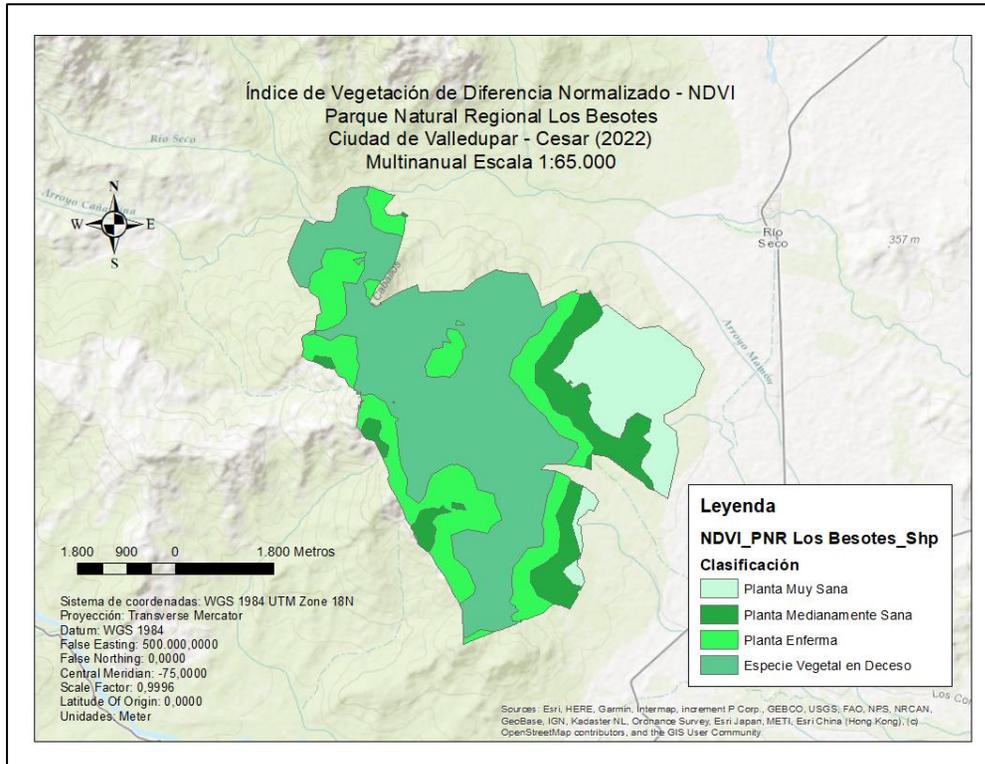


Figura 28. Representación Geográfica del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado – NDVI del Parque Natural Regional Los Besotes

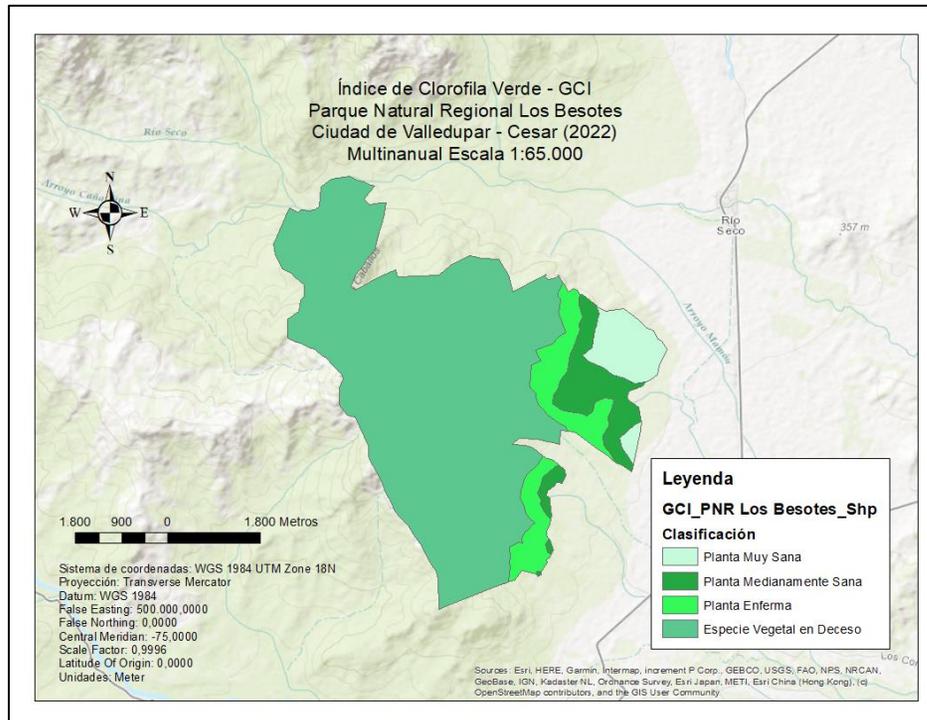
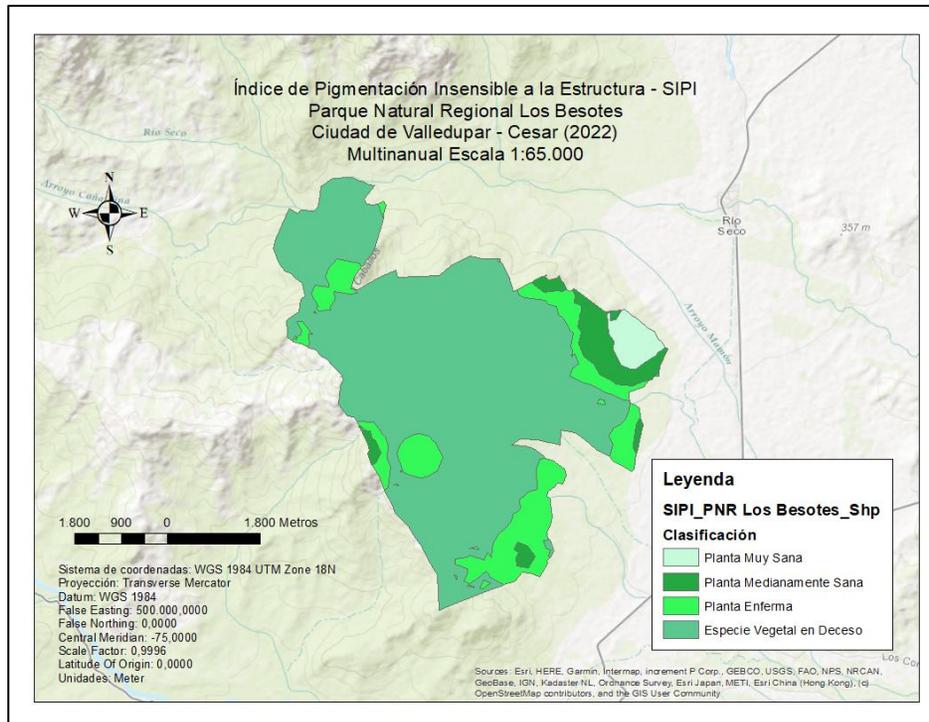


Figura 29. Representación Geográfica del Índice de Clorofila Verde – GCI del Parque Natural Regional Los Besotes



**Figura 30.** Representación Geográfica del Índice de Pigmentación Insensible a la Estructura – SIPI del Parque Natural Regional Los Besotes.

Si bien, al comparar con las figuras 28, 29 y 30, el NDVI al igual que el GCI y el SIPI (como se apreciarán) difieren en las distribuciones de la zonificación de sus clases categóricas, concentrando una gran extensión de especie vegetal en deceso explicando mayoritariamente el área de estudio.

Además, la razón por la cual son congruentes es que estos indicadores no consideran variables físicas en sus fórmulas, sino que utilizan netamente las bandas del satélite para analizar la concentración de clorofila y carotenoides en la vegetación, explicando así desde otro punto de vista funcionales mayores áreas de afectación ante posibles inminentes devastaciones por incendios.

Así mismo, indicadores como el GCI parecen no explicar correctamente la situación de la vegetación del Parque Natural Regional Los Besotes, puesto que las extensiones representadas son poco variables y se concentran en curvas de nivel conforme a la tendencia de la pendiente de los cerros que se integran en esta área.

Esto en principio llevó a la investigación para tratar de comprender el porqué del resultado tan sugerente, pero no se encontró una explicación que pudiera justificar a los autores del porque adopta esta tendencia y forma, lo que en parte llevó a repensar si considerarlo o no, pero para solventar dudas en futuras investigaciones se presenta y se integra en el modelo.

Finalmente, indicadores como el SIPI, el cual si tiene una particularidad más congruente con el NDVI que a diferencia del GCI coincide en características de distribución.

### Mapas Del Modelo De Combustible

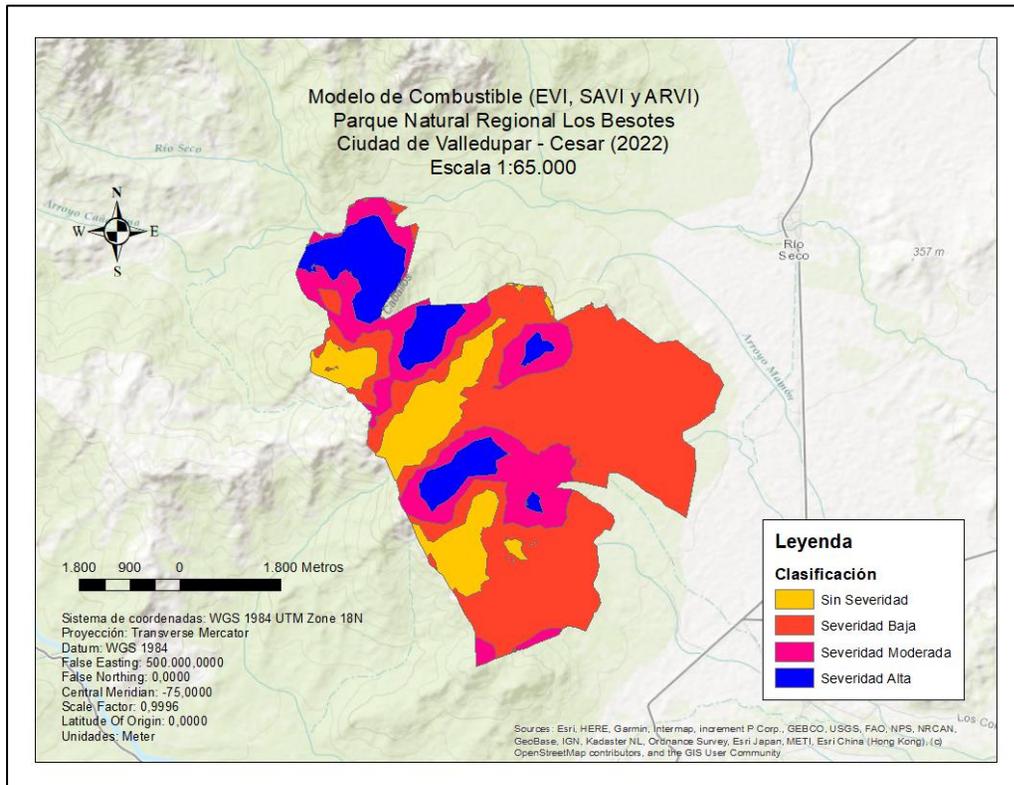
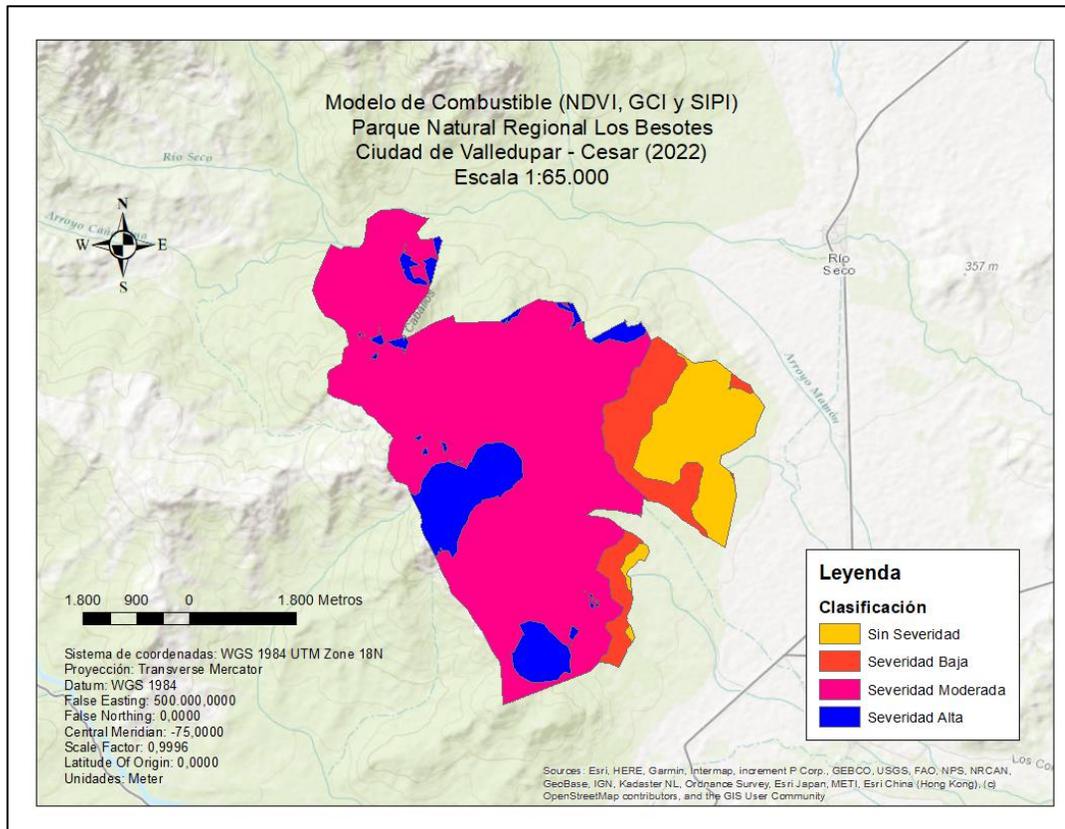


Figura 31. Modelo de Combustible 1 (EVI, SAVI y ARVI)

Como se aprecia en la figura 31, la mayoría de la extensión del polígono se caracteriza porque puede ser clasificado como Severidad Baja y existen zonas que son congruentes con los escarpados lugares del piso altitudinal y térmico más elevado en el Parque Natural Regional Los Besotes.

Así mismo, las zonas de severidad alta se encuentran en sitios con referentes y antecedentes de eventos sucedidos, por lo cual, se puede decir que este modelo es más coherente con lo esperado.



**Figura 32. Modelo de Combustible 2 (NDVI, GCI y SIPI)**

Por otra parte, el modelo de combustible 2 tiene una correspondencia con la tendencia de la pendiente y distribuye las zonas con ese enfoque, localizando las zonas sin severidad en las partes más bajas del parque y las zonas de mayor severidad en las partes más elevadas del parque y mayoritariamente predomina la severidad moderada, que no se distancia de la realidad observable por consecuencia de los eventos comburentes.

## CONCLUSIONES

Se procedió a realizar la aplicación de los índices NDVI, EVI, ARVI, SAVI, GCI, SIPI, NBR y dNBR conforme a las formulaciones y para la mayoría fue correcta su aplicación, sin embargo, para el EVI hubo inconsistencias con los datos y sobre todo por los problemas de bandeado que este satélite presentó, para lo cual fue empleado el EVI de Jung.

Los resultados fueron estandarizados siguiendo la distribución del espectro electromagnético y categorizados en cuatro clases: Planta muy sana, Planta medianamente sana, Planta enferma y Especie vegetal en deceso.

Se identificaron que se conformaban dos grupos, uno para los indicadores NDVI, GCI y SIPI y otro para EVI\_2, ARVI y SAVI siendo significativos al Análisis de Varianza (ANOVA).

Resulta más factible considerar el primer modelo de combustión como el idóneo, ya que contiene variables físicas externas que pueden incidir en la posible distribución de los penachos incendiarios sobre la cobertura.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la ingeniera Karina Torres por su dedicación y enseñanza durante el proceso de este trabajo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Rico, G. (31 de Julio de 2017). Solo queda el 8%: ¿Cuál es el futuro del bosque seco tropical en Colombia? Obtenido de MONGABAY: <https://es.mongabay.com/2017/07/solo-queda-8-futuro-del-bosque-seco-tropical-colombia/>
- [2] Perfetti, J., Balcázar, Á., Hernández, A., & Leibovich, J. (2013). Políticas para el desarrollo de la agricultura en Colombia. Bogotá D.C.: FEDESARROLLO.
- [3] Nasi, R., Dennis, R., Meijaard, E., & Moore, P. (2001). Los incendios forestales y la diversidad biológica. FAO Artículos. Obtenido de <https://www.fao.org/3/y3582s/y3582s08.htm>
- [4] Díaz T., J. (s.f.). Descripción del régimen de incendios del Bosque seco tropical de la cuenca alta del Río Magdalena y su relación con la variación climática. Manizales, Caldas: Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Obtenido de <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/23232/Descripcion%20regimen%20incendios%20bs-T.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [5] IDEAM. (2014). Ecosistemas: Incendios de la Cobertura Vegetal. Obtenido de Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales: <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/incendios-cobertura-vegetal>
- [6] FEDEBIOCOMBUSTIBLES. (2007). BIOCMBUSTIBLES, 50 preguntas sobre este nuevo mercado. Obtenido de Federación Nacional de Biocombustibles de Colombia: <https://www.fedebiocombustibles.com/nota-web-id-923.htm>
- [7] Diario El Pílon. (06 de Diciembre de 2016). El Parque Natural Regional (PNR) Los Besotes, ubicado al norte de Valledupar y localizado en las mencionadas regiones ha sufrido consecuencias devastadoras en su flora y fauna a consecuencia de incendios forestales cuyo origen se supone es producto de per. Obtenido de Diario El Pílon: <https://elpilon.com.co/ecoparque-los-besotes-del-infierno-al-paraiso/>
- [8] CORPOCESAR. (2016). Más de \$348 Millones costó el control de incendio Forestal del Parque Natural regional los Besotes. Valledupar: Corporación Autónoma Regional del Cesar.
- [9] CORPOCESAR. (2011). Estudio Básico Para La Declaratoria De Un Área Natural Protegida En La Región De Los Besotes (Municipio De Valledupar) Y Formulación De Su Plan De Manejo. Valledupar.
- [10] Márquez, G. (2003). ECOSISTEMAS ESTRATÉGICOS, BIENESTAR Y DESARROLLO. En G. Márquez. Universidad Nacional de Colombia.
- [11] Toribio, G. (25 de Octubre de 2019). Teledetección Aplicada a la Agricultura de Precisión. Obtenido de Cursos de Teledetección: <https://www.cursosteledeteccion.com/ndvi-que-es-y-para-que-sirve/>