

**DISEÑO DE MODELO DE COMBUSTIBLE VEGETAL A TRAVÉS DE IMÁGENES
SATELITALES MEDIANTE SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICO EN EL
COMPLEJO CENAGOSO DE LA ZAPATOSA**



AUTORES:

JUAN PABLO BENJUMEA CALDERÓN

ODUBER JOSÉ GARCÍA OSORIO

UNIVERSIDAD POPULAR DEL CESAR

FACULTAD DE INGENIERÍA Y TECNOLÓGICAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA

VALLEDUPAR – CESAR

2023

**DISEÑO DE MODELO DE COMBUSTIBLE VEGETAL A TRAVÉS DE IMÁGENES
SATELITALES MEDIANTE SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICO EN EL
COMPLEJO CENAGOSO DE LA ZAPATOSA**

AUTORES:

JUAN PABLO BENJUMEA CALDERÓN
ODUBER JOSÉ GARCÍA OSORIO

DIRECTOR

KARINA PAOLA TORRES CERVERA
MAGISTER EN MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE

ASESORA

ADRIANA CAROLINA DE LA CRUZ BARRAZA
INGENIERA AMBIENTAL Y SANITARIA

UNIVERSIDAD POPULAR DEL CESAR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y TECNOLÓGICAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA
VALLEDUPAR – CESAR

2023

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco a mi tutor por su dedicación, apoyo y paciencia, sin sus enseñanzas y correcciones no hubiese podido lograr llegar a esta instancia tan esperada. Gracias por su actitud, perseverancia y todos sus consejos que tanto necesite y que los llevaré grabados para siempre en la memoria en mi futuro profesional”.

Le agradezco a todos los docentes que han formado mi camino universitario, por transmitirme los conocimientos necesarios para hoy poder estar aquí. Sin ustedes no hubiese podido formarme como estudiantes, como profesional y como persona.

Y finalmente agradecerles a todos mis compañeros que me han acompañado y ayudado cuando siempre los necesite. Gracias por las horas compartidas dentro de las aulas de clases y también las veces que pude compartir tiempo fuera de las aulas de clase, los trabajos realizados en conjunto y las historias vividas que siempre quedaran en mi memoria.

Juan Pablo Benjumea Calderón



AGRADECIMIENTOS

Agradecido primordialmente con Dios y mis padres quienes fueron los autores y promotores principales, por la cual me impulsaron a cumplir todos mis objetivos, gracias a ellos puedo decir quién soy hoy, especialmente mi mama LUZ MARINA OSORIO que con su soporte económico y consejos me indujeron y me ayudaron a tomar las mejores decisiones. Agradezco infinitamente a mi directora KARINA PAOLA TORRES CERVERA por su paciencia y dedicación que fueron base fundamental para llevar a cabo las mejores correcciones de este proyecto, gracias a su labor puedo decir que me llevo las mejores experiencias profesionales que quedaran en memoria para la culminación de mi carrera profesional. Agradezco a todos mis docentes por sus enseñanzas y conocimientos que durante mi carrera profesional han hecho de mi una persona con buenos principios y saberes y muy seguidamente a mis compañeros de aula, especialmente a WALDIR IVAN GUTIERREZ COTES que durante mi recorrido hemos venido compartiendo conocimientos para hoy hacer historia en nuestras vidas y labores, de veras gracias por todo muy agradecido.

Oduber José García Osorio



DEDICATORIA

Le dedico el resultado de este trabajo a toda mi familia y compañeros de estudio, pero especialmente, a mis padres Mariana y Diomedes. Por su amor, paciencia y por haber creído en mí. Me apoyaron y me contuvieron en los momentos malos y en los menos malos. Les agradezco por brindarme las cosas que necesité y por enseñarme a afrontar las dificultades de la vida. Me han enseñado a ser la persona que soy hoy en día, mi humildad, mis capacidades, mi respeto hacia los demás, mi perseverancia, mi tolerancia y por los demás valores que tengo.

También quiero dedicarle este trabajo a Dios. Gracias a él pude tener el conocimiento y la responsabilidad de afrontar este proyecto. Por el tiempo que me da para seguir en esta vida y por las cosas que vendrán en un futuro gracias a él.

Juan Pablo Benjumea Calderón

Dios, patria y amor es el lema que tanto anhelé desde mis inicios, por eso principalmente pongo a Dios sobre todas las cosas, dedico este triunfo a Dios, a mis padres, en especial a mi padre ODUBER GARCIA SIERRA, quien siempre quiso que fuera profesional, a mi familia completa que necesite de sus ayuda para llevar a cabo este proyecto, dedico esto para aquellos que pensaron que no era posible, aprendí ser resiliente con algunos obstáculos pero con la bendición de Dios y mi familia pude decir que si es posible.

Oduber José García Osorio



RESUMEN

Este estudio proporciona un análisis innovador de la zonificación del modelo de combustible mediante la correlación con el Índice de Calcinación Normalizada (NBR) para la proyección estática de focos incendiarios en el Complejo Cenagoso de Zapatosa. El objetivo era identificar áreas con mayor probabilidad de ser focos de incendios de rápida propagación. Se empleó una metodología basada en Sistemas de Información Geográfica (SIG) y análisis de correlación de variables vegetativas obtenidas a través de imágenes satelitales. Los resultados sugieren una moderada correlación entre las variables vegetativas y el NBR, sugiriendo la posibilidad de construir un modelo matemático útil. El modelo propuesto se obtuvo mediante el método de mínimos cuadrados ordinarios y análisis de varianza (ANOVA). La validación de los resultados y la aplicabilidad del modelo propuesto para futuros estudios de zonas propensas a incendios en diferentes ecosistemas se recomienda para trabajos futuros.

Palabras Claves: Indicadores vegetativos, Sistemas de Información Geográfica, Modelo de combustible, Análisis de correlación, Índice de Calcinación Normalizada.



ABSTRACT

This study provides an innovative analysis of fuel model zoning through correlation with the Normalized Burn Ratio (NBR) for static projection of fire foci in the Zapatosa Wetland Complex. The goal was to identify areas with a high likelihood of becoming rapid fire spread foci. A methodology based on Geographic Information Systems (GIS) and correlation analysis of vegetative variables obtained through satellite images was employed. Results suggest a moderate correlation between vegetative variables and the NBR, implying the possibility of constructing a useful mathematical model. The proposed model was obtained using the ordinary least squares method and analysis of variance (ANOVA). The validation of the results and the applicability of the proposed model for future studies of fire-prone zones in different ecosystems is recommended for future work.

Keywords: *Vegetative indicators, Geographic Information Systems, Fuel model, Correlation analysis, Normalized Burn Ratio.*



TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	14
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	16
2. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO	18
3. OBJETIVOS	20
3.1. OBJETIVO GENERAL.....	20
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
4. MARCO REFERENCIAL.....	21
4.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.....	21
4.2. MARCO TEÓRICO.....	24
4.2.1. Incendios Forestales.....	24
4.2.2. Índices de Vegetación.....	26
4.2.3. Sistema de Información Geográfico (SIG)	28
4.3. MARCO CONCEPTUAL	29
4.4. MARCO CONTEXTUAL	30
4.5. MARCO LEGAL.....	32
5. MARCO METODOLÓGICO.....	36
5.1. LÍNEA, SUBLÍNEA Y ÁREA TEMÁTICA DE INVESTIGACIÓN.....	36
5.2. ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN	36
5.3. ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN.....	36
5.4. POBLACIÓN DE ESTUDIO	36
5.5. MUESTRA POBLACIONAL	37
5.6. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	37
5.7. ESTRATEGIA METODOLÓGICA.....	37

Fase 1. Determinación De Indicadores Para La Obtención Del Estado De Salud Vegetativa Y Ecosistémica Mediante Sistema De Información Geográfico Para El Complejo Cenagoso De Zapatosa	37
Fase 2. Construcción Del Modelo De Combustible A Partir De Indicadores De Estado De Salud Vegetativa Y Ecosistémica Mediante Sistema De Información Geográfico Para El Complejo Cenagoso De Zapatosa	38
Fase 3. Zonificación Del Modelo De Combustible Mediante La Correlación Con El Índice De Calcinación Normalizada (NBR) Para La Proyección Estática De Focos Incendiarios Mediante Sistema De Información Geográfico Para El Complejo Cenagoso De Zapatosa	39
6. RESULTADOS Y ANÁLISIS	40
6.1. DETERMINACIÓN DE INDICADORES PARA LA OBTENCIÓN DEL ESTADO DE SALUD VEGETATIVA Y ECOSISTÉMICA MEDIANTE SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICO PARA EL COMPLEJO CENAGOSO DE ZAPATOSA	40
6.1.1. Obtención De La Información.	40
6.1.2. Cálculo De Indicadores	45
6.2. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO DE COMBUSTIBLE A PARTIR DE INDICADORES DE ESTADO DE SALUD VEGETATIVA Y ECOSISTÉMICA MEDIANTE SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICO PARA EL COMPLEJO CENAGOSO DE ZAPATOSA.....	93
6.2.1. Regresión Múltiple De Indicadores.	93
6.2.2. Análisis De Varianza – ANOVA.....	107
6.2.3. Interpretación Gráfica Del Modelo	110
6.3. ZONIFICACIÓN DEL MODELO DE COMBUSTIBLE MEDIANTE LA CORRELACIÓN CON EL ÍNDICE DE CALCINACIÓN NORMALIZADA (NBR) PARA LA PROYECCIÓN ESTÁTICA DE FOCOS INCENDIARIOS MEDIANTE SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICO PARA EL COMPLEJO CENAGOSO DE ZAPATOSA	118

6.3.1. Representación Gráfica De Indicadores.....	118
6.3.2. Representación Gráfica Del NBR.....	125
7. CONCLUSIONES.....	128
8. RECOMENDACIONES.....	131
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	134
ANEXOS	140
ANEXO I. Código de Proceso ArcPython.....	140
Literal A. Proceso Iterativo Cálculo NDVI	140
Literal B. Proceso Iterativo Cálculo SAVI	141
Literal C. Proceso Iterativo Cálculo ARVI.....	142
Literal D. Proceso Iterativo Cálculo GCI	143
Literal E. Proceso Iterativo Cálculo NBR	144
Literal F. Proceso Iterativo Conversión Raster A Shape	145

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Tetraedro de fuego.....	24
Figura 2. Ubicación del Complejo Cenagoso de Zapatosa	30
Figura 3. Definición Geográfica del Área de Estudio.....	40
Figura 4. Panel de Selección de las Plataformas Satelitales de Interés	41
Figura 5. Imagen satelital Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L2 de la zona de estudio.....	42
Figura 6. Productos Digitales obtenidos del EarthData de la USGS	43
Figura 7. Imagen Satelital de la zona de estudio año 2016.....	49
Figura 8. Imagen Satelital de la zona de estudio año 2017.....	50
Figura 9. Imagen Satelital de la zona de estudio año 2018.....	51
Figura 10. Imagen Satelital de la zona de estudio año 2019.....	52
Figura 11. Imagen Satelital de la zona de estudio año 2020.....	53

Figura 12. Coordenadas de la delimitación del Complejo Cenagoso de Zapatosa.....	54
Figura 13. Representación Geográfica del Complejo Cenagoso de Zapatosa.....	56
Figura 14. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado – NDVI año 2016.....	58
Figura 15. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado – NDVI año 2017.....	59
Figura 16. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado – NDVI año 2018.....	60
Figura 17. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado – NDVI año 2019.....	61
Figura 18. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado – NDVI año 2020.....	62
Figura 19. Índice de Vegetación Resistente a la Atmósfera – SAVI año 2016.....	65
Figura 20. Índice de Vegetación Resistente a la Atmósfera – SAVI año 2017.....	66
Figura 21. Índice de Vegetación Resistente a la Atmósfera – SAVI año 2018.....	67
Figura 22. Índice de Vegetación Resistente a la Atmósfera – SAVI año 2019.....	68
Figura 23. Índice de Vegetación Resistente a la Atmósfera – SAVI año 2020.....	69
Figura 24. Índice de Vegetación Resistente a la Atmósfera – ARVI año 2016.....	72
Figura 25. Índice de Vegetación Resistente a la Atmósfera – ARVI año 2017.....	73
Figura 26. Índice de Vegetación Resistente a la Atmósfera – ARVI año 2018.....	74
Figura 27. Índice de Vegetación Resistente a la Atmósfera – ARVI año 2019.....	75
Figura 28. Índice de Vegetación Resistente a la Atmósfera – ARVI año 2020.....	76
Figura 29. Índice de Clorofila Verde – GCI año 2016.....	79
Figura 30. Índice de Clorofila Verde – GCI año 2017.....	80
Figura 31. Índice de Clorofila Verde – GCI año 2018.....	81
Figura 32. Índice de Clorofila Verde – GCI año 2019.....	82
Figura 33. Índice de Clorofila Verde – GCI año 2020.....	83
Figura 34. Escala de colores que representan al indicador NBR.....	86
Figura 35. Índice de Calcinación Normalizado – NRB año 2016.....	87
Figura 36. Índice de Calcinación Normalizado – NRB año 2017.....	88
Figura 37. Índice de Calcinación Normalizado – NRB año 2018.....	89
Figura 38. Índice de Calcinación Normalizado – NRB año 2019.....	90
Figura 39. Índice de Calcinación Normalizado – NRB año 2020.....	91
Figura 40. Puntos Aleatorios para Captación Muestral de Información.....	99
Figura 41. Modelo Matemático de Regresión Validado para el año 2016.....	108
Figura 42. Modelo Matemático de Regresión Validado para el año 2017.....	108
Figura 43. Modelo Matemático de Regresión Validado para el año 2018.....	109

Figura 44. Modelo Matemático de Regresión Validado para el año 2019	109
Figura 45. Modelo Matemático de Regresión Validado para el año 2020	110
Figura 46. Modelo de Combustible para el Año 2016.....	111
Figura 47. Modelo de Combustible para el Año 2017.....	112
Figura 48. Modelo de Combustible para el Año 2018.....	113
Figura 49. Modelo de Combustible para el Año 2019.....	114
Figura 50. Modelo de Combustible para el Año 2020.....	115
Figura 51. Clasificación del Porcentaje de Área de Riesgo Categorizada para el año 2016 .	116
Figura 52. Clasificación del Porcentaje de Área de Riesgo Categorizada para el año 2017 .	116
Figura 53. Clasificación del Porcentaje de Área de Riesgo Categorizada para el año 2018 .	117
Figura 54. Clasificación del Porcentaje de Área de Riesgo Categorizada para el año 2019 .	117
Figura 55. Clasificación del Porcentaje de Área de Riesgo Categorizada para el año 2020 .	118
Figura 56. Puntos Aleatorios para la Comprobación Final del Modelo	119
Figura 57. Modelo Estadísticamente Significativo Multianual Indicador NDVI.....	120
Figura 58. Modelo Estadísticamente Significativo Multianual Indicador SAVI.....	121
Figura 59. Modelo Estadísticamente Significativo Multianual Indicador ARVI	122
Figura 60. Modelo Estadísticamente Significativo Multianual Indicador GCI.....	123
Figura 61. Modelo Estadísticamente Significativo Multianual Indicador NBR.....	124
Figura 62. Primera Iteración del Modelo Final.....	126
Figura 63. Segunda Iteración del Modelo Final.....	126
Figura 64. Modelo de Combustible	127
Figura 65. Código de Proceso para cálculo del NDVI en ArcPython	140
Figura 66. Código de Proceso para cálculo del SAVI en ArcPython	141
Figura 67. Código de Proceso para cálculo del ARVI en ArcPython.....	142
Figura 68. Código de Proceso para cálculo del GCI en ArcPython.....	143
Figura 69. Código de Proceso para cálculo del NBR en ArcPython	144
Figura 70. Código de Proceso para Conversión de Raster a Shape	145

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Aspectos normativos y legales aplicables al proyecto	32
Tabla 2. Valores de Clasificación del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado (NDVI)	96
Tabla 3. Valores de Clasificación del Índice de Vegetación Ajustada al Suelo (SAVI)	96
Tabla 4. Valores de Clasificación del Índice de Vegetación Resistente a la Atmósfera (ARVI)	96
Tabla 5. Valores de Clasificación del Índice de Clorofila Verde (GCI).....	97
Tabla 6. Valores de Clasificación del Índice de Calcinación Normalizado (NBR).....	97
Tabla 7. Regresión Lineal Múltiple para el modelo matemático con datos del año 2016.....	101
Tabla 8. Regresión Lineal Múltiple para el modelo matemático con datos del año 2017.....	102
Tabla 9. Regresión Lineal Múltiple para el modelo matemático con datos del año 2018.....	103
Tabla 10. Regresión Lineal Múltiple para el modelo matemático con datos del año 2019...	104
Tabla 11. Regresión Lineal Múltiple para el modelo matemático con datos del año 2020...	105
Tabla 12. Dispersión de los Datos para la Constitución del Modelo Definitivo	125



INTRODUCCIÓN

Los incendios son voraces conflagraciones de fuego que pueden consumir cualquier elemento que se constituya físicamente como sólido. Las mayores manifestaciones de los incendios son de carácter forestal y vegetal, sin embargo, no resta importancia a los importantes eventos de infraestructura e industrial, los cuales son más difíciles de controlar, pero han sido más estudiados y correctamente prevenidos, a diferencia de los que puedan producirse en los ecosistemas.

Las principales características que hacen potencialmente vulnerable los ecosistemas y la biodiversidad del Complejo Cenagoso de la Zapatosa (CCZ) es que no hay control ni gobernabilidad que ayude a mitigar las quemas extensivas que hacen campesinos y agricultores, así como otras personas inescrupulosas, que obtienen sustentos variados para su subsistencia de los ecosistemas, no valorando los servicios que estos proveen para la humanidad.

Las causas que llevaron a escoger este trabajo toman como base que la composición y estructura biodiversa de la flora conforme a la zona de vida en la cual se sitúa y otras características particulares, son tan permisibles a la transmisión del fuego, por lo cual, es necesario crear un modelo que ayude a comprender como la vegetación es susceptible a este aspecto y conocer como se puedan considerar estrategias para mitigar las conflagraciones.

Por lo cual, se decide diseñar un modelo de combustible a partir de indicadores vegetativos a través de imágenes satelitales mediante sistema de información geográfico para el Complejo Cenagoso de la Zapatosa, iniciando por la obtención del insumo digital, procediendo a analizarlo mediante su representación geográfica, se sigue inmediatamente por establecer el análisis de varianza y la regresión múltiple que lo conforma y poniendo a prueba la relación de los indicadores escenificados geográficamente versus el modelo obtenido.

La necesidad de contar con un modelo de combustible parte de que las entidades territoriales y autoridades ambientales necesitan información para planificar estrategias encaminadas al desarrollo sostenible local, el uso y aprovechamiento medido y cuidadoso de los recursos naturales disponibles, la biodiversidad genética y calidad de los hábitats y ecosistemas y también la protección del valor y de las costumbres de los pueblos anfibios.

Para poder alcanzar los resultados esperados de este trabajo de investigación se formularon tres objetivos específicos que persiguen el objetivo general del trabajo:

- Determinar Indicadores para la obtención del Estado de Salud Vegetativa y Ecosistémica mediante Sistema de Información Geográfico para el Complejo Cenagoso de Zapatos
- Construir el modelo de combustible a partir de indicadores de estado de salud vegetativa y ecosistémica mediante Sistema de Información Geográfico para el Complejo Cenagoso de Zapatos
- Zonificar el modelo de combustible mediante la correlación con el Índice de Calcinación Normalizada (NBR) para la proyección estática de focos incendiarios mediante Sistema de Información Geográfico para el Complejo Cenagoso de Zapatos

Este documento se integra en por varios subcapítulos, secciones y subsecciones, estructurado en cuatro capítulos así:

Primer capítulo. Constituido por los subcapítulos de énfasis como Planteamiento del Problema, Justificación del Proyecto y los Objetivos del proyecto.

Segundo capítulo. Constituido por los subcapítulos de Marco Referencial que incluye Antecedentes de la Investigación, Marco Teórico, Marco Conceptual, Marco Contextual y el Marco Legal.

Tercer capítulo. Constituido por los subcapítulos de Marco Metodológico que incluye la línea, sublínea y área temática de investigación, enfoque de la investigación, alcance de la investigación, población de estudio, muestra poblacional, diseño de la investigación y la estrategia metodológica.

Cuarto capítulo. Constituido por los subcapítulos Resultados Esperados, Cronograma de Actividades, Presupuesto del Proyecto y las Referencias Bibliográficas.

Este trabajo fue elaborado con los Lineamientos y Guía Orientadora para la Estructuración de Informes de Prácticas Académicas en el Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria de la Universidad Popular del Cesar. (UNICESAR, 2023).

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los incendios forestales tienen impactos ambientales importantes sobre la calidad de los recursos aire, así como afectaciones a la salud humana y ecosistémica. El Cambio climático es un factor fundamental que ayuda al incremento de las temperaturas y por ende también facilita la ignición natural de material vegetal seco, además, la contaminación ambiental también pueden ser el medio de inicio de conflagraciones. (ONU, 2022).

El mundo se encuentra constantemente en llamas. Tanta es la magnitud de estos eventos y fenómenos auspiciados por las olas intensas de calor que se han registrado también en el círculo polar ártico, registrando un récord de temperaturas de conflagración de hasta 38°C. Para el año 2020 fueron consumidas 5.5 millones de hectáreas emitiendo aproximadamente 182 millones de toneladas de dióxido de carbono a la atmósfera. (WWF, 2020).

Dentro de lo que conocemos como incendios se presentan los denominados incendios de sexta generación, los cuales tienen la capacidad de modificar el clima y producir afectaciones tales que forman tormenta y torbellinos de fuego. Estos se están presentando más comúnmente en regiones y países desarrollados de Europa y en Australia. Este tipo de conflagraciones son de tan difícil manejo que su mitigación muchas veces depende de los cambios de temperatura y eventuales precipitaciones (BBC News Mundo, 2022).

En América Latina la mayoría de los incendios son provocados u originados por malas prácticas campesinas para la agricultura y el aprovechamiento de los recursos naturales. La situación del cambio climático agrava esta problemática puesto que las concentraciones de oxígeno serían demasiado elevadas, muy reactivas y peligrosas. (Resco de Dios, 2020) Los países suramericanos llevan mayor gravamen del problema. Chile ha vivido estragos con más de 24 víctimas mortales, 997 heridos, más de 800 viviendas consumidas y 270.000 hectáreas devastadas por las conflagraciones. (El Tiempo, 2023).

En Colombia, los factores que juegan un papel fundamental para el riesgo de incendio son la topografía, el tiempo atmosférico y el combustible, que sería el material vegetal. (IDIGER, 2016). En el país se registraron 1886 incendios entre diciembre y febrero de 2021, y, 1672 incendios entre diciembre y febrero de 2022, obteniendo una reducción en los devastadores eventos. (MINAMBIENTE, 2022)

Sin embargo, la mitigación debe ser total esto quiere decir que debe ser extensiva, puesto que, aunque se han invertido más de 69 mil millones en atención al riesgo del desastre por incendios, existe carencia de herramientas, maquinaria, herramientas, elementos y equipos para la gestión y la atención. (MINAMBIENTE, 2022).

Concerniente a esto, hay lugares donde la gestión del riesgo del desastre por incendios forestales parece improbable e innecesaria. Aunque se cuenta con elementos que garantizan preparación, las actividades extensivas de la agricultura y la ganadería han ido ganando espacio dentro del Complejo Cenagoso de Zapatosa, y esto se ha conseguido rápidamente a las quemas incontroladas y descomunales que producen personas inescrupulosas y terratenientes, cuyo objeto tiene un propósito económico.

Para el año 2021 fueron consumidas 20 hectáreas de bosque protegido en el municipio de Chimichagua Cesar, por fuego producido para dispersas abejas para obtener la miel y también la utilizan para sacar a las tortugas galápagos de su hábitat común y cazarlos. Esto devastó una gran cantidad de animales terrestres y aves, así como una diversidad importante de especies vegetales de flora. (Barrios, 2021).

La mayoría de los incendios son producidos y la calidad del material vegetal con una composición de zonas de vidas que incluye relictos leñosos y de materia seca facilitan la propagación del fuego hasta áreas de gran interés ecosistémico para la biodiversidad y producción de servicios ambientales de regulación climática. Por lo cual, el Complejo Cenagoso de Zapatosa se encuentra vulnerado por estas actividades ilícitas y no se tiene una medida en función de la calidad del material vegetal para poder entender y conducir como se puede comportar un incendio y las zonas con mayor probabilidad del riesgo al desastre por incendio.

Conforme al orden de las ideas presentadas, se trata de esclarecer esta situación mediante la siguiente pregunta y formulación de la investigación: ¿Cómo se llevará a cabo el Diseño de Modelo de Combustible Vegetal a través de Imágenes Satelitales mediante Sistema de Información Geográfico en el Complejo Cenagoso de la Zapatosa?

2. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

Este documento es importante porque su formulación también persigue los objetivos de conservación dispuestos en el documento síntesis para la declaratoria del Complejo Cenagoso de la Zapatosa como Área Protegida del convenio interadministrativo No. 205 de 2017, celebrado entre la Corporación Autónoma Regional del Magdalena y la Universidad del Magdalena, y en especial, aquel que denomina la Conservación de los ecosistemas de humedales, bosques de riberas, bosques inundables, bosques secos y zonas arenosas naturales (playones) degradados con el fin de mantener la oferta de los bienes y servicios ambientales proporcionados por estos. (CORPOMAG/UNIMAG, 2017).

Se quiere realizar este proyecto porque su resultado permitirá tener un elemento que ayudará a reflejar la fragilidad del ecosistema cuando se expone al riesgo del desastre por incendios desde la calidad de indicadores vegetativos y permitiría conocer el comportamiento estático de la vegetación ante un evento muy dinámico como lo es la conflagración, esto ayudará a tener una idea de cómo poder planificar estrategias de la mitigación y extinción del fuego.

La finalidad o pertinencia de desarrollar un modelo de combustible es poder tener una referencia real de como la vegetación, de manera intrínseca, permitiría los sucesos conjuntivos del fuego o el tránsito de la conflagración a través de la estructura y composición vegetativa. Considerando que dentro del Complejo Cenagoso de la Zapatosa hay una importante zona intervenida, así como hay gran parte que se conserva y se encuentra en grado de recuperación y rehabilitación para la prestación de los servicios ecosistémicos.

Los principales beneficios de este trabajo será la obtención de un instrumento de planificación territorial que será conforme para el manejo del riesgo del desastre y la gestión ambiental del Distrito Regional de Manejo Integrado (DRMI) del Complejo Cenagoso de la Zapatosa (CCZ) por parte de los municipios de Chimichagua, Tamalameque, Curumaní y Chiriguaná en el departamento del Cesar y El Banco en el departamento del Magdalena, además, con el apoyo reservado de las Corporaciones Autónomas Regionales de estos dos departamentos. Además, permitirá predecir correctamente como puede evolucionar un fenómeno de tal magnitud, lo que mejora la toma de decisiones.

El desarrollo de esta idea aportará una forma metodológica de como correlacionar variables para dar explicaciones de sucesos en materia de gestión del riesgo, empleando complejidad en criterios técnicos y científicos de manejo de la información, además, implica el uso de herramienta como Sistema de Información Geográfico, desde el cual, se tiene un contexto mucho más amplio de entendimiento y de geo proceso de la información.

Además, el insumo informativo procede de una fuente original primaria con un grado de representación geográfica y espacial adecuada para el entendimiento y construcción de la situación, lo que también ayudaría a entender, si se quiere, como en distintos momentos del tiempo han evolucionado los procesos que fomentan la aparición de focos incendiarios desde zonas intervenidas de manera antrópica hacia el rico y diverso ecosistema del Complejo Cenagoso de la Zapatosa.

Con este trabajo se pretende solucionar la problemática del desconocimiento del territorio desde los factores antrópicos que propician la aparición del riesgo del desastre por focos incendiarios. Además, también ayuda a tener un grado de conocimiento de como las especies vegetales aportan al incremento de la problemática. Esto también ayudaría a esclarecer las categorías de peligrosidad por la composición vegetal ecosistema cerca centros urbanizados.



3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar el Modelo de Combustible Vegetal a través de Imágenes Satelitales mediante Sistema de Información Geográfico en el Complejo Cenagoso de la Zapatosa

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Determinar Indicadores para la obtención del Estado de Salud Vegetativa y Ecosistémica mediante Sistema de Información Geográfico para el Complejo Cenagoso de Zapatosa

Construir el modelo de combustible a partir de indicadores de estado de salud vegetativa y ecosistémica mediante Sistema de Información Geográfico para el Complejo Cenagoso de Zapatosa

Zonificar el modelo de combustible mediante la correlación con el Índice de Calcinación Normalizada (NBR) para la proyección estática de focos incendiarios mediante Sistema de Información Geográfico para el Complejo Cenagoso de Zapatosa



4. MARCO REFERENCIAL

4.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Salgado, P. (2021), desarrolló la investigación titulada Cartografía para Modelos Combustibles Utilizando Tecnologías Geoespaciales para la Predicción de Incendios Forestales en la Reserva Geobotánica Pululahua; para optar el título de Ingeniera Geógrafa y Medio Ambiente, en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, con la finalidad de encontrar peculiaridades del bosque y tipo de combustible característico mediante imágenes satelitales e identificar modelos combustibles pertenecientes a Prometheus y Rhotermel. Esta investigación se llevó a cabo en varias fases; para empezar el autor realizó una recopilación de información para generar la cartografía de modelos combustibles, esta actividad se realizó mediante la descarga de imágenes satelitales y con información de la cobertura vegetal de la zona, luego, se realizó un diagnóstico con la información cartográfica con el fin de determinar zonas propensas a incendios forestales en el área de estudio, se clasificaron las imágenes satelitales para identificar los modelos representativos del bosque, seguidamente se estimó la biomasa forestal y finalmente se estructuró la cartografía de modelos combustibles para la predicción de incendios. Se obtuvo como resultado 25 coberturas para la generación de la cartografía de modelos combustibles, conformada por tres imágenes Sentinel-2 y una Spot-6, los modelos combustibles Prometheus y Rhotermel presentaron áreas propensas a incendiarse por el pasto y la velocidad de propagación es alta. Los aportes directos al presente estudio son la generación de cartografías con imágenes satelitales para la identificación de cobertura vegetal como combustibles para la generación de incendios en una zona determinada.

Arenas, J. & Noy, B. (2019), desarrolló la investigación titulada Análisis de la Severidad de un Incendio en un Relicto de Bosque Seco Tropical en Colombia; para optar el título de Ingeniero Forestal, en la Universidad Francisco José de Caldas, con la finalidad de determinar la severidad de un incendio forestal ocurrido en un bosque seco del Municipio de Armero Guayabal en Tolima, mediante los índices espectrales NDVI, NBR y dNBR obtenidos a partir de imágenes del sensor Sentinel 2A. Esta investigación se llevó a cabo en dos etapas; en primer lugar, los autores identificaron el tipo de vegetación presente en el área de estudio antes de la ocurrencia del incendio, teniendo como marco referente la aplicación de un índice espectral como NDVI y el NBR, posteriormente se estableció el grado de severidad del

incendio y su variación en el área quemada. Los resultados de la investigación fueron de acuerdo con los índices espectrales de identificación de incendios se obtuvo que el área afectada por el incendio fue de 96,15 ha, de las cuales 36,69 ha se tipificaron con severidad de quema moderada y 33,9 ha con severidad de quema moderada-alta. Los aportes directos al presente estudio son la implementación de los índices como NVDI y NBR para la marcación de zonas expuestas a incendios o que ya han sido incendiadas.

Vargas, D. & Campos, C. (2018), desarrollaron la investigación titulada Modelo de Vulnerabilidad ante Incendios Forestales para el Área de Conservación Guanacaste, Costa Rica, con la finalidad de desarrollar un modelo de vulnerabilidad a incendios forestales para identificar áreas prioritarias de incendios en el Área de Conservación de Guanacaste (ACG). El modelo está diseñado para integrar componentes ecológicos como calidad de imagen y biodiversidad, de igual manera se incorporaron componentes socioeconómicos como infraestructura y servicios ecosistémicos incluidos en el ACG. Los resultados obtenidos se dan mediante la identificación de las áreas más vulnerables que corresponden a áreas con poco o ningún incendio forestal, mientras que las áreas que han sido afectadas repetidamente por incendios forestales son menos vulnerables. A partir de este estudio se enfatiza la clasificación del riesgo ecológico y social de acuerdo con la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales, factor cuya articulación ayudará significativamente al estudio para determinar los parámetros de incendios forestales.

Jiménez, A. Urrego, L. & Toro, L. (2016), desarrollaron la investigación titulada Evaluación Del Comportamiento De Incendios De La Vegetación En El Norte De Antioquia (Colombia): Análisis Del Paisaje, en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Con la finalidad de crear mapas de susceptibilidad bruta a incendios (SB), con base en las características intrínsecas de la vegetación y la susceptibilidad neta (SN), SB más variables climáticas y topográficas, a escala regional. Esta investigación obtuvo una determinación del área que fue más afectada por incendios mayores, la mayoría son pastizales con SB (27.19%) y SN (18.38) muy altos %), por lo tanto, confirman que los patrones espaciales de inflamabilidad están estrechamente relacionados con factores climáticos y topográficos. El aporte directo a esta investigación es la contribución directa de las variables utilizadas y el método de modelización del combustible, incorporando la humedad, la biomasa, la altitud y la

cobertura como los factores más relevantes a tener en cuenta a la hora de evaluar la posibilidad de que se produzca un incendio.

Fernández, O. (2016), desarrolló la investigación titulada Estimación de Modelos de Combustible Basada en Datos de Sensores Remotos; para optar por el grado de Máster, en la Universidad de Oviedo España. Con la finalidad de utilizar imágenes satelitales obtenidas de información radiométrica de LandSat 8, SPOT5 y LiDAR e inclusión de información complementaria en la provincia de Cuenca. Para realizar esta investigación se llevaron a cabalidad una serie de etapas las cuales abarcan la segmentación de la zona de estudio, revisión e identificación de nodos en conflictos, se validaron los modelos de combustible mediante el simulador Wildfire Analyst y finalmente se compararon los modelos de combustible descritos con la escala del mapa forestal de España 1:50.000. los resultados arrojaron el reconocimiento de 11 tipos de modelos de combustible que se distribuyen en 5 grupos definidos por Scott y Burgan en el 2005, modelos GR2, GS2, SH4 y TU, estos fueron los que se identificaron con mayor ocupación en el área de estudio, se destaca la clasificación de los modelos en las clases: incombustibles, combustibles de tipo pastizal, tipo pastizal-matorral, madera-sotobosque, hojarasca de bosque y restos de madera derribada, empleando la evaluación del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado (NDVI); así como un esquema general del proceso de estimación del modelo en 4 etapas como son: definición de datos de entrada, estimación del modelo, paso de revisión y resultados y validación.

4.2. MARCO TEÓRICO

4.2.1. Incendios Forestales

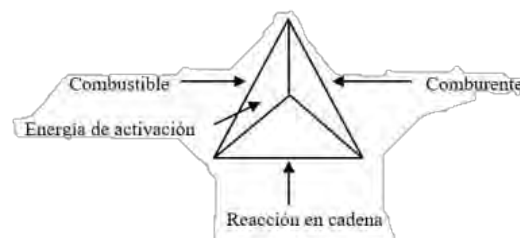
Los incendios forestales han contribuido al agotamiento de los recursos naturales y están afectando a los bosques de todo el mundo con daños irreversibles. Sin embargo, los esfuerzos en la prevención de incendios forestales aún son recurrentes, teniendo una interacción común con las poblaciones urbanas y la infraestructura, poniendo en peligro a las personas y con ello causando pérdidas económicas, humanas y ambientales. (Ressl & Cruz, 2012)

Los incendios de cobertura vegetal se pueden presentar a través de origen natural o antropogénico y propagarse sin control, provocando perturbaciones ecológicas afectando o destruyendo un área de gran extensión territorial, en un entorno urbano o rural, dependiendo del tipo de vegetación, cantidad de combustible, oxígeno, clima condiciones, terreno, actividad humana, etc. (UNGRD, 2019). Se estima que las actividades humanas provocan el 99% de los incendios y solo el 1% son causados por fenómenos naturales como descargas eléctricas y erupciones volcánicas. Según las estadísticas promedio de los últimos 10 años, los incendios forestales son causados por actividades agrícolas y urbanización, así como por acciones intencionales y negligencia humana. (Plana, Font, & Serra, 2016)

4.2.1.1. Factores de Inicio de Fuego

Para que se produzca un incendio se requiere la coincidencia de tres factores: un origen de calor, el combustible y el aire. Una vez iniciado, la propagación de un incendio está influenciada por tres factores: tipo de combustible, clima y terreno. (Plana, Font, & Serra, 2016)

Figura 1. Tetraedro de fuego



Nota: Tomado por Autores, 2023 del artículo titulado: *Problemática de los Incendios Forestales*. (SIPECIF, 2007) citado por la Tercera Comunicación Nacional De Cambio Climático. IDEAM, PNUD, MADS, DNP, Cancillería, “Conocer: El primer paso para adaptarse. Guía básica de conceptos sobre el cambio climático” 2016.

4.2.1.2. Factores Que Intervienen En El Comportamiento Del Fuego.

Después de que comienza un incendio forestal, el comportamiento del fuego está determinado por tres factores: terreno, clima (meteorología) y combustible. Estos tres elementos se llaman la gran tríada. (UNGRD, 2019)

Los factores que intervienen en el comportamiento del fuego se dividen en:

Factor Permanente, dentro de los cuales se incluyen:

- La composición de los combustibles
- Especies vegetales
- Topografía

Condiciones Transitorias, se incluyen:

- Temperatura
- Humedad Relativa
- Velocidad y dirección del viento
- Precipitación Pluvial

Otros Elementos como:

- Fuente de calor
- Temporada
- Asentamientos

4.2.1.3. Tipos de Incendio de Cobertura Vegetal

Los incendios se dan de manera muy distintas mediante la forma de propagarse, se encuentran (EMOL, 2014):

Incendio de superficie: Son las que se esparcen por la superficie de la tierra, quemando la vegetación baja, pastizales y restos vegetales secos como troncos, ramas caídas y hojas muertas.

Incendio de copas o aéreos: También comienzan en la superficie, pero en este caso la llama o “fuego” avanza primero por encima del suelo y se propaga verticalmente, es decir, quemando la vegetación dispuesta hacia arriba, que se utiliza como combustible en forma

trapezoidal hasta la copa del árbol. Son los más destructivos, los más peligrosos y los más difíciles de controlar, ya que el fuego consume toda la vegetación.

Incendio de suelos o subterráneos: Son especies que crecen quemando materia orgánica y raíces existentes debajo de la superficie del suelo. Son fuegos lentos y casi no desprenden humo, por lo que son más difíciles de detectar y extinguir, de esta manera uno siente que el fuego está claramente controlado o extinguido porque el fuego no está controlado. Visualización. La profundidad del fuego del fuego subterráneo alcanza los 1,5 metros.

4.2.2. *Índices de Vegetación*

La cobertura vegetal fue una de las primeras áreas de investigación en evaluación y manejo de recursos naturales utilizando imágenes satelitales, especialmente después del lanzamiento de la serie LANDSAT en 1972. Sistemas satelitales Los satélites de observación de la Tierra, LANDSAT, SPOT y NOAA, entre otros, brindan imágenes que son ampliamente utilizados para evaluar y monitorear la salud de la vegetación a nivel mundial, regional y nacional, local y nacional. (Muñoz, 2013)

El índice de vegetación se puede definir como un parámetro calculado a partir de valores de reflectancia a diferentes longitudes de onda y es particularmente sensible a la cobertura vegetal. Además, corresponde a un número producido por una combinación de bandas espectrales y puede tener relación con la cantidad de vegetación presente en un píxel dado. Estos índices ayudan a mejorar la capacidad de distinguir entre el suelo y la vegetación, al reducir el impacto del relieve en las características espectrales de los diferentes mantos. (Muñoz, 2013)

Los índices vegetativos se han utilizado en los últimos años para identificar el tipo de cobertura, evaluar su cambio a lo largo del tiempo o establecer el estado de salud de los cultivos en función de estimaciones de características como la salud, la viabilidad de la planta, el contenido de clorofila, el estado nutricional o el estado del agua. (Muñoz, 2013) Para estas estimaciones se tienen diversos índices de vegetación:

4.2.2.1. **Índice De Vegetación De Diferencia Normalizado (NDVI).**

Puede estimar la cantidad, calidad y crecimiento de la vegetación a partir de la medida de la intensidad de radiación de determinadas bandas del espectro electromagnético emitido o

reflejado por la vegetación. La fórmula de cálculo es la siguiente (Rouse, Haas, Schell, & Deering, 1974):

$$NDVI = \frac{NIR - VIS}{NIR + VIS}$$

Dónde el NIR es la Banda de Infrarrojo Cercano y la VIS es la Banda de Visible – Rojo.

4.2.2.2. Índice De Vegetación Ajustado Al Suelo (SAVI).

Está diseñado para minimizar el efecto del brillo del piso. El factor de corrección del suelo L se agrega a la ecuación NDVI para corregir los efectos del ruido del suelo (color del suelo, humedad del suelo, variación del suelo en el área, etc.), que tienden a afectar los resultados de la fruta. La fórmula de cálculo es la siguiente (Huete, 1998):

$$SAVI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red + L)} \times (1 + L)$$

4.2.2.3. Índice De Vegetación Resistente A La Atmósfera (ARVI).

La fórmula ARVI se corrige básicamente en NDVI por el efecto de dispersión atmosférica en la reflectancia de la banda roja utilizando mediciones en la longitud de onda de la banda azul. La fórmula de cálculo es la siguiente (Kaufman & Tanré, 1992):

$$ARVI = \frac{[NIR - (2 \times Red) + Blue]}{[NIR + (2 \times Red) + Blue]}$$

4.2.2.4. Índice De Clorofila Verde (GCI).

Se utiliza para estimar el contenido de clorofila en las hojas de varias especies de plantas. El contenido de clorofila refleja el estado fisiológico de la planta; disminuyó en plantas estresadas y, por lo tanto, podría usarse como una herramienta para evaluar el vigor de la planta. La fórmula de cálculo es la siguiente (Gitelson, Gritz, & Merzlyak, 2003):

$$GCI = \frac{NIR}{Green} - 1$$

4.2.2.5. Índice De Calcinación Normalizado (NBR).

Se utiliza para calcular o cuantificar las áreas quemadas. Este indicador se enfoca en mediciones en longitudes de onda NIR y SWIR. La vegetación saludable muestra alta

reflectividad en NIR, mientras que las áreas de vegetación quemada recientemente muestran alta reflectividad en SWIR.

Este indicador ha cobrado especial importancia en los últimos años, ya que las condiciones climáticas extremas (como la sequía de El Niño) provocan un aumento significativo de los incendios forestales que destruyen la biomasa forestal (Key & Benson, 2006).

$$NBR = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$$

4.2.2.6. Índice De Diferencia De Calcinación Normalizado (dNBR).

Nos permite calcular la diferencia entre las dos imágenes, antes y después del incendio, lo que nos ayuda a comprender la gravedad del disparo. llama, haciendo la diferencia en el área de las áreas en el tiempo n con respecto al tiempo m . (Key & Benson, 2006).

$$dNBR = NBR_n - NBR_m$$

4.2.3. Sistema de Información Geográfico (SIG)

Los sistemas de información geográfica permiten la gestión de datos espaciales de un área y realizan los procesos necesarios para identificar problemas y aproximar y estimar un determinado fenómeno. Entre las ventajas que brindan estos sistemas se encuentra el uso de herramientas que permiten la aplicación de modelos de ciertos elementos o clases al desarrollo de variaciones del paisaje, tales como aplicaciones. con datos ráster y datos vectoriales. (García, 2013).

Principalmente con un sistema de información geográfica se pueden dar solución a las siguientes situaciones (son presentadas en orden de complejidad):

- **Localización:** características de un lugar específico.
- **Condición:** cumplir o no condiciones impuestas.
- **Tendencia:** relaciones situacionales temporales o en lapsos de tiempo.
- **Rutas:** estimación de decisión sobre criterios de ruteo.
- **Pautas:** relaciones específicas entre dos contextos geográficos.
- **Modelos:** simulación de modelos a partir actuaciones.

4.3. MARCO CONCEPTUAL

Amenaza natural: Peligro potencial asociado a la posible manifestación de un fenómeno físico cuyo origen se encuentra íntegramente en los procesos naturales de transformación y transformación de la tierra y el medio ambiente. (Ley 1523 de 2012)

Cortafuegos: Barrera natural o artificial construida antes de un incendio, parcial o totalmente destruida, para evitar la progresión de un incendio o la propagación de un incendio potencial. (ACHS, 1992)

Combustión: Es un tipo de reacción química exotérmica que provoca una rápida oxidación de los elementos combustibles que consisten principalmente en carbono e hidrógeno y, a veces, azufre. (ACHS, 1992)

Combustibles inflamables: Sustancias que emiten vapores a temperatura ambiental normal, los cuales pueden arder con el aire y en presencia de fuente calórica. tienen un punto de inflamabilidad por debajo de 37,8°C. (ACHS, 1992)

Foco: Áreas ardientes no reconocidas. También aplicable a cualquier sector del incendio que arde intensamente. (ACHS, 1992)

Incendio forestal: Es un fuego de libre propagación que tiene un efecto adverso sobre la vegetación y no está sujeto al control humano. Cuando se afecten áreas desforestadas o no aptas para la reforestación, se incluye el término incendio rural. (Plana, Font, & Serra, 2016)

Peligro: Fuente potencialmente dañina o situación de lesión personal, daño a la propiedad, daño ambiental o una combinación de estos. (ARL SURA, 2017).

Riesgo de desastres: Corresponde al daño o pérdida potencial que puede ocurrir como resultado de eventos físicos peligrosos de la naturaleza, naturaleza-sociedad, tecnología, saneamiento o hechos no intencionales por el hombre, durante un período de tiempo definido y está determinado por la vulnerabilidad de los expuestos, por lo tanto, el riesgo de desastre surge de una combinación de amenaza y vulnerabilidad. (Ley 1523 de 2012)

Quema: Incendios provocados por el hombre, urbanos o rurales, con el fin de eliminar desechos vegetales o desechos sólidos no deseados. Las Corporaciones Autónomas Regionales son las únicas entidades que pueden licenciar esta actividad. (Ley 1523 de 2012)

4.4. MARCO CONTEXTUAL

Localización Geográfica

El Departamento del Cesar, está situado en la zona noreste del país, posee una extensión de 22.905 km². Se ubica en la parte nororiental del país, el Departamento del Cesar limita al norte con los departamentos de La Guajira y Magdalena; por el sur, con los departamentos de Bolívar, Santander y Norte de Santander; y por el este, con los departamentos de Norte de Santander y la República Bolivariana de Venezuela. Sus coordenadas son 07°41'16'' y 10°52'14'' de latitud norte y 72°53'27'' y 74°08'28'' de longitud oeste. Su capital es Valledupar. (Plan de Desarrollo Departamental, 2020)

La Complejo Cenagoso de Zapatosa, se encuentra dentro del Municipio de Chimichagua, Cesar, rodeada de las bellas "Playas de Amor" y numerosas islas. Geográficamente se encuentra situada en Sur América, al Nororiente de La República de Colombia y al Centro del Departamento del Cesar. Se halla a 9°, 27' - 28" de la longitud Este del Meridiano de Bogotá y 73° 49' de longitud al Oeste. (Plan de Desarrollo Municipal , 2020)

Figura 2. Ubicación del Complejo Cenagoso de Zapatosa



Nota: Tomado por Autores, 2023 de la Pagina Web de la Gobernación del Cesar, Sección de Mapas Propios de la Región.

La Ciénaga de Zapatosa es el humedal continental más grande de agua dulce que tiene Colombia, cuenta con una extensión de entre 30.000 y 40.000 hectáreas en verano y 70.000 hectáreas en invierno. Beneficia de manera directa a los habitantes de Curumaní, Chiriguaná, Tamalameque y Chimichagua en el Cesar y El Banco en Magdalena, que además encuentran en sus aguas opciones productivas a través de la pesca. El conjunto lagunar de Zapatosa, está compuesto por varias ciénagas intercomunicadas: Candelaria, Zapatosa, Saloa, Santo Domingo, Gramalito, etc. (Plan de Desarrollo Municipal , 2020)



4.5. MARCO LEGAL

Tabla 1. Aspectos normativos y legales aplicables al proyecto

Normativa	Descripción	Aplicación
<p>Constitución Política de 1991</p>	<p>Artículo 8. Es obligación del Estado y de las personas proteger las riquezas culturales y naturales de la Nación.</p> <p>Artículo 79. Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. La ley garantizará la participación de la comunidad en las decisiones que puedan afectarlo. Es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación para el logro de estos fines.</p> <p>Artículo 80. El Estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución. Además, deberá prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental, imponer las sanciones legales y exigir la reparación de los daños causados. Así mismo, cooperará con otras naciones en la protección de los ecosistemas situados en las zonas fronterizas.</p>	<p>Principios generales rectores que debe cumplirse como derechos y deberes de todos los ciudadanos que se identifican como colombianos.</p>

Normativa	Descripción	Aplicación
Ley 23 de 1973	Por la cual se conceden facultades extraordinarias al presidente de la República para expedir el Código de Recursos Naturales y protección al medio ambiente y se dictan otras disposiciones.	Como dentro del objeto de análisis se tendrá que planificar sobre los recursos naturales es necesario considerar los lineamientos normativos reglamentarios.
Ley 99 de 1993	Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA y se dictan otras disposiciones.	Como se requiere información de las entidades científicas dentro del SINA entonces se debe considerar la reglamentación que lo soporta.
Ley 140 de 1994	<p>Por la cual se reglamenta la Publicidad Exterior Visual en el Territorio Nacional.</p> <p>Artículo 2. La presente Ley tiene por objeto mejorar la calidad de vida de los habitantes del país, mediante la descontaminación visual y del paisaje, la protección del espacio público y de la integridad del medio ambiente.</p>	Se requiere normas que comprendan la contaminación visual y alteración del paisaje.
Ley 1523 de 2012	Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones	Se tienen en cuenta los lineamientos para ejecutar la gestión del riesgo de desastres de acuerdo con su eventualidad.

Normativa	Descripción	Aplicación
Decreto 2811 de 1974	Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.	Como se objeta crear lineamientos para la protección y el uso sostenible de los recursos naturales se necesitan soportes reglamentarios en este campo.
Decreto 948 de 1995	Se reglamentan, parcialmente la Ley 23 de 1973, los artículos 33, 73, 74, 75 y 76 del Decreto ley 2811 de 1974; los artículos 41, 42, 43, 44, 45, 48 y 49 de la Ley 9ª de 1979; y la Ley 99 de 1993, en relación con la prevención y control de la contaminación atmosférica y protección de calidad del aire.	Se efectúa la ley que prohíbe la quema de bosques natural y de vegetación natural protectora en todo el territorio nacional.
Decreto 1076 de 2015	Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible.	Reglamentado en el Libro 2 Parte 2 Título 2ª referente a la Biodiversidad Capítulo 1, 2 y 4.
Decreto 1715 de 1978	Por el cual se reglamentan parcialmente el Decreto- Ley 2811 de 1974, la Ley 23 de 1973 y el Decreto- Ley 154 de 1976, en cuanto a protección del paisaje.	la comunidad tiene derecho a disfrutar de paisajes urbanos y rurales que contribuyan a su bienestar físico y espiritual.
Decreto 2340 de 1997	Por el cual se dictan unas medidas para la organización en materia de prevención y mitigación de incendios forestales y se dictan otras disposiciones	Es necesaria para la prevención y mitigación de incendios forestales en el país.

Normativa	Descripción	Aplicación
Resolución 1415 de 2012	Por la cual se actualiza y modifica el modelo de almacenamiento geográfico (Geodatabase) contenido en la Metodología General para la presentación de Estudios Ambientales adoptada en la resolución 1503 del 04 de agosto de 2010.	Como se creará cartografía y almacenará información cartográfica se desarrollará la metodología referente
Resolución 471 de 2020	Por medio del cual se establecen las especificaciones técnicas mínimas que deben tener los productos de la cartografía básica oficial de Colombia.	Las cartografías deben cumplir con características y elementos necesarios conforme a criterios y por lo tanto se adopta los requisitos técnicos mínimos.
Resolución 529 de 2020	Por medio de la cual se modifica la Resolución 471 de 2020 “Por medio del cual se establecen las especificaciones técnicas mínimas que deben tener los productos de la cartografía básica oficial de Colombia”.	Las cartografías deben cumplir con características y elementos necesarios conforme a criterios y por lo tanto se adopta los requisitos técnicos mínimos.
Resolución 2182 de 2016	Por medio la cual se modifica y consolida el Modelo de Almacenamiento Geográfico contenido en la Metodología General para la presentación de Estudios Ambientales y en el Manual de Seguimiento Ambiental de Proyectos	Las cartografías deben cumplir con características y elementos necesarios conforme a criterios y por lo tanto se adopta los requisitos técnicos mínimos.

Nota: Elaborado por los Autores, 2023 a partir de las normativas referenciadas en la página web de la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastre.

5. MARCO METODOLÓGICO

5.1. LÍNEA, SUBLÍNEA Y ÁREA TEMÁTICA DE INVESTIGACIÓN

- Este proyecto se adscribe a la siguiente línea de investigación:
“Sostenibilidad y Gestión Ambiental”,
- Este proyecto se adscribe a la siguiente sublínea de investigación:
“Seguridad y salud en el trabajo, sistemas de gestión y gestión del riesgo”
- Este proyecto se adscribe a la siguiente área temática de investigación:
“Instrumentos de Planificación en la Gestión del Riesgo”,

Conforme a lo indicado en el acuerdo No. 003 del 08 de julio de 2021, “por medio del cual se adoptan las líneas de investigación de los programas de Pregrado de la Facultad de Ingeniería y Tecnológicas sede Valledupar, y se dictan otras disposiciones”. (UNICESAR, 2021).

5.2. ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN

El enfoque de la investigación es Cuantitativo, este se define así porque este trabajo obedece un conjunto de procesos, de manera secuencial y probatoria, fundamentado en obtener información o datos numéricos mediante información preparada y digitalizada. (Hernández S. & Mendoza T., Metodología de la Investigación las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta, 2018).

5.3. ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

El alcance de la investigación es explicativo, puesto que va más allá de describir un fenómeno. Busca establecer relaciones de conceptos y de intereses para explicar la ocurrencia de una situación y las condiciones en las que esta se manifiesta. (Hernández S., Fernández C., & Baptista L., Metodología de la Investigación, 2014).

5.4. POBLACIÓN DE ESTUDIO

Corresponde a todos los ecosistemas estratégicos que por sus características naturales representan un valor para el sostenimiento de la biodiversidad y la sostenibilidad para la seguridad alimentaria, y en particular, aquellos que son de regiones tropicales, con pisos térmicos premontanos y provincia de humedad semi árido a subhúmedo. (Holdridge, 1982).

5.5. MUESTRA POBLACIONAL

Corresponde al área del Complejo Cenagoso de la Zapatosa (CCZ) dado por el acuerdo No. 001 del 18 de diciembre de 2019 “por el cual se declara, reserva, delimita y alindera el área protegida denominada Distrito Regional de Manejo Integrado (DRMI) del Complejo Cenagoso de la Zapatosa (CCZ) en los municipios de Chimichagua, Tamalameque, Curumaní y Chiriguaná en el departamento del Cesar y El Banco en el departamento del Magdalena, en jurisdicción de CORPOCESAR y CORPOMAG” que de acuerdo al artículo primero establece que posee una extensión de 140.765,7 hectáreas.

5.6. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

El diseño de la investigación es experimental y de tipo preexperimental, puesto que se tendrá un grado de control mínimo sobre las variables, sin intención, puesto que se quieren conservar sus valores originales, pero si se asociarán a composiciones gráficas que ayuden a mimetizar una realidad observable. Estos elementos serán evaluados mediante Análisis de Varianza (ANOVA) para regresiones múltiples que querrán asociar atributos o clases de estudio. Las variables de control serán indicadores vegetativos obtenidos mediante el uso de bandas de imagen obtenida con satélites.

5.7. ESTRATEGIA METODOLÓGICA

Fase 1. Determinación De Indicadores Para La Obtención Del Estado De Salud Vegetativa Y Ecosistémica Mediante Sistema De Información Geográfico Para El Complejo Cenagoso De Zapatosa

Actividad 1.1. Obtención De La Información.

Descripción: Se procedió a descargar información de imágenes satelitales desde el sensor remoto Landsat, conforme a la disponibilidad y vigencia de la información. Estas imágenes fueron analizadas y estudiadas, escogidas conforme a los períodos de mayor interés y se indicaron durante cinco años anteriores al actual.

Actividad 1.2. Cálculo De Indicadores.

Descripción: los indicadores a obtenidos son el de Vegetación de Diferencia Normalizado (NDVI) de Vegetación Mejorada (EVI), de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI), de Vegetación Resistente a la Atmósfera (ARVI), de Clorofila Verde (GCI) y el de Calcinación Normalizado (NBR). El procedimiento de obtención se realizó mediante composición de bandas en Sistema de Información Geográfico ArcMAP.

Fase 2. Construcción Del Modelo De Combustible A Partir De Indicadores De Estado De Salud Vegetativa Y Ecosistémica Mediante Sistema De Información Geográfico Para El Complejo Cenagoso De Zapatosa

Actividad 2.1. Regresión Múltiple De Indicadores.

Descripción: Se procedió a estimar una regresión lineal múltiple mediante mínimos cuadrados ordinarios – MCO, tomando como variable dependiente el Índice de Calcinación Normalizado (NBR) respecto a las variables independientes como lo fueron Vegetación de Diferencia Normalizado (NDVI) de Vegetación Mejorada (EVI), de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI), de Vegetación Resistente a la Atmósfera (ARVI) y el de Clorofila Verde (GCI).

Actividad 2.2. Análisis De Varianza.

Descripción: Después de obtener la regresión a partir de los indicadores y calcular información y su disposición para diferentes momentos en el tiempo, se procedió a realizar un análisis de varianza para verificar la idoneidad de estas con el objeto de verificar si era posible realizar agrupaciones entre todas las variables o algunas variables que podrían explicar e interpretar la situación.

Actividad 2.3. Interpretación Gráfica Del Modelo.

Descripción: Se realizó entonces la aplicación de la regresión múltiple de los indicadores construidos mediante la información digital de imágenes satelitales para obtener la representación geográfica del modelo de combustible, categorizándola en niveles de riesgo al desastre por incendio. Esta información fue explicada y comparada conforme a los elementos antrópicos y biofísicos que conforman el paisaje del Complejo Cenagoso de la Zapatosa.

Fase 3. Zonificación Del Modelo De Combustible Mediante La Correlación Con El Índice De Calcinación Normalizada (NBR) Para La Proyección Estática De Focos Incendiaros Mediante Sistema De Información Geográfico Para El Complejo Cenagoso De Zapatosa

Actividad 3.1. Representación Gráfica De Indicadores.

Descripción: Se realizó la representación gráfica de los indicadores con respecto al modelo de combustible obtenido, lo que mostró indicar el porcentaje de influencia de estos en el modelo elaborado. Se realizaron interpretaciones y análisis de los datos especificados geográficamente para determinar la afectación con los elementos que conforman el paisaje del Complejo Cenagoso de la Zapatosa.

Actividad 3.2. Representación Gráfica Del NBR.

Descripción: Se realizó la representación gráfica del Índice de Calcinación Normalizado respecto al modelo de combustible elaborado. Se llevó a cabo interpretaciones y análisis de los datos especificados geográficamente para determinar la afectación con los elementos que conforman el paisaje del Complejo Cenagoso de la Zapatosa.



6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

6.1. DETERMINACIÓN DE INDICADORES PARA LA OBTENCIÓN DEL ESTADO DE SALUD VEGETATIVA Y ECOSISTÉMICA MEDIANTE SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICO PARA EL COMPLEJO CENAGOSO DE ZAPATOSA

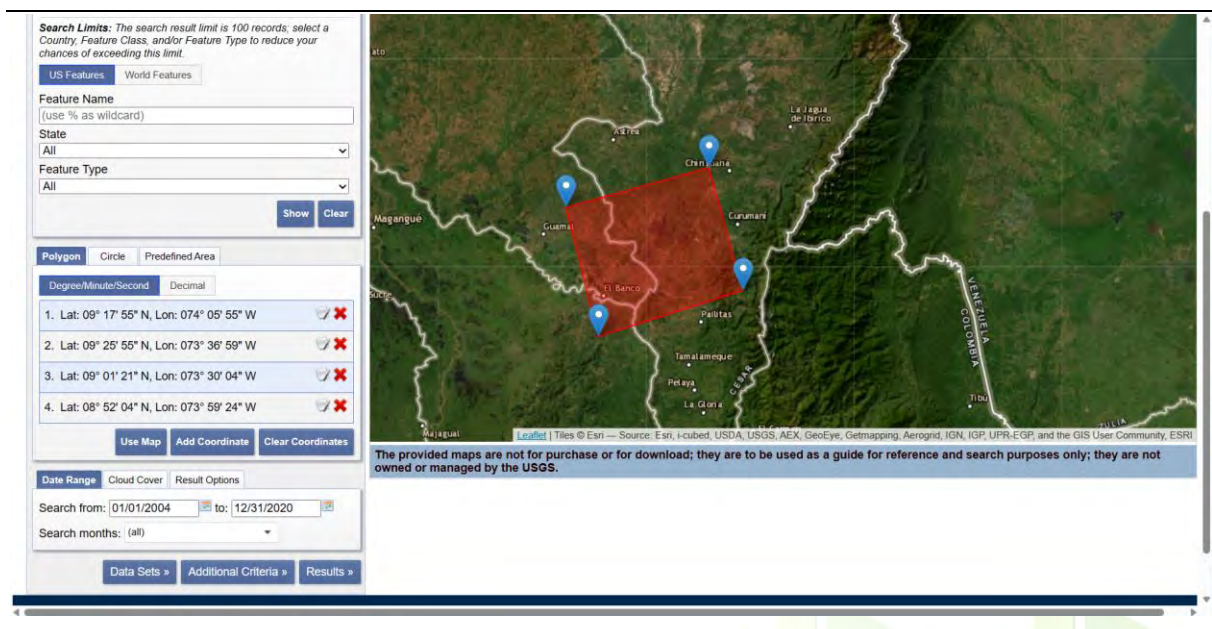
6.1.1. Obtención De La Información.

Para poder llevar a cabo esta investigación se requiere del insumo satelital, que corresponden a imágenes satelitales del satélite Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L2 de la Agencia Espacial de los Estados Unidos (NASA, por sus siglas en inglés).

El proceso de descarga de imágenes satelitales del satélite Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L2 a través del EarthExplorer del USGS se realiza siguiendo los siguientes pasos:

- i. El usuario accede al sitio web del EarthExplorer del USGS a través de un navegador web.

Figura 3. Definición Geográfica del Área de Estudio

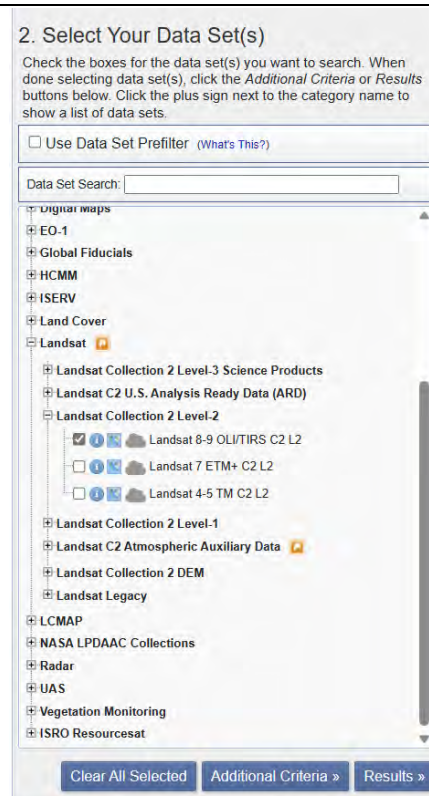


Nota: Captura de Pantalla realizada de la página oficial del EarthData del USGS (2023)

- ii. Se solicita al usuario que se registre o inicie sesión en el sitio web para obtener acceso completo a todas las funcionalidades disponibles.

- iii. Una vez que se ha iniciado sesión, se muestra una interfaz de usuario donde se pueden establecer los parámetros de búsqueda para la imagen satelital deseada. En la pestaña "Búsqueda" o "Search", se selecciona "Landsat Collection 2 Level-2" como la colección de imágenes.

Figura 4. Panel de Selección de las Plataformas Satelitales de Interés

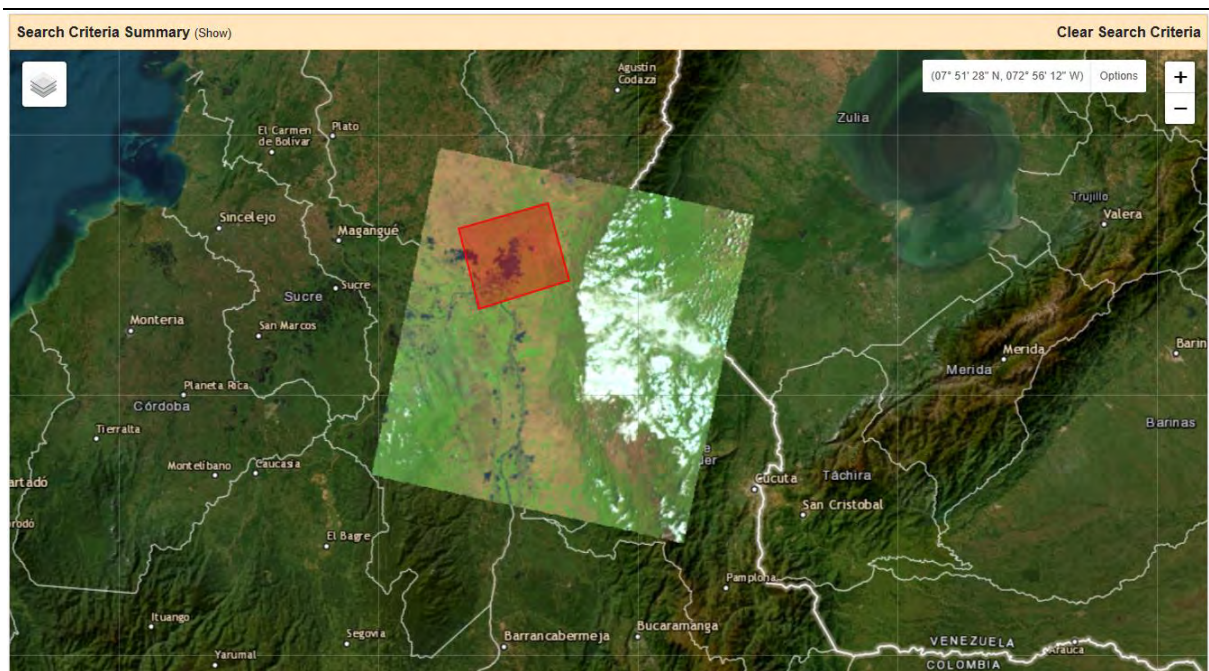


Nota: Captura de Pantalla realizada de la página oficial del EarthData del USGS (2023)

- iv. A continuación, se define la ubicación geográfica del Complejo Cenagoso de Zapatos. Esto se puede lograr ingresando las coordenadas geográficas o utilizando las herramientas de selección proporcionadas en el mapa.
- v. Se especifica el rango de fechas para la búsqueda de imágenes, con el objetivo de obtener las imágenes satelitales más relevantes para el estudio en cuestión.
- vi. Una vez que se ha definido la ubicación y el rango de fechas, se pueden aplicar filtros adicionales según las necesidades específicas del usuario. Estos filtros pueden incluir información sobre las bandas espectrales, la cobertura de nubes y otros parámetros relacionados con la investigación.

- vii. Tras aplicar los filtros, se hace clic en el botón de búsqueda para obtener una lista de las imágenes satelitales disponibles que cumplen con los criterios de búsqueda establecidos.
- viii. El usuario examina los resultados de la búsqueda y selecciona la imagen satelital deseada. Es importante verificar la calidad de la imagen, la cobertura de nubes y otros atributos relevantes antes de proceder con la descarga.
- ix. Una vez que se ha seleccionado la imagen deseada, se hace clic en el botón de descarga para iniciar el proceso de descarga. En algunos casos, se puede solicitar al usuario que proporcione información adicional, como una dirección de correo electrónico, para recibir el enlace de descarga.
- x. Dependiendo del tamaño de la imagen y la velocidad de la conexión a Internet, la descarga puede llevar algún tiempo. Una vez completada la descarga, es importante verificar la integridad de la imagen antes de utilizarla en el análisis correspondiente. Particularmente sin nubosidad y sin cortes entre imágenes.

Figura 5. Imagen satelital Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L2 de la zona de estudio



Nota: Captura de Pantalla realizada de la página oficial del EarthData del USGS (2023). En la imagen se aprecia una de las imágenes satelitales consideradas para el año 2020.

Para este trabajo se obtuvieron cinco productos para los años 2016, 2017, 2018, 2019 y 2020, las cuales son presentadas a continuación:

Figura 6. Productos Digitales obtenidos del EarthData de la USGS



Nota: Captura de Pantalla realizada de la página oficial del EarthData del USGS (2023).

Es importante tener en cuenta que cada una de las imágenes satelitales tienen un peso considerable y que su descarga requiere buena capacidad de espacio y el uso de computador especializado y con hardware integrado para poder realizar los procedimientos que se pretenden con las imágenes satelitales.

De manera informativa, es importante poner a su conocimiento la información obtenida con la descarga de estas imágenes satelitales. El satélite Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L2 cuenta con diferentes bandas espectrales que capturan información sobre la Tierra. A continuación, se detallan las principales bandas y su función (USGS, 2020):

- *Banda 1 (Coastal/Aerosol)*: Esta banda tiene una longitud de onda corta y se utiliza para detectar la presencia de aerosoles en la atmósfera y estudiar la calidad del agua.
- *Banda 2 (Blue)*: Captura la luz azul visible y se utiliza para estudiar cuerpos de agua, características costeras y la vegetación en general.
- *Banda 3 (Green)*: Mide la luz verde visible y es útil para evaluar la salud de la vegetación y detectar cambios en los cultivos y bosques.
- *Banda 4 (Red)*: Esta banda registra la luz roja visible y se utiliza para evaluar la salud de la vegetación, identificar cambios en los cultivos y analizar la cobertura del suelo.
- *Banda 5 (NIR - Near Infrared)*: Capta la luz cercana al infrarrojo y se utiliza para analizar la salud de la vegetación, estimar el contenido de agua y detectar áreas afectadas por incendios.
- *Banda 6 (SWIR 1 - Shortwave Infrared 1)*: Esta banda mide la radiación infrarroja de onda corta y se utiliza para evaluar la humedad del suelo, detectar minerales y caracterizar los tipos de roca.
- *Banda 7 (SWIR 2 - Shortwave Infrared 2)*: Captura la radiación infrarroja de onda corta y se utiliza para detectar minerales, evaluar la calidad del agua y monitorear incendios.
- *Banda 8 (Panchromatic)*: Esta banda registra una amplia gama de longitudes de onda y proporciona una imagen de alta resolución espacial para estudios detallados.
- *Banda 9 (Cirrus)*: Diseñada para medir la presencia de cirros y nubes delgadas en la atmósfera, lo que ayuda a mejorar la calidad de las imágenes.

Por otra parte, OLI significa "Operational Land Imager" y se refiere al instrumento principal a bordo de los satélites Landsat 8 y 9. El OLI es un sensor que captura imágenes en múltiples bandas espectrales para el monitoreo de la Tierra y la observación de fenómenos naturales y humanos.

TIRS significa "Thermal Infrared Sensor" y es otro instrumento a bordo de los satélites Landsat 8 y 9. El TIRS se utiliza para capturar imágenes térmicas y medir la temperatura de la superficie terrestre mediante la detección de la radiación infrarroja térmica.

Así como, C2 y L2 se refieren a las versiones de la colección y el nivel de procesamiento de los datos satelitales Landsat.

C2 (Collection 2): Hace referencia a la segunda versión de la colección de datos Landsat, que incluye mejoras y actualizaciones con respecto a la versión anterior. Esta versión proporciona datos más precisos y consistentes para diversas aplicaciones.

L2 (Level-2): Indica el nivel de procesamiento de los datos satelitales. El nivel de procesamiento L2 implica una calibración radiométrica y geométrica más precisa, lo que resulta en datos más refinados y corregidos para su uso en análisis cuantitativos y aplicaciones científicas.

Por lo cual, se puede mencionar que este trabajo fue realizado con un insumo digital de alto valor informativo geográfico, por lo cual, puede proporcionar una base para el desarrollo de esta investigación y otras que puedan surgir en torno a esta.

6.1.2. Cálculo De Indicadores

Para realizar el cálculo de los indicadores se necesita información satelital, la cual fue obtenida. Pero la construcción de estos indicadores pide bandas específicas. A continuación, se presenta por indicador la banda que se requiere:

i. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado (NDVI):

Banda 4 (Red): Captura la luz roja visible.

Banda 5 (NIR): Capta la luz cercana al infrarrojo.

ii. *Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI):*

Banda 4 (Red): Captura la luz roja visible.

Banda 5 (NIR): Capta la luz cercana al infrarrojo.

Se requiere también el valor de ajuste L (Factor de ajuste del suelo) para calcular el SAVI (generalmente se establece en 0.5)

iii. *Índice de Vegetación Resistente a la Atmósfera (ARVI):*

Banda 4 (Red): Captura la luz roja visible.

Banda 5 (NIR): Capta la luz cercana al infrarrojo.

Banda 2 (Blue): Captura la luz azul visible.

iv. *Índice de Clorofila Verde (GCI):*

Banda 3 (Green): Captura la luz verde visible.

Banda 5 (NIR): Capta la luz cercana al infrarrojo.

v. *Índice de Calcinación Normalizado (NBR):*

Banda 5 (NIR): Capta la luz cercana al infrarrojo.

Banda 7 (SWIR 2): Captura la radiación infrarroja de onda corta.

El cálculo de estos indicadores en el Complejo Cenagoso de Zapatosa puede ser de gran relevancia para comprender el estado de salud vegetativa y ecosistémica de la zona, así como para la gestión y monitoreo de posibles riesgos de incendios forestales. A continuación, se mencionan algunas razones por las cuales calcular estos indicadores podría ser relevante en esta área específica:

- **Evaluación de la salud vegetativa:** Los indicadores como el NDVI, SAVI, ARVI y GCI proporcionan información sobre la densidad y salud de la vegetación. En un área tan importante como el Complejo Cenagoso de Zapatosa, que alberga ecosistemas acuáticos y terrestres de gran biodiversidad, estos indicadores pueden ayudar a evaluar el estado de los bosques, humedales y vegetación en general. Esto puede ser útil para identificar áreas degradadas, cambios en la cobertura vegetal y posibles acciones de restauración necesarias.

- **Detección de cambios y amenazas:** Al monitorear los valores de los indicadores a lo largo del tiempo, es posible identificar cambios significativos en la vegetación, como deforestación, degradación o expansión de áreas afectadas por incendios. Estos cambios pueden estar asociados con amenazas para el ecosistema, como la pérdida de hábitat, la fragmentación del paisaje y la proliferación de especies invasoras. La detección temprana de estos cambios permite tomar medidas adecuadas de conservación y gestión.
- **Evaluación del riesgo de incendios:** El NBR es particularmente relevante para evaluar el riesgo de incendios forestales. Este indicador puede ayudar a identificar áreas propensas a la combustión y determinar la severidad de los incendios pasados. Al zonificar el modelo de combustible y correlacionarlo con el NBR, como se propone en los objetivos específicos de tu tesis, es posible mapear y proyectar áreas con mayor probabilidad de focos incendiarios. Esta información es valiosa para la planificación de estrategias de prevención y respuesta ante incendios.

Según un estudio realizado por Johnson et al. (2019), el análisis de indicadores de vegetación derivados de imágenes satelitales y el uso de SIG pueden ayudar a predecir y gestionar el riesgo de incendios forestales. El estudio demostró que la combinación de indicadores como el NDVI, SAVI, ARVI y NBR con datos geoespaciales y técnicas de análisis espacial permite identificar áreas propensas a los incendios y evaluar su severidad potencial. Estos resultados respaldan la implementación de estrategias de prevención y respuesta temprana, así como la planificación efectiva de la gestión del riesgo en los desastres por incendios.

La aplicación de sistemas de información geográfica y los indicadores mencionados en la gestión del riesgo de incendios forestales ha sido ampliamente reconocida en la literatura científica. Estos enfoques permiten una evaluación más precisa y eficiente del riesgo, facilitando la toma de decisiones informadas para la protección de los ecosistemas y la seguridad de las comunidades afectadas.

Sin embargo, antes se hará la presentación del insumo obtenido y posteriormente se presentará el procedimiento para cada uno de los indicadores enlistados anteriormente.

6.1.2.1. Imágenes Satelitales.

El procedimiento para llevar a cabo este trabajo en ArcGIS es el siguiente:

- Iniciar ArcMap y abrir el proyecto existente o crear un nuevo proyecto.
- En la barra de herramientas, seleccionar "Add Data" para agregar las imágenes satelitales del Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L2 al proyecto.
- Navegar hasta la ubicación de las imágenes satelitales y seleccionar los archivos correspondientes a las bandas que se desean visualizar.
- Hacer clic en "Agregar" para cargar las imágenes satelitales en ArcMap. Las bandas seleccionadas se agregarán como capas individuales en la tabla de contenidos.
- Asegurarse de que todas las bandas estén visibles en la tabla de contenidos. Hacer clic derecho en una de las capas de banda y seleccionar "Propiedades".
- En la ventana de propiedades de la capa, ir a la pestaña "Symbology". Seleccionar la opción "RGB Composite" y elegir las bandas que se utilizarán para crear la combinación de colores naturales. Para el color natural, se suelen utilizar las siguientes bandas:

Banda 4 (Red) para el canal rojo.

Banda 3 (Green) para el canal verde.

Banda 2 (Blue) para el canal azul.

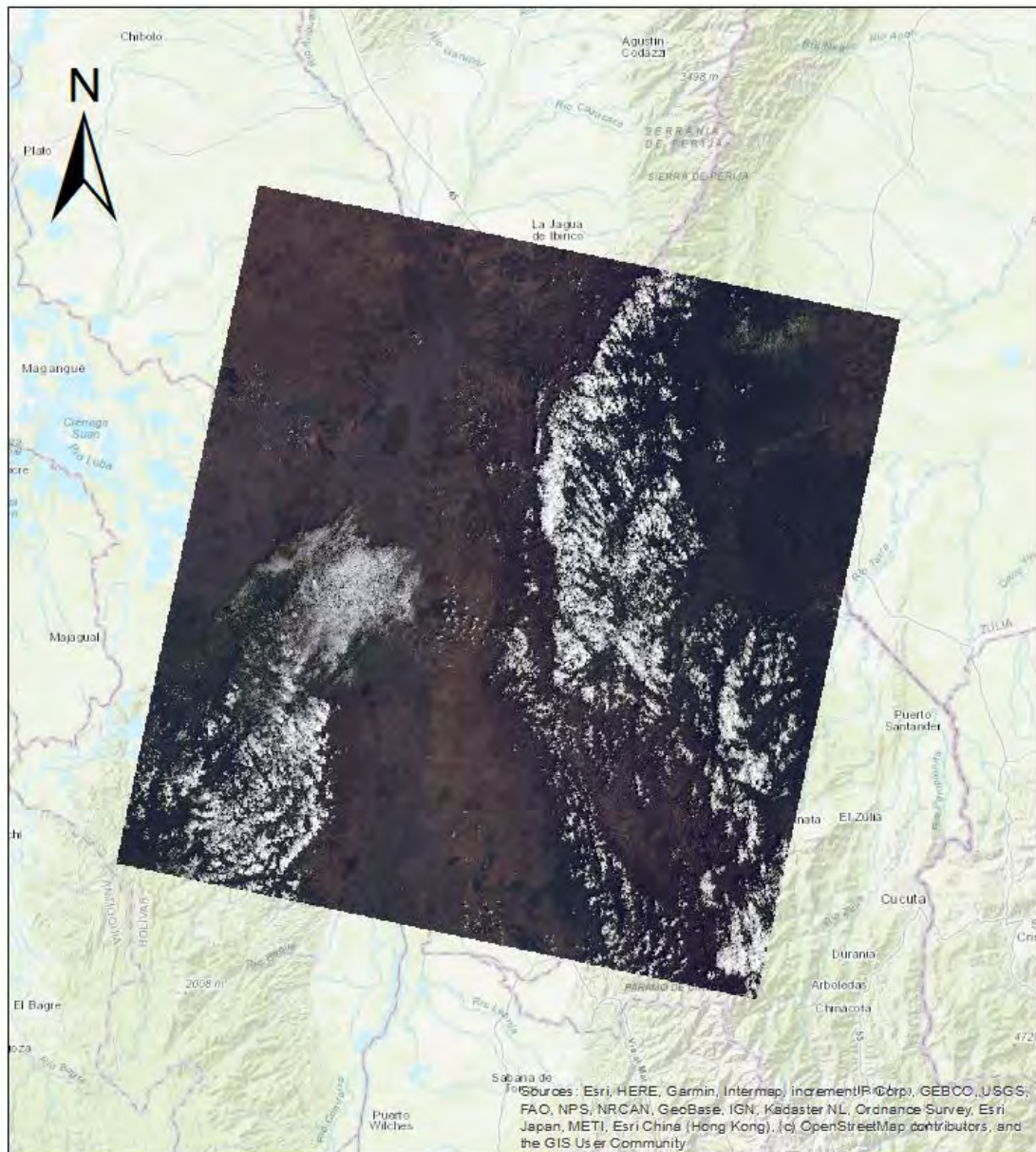
- Hacer clic en "OK" para aplicar los cambios de simbología y visualizar las imágenes en color natural.
- Para crear un diseño de presentación, ir al menú "View" y seleccionar "Layout View". Esto permitirá trabajar en un lienzo de presentación separado.
- En la vista de diseño, se pueden agregar elementos como títulos, leyendas, escalas y cuadros de texto para diseñar la presentación. Utilizar las herramientas de la barra de herramientas "Layout" para agregar y personalizar estos elementos.

La presentación de las imágenes para los años 2016, 2017, 2018, 2019 y 2020 se hacen a continuación de manera secuenciada:

Figura 7. Imagen Satelital de la zona de estudio año 2016

LC08_L2SP_008054_20160224_20200907_02_T1
1 centimeter = 15.000 meters

70.000 35.000 0 70.000 Meters

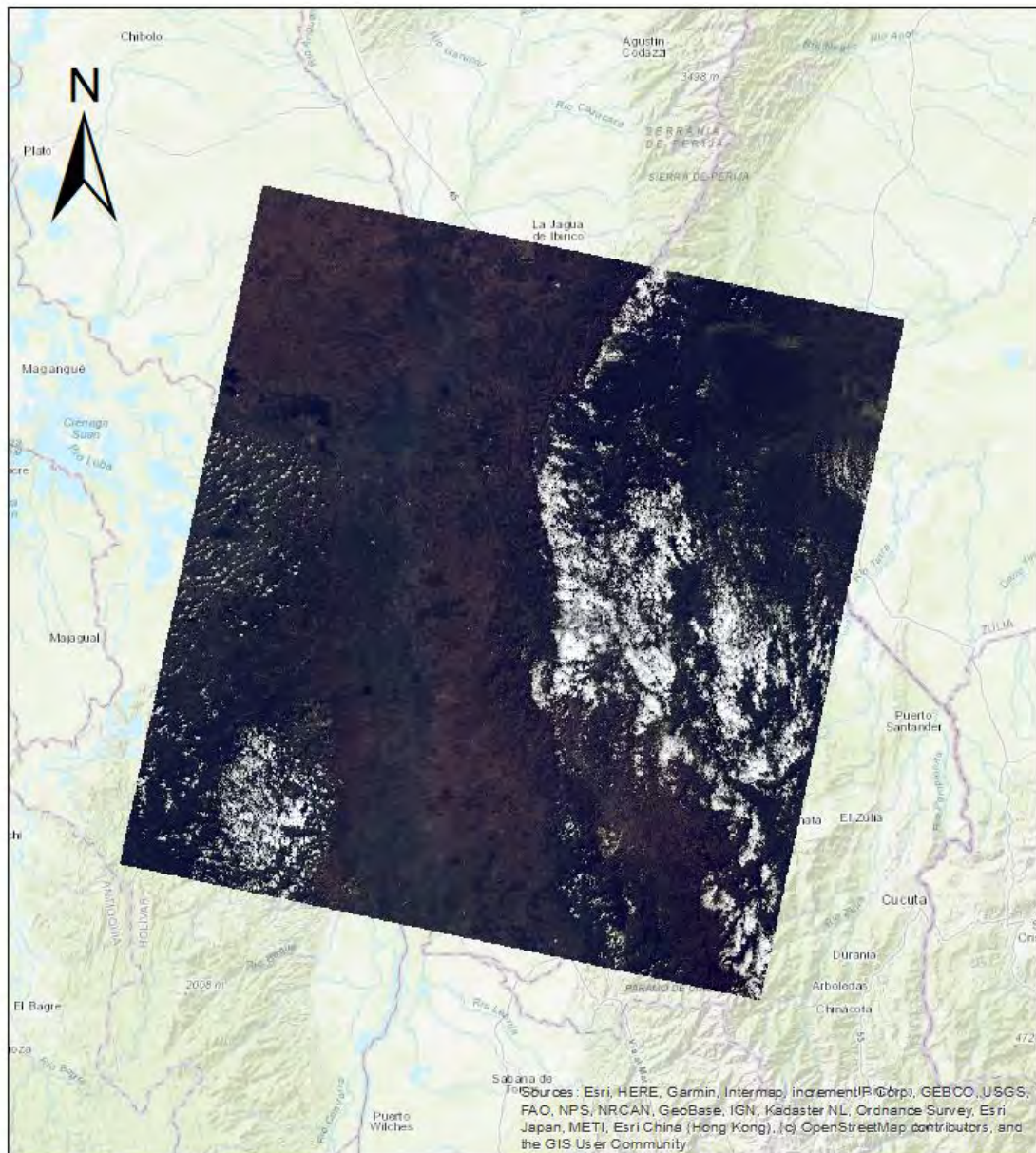


Nota: Elaborado por los Autores (2023) a partir del Software ArcGIS empleando imágenes satelitales del Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L2 obtenido del EarthData del USGS (2023).

Figura 10. Imagen Satelital de la zona de estudio año 2019

LC08_L2SP_008054_20190115_20200830_02_T1
1 centimeter = 15.000 meters

70.000 35.000 0 70.000 Meters

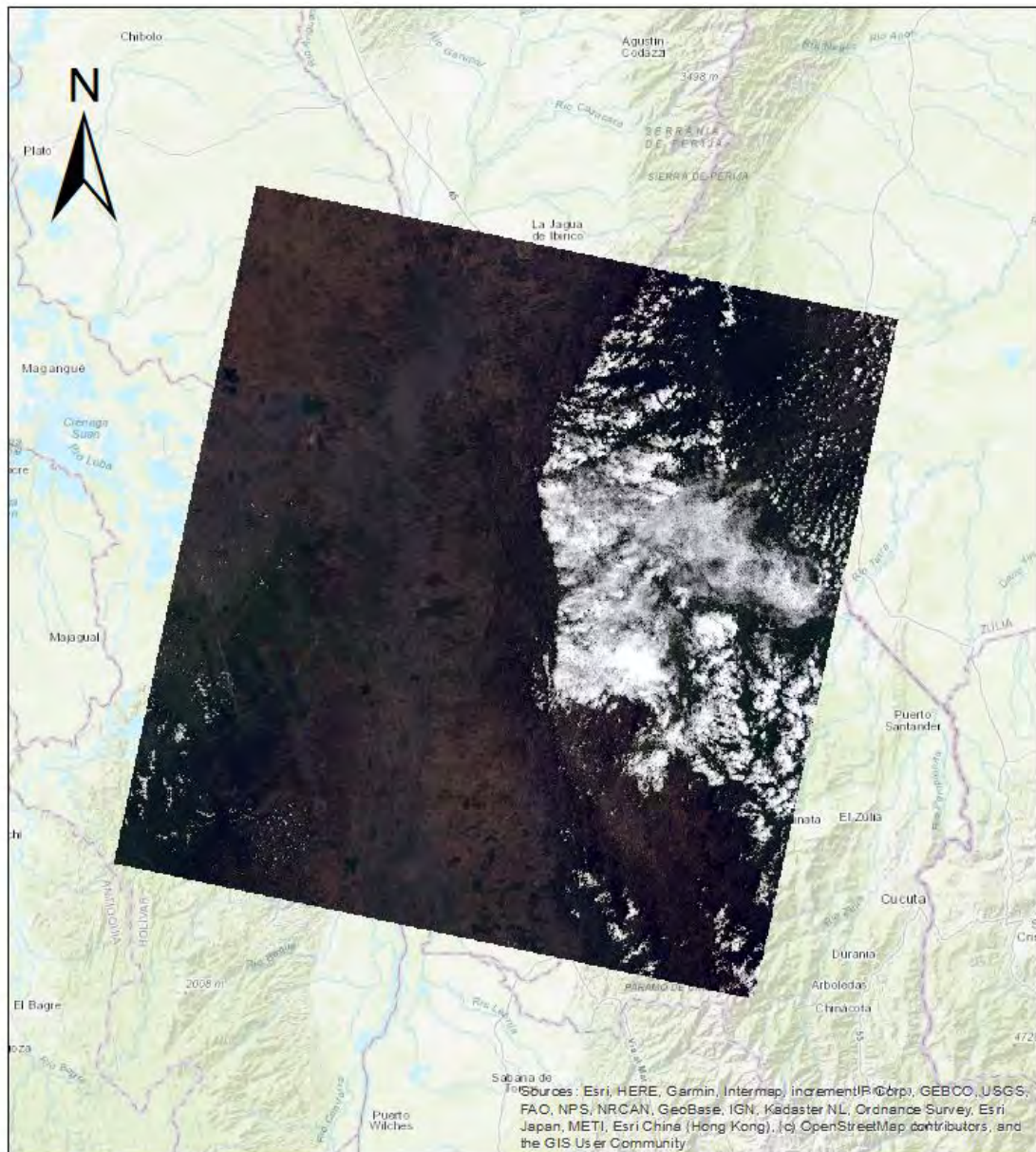


Nota: Elaborado por los Autores (2023) a partir del Software ArcGIS empleando imágenes satelitales del Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L2 obtenido del EarthData del USGS (2023).

Figura 11. Imagen Satelital de la zona de estudio año 2020

LC08_L2SP_008054_20200322_20200822_02_T1
1 centimeter = 15.000 meters

70.000 35.000 0 70.000 Meters



Nota: Elaborado por los Autores (2023) a partir del Software ArcGIS empleando imágenes satelitales del Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L2 obtenido del EarthData del USGS (2023).

6.1.2.2. Capa De Trabajo.

La delimitación del área de trabajo se obtiene a partir del acuerdo No. 001 del 18 de diciembre de 2019 “por el cual se declara, reserva, delimita y alindera el área protegida denominada Distrito Regional de Manejo Integrado (DRMI) del Complejo Cenagoso de la Zapatosa (CCZ) en los municipios de Chimichagua, Tamalameque, Curumaní y Chiriguaná en el departamento del Cesar y El Banco en el departamento del Magdalena, en jurisdicción de CORPOCESAR y CORPOMAG”, en donde se define la siguiente tabla de coordenadas

Figura 12. *Coordenadas de la delimitación del Complejo Cenagoso de Zapatosa*

PUNTO	Este X (m)	Norte Y (m)	PUNTO	Este X (m)	Norte Y (m)
1	1012020,936	1486535,178	26	1032062,781	1544977,279
2	1012263,167	1489821,241	27	1038720,044	1544992,752
3	1012293,128	1490027,176	28	1051148,999	1524393,197
4	1016260,64	1505544,039	29	1050037,174	1520505,206
5	1016987,705	1506468,505	30	1048747,393	1518653,905
6	1018197,372	1507623,348	31	1045461,92	1508270,71
7	1018288,559	1509028,716	32	1043907,945	1502783,315
8	1018654,047	1509646,723	33	1042311,679	1500400,513
9	1019998,934	1511935,878	34	1042462,41	1499582,069
10	1019055,384	1512533,059	35	1040902,918	1497611,272
11	1018315,326	1514190,642	36	1040943,242	1496058,611
12	1018363,837	1515327,6	37	1040934,132	1493589,418
13	1020166,847	1518272,423	38	1041621,378	1490981,966
14	1021520,788	1518856,631	39	1042360,192	1490428,466
15	1023642,323	1515889,127	40	1042102,912	1486433,842
16	1024993,986	1516273,998	41	1038106,972	1485185,641
17	1025485,925	1516310,788	42	1037720,008	1484889,898
18	1028787,558	1514406,03	43	1035102,469	1484714,221
19	1029527,298	1516466,957	44	1035133,475	1481788,298
20	1029775,654	1517952,995	45	1035999,184	1478336,09
21	1028736,157	1518061,024	46	1035371,021	1477479,577
22	1028710,784	1519950,917	47	1032674,029	1476172,318
23	1028127,419	1521491,812	48	1031369,873	1476103,288
24	1033884,463	1526564,497	49	1030613,978	1475412,036
25	1031825,656	1541541,586	50	1029013,782	1474748,601

Nota: *Elaborado por los Autores (2023) a partir de la tabla presentada en el artículo 2 del acuerdo No. 001 del 18 de diciembre de 2019 “por el cual se declara, reserva, delimita y alindera el área protegida denominada Distrito Regional de Manejo Integrado (DRMI) del Complejo Cenagoso de la Zapatosa (CCZ) en los municipios de Chimichagua, Tamalameque, Curumaní y Chiriguaná en el departamento del Cesar y El Banco en el departamento del Magdalena, en jurisdicción de CORPOCESAR y CORPOMAG”*

La representación geográfica de los puntos presentados anteriormente obedece un procedimiento del software ArcGIS.

i. Definición del sistema de coordenadas:

Antes de importar las coordenadas, resulta crucial definir el sistema de coordenadas del proyecto en UTM WGS84. Para ello, el usuario debe dirigirse a la barra de herramientas "ArcMap" y seleccionar "Properties" o "Propiedades". En la pestaña "Coordinate System" o "Sistema de coordenadas", se debe elegir el sistema de coordenadas UTM apropiado para la ubicación específica en WGS84.

ii. Creación de un nuevo shapefile:

El siguiente paso implica hacer clic derecho en la tabla de contenidos y seleccionar "New Shapefile" o "Nuevo shapefile". En esta opción, se escoge el tipo de geometría deseado, ya sea punto, línea o polígono, y se establece la ubicación y el nombre del archivo shapefile.

iii. Adición de campos de atributos:

Una vez creado el shapefile, se procede a hacer clic derecho en él dentro de la tabla de contenidos y seleccionar "Open Attribute Table" o "Abrir tabla de atributos". En esta tabla, se añaden los campos de atributos necesarios según los datos que se desean asociar a las coordenadas.

iv. Importación de las coordenadas:

Para importar las coordenadas, se abre el archivo de texto o la hoja de cálculo que contienen las coordenadas en UTM WGS84. Luego, se copian y pegan las coordenadas en la tabla de atributos del shapefile recién creado. Es importante asegurarse de asignar las coordenadas a la columna de geometría correspondiente según el tipo de geometría seleccionado, ya sea punto, línea o polígono.

En la siguiente figura se observa el shape o polígono del Complejo Cenagoso de Zapatosa:

Figura 13. Representación Geográfica del Complejo Cenagoso de Zapatosa



Elaborado por:	JUAN BENJUMEA ODUBER GARCÍA
----------------	--------------------------------

Leyenda

- ◆ CCZ_UTM
- CCZ_Poligono

Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 18N
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: WGS 1984
 False Easting: 500.000.000
 False Northing: 0,0000
 Central Meridian: -75,0000
 Scale Factor: 0,9996
 Latitude Of Origin: 0,0000
 Units: Meter



Nota: Elaborado por los Autores (2023) a partir de la tabla presentada en el artículo 2 del acuerdo No. 001 del 18 de diciembre de 2019



6.1.2.3. Índice NDVI.

Para obtener el Índice De Vegetación De Diferencia Normalizado (NDVI), se procede a realizar el siguiente paso a paso en ArcGIS. (ESRI).

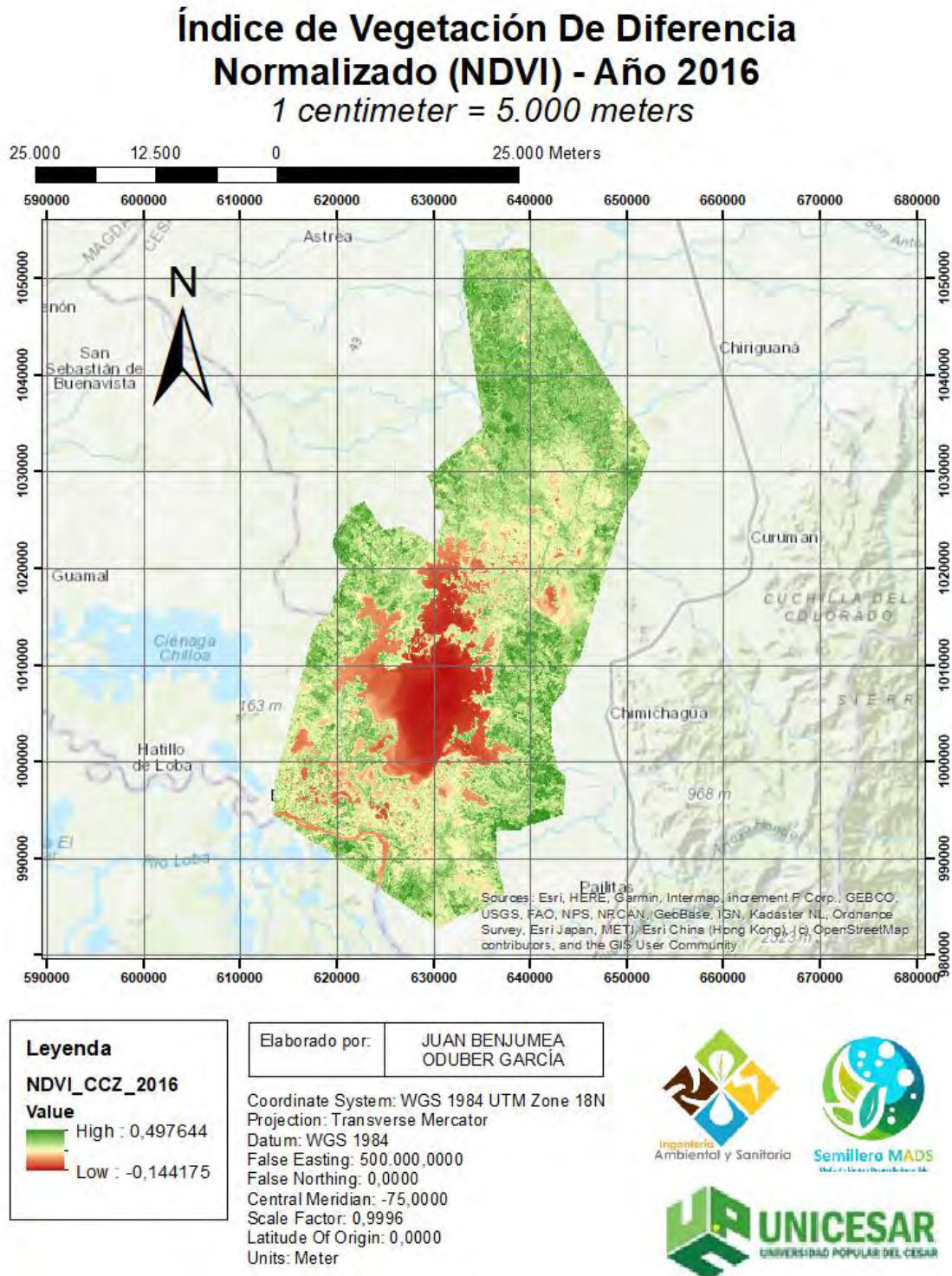
- i. Asegurarse de tener las bandas necesarias de la imagen satelital cargadas en ArcMap. Por lo general, se requiere la banda roja (Red) y la banda del infrarrojo cercano (NIR).
- ii. Acceder a la barra de herramientas "Spatial Analyst" y verificar si la extensión "Spatial Analyst" está habilitada. En caso de no estar habilitada, se puede activar y reiniciar ArcMap si es necesario.
- iii. Seleccionar la opción "Raster Calculator" o "Calculadora de ráster" ubicada en la barra de herramientas "Spatial Analyst".
- iv. En la ventana de la calculadora de ráster, se debe ingresar la fórmula del NDVI utilizando las bandas correspondientes:

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{Red})$$

- v. Hacer clic en el botón "OK" para calcular el NDVI.
- vi. Especificar una ubicación y un nombre para el nuevo ráster que se generará con el resultado del NDVI. Este ráster contendrá los valores del NDVI para cada píxel de la imagen.
- vii. Una vez completado el cálculo, el ráster resultante del NDVI se agregará automáticamente a la tabla de contenidos en ArcMap.
- viii. Para una visualización más efectiva del NDVI, se puede aplicar una simbología adecuada a la capa del ráster del NDVI en la tabla de contenidos. Esto permitirá representar visualmente las variaciones en los valores del NDVI en la imagen.

Teniendo en cuenta que se está trabajando con varias imágenes satelitales este trabajo será desarrollado en la ventana ArcPython, integrando el código para que pueda realizarse el trabajo de manera iterativa y sea un ahorro de tiempo para los investigadores. (ver Anexo I, Literal A). Las representaciones geográficas del NDVI se presentan en secuencia a continuación:

Figura 14. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado – NDVI año 2016

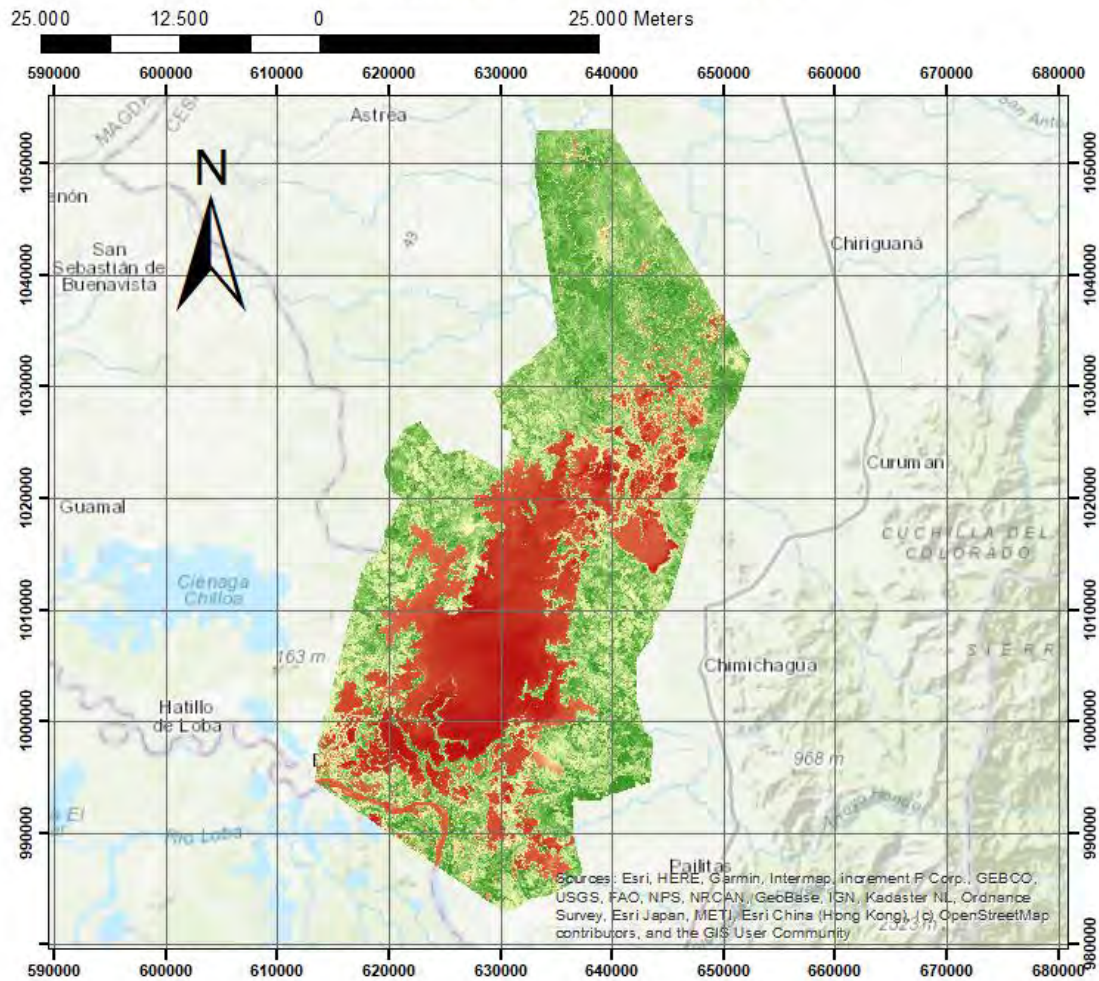


Nota: Elaborado por los Autores (2023) a partir del Software ArcGIS empleando imágenes satelitales del Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L2 obtenido del EarthData del USGS (2023).

Figura 15. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado – NDVI año 2017

Índice de Vegetación De Diferencia Normalizado (NDVI) - Año 2017

1 centimeter = 5.000 meters



Leyenda

NDVI_CCZ_2017

Value

- High : 0,546831
- Low : -0,118978

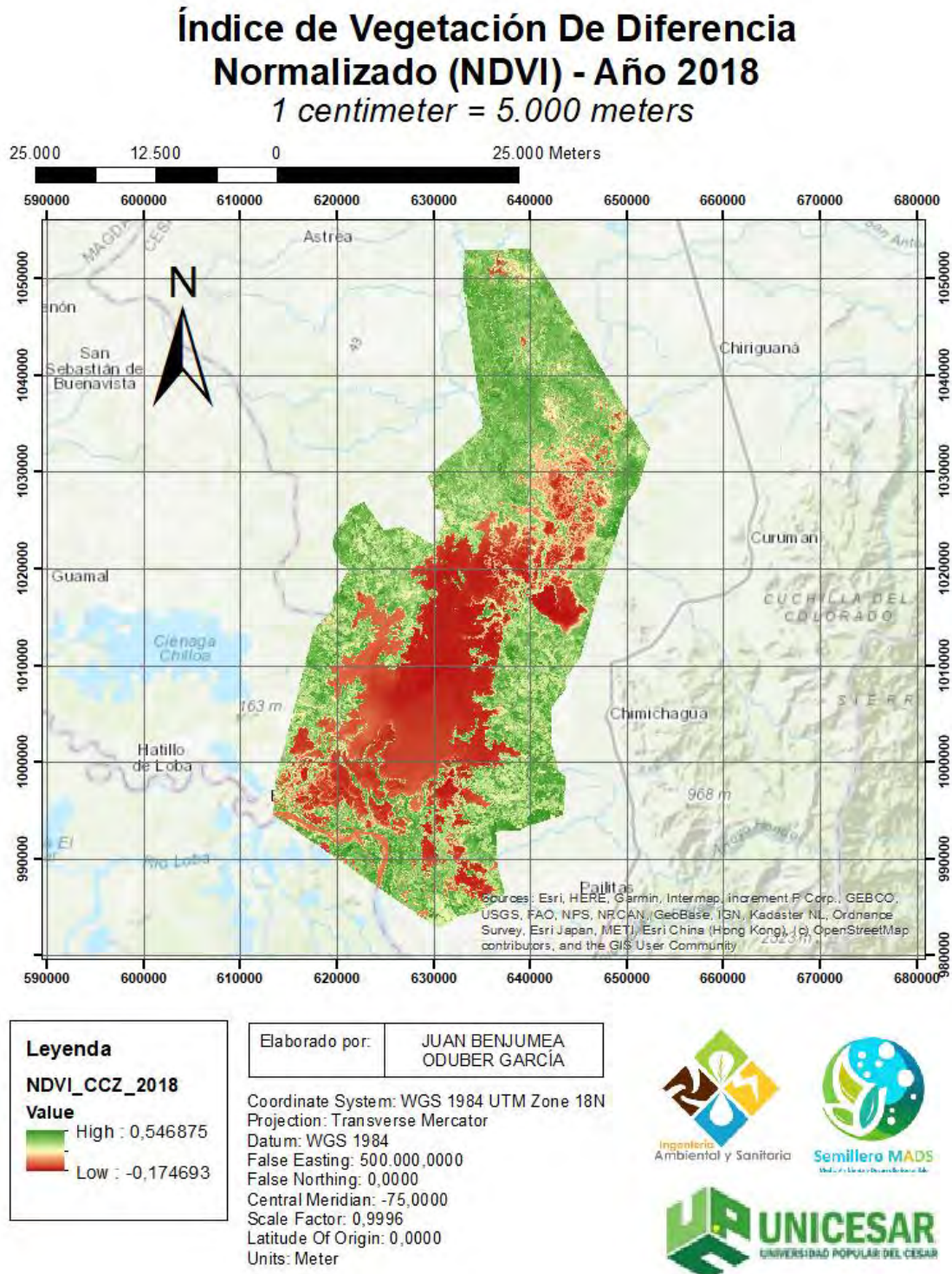
Elaborado por: **JUAN BENJUMEA
ODUBER GARCÍA**

Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 18N
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984
False Easting: 500.000.0000
False Northing: 0,0000
Central Meridian: -75,0000
Scale Factor: 0,9996
Latitude Of Origin: 0,0000
Units: Meter



Nota: Elaborado por los Autores (2023) a partir del Software ArcGIS empleando imágenes satelitales del Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L2 obtenido del EarthData del USGS (2023).

Figura 16. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado – NDVI año 2018

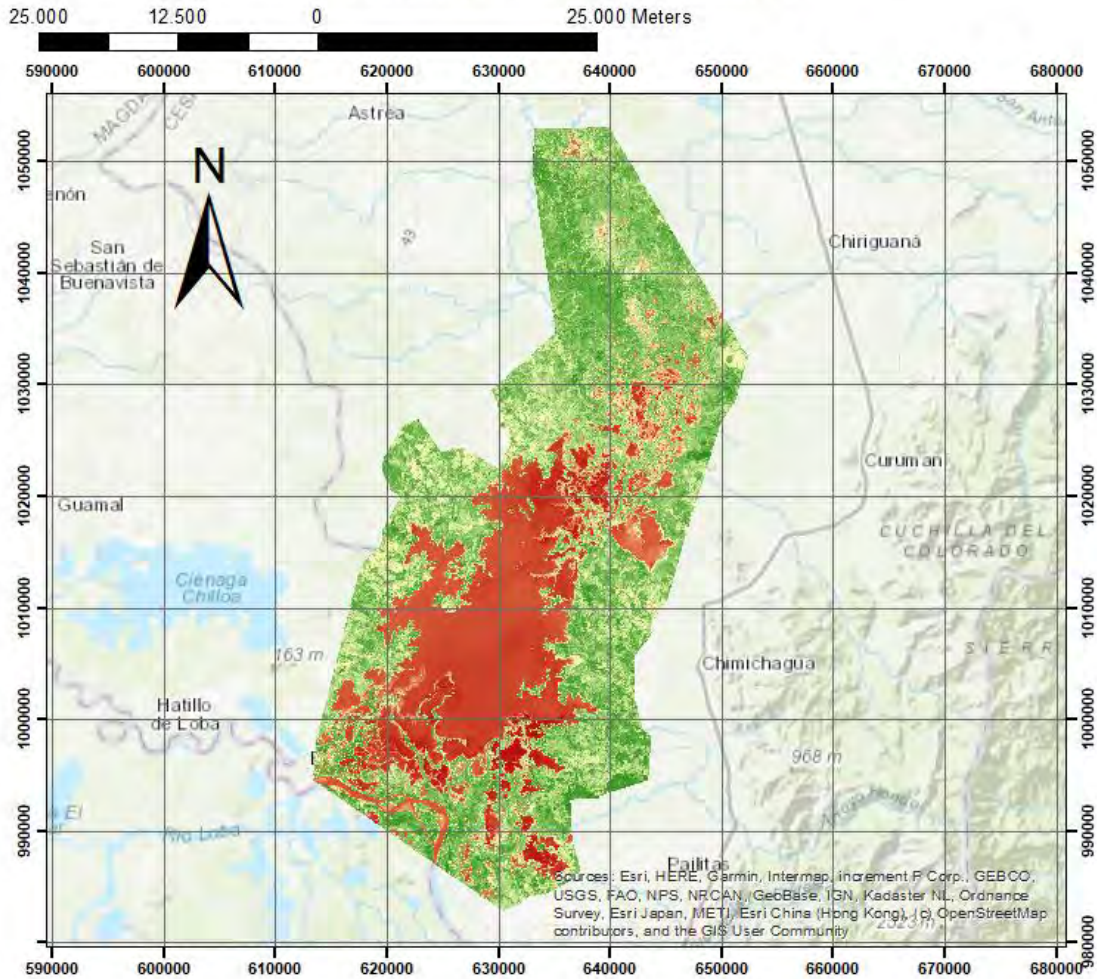


Nota: Elaborado por los Autores (2023) a partir del Software ArcGIS empleando imágenes satelitales del Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L2 obtenido del EarthData del USGS (2023).

Figura 17. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado – NDVI año 2019

Índice de Vegetación De Diferencia Normalizado (NDVI) - Año 2019

1 centimeter = 5.000 meters



Leyenda	
NDVI_CCZ_2019	
Value	
	High : 0,623123
	Low : -0,13001

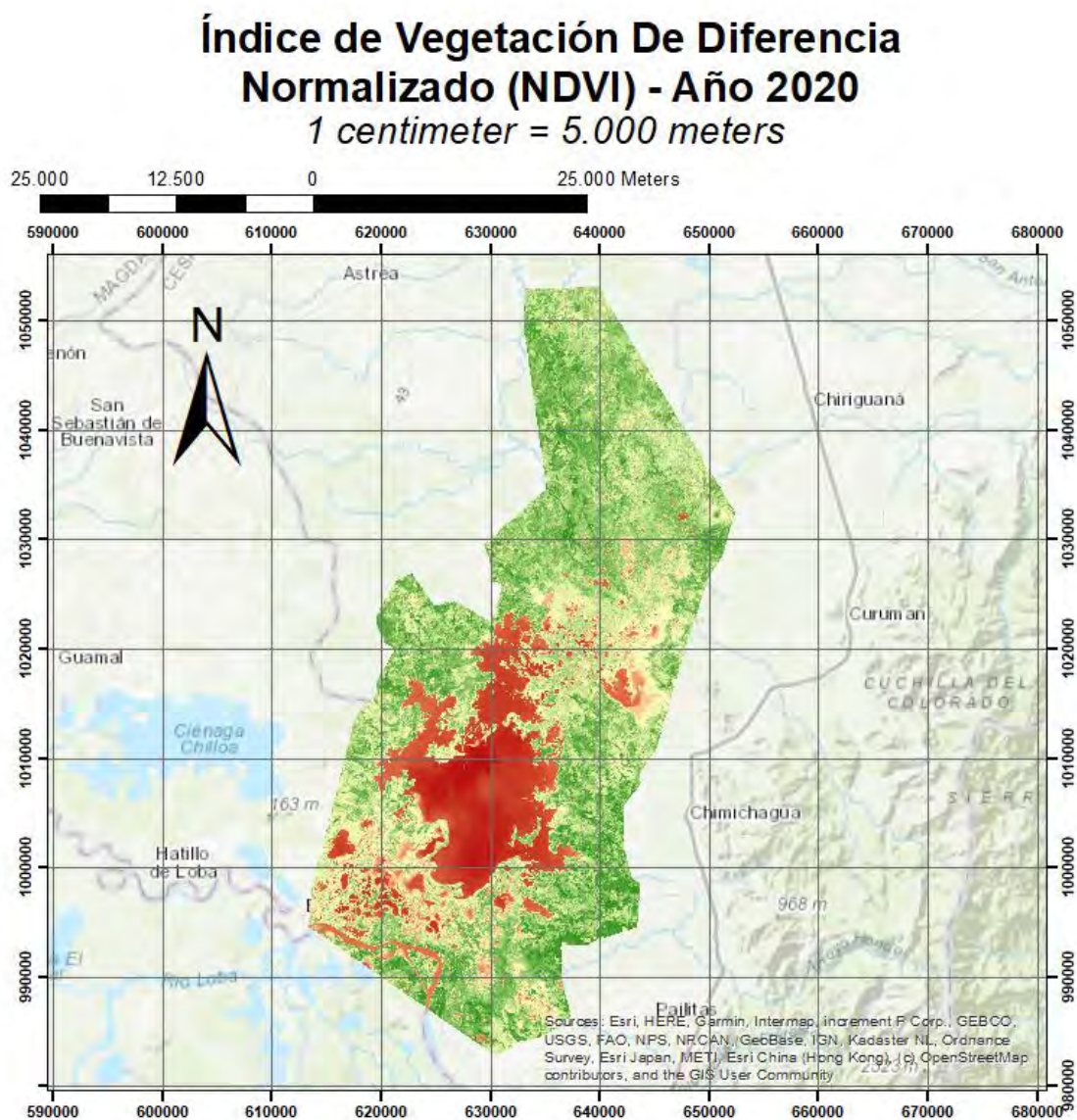
Elaborado por:	JUAN BENJUMEA ODUBER GARCÍA
----------------	--------------------------------

Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 18N
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984
False Easting: 500.000.000
False Northing: 0,0000
Central Meridian: -75,0000
Scale Factor: 0,9996
Latitude Of Origin: 0,0000
Units: Meter



Nota: Elaborado por los Autores (2023) a partir del Software ArcGIS empleando imágenes satelitales del Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L2 obtenido del EarthData del USGS (2023).

Figura 18. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado – NDVI año 2020



Leyenda

NDVI_CCZ_2020

Value

	High : 0,502517
	Low : -0,129566

Elaborado por: **JUAN BENJUMEA
ODUBER GARCÍA**

Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 18N
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984
False Easting: 500.000.0000
False Northing: 0,0000
Central Meridian: -75,0000
Scale Factor: 0,9996
Latitude Of Origin: 0,0000
Units: Meter



Nota: Elaborado por los Autores (2023) a partir del Software ArcGIS empleando imágenes satelitales del Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L2 obtenido del EarthData del USGS (2023).

Al analizar los cambios en los valores bajos y altos del NDVI en el Complejo Cenagoso de Zapatosa a lo largo de los años, es posible obtener algunas conclusiones e inferencias sobre las condiciones de la vegetación en la zona. A continuación, se presenta un análisis de estos cambios y posibles explicaciones:

Variabilidad en los valores bajos del NDVI: Los valores bajos del NDVI indican áreas con vegetación menos densa o saludable. La variabilidad en estos valores puede ser atribuida a factores como cambios en las condiciones climáticas, sequías, inundaciones o disturbios naturales o antrópicos. Por ejemplo, en años de sequía, es posible que se observe un aumento en los valores bajos del NDVI debido a la falta de agua disponible para las plantas. Por otro lado, eventos de inundaciones pueden afectar negativamente la salud de la vegetación y resultar en valores bajos del NDVI.

Variabilidad en los valores altos del NDVI: Los valores altos del NDVI indican áreas con una vegetación densa y saludable. La variabilidad en estos valores puede estar relacionada con factores como cambios en el patrón de lluvias, la presencia de humedales, la regeneración natural de la vegetación y las prácticas de manejo de la tierra. Por ejemplo, en años con un mayor régimen de lluvias, es probable que se observen valores altos del NDVI debido a una mayor disponibilidad de agua y condiciones favorables para el crecimiento de la vegetación. Además, la implementación de prácticas de manejo sostenible de la tierra, como la reforestación o la conservación de humedales, puede contribuir a valores altos y estables del NDVI a lo largo del tiempo.

6.1.2.4. Índice SAVI.

El procedimiento para obtener el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI) es el presentado a continuación:

- i. Cargar la imagen satelital: Abre ArcMap y carga la imagen satelital en la que deseas calcular el SAVI. Asegúrate de tener las bandas necesarias, generalmente la banda roja (Red) y la banda del infrarrojo cercano (NIR), disponibles y visibles en la tabla de contenidos.

- ii. Calcular el SAVI: Ve a la barra de herramientas "Spatial Analyst" y asegúrate de que la extensión "Spatial Analyst" esté habilitada. Luego, selecciona la opción "Raster Calculator" o "Calculadora de ráster" en la barra de herramientas.
- iii. Introducir la fórmula del SAVI: En la ventana de la calculadora de ráster, ingresa la fórmula del SAVI:

$$\text{SAVI} = ((\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{Red} + \text{L})) * (1 + \text{L})$$

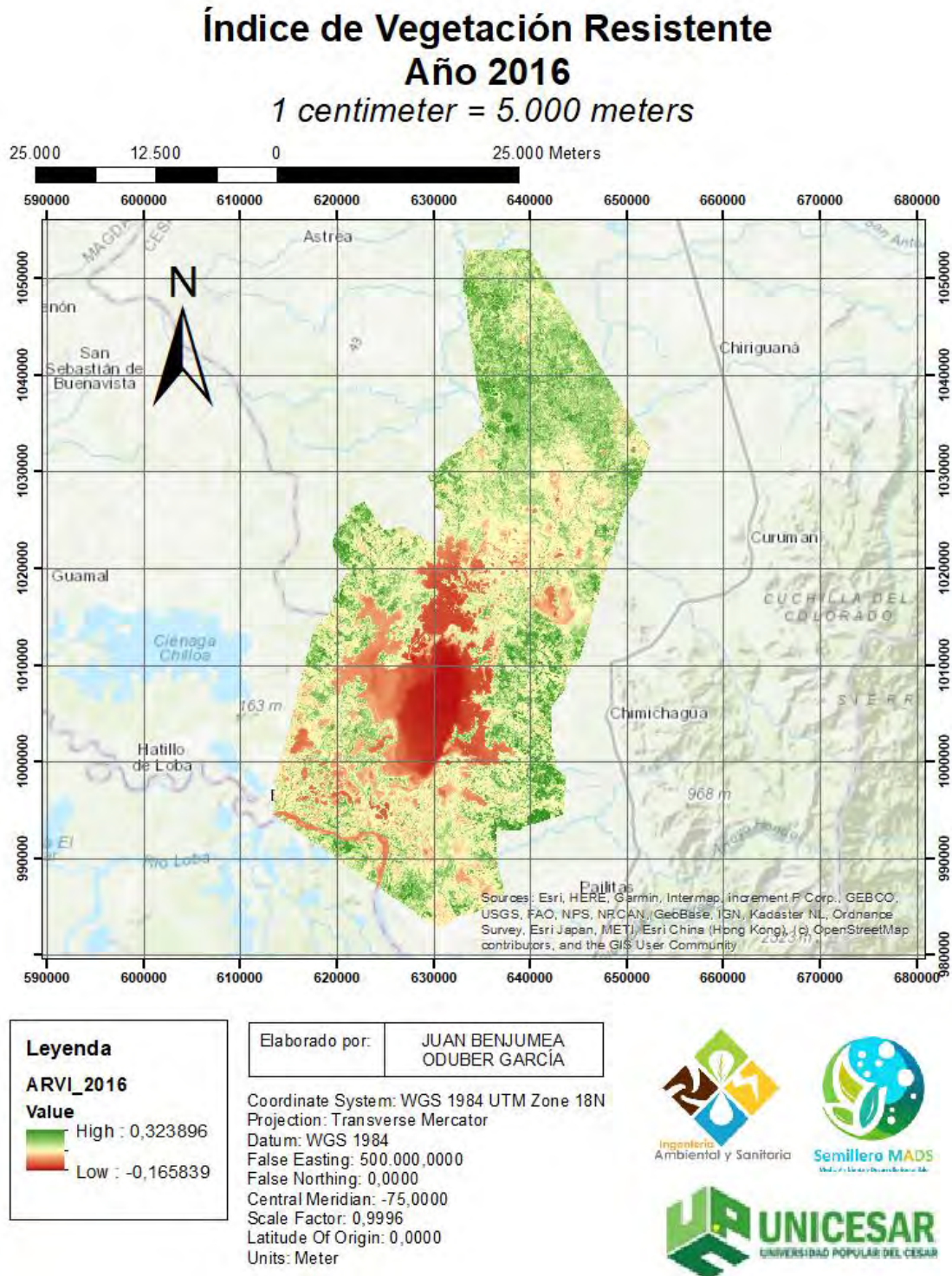
Donde NIR es el valor de reflectancia en la banda del infrarrojo cercano, Red es el valor de reflectancia en la banda roja, y L es el factor de ajuste del suelo, que generalmente se establece en 0.5. Puedes ajustar el valor de L según tus necesidades y el tipo de vegetación.

- iv. Ejecutar el cálculo: Haz clic en el botón "OK" para calcular el SAVI. Se generará un nuevo ráster con los valores del SAVI para cada píxel de la imagen.
- v. Visualizar el SAVI: Para visualizar el SAVI de manera más efectiva, puedes aplicar una simbología adecuada a la capa del ráster del SAVI en la tabla de contenidos. Esto te permitirá representar visualmente las variaciones en los valores del SAVI en la imagen.

Teniendo en cuenta que se está trabajando con varias imágenes satelitales este trabajo será desarrollado en la ventana ArcPython, integrando el código para que pueda realizarse el trabajo de manera iterativa y sea un ahorro de tiempo para los investigadores. (ver Anexo I, Literal B).

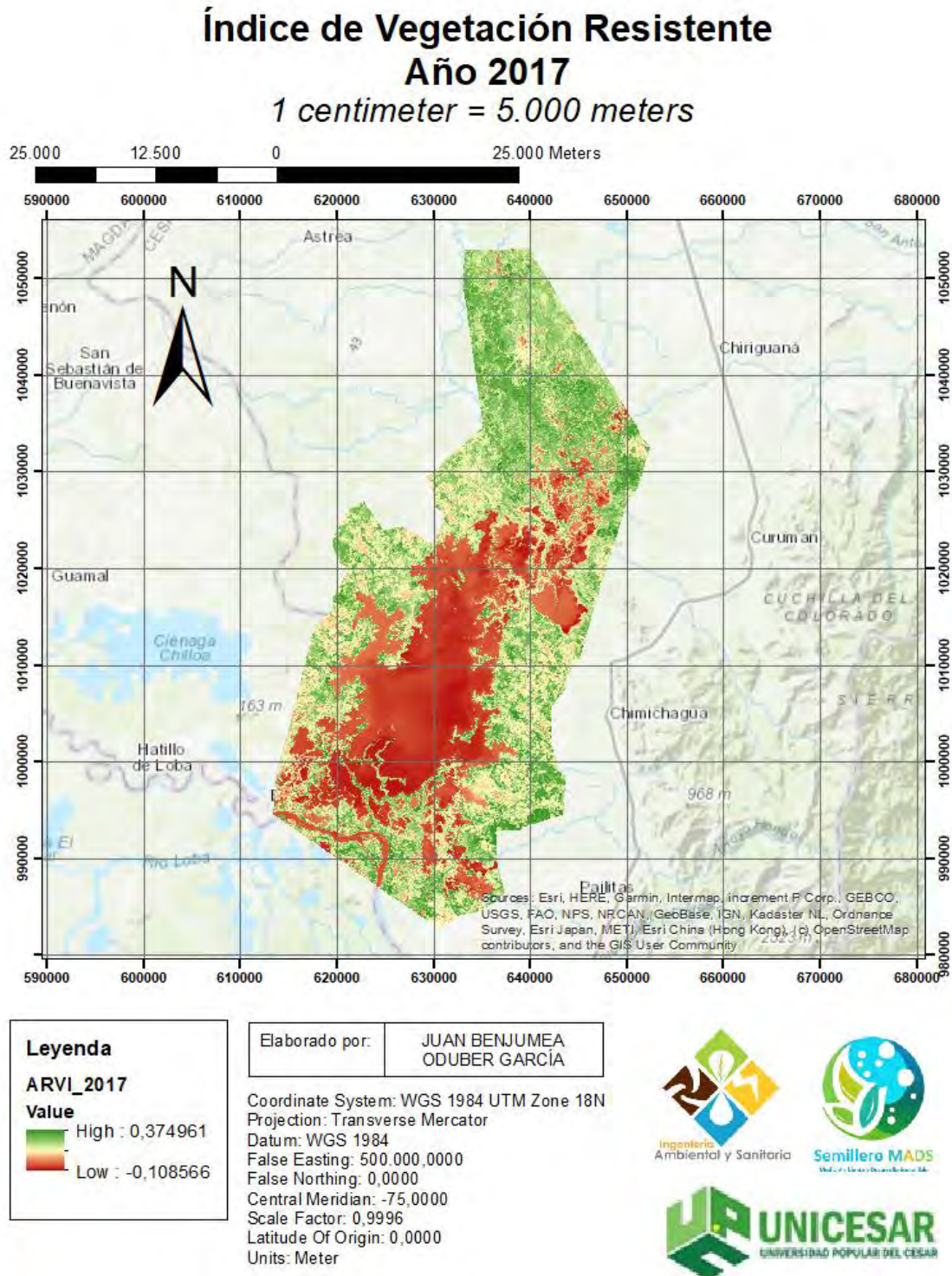
El SAVI es un índice que ajusta el NDVI para tener en cuenta la influencia del suelo, y puede variar según el objetivo del estudio y las características del área de interés. Las representaciones geográficas del SAVI se presentan en secuencia a en la siguiente página.

Figura 19. Índice de Vegetación Resistente a la Atmósfera – SAVI año 2016



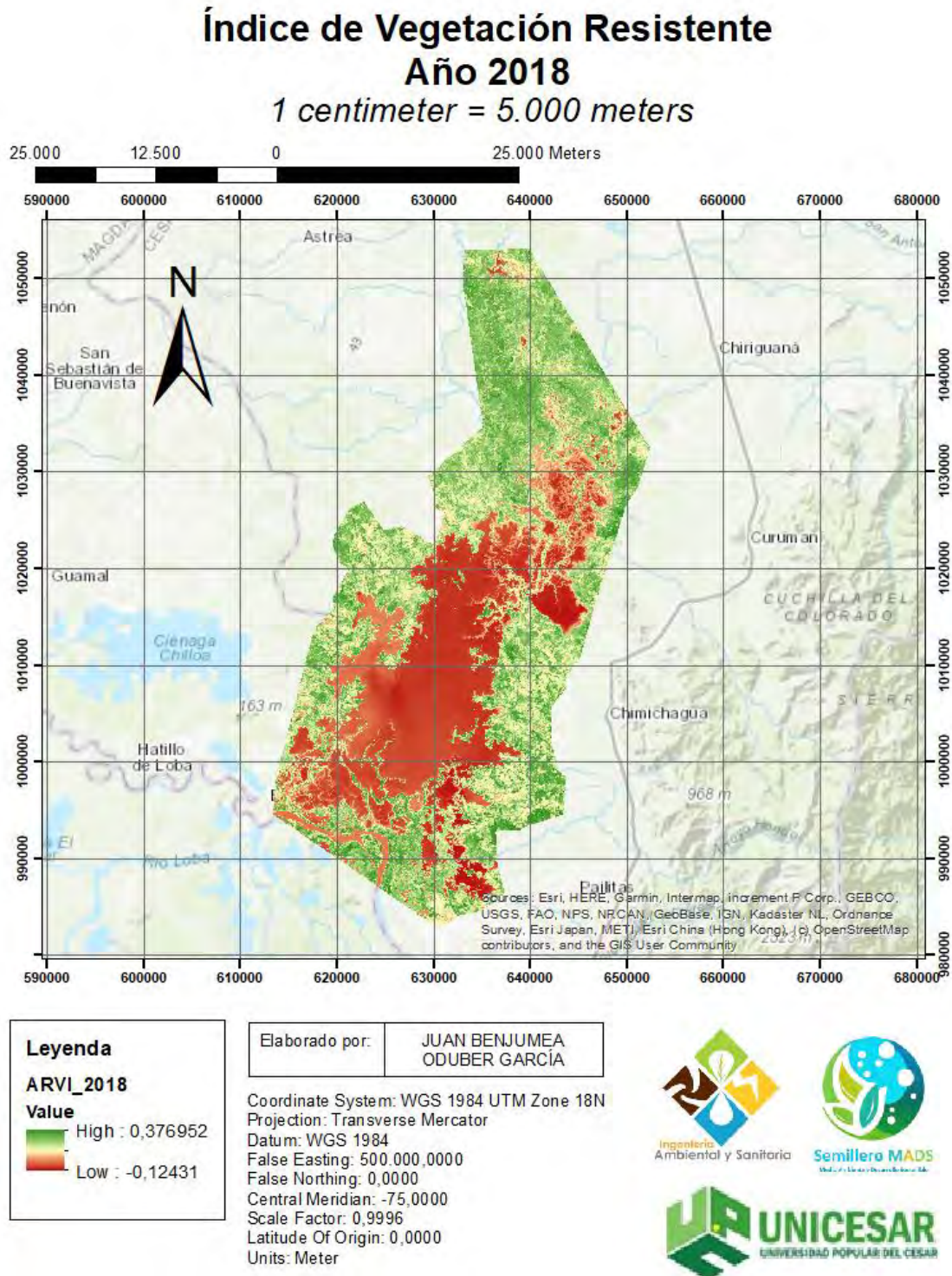
Nota: Elaborado por los Autores (2023) a partir del Software ArcGIS empleando imágenes satelitales del Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L2 obtenido del EarthData del USGS (2023).

Figura 20. Índice de Vegetación Resistente a la Atmósfera – SAVI año 2017



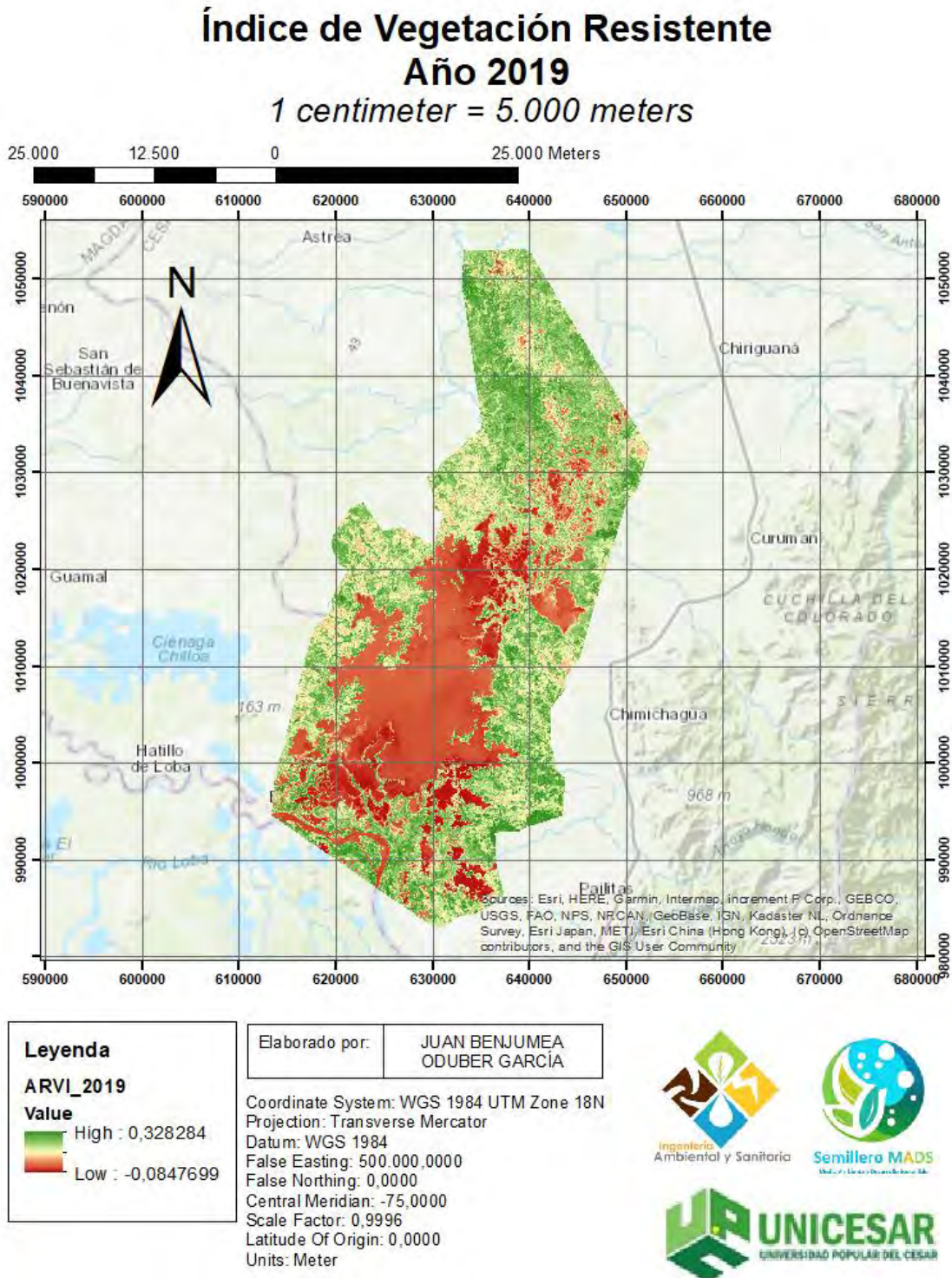
Nota: Elaborado por los Autores (2023) a partir del Software ArcGIS empleando imágenes satelitales del Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L2 obtenido del EarthData del USGS (2023).

Figura 21. Índice de Vegetación Resistente a la Atmósfera – SAVI año 2018



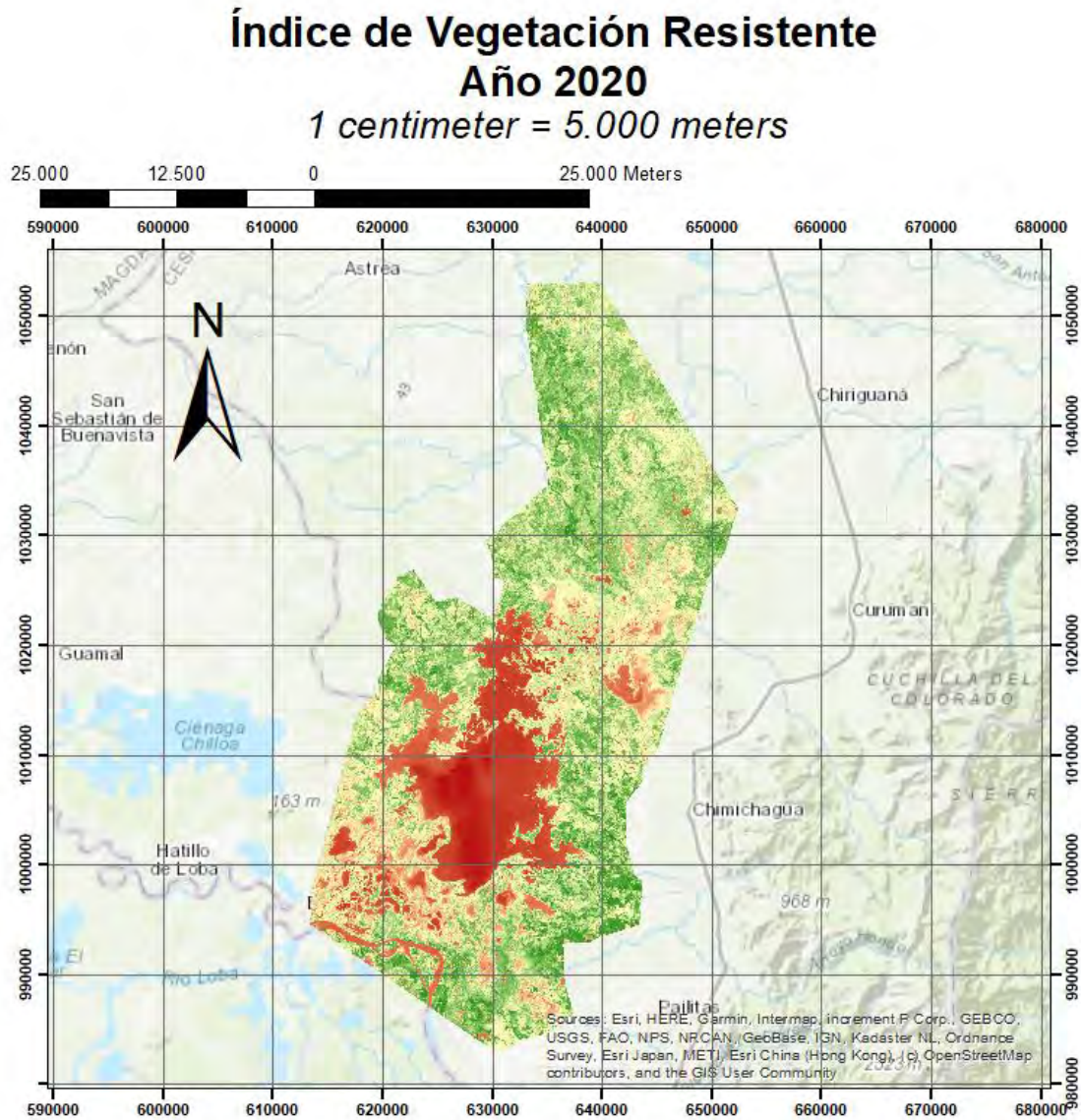
Nota: Elaborado por los Autores (2023) a partir del Software ArcGIS empleando imágenes satelitales del Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L2 obtenido del EarthData del USGS (2023).

Figura 22. Índice de Vegetación Resistente a la Atmósfera – SAVI año 2019



Nota: Elaborado por los Autores (2023) a partir del Software ArcGIS empleando imágenes satelitales del Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L2 obtenido del EarthData del USGS (2023).

Figura 23. Índice de Vegetación Resistente a la Atmósfera – SAVI año 2020



Leyenda	
ARVI_2020	
Value	
	High : 0,333731
	Low : -0,113577

Elaborado por:	JUAN BENJUMEA ODUBER GARCÍA
----------------	--------------------------------

Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 18N
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984
False Easting: 500.000.0000
False Northing: 0,0000
Central Meridian: -75,0000
Scale Factor: 0,9996
Latitude Of Origin: 0,0000
Units: Meter



Nota: Elaborado por los Autores (2023) a partir del Software ArcGIS empleando imágenes satelitales del Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L2 obtenido del EarthData del USGS (2023).

Al analizar los cambios en los valores bajos y altos del SAVI (Índice de Vegetación Ajustado al Suelo) en el Complejo Cenagoso de Zapatosa a lo largo de los años, se pueden obtener algunas observaciones e inferencias sobre las condiciones de la vegetación y del suelo en la zona. A continuación, se presenta un análisis de estos cambios y posibles explicaciones:

Variabilidad en los valores bajos del SAVI: Los valores bajos del SAVI indican áreas con vegetación menos densa o saludable, y pueden estar relacionados con diversas condiciones y factores ambientales. La variabilidad en estos valores puede deberse a cambios en el régimen de precipitaciones, eventos extremos como sequías o inundaciones, cambios en la cobertura del suelo, disturbios naturales o antropogénicos, y prácticas de manejo de la tierra. Por ejemplo, períodos de sequía pueden resultar en valores más bajos del SAVI debido a la falta de agua disponible para el crecimiento de la vegetación. Por otro lado, la deforestación o la conversión de áreas naturales a usos agrícolas o urbanos pueden contribuir a la disminución de la densidad de vegetación y, por lo tanto, a valores más bajos del SAVI.

Variabilidad en los valores altos del SAVI: Los valores altos del SAVI indican áreas con una vegetación densa y saludable, y pueden estar asociados con condiciones favorables para el crecimiento de la vegetación. La variabilidad en estos valores puede estar relacionada con factores como la disponibilidad de agua, la calidad del suelo, las prácticas de manejo de la tierra y los cambios en la cobertura vegetal. Por ejemplo, períodos con un mayor régimen de precipitaciones pueden favorecer un crecimiento vegetal más denso y, por lo tanto, valores más altos del SAVI. Además, la implementación de prácticas de manejo sostenible de la tierra, como la reforestación, la conservación de humedales o la protección de áreas naturales, puede contribuir a mantener o aumentar los valores altos del SAVI a lo largo del tiempo.

6.1.2.5. Índice ARVI.

El procedimiento para obtener el Índice de Vegetación Resistente a la Atmósfera (ARVI) es el presentado a continuación:

- i. Cargar la imagen satelital: Abre ArcMap y carga la imagen satelital en la que deseas calcular el ARVI. Asegúrate de tener las bandas necesarias, generalmente la banda roja (Red) y la banda del infrarrojo cercano (NIR), disponibles y visibles en la tabla de contenidos.

- ii. Calcular el ARVI: Ve a la barra de herramientas "Spatial Analyst" y asegúrate de que la extensión "Spatial Analyst" esté habilitada. Luego, selecciona la opción "Raster Calculator" o "Calculadora de ráster" en la barra de herramientas.
- iii. Introducir la fórmula del ARVI: En la ventana de la calculadora de ráster, ingresa la fórmula del ARVI:

$$\text{ARVI} = (\text{NIR} - (2 * \text{Red}) + \text{Blue}) / (\text{NIR} + (2 * \text{Red}) + \text{Blue})$$

Donde NIR es el valor de reflectancia en la banda del infrarrojo cercano, Red es el valor de reflectancia en la banda roja y Blue es el valor de reflectancia en la banda azul. Ten en cuenta que la banda azul es opcional y puede variar según la disponibilidad de datos.

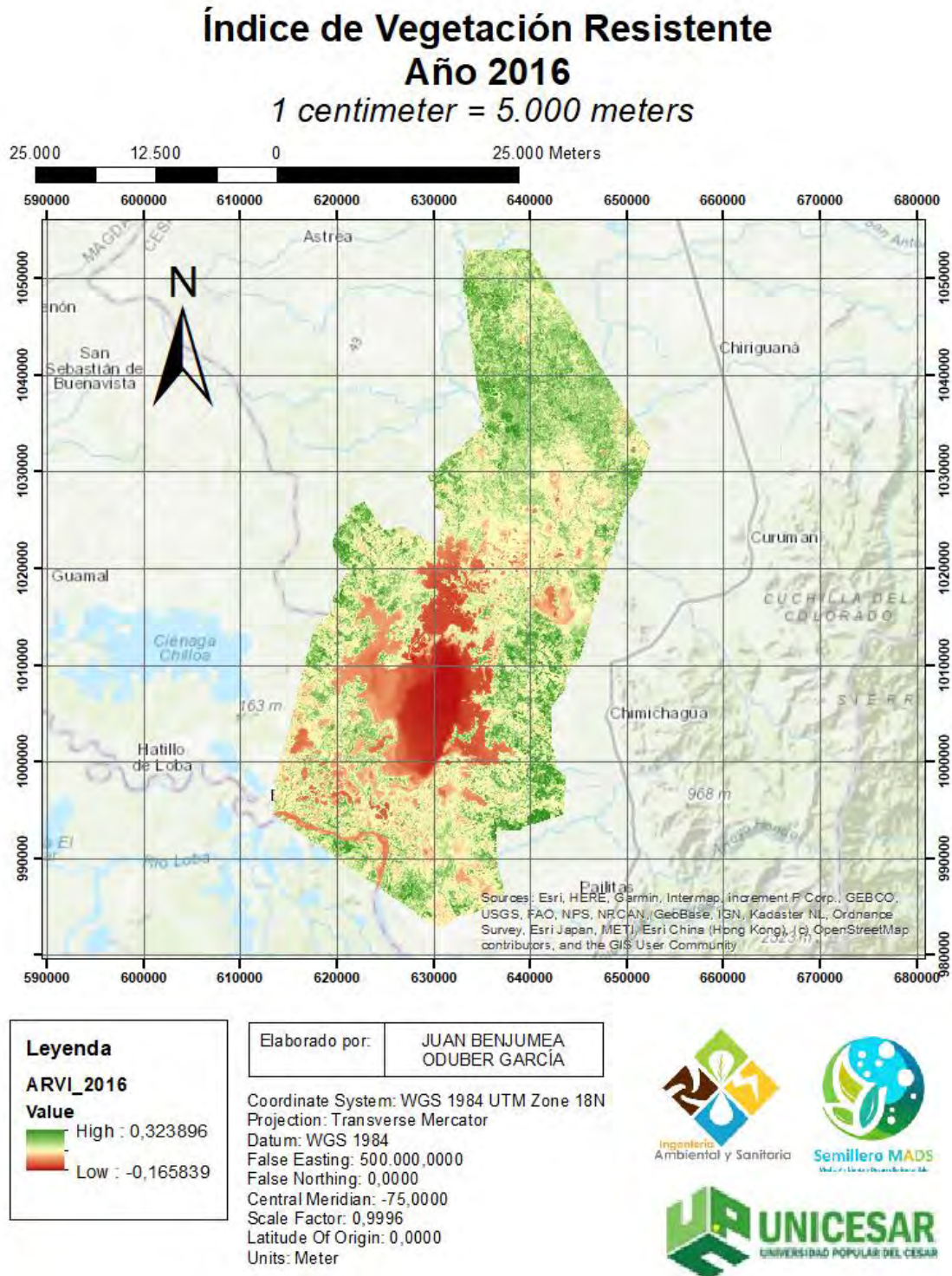
- iv. Ejecutar el cálculo: Haz clic en el botón "OK" para calcular el ARVI. Se generará un nuevo ráster con los valores del ARVI para cada píxel de la imagen.
- v. Visualizar el ARVI: Para visualizar el ARVI de manera más efectiva, puedes aplicar una simbología adecuada a la capa del ráster del ARVI en la tabla de contenidos. Esto te permitirá representar visualmente las variaciones en los valores del ARVI en la imagen.

Teniendo en cuenta que se está trabajando con varias imágenes satelitales este trabajo será desarrollado en la ventana ArcPython, integrando el código para que pueda realizarse el trabajo de manera iterativa y sea un ahorro de tiempo para los investigadores. (ver Anexo I, Literal C).

El ARVI es un índice de vegetación que tiene en cuenta la influencia de la atmósfera en las bandas de reflectancia. El ARVI considera la absorción atmosférica en la banda azul (Blue) para compensar la influencia de los aerosoles y la dispersión atmosférica en las mediciones de reflectancia. Esto permite obtener una estimación más precisa de la cantidad y la salud de la vegetación, especialmente en áreas con mayor presencia de aerosoles atmosféricos.

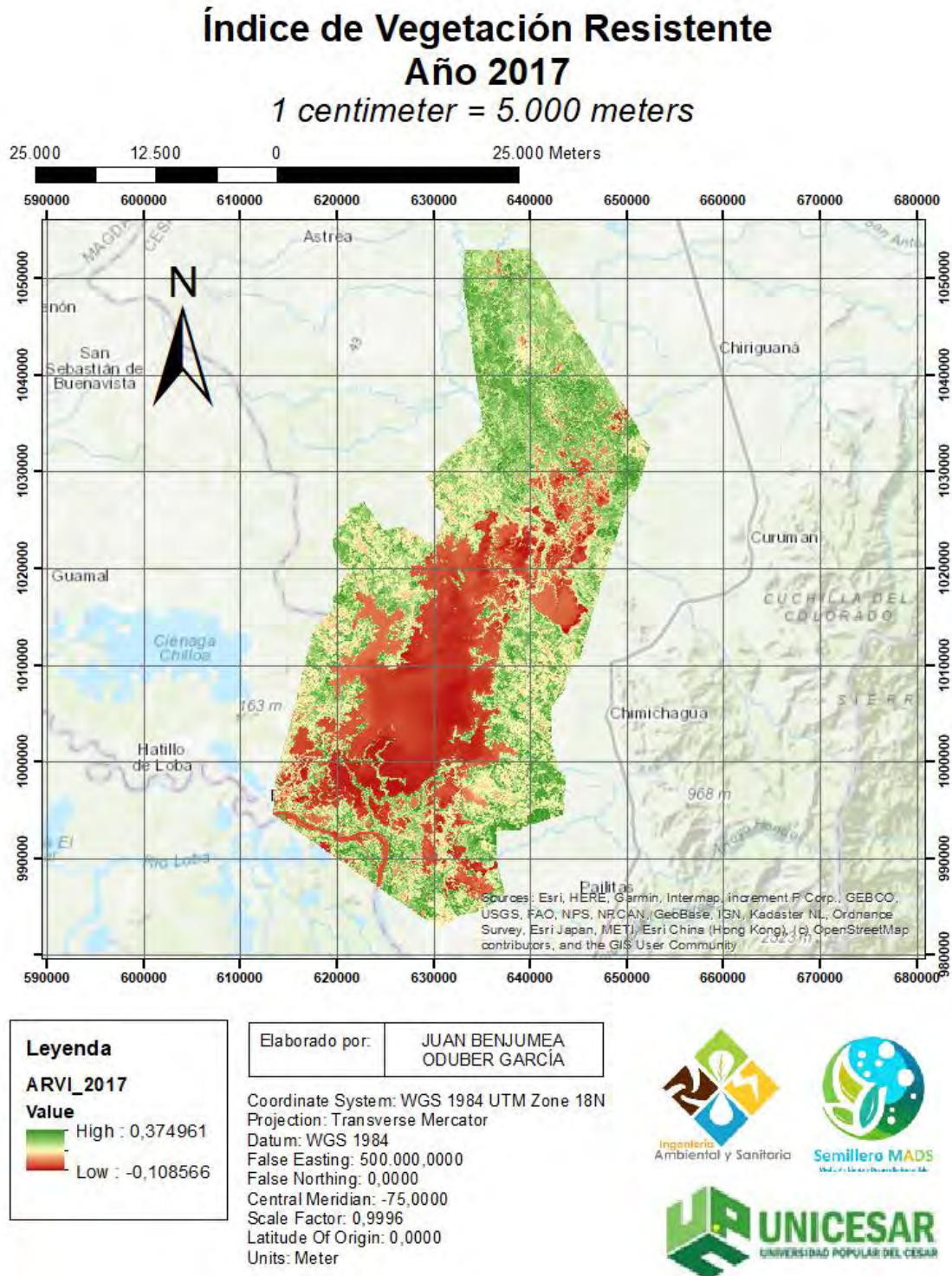
Las representaciones geográficas del ARVI se presentan en secuencia a en la siguiente página.

Figura 24. Índice de Vegetación Resistente a la Atmósfera – ARVI año 2016



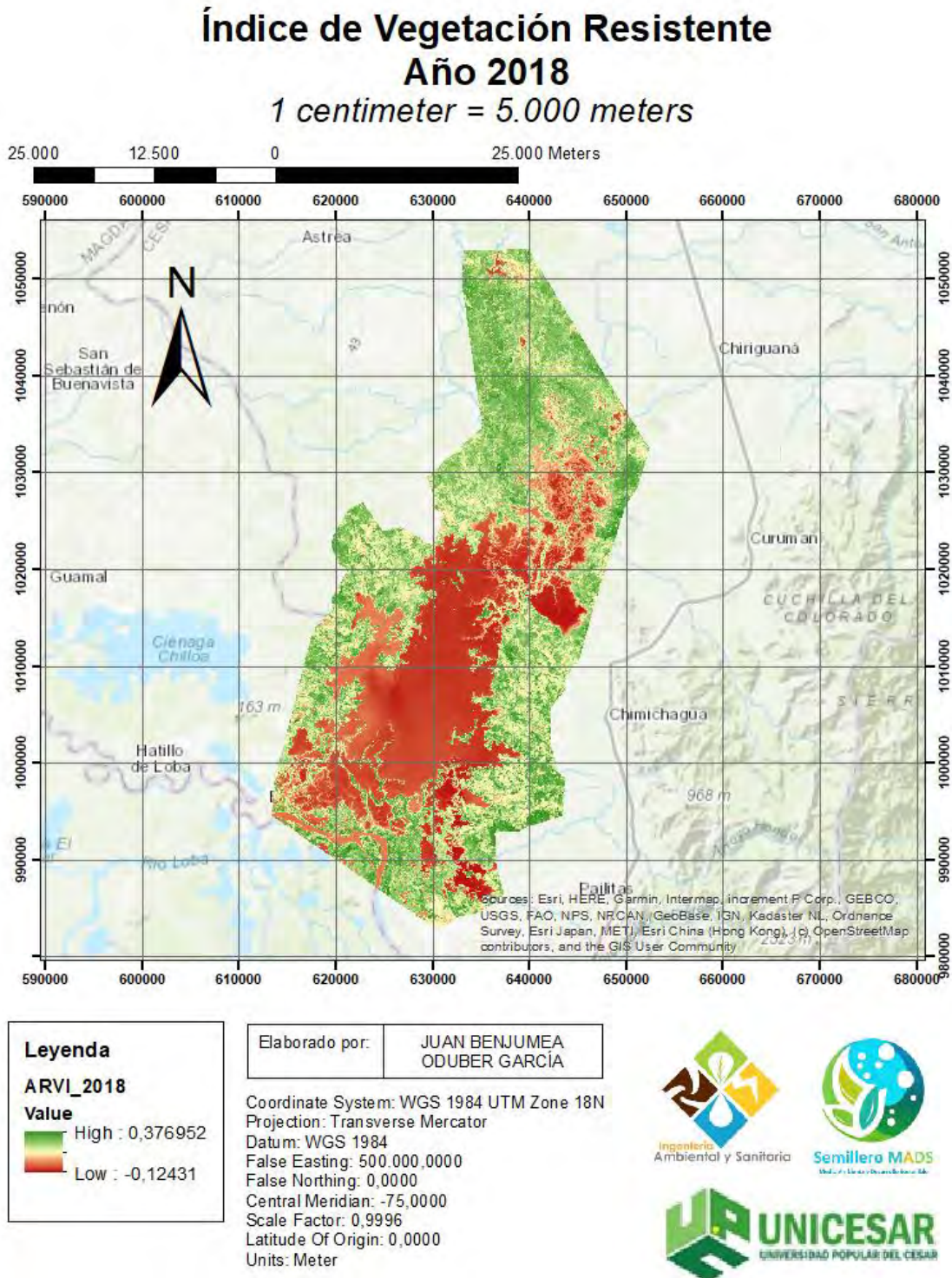
Nota: Elaborado por los Autores (2023) a partir del Software ArcGIS empleando imágenes satelitales del Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L2 obtenido del EarthData del USGS (2023).

Figura 25. Índice de Vegetación Resistente a la Atmósfera – ARVI año 2017



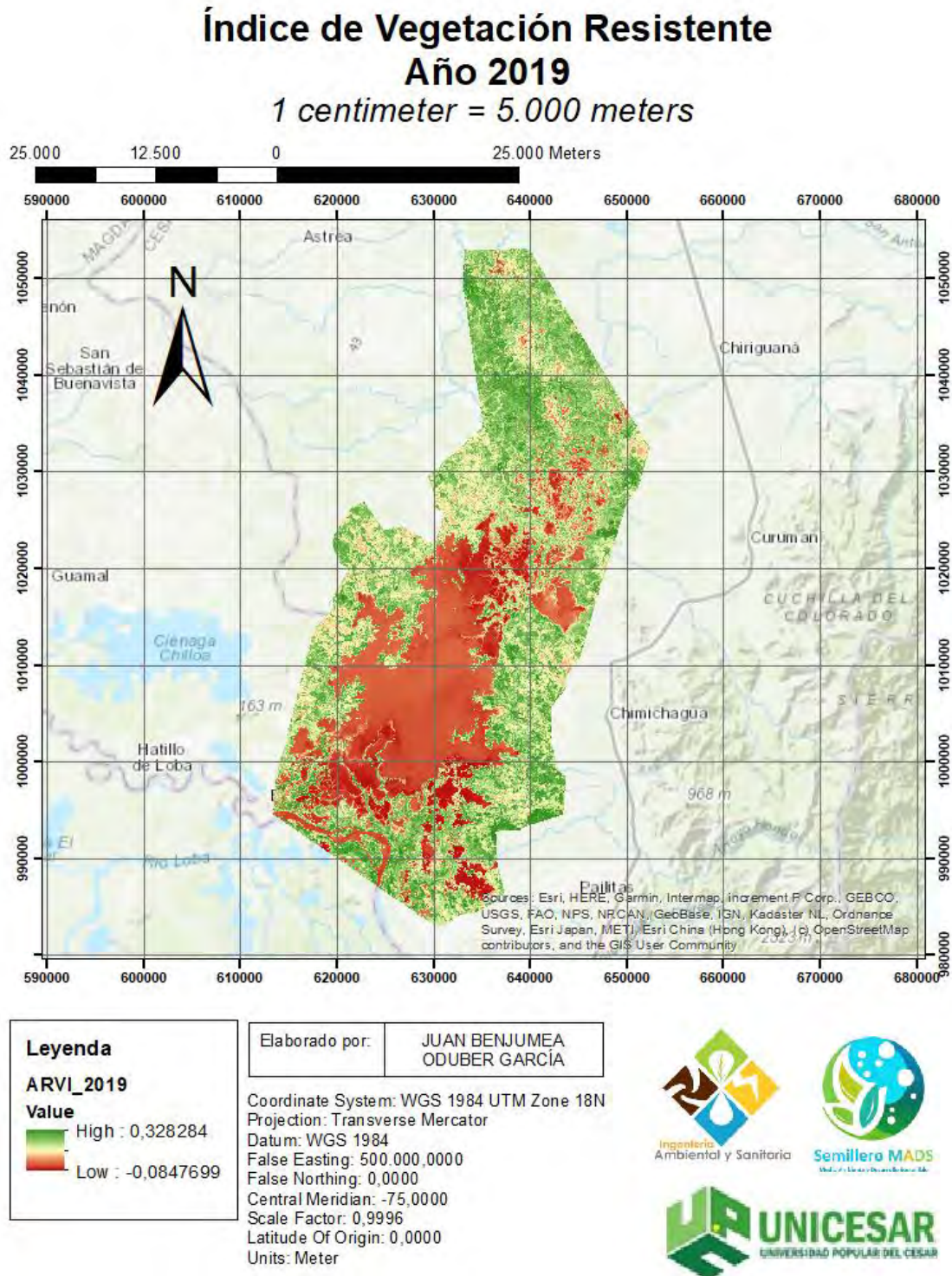
Nota: Elaborado por los Autores (2023) a partir del Software ArcGIS empleando imágenes satelitales del Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L2 obtenido del EarthData del USGS (2023).

Figura 26. Índice de Vegetación Resistente a la Atmósfera – ARVI año 2018



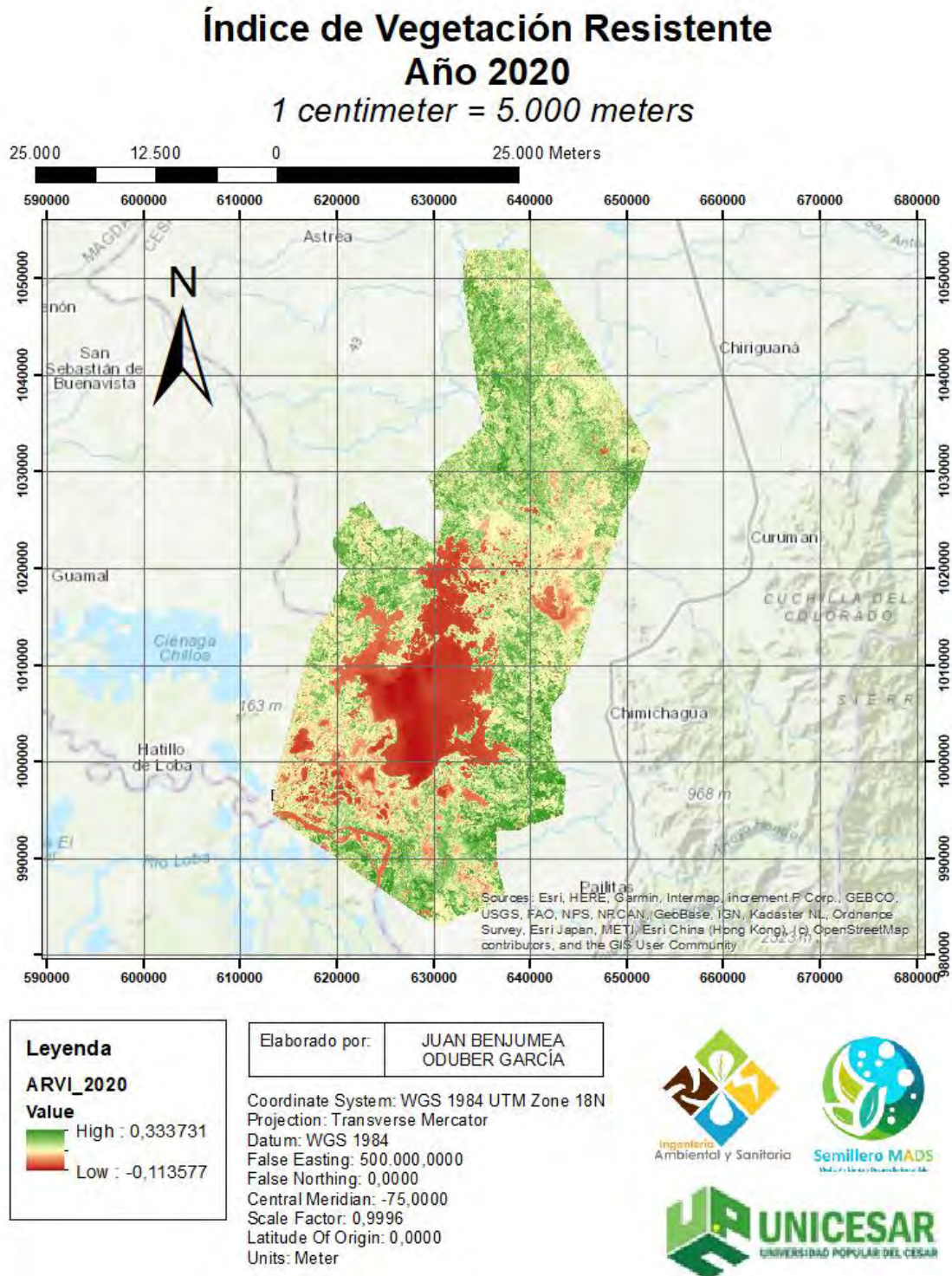
Nota: Elaborado por los Autores (2023) a partir del Software ArcGIS empleando imágenes satelitales del Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L2 obtenido del EarthData del USGS (2023).

Figura 27. Índice de Vegetación Resistente a la Atmósfera – ARVI año 2019



Nota: Elaborado por los Autores (2023) a partir del Software ArcGIS empleando imágenes satelitales del Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L2 obtenido del EarthData del USGS (2023).

Figura 28. Índice de Vegetación Resistente a la Atmósfera – ARVI año 2020



Nota: Elaborado por los Autores (2023) a partir del Software ArcGIS empleando imágenes satelitales del Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L2 obtenido del EarthData del USGS (2023).

Al analizar los cambios en los valores bajos y altos del ARVI (Índice de Vegetación Resistente a la Atmósfera) en el Complejo Cenagoso de Zapatosa a lo largo de los años, se pueden obtener algunas observaciones e inferencias sobre las condiciones de la vegetación y las influencias atmosféricas en la zona. A continuación, se presenta un análisis de estos cambios y posibles explicaciones:

Variabilidad en los valores bajos del ARVI: Los valores bajos del ARVI indican áreas con vegetación menos densa o saludable, y pueden estar relacionados con varias condiciones y factores ambientales. La variabilidad en estos valores puede deberse a cambios en la cobertura vegetal, eventos climáticos extremos, perturbaciones naturales o antropogénicas, y factores atmosféricos. Por ejemplo, períodos de sequía o falta de agua disponible pueden resultar en valores más bajos del ARVI debido a la disminución de la salud y densidad de la vegetación. Además, la presencia de factores atmosféricos como aerosoles, contaminación o polvo puede influir en la calidad de la reflectancia y afectar los valores bajos del ARVI.

Variabilidad en los valores altos del ARVI: Los valores altos del ARVI indican áreas con una vegetación más densa y saludable, y pueden estar asociados con condiciones favorables para el crecimiento vegetal y menor influencia atmosférica. La variabilidad en estos valores puede estar relacionada con factores como la disponibilidad de agua, la calidad del suelo, las prácticas de manejo de la tierra y los cambios en la cobertura vegetal. Por ejemplo, períodos con mayor disponibilidad de agua, como lluvias abundantes, pueden favorecer un crecimiento vegetal más denso y, por lo tanto, valores más altos del ARVI. Asimismo, la implementación de prácticas de manejo sostenible de la tierra y conservación de vegetación puede contribuir a mantener o aumentar los valores altos del ARVI a lo largo del tiempo.

6.1.2.6. Índice GCI.

El procedimiento para obtener el Índice de Clorofila Verde (GCI) es el presentado a continuación:

- i. Cargar la imagen satelital: Abre ArcMap y carga la imagen satelital en la que deseas calcular el GCI. Asegúrate de tener las bandas necesarias, generalmente la banda del infrarrojo cercano (NIR) y la banda del verde (Green), disponibles y visibles en la tabla de contenidos.

- ii. Calcular el GCI: Ve a la barra de herramientas "Spatial Analyst" y asegúrate de que la extensión "Spatial Analyst" esté habilitada. Luego, selecciona la opción "Raster Calculator" o "Calculadora de ráster" en la barra de herramientas.
- iii. Introducir la fórmula del GCI: En la ventana de la calculadora de ráster, ingresa la fórmula del GCI:

$$\text{GCI} = (\text{NIR} / \text{Green}) - 1$$

Donde NIR es el valor de reflectancia en la banda del infrarrojo cercano y Green es el valor de reflectancia en la banda verde.

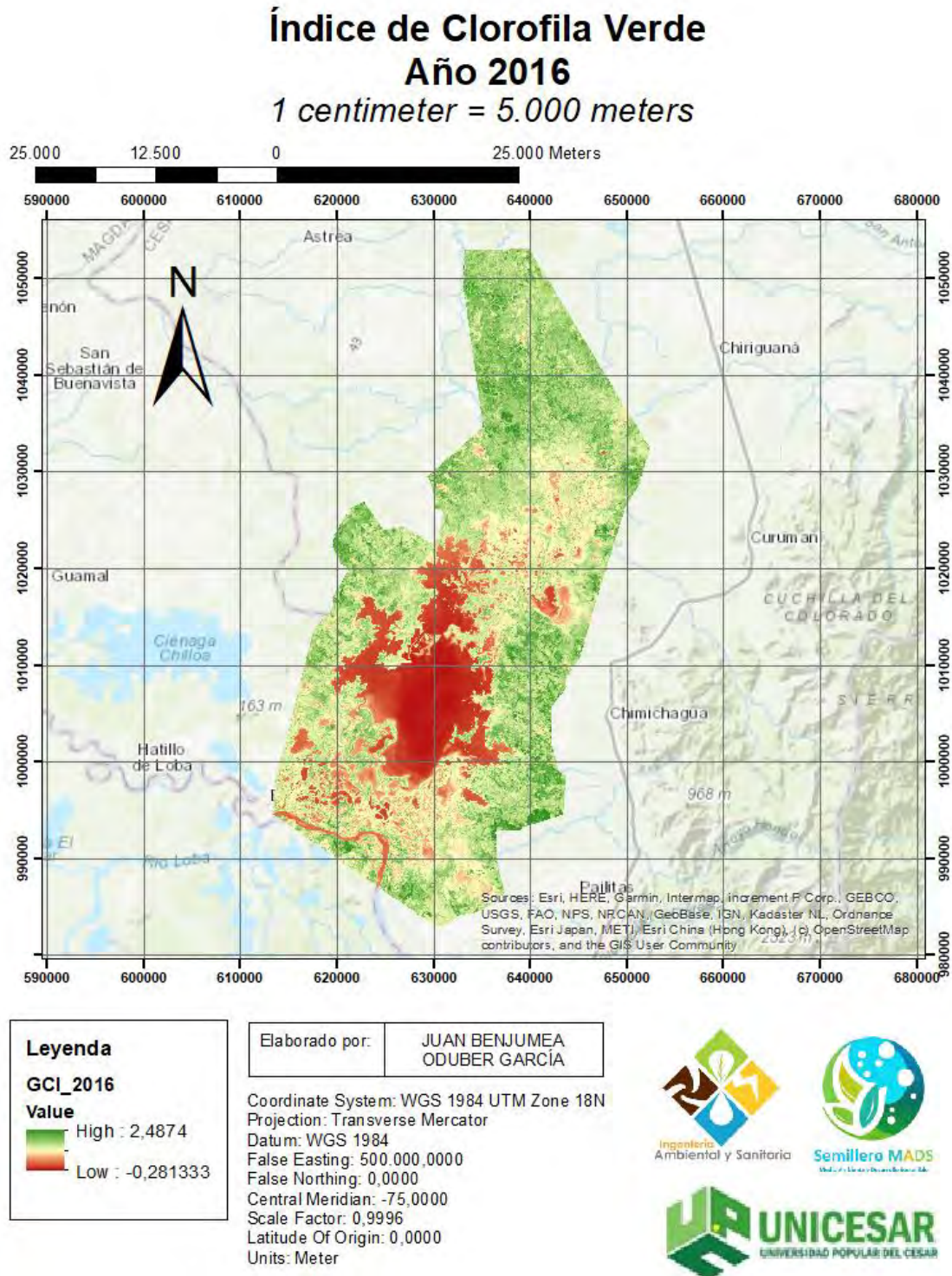
- iv. Ejecutar el cálculo: Haz clic en el botón "OK" para calcular el GCI. Se generará un nuevo ráster con los valores del GCI para cada píxel de la imagen.
- v. Visualizar el GCI: Para visualizar el GCI de manera más efectiva, puedes aplicar una simbología adecuada a la capa del ráster del GCI en la tabla de contenidos. Esto te permitirá representar visualmente las variaciones en los valores del GCI en la imagen.

Teniendo en cuenta que se está trabajando con varias imágenes satelitales este trabajo será desarrollado en la ventana ArcPython, integrando el código para que pueda realizarse el trabajo de manera iterativa y sea un ahorro de tiempo para los investigadores. (ver Anexo I, Literal D).

El GCI es un índice que estima la concentración de clorofila verde en la vegetación. El GCI (Índice de Clorofila Verde) es un índice de vegetación que está relacionado con el contenido de clorofila en las plantas. Aunque el GCI no es tan ampliamente utilizado como el SAVI (Índice de Vegetación Ajustado al Suelo), el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) y el ARVI (Índice de Vegetación Resistente a la Atmósfera), puede tener algunas relaciones con estos índices de vegetación.

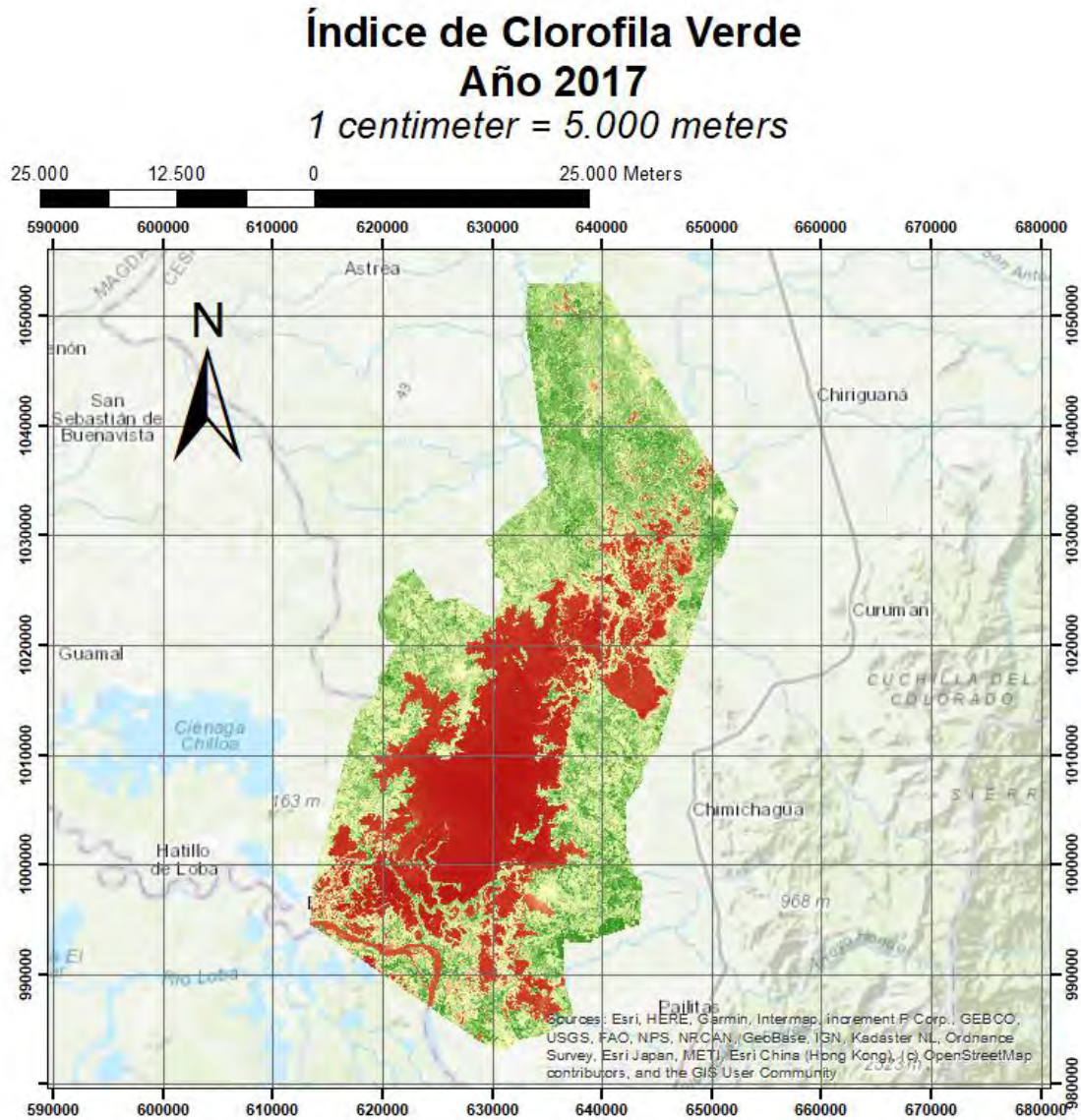
El GCI se basa en la relación entre la reflectancia en la banda del infrarrojo cercano (NIR) y la reflectancia en la banda verde (Green). Esta relación puede proporcionar información sobre la cantidad de clorofila presente en la vegetación, ya que la clorofila tiene una fuerte absorción en el rango del verde y es importante para la fotosíntesis. Las representaciones geográficas del GCI se presentan en secuencia a en la siguiente página.

Figura 29. Índice de Clorofila Verde – GCI año 2016



Nota: Elaborado por los Autores (2023) a partir del Software ArcGIS empleando imágenes satelitales del Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L2 obtenido del EarthData del USGS (2023).

Figura 30. Índice de Clorofila Verde – GCI año 2017



Leyenda	
GCI_2017	
Value	
	High : 1,84094
	Low : -0,203826

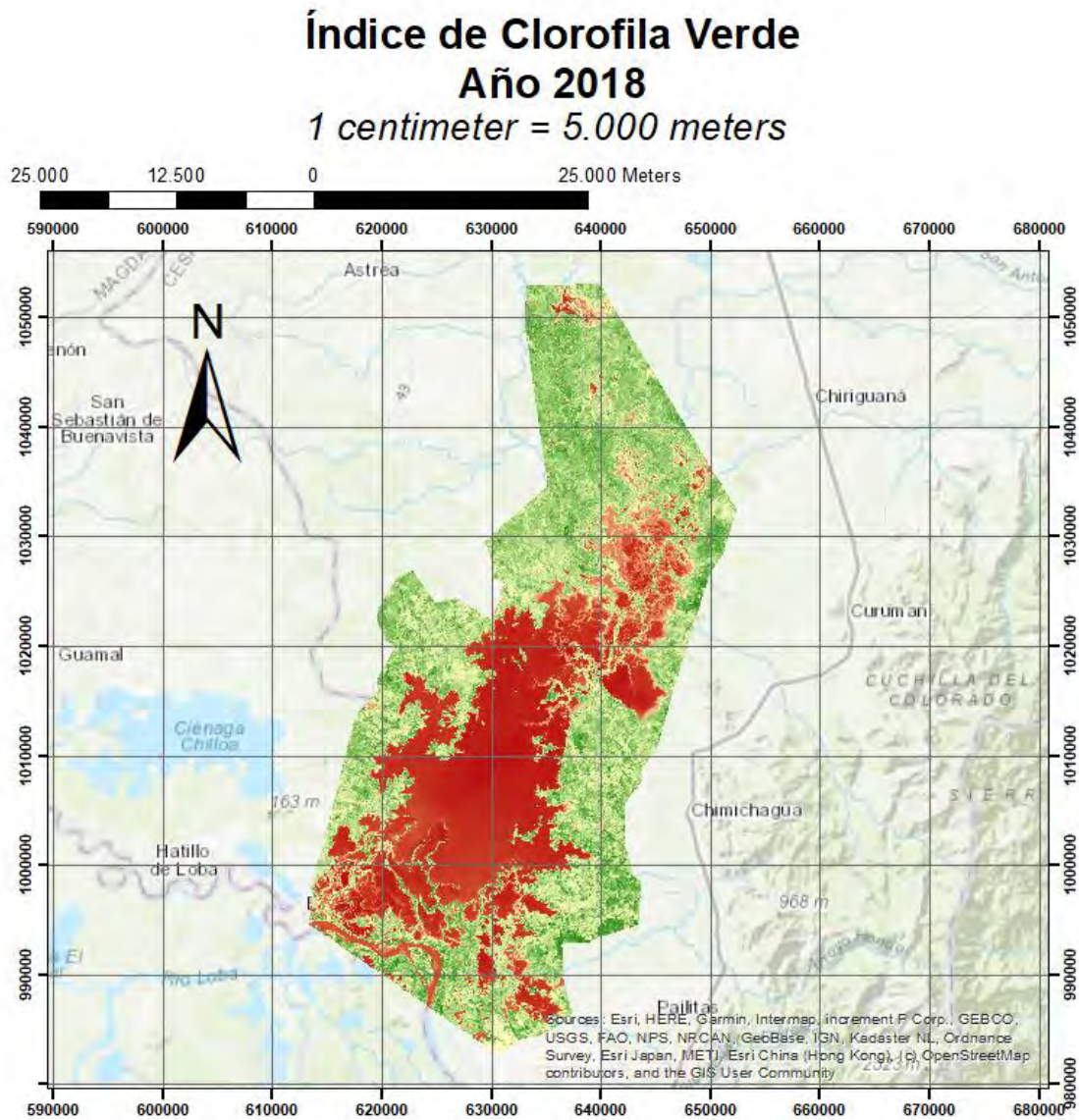
Elaborado por: **JUAN BENJUMEA
ODUBER GARCÍA**

Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 18N
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984
False Easting: 500.000.0000
False Northing: 0,0000
Central Meridian: -75,0000
Scale Factor: 0,9996
Latitude Of Origin: 0,0000
Units: Meter



Nota: Elaborado por los Autores (2023) a partir del Software ArcGIS empleando imágenes satelitales del Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L2 obtenido del EarthData del USGS (2023).

Figura 31. Índice de Clorofila Verde – GCI año 2018



Leyenda

GCI_2018

Value

High : 1,9775

Low : -0,367471

Elaborado por: **JUAN BENJUMEA
ODUBER GARCÍA**

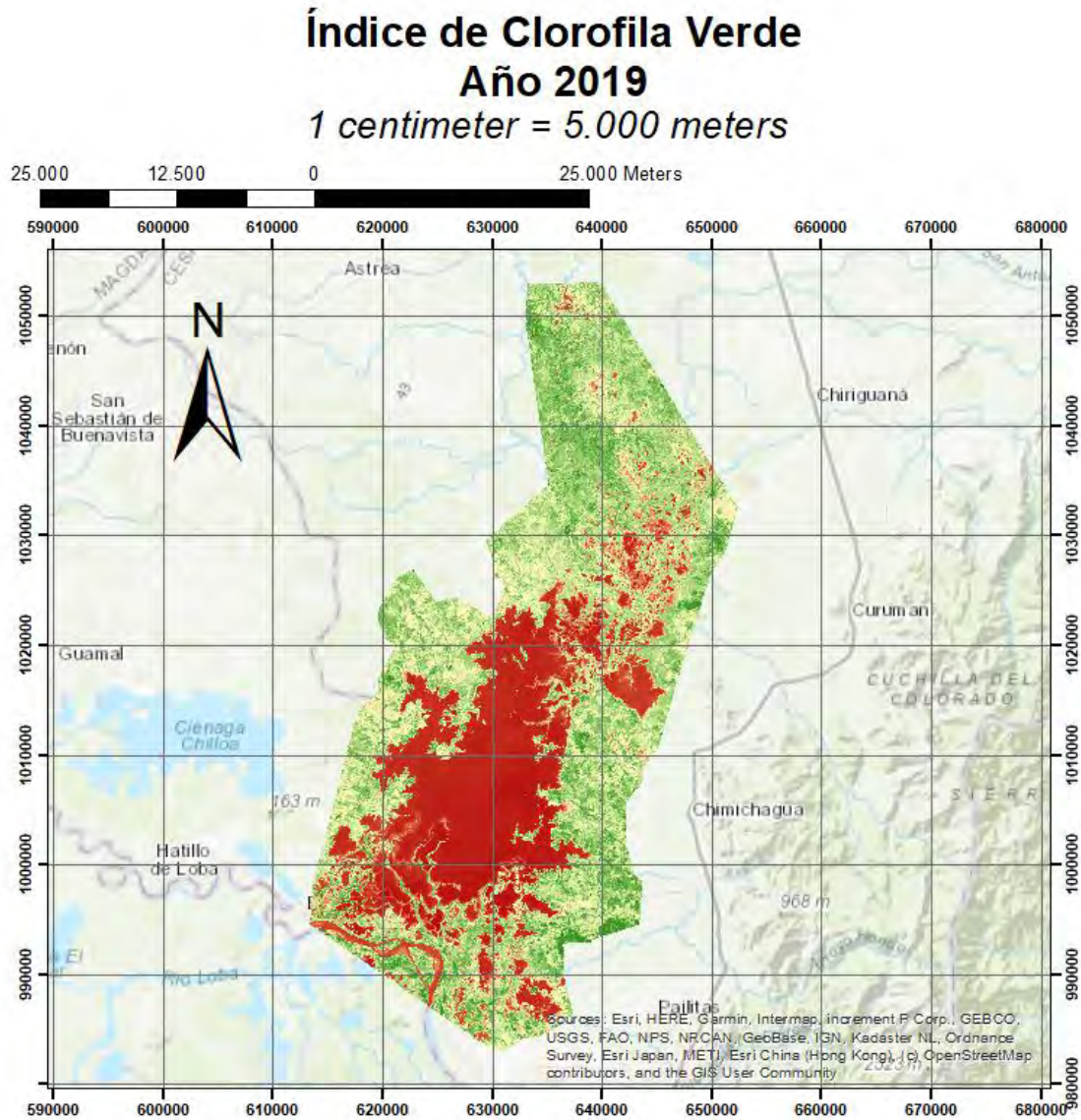
Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 18N
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984
False Easting: 500.000.0000
False Northing: 0,0000
Central Meridian: -75,0000
Scale Factor: 0,9996
Latitude Of Origin: 0,0000
Units: Meter



Nota: Elaborado por los Autores (2023) a partir del Software ArcGIS empleando imágenes satelitales del Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L2 obtenido del EarthData del USGS (2023).



Figura 32. Índice de Clorofila Verde – GCI año 2019



Leyenda

GCI_2019

Value

High : 6,1148

Low : -0,227095

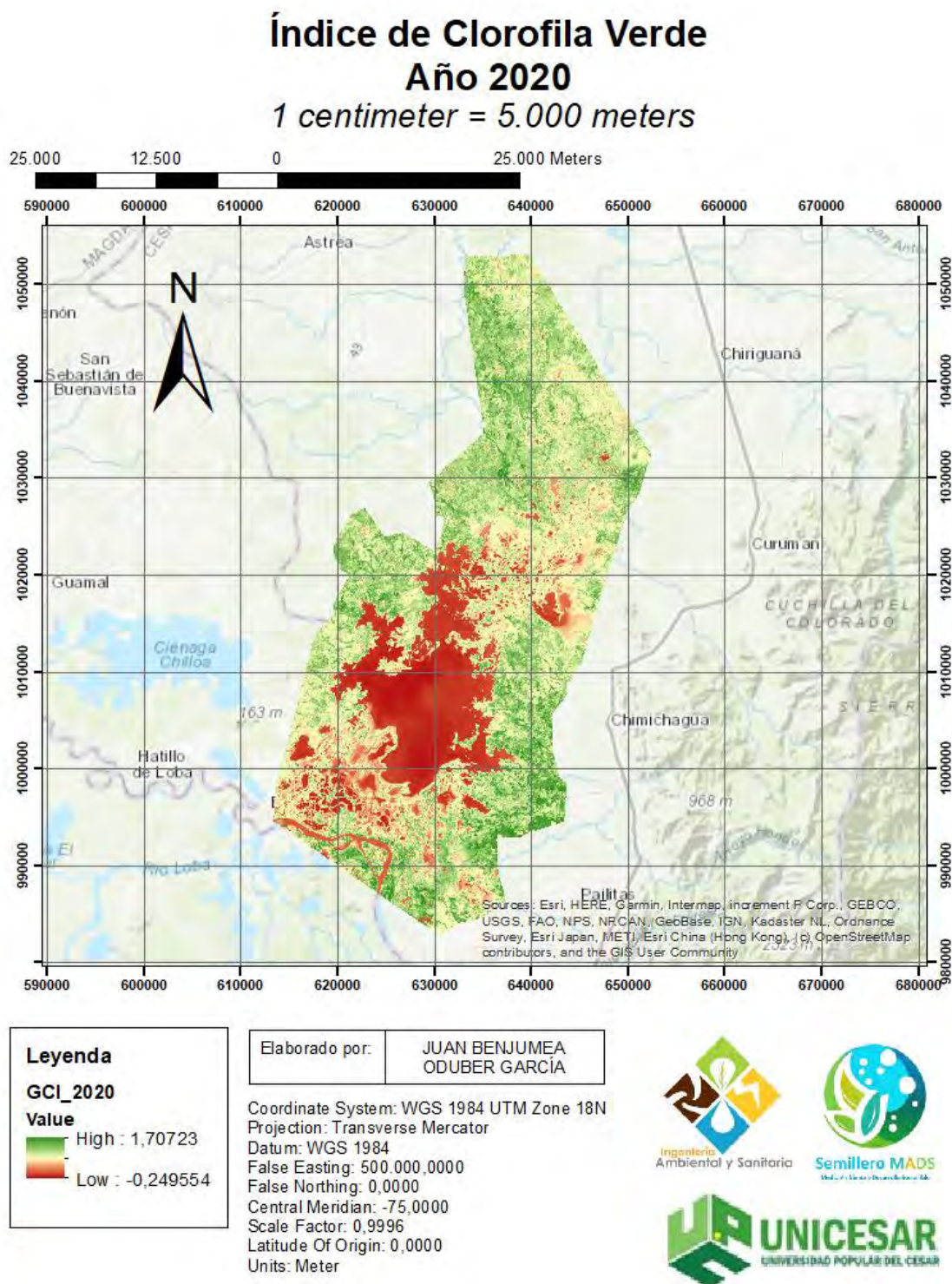
Elaborado por: **JUAN BENJUMEA
ODUBER GARCÍA**

Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 18N
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984
False Easting: 500.000.0000
False Northing: 0,0000
Central Meridian: -75,0000
Scale Factor: 0,9996
Latitude Of Origin: 0,0000
Units: Meter



Nota: Elaborado por los Autores (2023) a partir del Software ArcGIS empleando imágenes satelitales del Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L2 obtenido del EarthData del USGS (2023).

Figura 33. Índice de Clorofila Verde – GCI año 2020



Nota: Elaborado por los Autores (2023) a partir del Software ArcGIS empleando imágenes satelitales del Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L2 obtenido del EarthData del USGS (2023).

Al analizar los cambios en los valores bajos y altos del GCI (Índice de Clorofila Verde) en el Complejo Cenagoso de Zapatosa a lo largo de los años, se pueden obtener algunas observaciones e inferencias sobre la concentración de clorofila verde y las condiciones de la vegetación en la zona. A continuación, se presenta un análisis de estos cambios y posibles explicaciones:

Variabilidad en los valores bajos del GCI: Los valores bajos del GCI indican una menor concentración de clorofila verde en la vegetación y pueden estar relacionados con diversas condiciones y factores ambientales. La variabilidad en estos valores puede deberse a cambios en la densidad de la vegetación, la disponibilidad de agua, la calidad del suelo, los cambios en la cobertura vegetal y los efectos de perturbaciones naturales o antropogénicas. Por ejemplo, períodos de sequía o escasez de agua pueden resultar en una menor concentración de clorofila verde y, por lo tanto, valores más bajos del GCI. Además, la presencia de factores como la contaminación, las enfermedades de las plantas o las prácticas de manejo de la tierra pueden influir en los valores bajos del GCI.

Variabilidad en los valores altos del GCI: Los valores altos del GCI indican una mayor concentración de clorofila verde en la vegetación y pueden estar asociados con condiciones favorables para el crecimiento y la salud de las plantas. La variabilidad en estos valores puede estar relacionada con factores como la disponibilidad adecuada de agua, la fertilidad del suelo, la presencia de nutrientes esenciales, las condiciones climáticas favorables y la aplicación de prácticas de manejo sostenible de la tierra. Por ejemplo, períodos con una mayor disponibilidad de agua, una mayor concentración de nutrientes en el suelo y condiciones climáticas óptimas pueden favorecer una mayor concentración de clorofila verde y, por lo tanto, valores más altos del GCI.

6.1.2.7. Índice NBR.

El procedimiento para obtener el Índice de Calcinación Normalizado (NBR) es el presentado a continuación:

- i. Cargar las imágenes satelitales: Abre ArcMap y carga las imágenes satelitales en las que deseas calcular el NBR. Asegúrate de tener las bandas necesarias, generalmente la banda del infrarrojo medio (MIR) y la banda del infrarrojo cercano (NIR), disponibles y visibles en la tabla de contenidos.

- ii. Calcular el NBR: Ve a la barra de herramientas "Spatial Analyst" y asegúrate de que la extensión "Spatial Analyst" esté habilitada. Luego, selecciona la opción "Raster Calculator" o "Calculadora de ráster" en la barra de herramientas.
- iii. Introducir la fórmula del NBR: En la ventana de la calculadora de ráster, ingresa la fórmula del NBR:

$$\text{NBR} = (\text{NIR} - \text{MIR}) / (\text{NIR} + \text{MIR})$$

Donde NIR es el valor de reflectancia en la banda del infrarrojo cercano y MIR es el valor de reflectancia en la banda del infrarrojo medio.

- iv. Ejecutar el cálculo: Haz clic en el botón "OK" para calcular el NBR. Se generará un nuevo ráster con los valores del NBR para cada píxel de las imágenes.
- v. Visualizar el NBR: Para visualizar el NBR de manera más efectiva, puedes aplicar una simbología adecuada a la capa del ráster del NBR en la tabla de contenidos. Esto te permitirá representar visualmente las variaciones en los valores del NBR en las imágenes.

Teniendo en cuenta que se está trabajando con varias imágenes satelitales este trabajo será desarrollado en la ventana ArcPython, integrando el código para que pueda realizarse el trabajo de manera iterativa y sea un ahorro de tiempo para los investigadores. (ver Anexo I, Literal E).

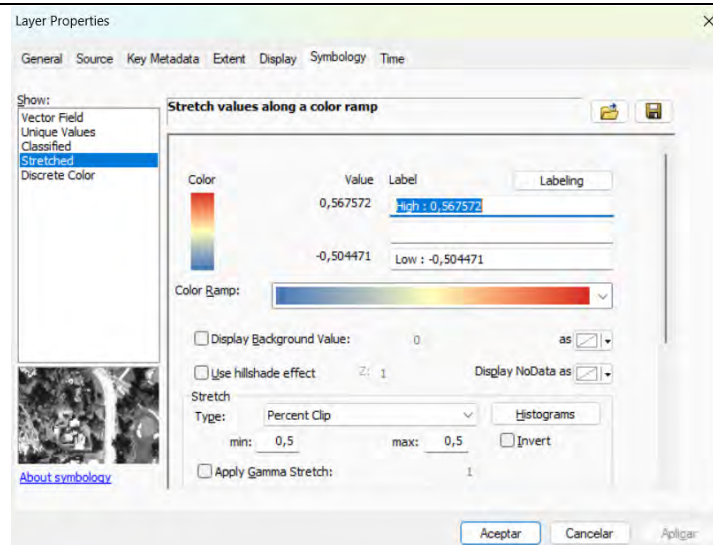
El NBR es un índice que se utiliza para detectar y mapear áreas quemadas o afectadas por incendios. El Índice de Calcinación Normalizado (NBR) se relaciona con otros índices de vegetación como el GCI (Índice de Clorofila Verde), el SAVI (Índice de Vegetación Ajustado al Suelo), el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) y el ARVI (Índice de Vegetación Resistente a la Atmósfera) de la siguiente manera:

- *Relación con el GCI:* Aunque no hay una relación directa entre el GCI y el NBR, se puede inferir que un aumento en la calcinación y daño causado por el fuego en la vegetación, indicado por valores más altos del NBR, podría estar asociado con una disminución en la concentración de clorofila verde y, por lo tanto, valores más bajos del GCI.

- *Relación con el SAVI y el NDVI:* En general, las áreas quemadas y afectadas por incendios tienden a tener valores bajos tanto en el SAVI como en el NDVI, debido a la pérdida de vegetación y la alteración de la reflectancia en el infrarrojo cercano. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la relación exacta entre el NBR y el SAVI o el NDVI puede variar dependiendo del tipo de vegetación y las condiciones específicas del área de estudio.
- *Relación con el ARVI:* Es probable que exista una relación inversa con el ARVI. Esto se debe a que las áreas quemadas o afectadas por incendios generalmente experimentan una disminución en la densidad y salud de la vegetación, lo que resulta en valores más bajos del ARVI.

La representación gráfica del Índice de Calcinación Normalizado (NBR) en ArcMap permite visualizar las variaciones espaciales y los patrones de calcinación o daño causado por incendios en una determinada área. La representación gráfica del NBR se realiza mediante la aplicación de una simbología adecuada que resalte las áreas afectadas por incendios de acuerdo con los valores del índice. En la siguiente ventana se presenta la asignación de la escala:

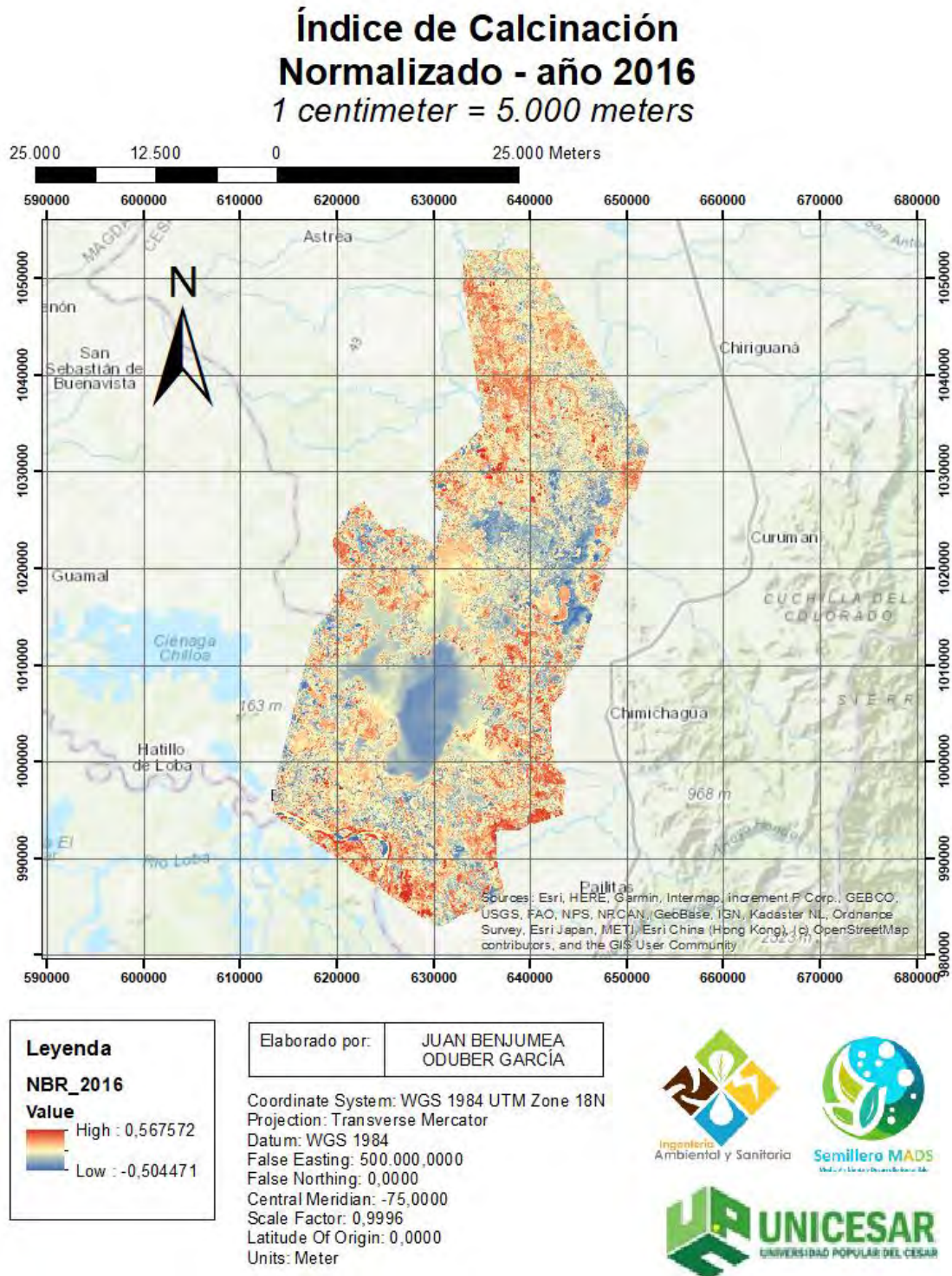
Figura 34. Escala de colores que representan al indicador NBR.



Nota: Elaborado por los Autores (2023) a partir del Software ArcGIS.

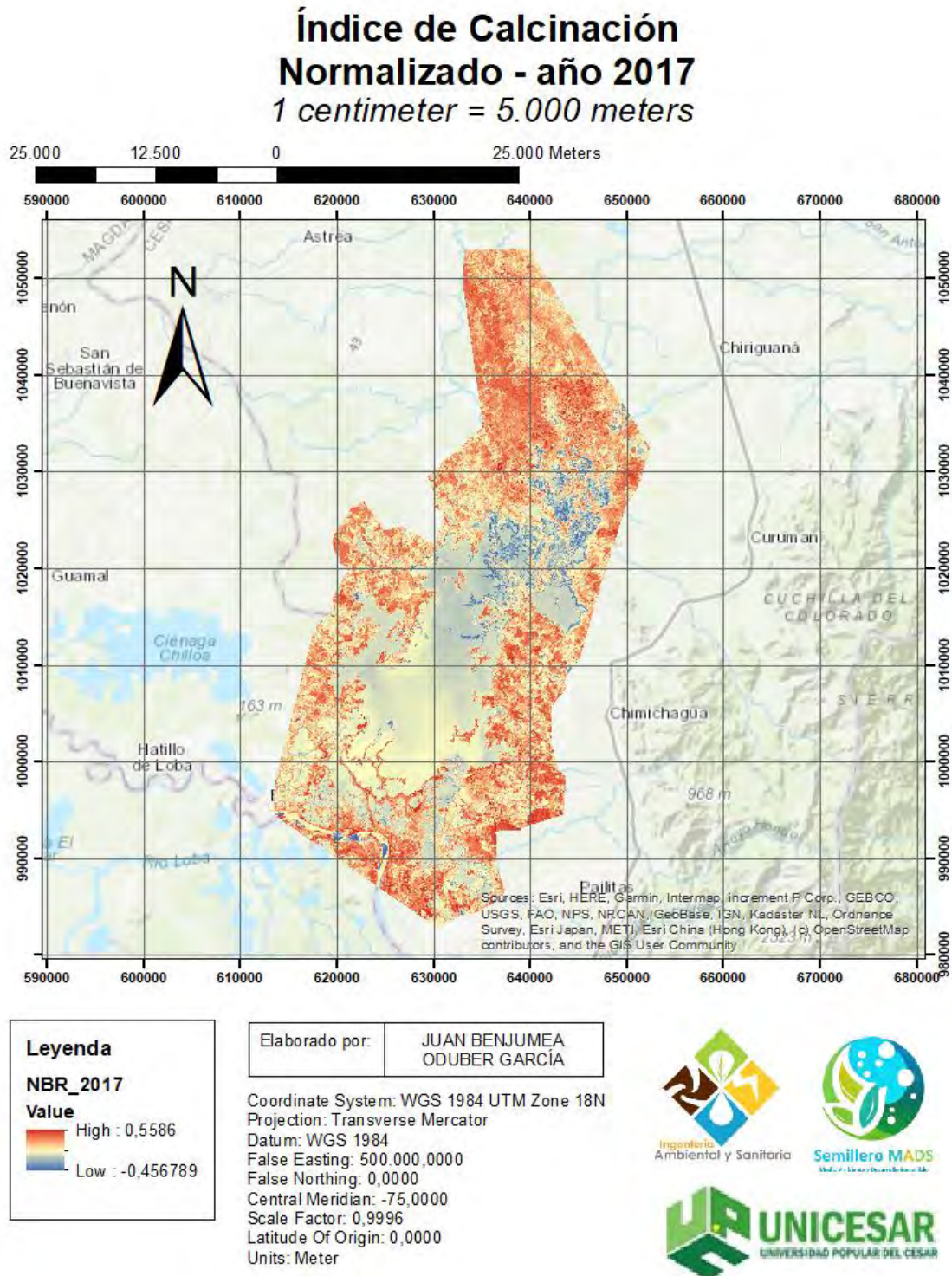
Las representaciones geográficas del NBR se presentan en secuencia a en la siguiente página.

Figura 35. Índice de Calcinación Normalizado – NRB año 2016



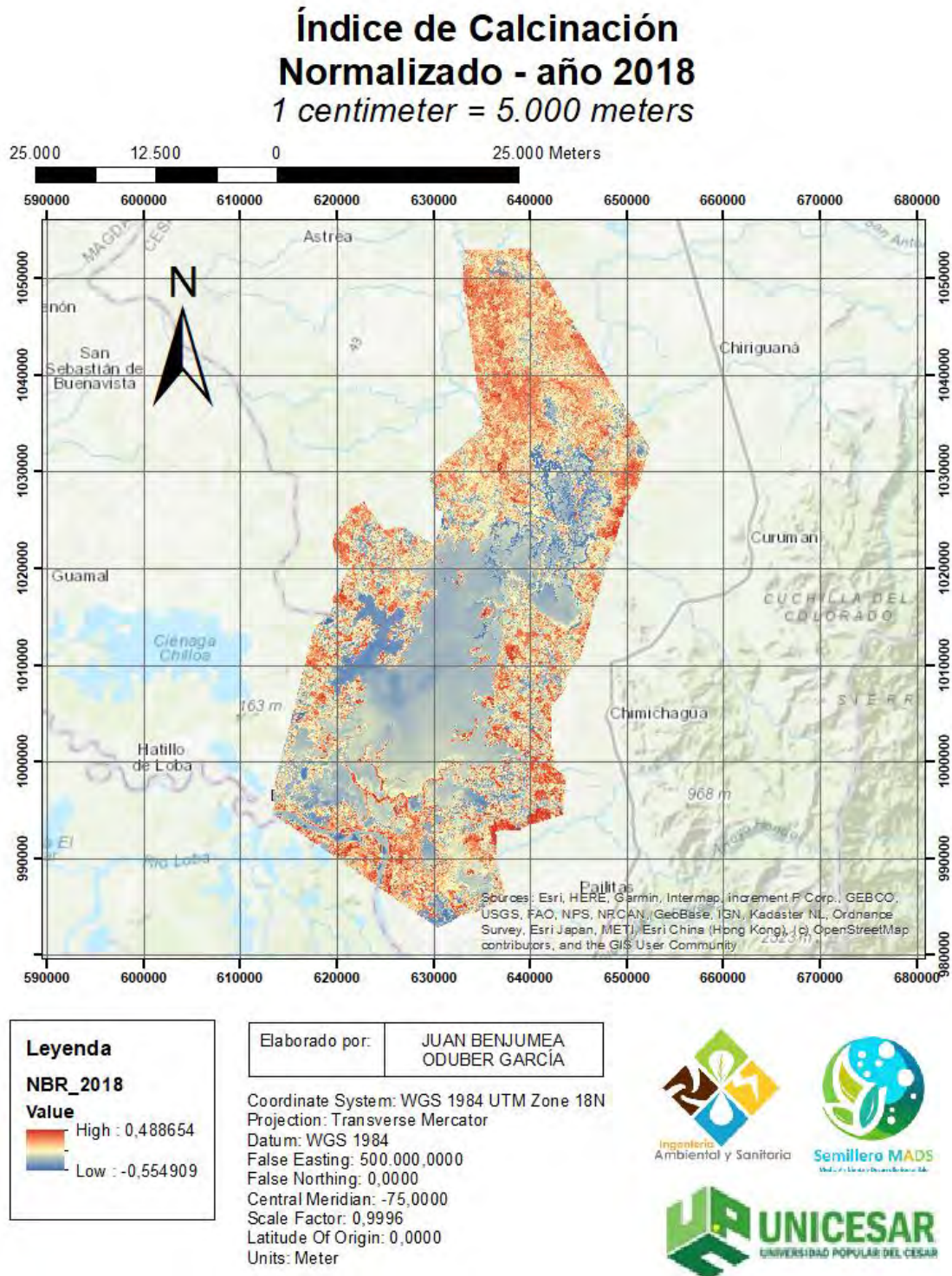
Nota: Elaborado por los Autores (2023) a partir del Software ArcGIS empleando imágenes satelitales del Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L2 obtenido del EarthData del USGS (2023).

Figura 36. Índice de Calcinación Normalizado – NRB año 2017



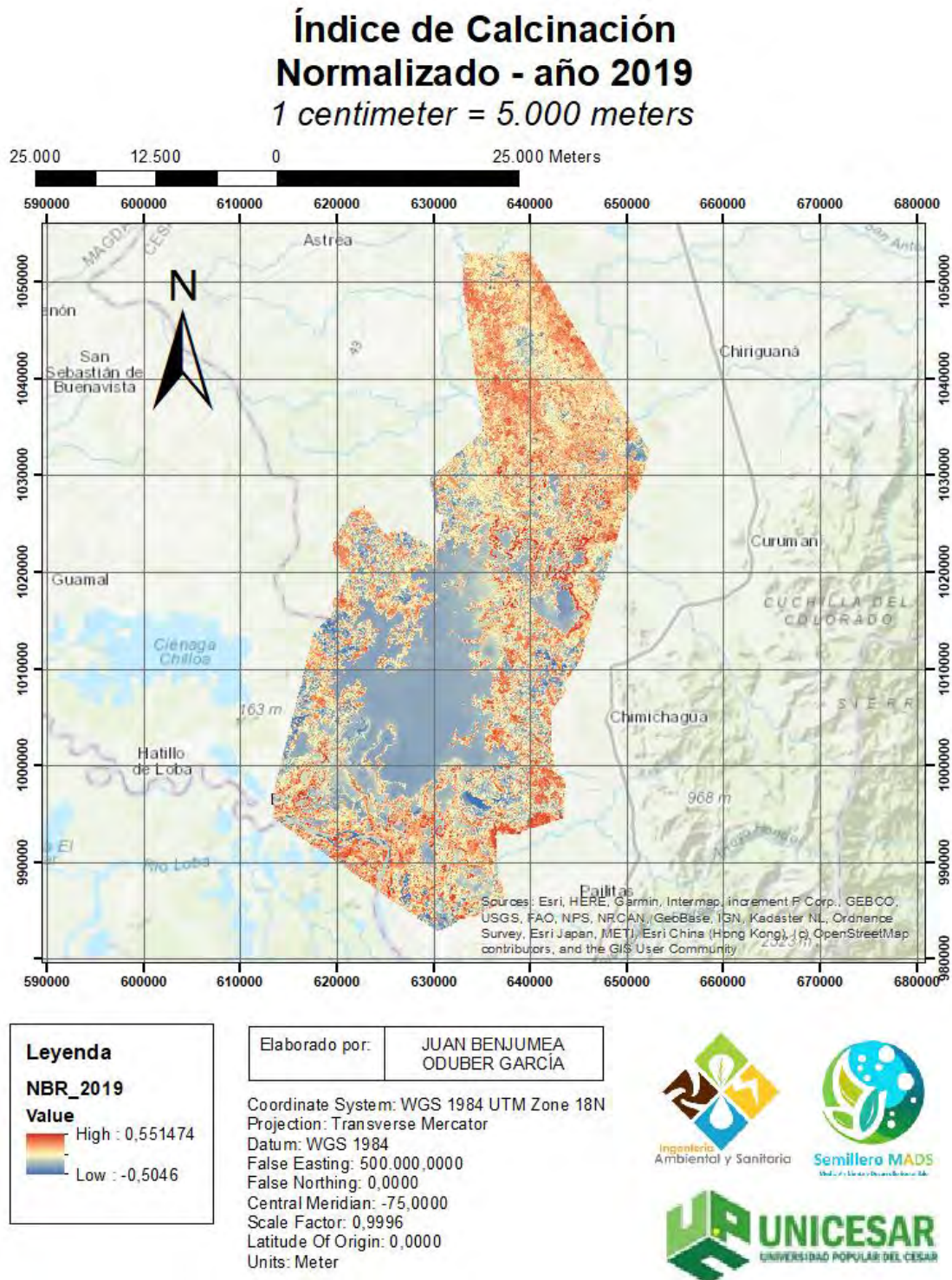
Nota: Elaborado por los Autores (2023) a partir del Software ArcGIS empleando imágenes satelitales del Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L2 obtenido del EarthData del USGS (2023).

Figura 37. Índice de Calcinación Normalizado – NRB año 2018



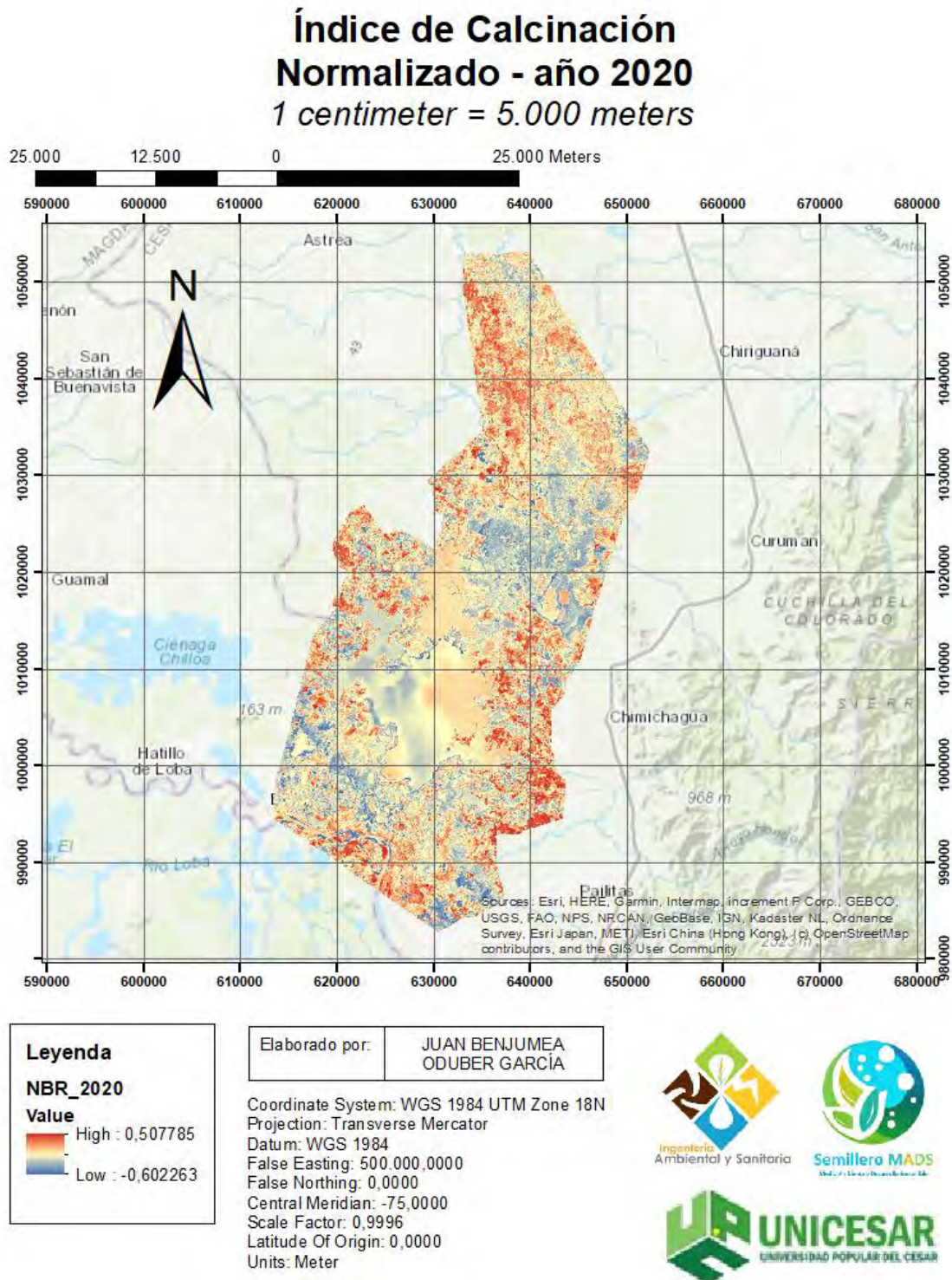
Nota: Elaborado por los Autores (2023) a partir del Software ArcGIS empleando imágenes satelitales del Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L2 obtenido del EarthData del USGS (2023).

Figura 38. Índice de Calcinación Normalizado – NRB año 2019



Nota: Elaborado por los Autores (2023) a partir del Software ArcGIS empleando imágenes satelitales del Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L2 obtenido del EarthData del USGS (2023).

Figura 39. Índice de Calcinación Normalizado – NRB año 2020



Nota: Elaborado por los Autores (2023) a partir del Software ArcGIS empleando imágenes satelitales del Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L2 obtenido del EarthData del USGS (2023).

Al analizar los cambios en los valores bajos y altos del Índice de Calcinación Normalizado (NBR) en el Complejo Cenagoso de Zapatosa a lo largo de los años, se pueden obtener algunas observaciones e inferencias sobre la severidad y extensión de los eventos de incendios en la zona. A continuación, se presenta un análisis de estos cambios y posibles explicaciones:

Variabilidad en los valores bajos del NBR: Los valores bajos del NBR indican áreas menos afectadas por incendios o con una menor severidad de calcinación. La variabilidad en estos valores puede estar influenciada por diversos factores, como la presencia de medidas de prevención y control de incendios efectivas, la presencia de vegetación resistente al fuego, la presencia de barreras naturales o cambios en las condiciones climáticas que favorezcan una menor propagación del fuego. Además, es posible que estas áreas hayan experimentado una menor exposición a incendios o que hayan recibido una mayor intervención humana para reducir la propagación del fuego.

Variabilidad en los valores altos del NBR: Los valores altos del NBR indican áreas con mayor severidad de calcinación o daño causado por incendios. La variabilidad en estos valores puede estar relacionada con factores como la presencia de combustible inflamable, condiciones climáticas propicias para la propagación del fuego, la ausencia o ineffectividad de medidas de prevención y control de incendios, y la falta de intervención humana para mitigar los efectos del fuego. Además, eventos como sequías prolongadas, tormentas eléctricas o actividades humanas irresponsables pueden contribuir a un aumento en la severidad y extensión de los incendios en estas áreas.

6.2. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO DE COMBUSTIBLE A PARTIR DE INDICADORES DE ESTADO DE SALUD VEGETATIVA Y ECOSISTÉMICA MEDIANTE SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICO PARA EL COMPLEJO CENAGOSO DE ZAPATOSA

6.2.1. Regresión Múltiple De Indicadores.

Si se encuentra una relación significativa entre el Índice de Calcinación Normalizado (NBR) y los indicadores de vegetación como el GCI, ARVI, SAVI y el NDVI, esto podría tener implicaciones interesantes en términos de la comprensión y monitoreo de la vegetación y los eventos de incendios. A continuación, se presenta la hipótesis que podría surgir de esta relación:

Si se encuentra una correlación positiva significativa entre el NBR y el GCI, lo cual indica que a medida que aumenta la concentración de clorofila verde en la vegetación (reflejada por valores más altos del GCI), también se incrementa la severidad o extensión de la calcinación o daño causado por los incendios (reflejado por valores más altos del NBR). Esto podría sugerir que las áreas con una vegetación más densa y saludable (mayor concentración de clorofila verde) podrían ser más propensas a experimentar incendios más intensos o extensos. Esta información podría ser valiosa para la gestión y prevención de incendios forestales, ya que se podría identificar las áreas con mayor riesgo y enfocar los esfuerzos de prevención y mitigación en esos lugares.

Si se encuentra una correlación positiva entre el NBR y el ARVI, esto podría indicar que áreas con una mayor resistencia atmosférica (valores más altos del ARVI) están asociadas con una mayor severidad de calcinación (valores más altos del NBR). Esto podría sugerir que la presencia de una capa atmosférica más densa ha contribuido a la propagación y severidad de los incendios, ya que la resistencia atmosférica ha dificultado la dispersión y la mitigación del fuego en estas áreas.

Si existe una relación positiva entre el NBR y el SAVI, esto podría implicar que áreas con una mayor corrección del suelo en el cálculo del NDVI (valores más altos del SAVI) están asociadas con una mayor severidad de calcinación (valores más altos del NBR).

Esto podría indicar que las áreas con un suelo más saludable y con mayor capacidad de retener humedad han sido más afectadas por los incendios, ya que el suelo saludable puede actuar como combustible para la propagación del fuego.

Si se encuentra una correlación positiva entre el NBR y el NDVI, esto podría implicar que áreas con una mayor densidad y salud de la vegetación (valores más altos del NDVI) están asociadas con una mayor severidad de calcinación (valores más altos del NBR). Esto podría indicar que las áreas con una vegetación más densa son más susceptibles a incendios más intensos o extensos, posiblemente debido a una mayor acumulación de biomasa vegetal que puede actuar como combustible para los incendios.

Para proceder con esta actividad es necesario convertir los archivos raster a archivos shape, siguiendo el siguiente procedimiento:

i. Carga el archivo raster en ArcMap:

Abre ArcMap y crea un nuevo proyecto.

Dirígete a la opción "File" (Archivo) en la barra de menú y selecciona "Add Data" (Agregar datos). Selecciona el archivo raster que deseas convertir.

El archivo raster se cargará en la tabla de contenidos del proyecto.

ii. Realiza la reclasificación del archivo raster:

Haz clic derecho en el archivo raster en la tabla de contenidos y selecciona "Data" (Datos) -> "Export Data" (Exportar datos).

En el cuadro de diálogo "Export Raster Data" (Exportar datos raster), especifica una ubicación y un nombre de archivo para el nuevo raster reclasificado.

En la sección "Processing Options" (Opciones de procesamiento), elige la opción "Reclassify" (Reclasificar).

Haz clic en el botón "Classify" (Clasificar) y define los rangos y valores para la reclasificación según los requisitos del proyecto.

Finalmente, haz clic en "OK" para aplicar la reclasificación y exportar el nuevo raster reclasificado.

iii. Convierte el archivo raster reclasificado a un shapefile:

Haz clic derecho en el nuevo raster reclasificado en la tabla de contenidos y selecciona "Data" (Datos) -> "Export Data" (Exportar datos).

En el cuadro de diálogo "Export Raster Data" (Exportar datos raster), especifica una ubicación y un nombre de archivo para el nuevo shapefile.

En la sección "Output Feature Class" (Clase de entidad de salida), selecciona la opción "Shapefile".

Haz clic en "OK" para exportar el raster reclasificado como un shapefile.

iv. Agrega el shapefile al mapa:

Navega a la opción "File" (Archivo) en la barra de menú y selecciona "Add Data" (Agregar datos). Selecciona el shapefile exportado.

El shapefile se agregará al mapa y podrás visualizarlo y realizar análisis adicionales según sea necesario.

Teniendo en cuenta que se está trabajando con varias imágenes satelitales este trabajo será desarrollado en la ventana ArcPython, integrando el código para que pueda realizarse el trabajo de manera iterativa y sea un ahorro de tiempo para los investigadores. (ver Anexo I, Literal F).

Durante este procedimiento fueron reclasificadas las imágenes considerando información de algunas empresas y autores relevantes que han desarrollado estudios en torno a ello. A continuación, se presentarán los rangos utilizados para los indicadores a obtenidos son los Indicadores de Vegetación de Diferencia Normalizado (NDVI) de Vegetación Mejorada (EVI), de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI), de Vegetación Resistente a la Atmósfera (ARVI), de Clorofila Verde (GCI) y el de Calcinación Normalizado (NBR).

Valores de clasificación del NDVI.

Tabla 2. Valores de Clasificación del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado (NDVI)

Valor NDVI	Descripción
Menor o igual a 0,2	áreas sin rocas, arena o nieve.
Entre 0,2 y 0,6	representan arbustos y praderas
Mayores a 0,6	indican bosques templados y tropicales

Nota: Elaborado por los Autores (2023) a partir de EOS.

Valores de clasificación del SAVI.

Tabla 3. Valores de Clasificación del Índice de Vegetación Ajustada al Suelo (SAVI)

Valor SAVI	Descripción
Entre -1,49 a 0	Agua, sombra, rocas o vegetación muerta
Entre 0 a 0,3	Baja Marrón claro Suelo desnudo o vegetación enferma
Entre 0,3 a 0,6	Vegetación escasa
Entre 0,6 a 0,9	Vegetación densa semihúmeda
Entre 0,9 a 1,2	Vegetación densa húmeda
Entre 1,2 a 1,49	Vegetación muy densa húmeda

Nota: Elaborado por los Autores (2023) a partir de Canul, K. (2016)

Valores de clasificación del ARVI.

Tabla 4. Valores de Clasificación del Índice de Vegetación Resistente a la Atmósfera (ARVI)

Valor ARVI	Descripción
Menores a 0,2	baja presencia de vegetación
Entre 0,2 a 0,4	vegetación de densidad y salud promedio.
Mayores a 0,4	alta densidad y salud de la vegetación

Nota: Elaborado por los Autores (2023) a partir de Thenkabail, P. S. et. Al. (2000).

Valores de clasificación del GCI.

Tabla 5. Valores de Clasificación del Índice de Clorofila Verde (GCI)

Valor GCI	Descripción
Menores a 0,2	Indican una baja presencia de clorofila verde. Esto puede corresponder a áreas con vegetación limitada o en mal estado de salud.
Entre 0,2 a 0,4	Representan una presencia de clorofila verde de densidad y salud promedio. Esto incluye áreas con vegetación en un estado de salud moderado.
Mayores a 0,4	Indican una alta densidad y salud de la clorofila verde. Esto corresponde a áreas con una vegetación densa y saludable.

Nota: Elaborado por los Autores (2023) a partir de Haboudane, D., et. Al. (2004)

Valores de clasificación del NBR.

Tabla 6. Valores de Clasificación del Índice de Calcinación Normalizado (NBR)

Valor NBR	Descripción
Menor a -0,25	Alto crecimiento de vegetación posterior al fuego
Entre -0,25 a -0,1	Bajo crecimiento de vegetación posterior al fuego
Entre -0,1 a 0,1	Zonas estables o sin quemar
Entre 0,1 a 0,27	Zonas quemadas con gravedad baja
Entre 0,27 a 0,44	Zonas quemadas con gravedad moderada-baja
Entre 0,44 a 0,66	Zonas quemadas con gravedad moderada-alta
Mayor a 0,66	Zonas quemadas con gravedad alta

Nota: Elaborado por los Autores (2023) a partir de GIS & Beers (2019)

Realizada la reclasificación y conversión a formato shape se procede a crear una nube de puntos aleatorios con el objeto de extraer la información de los archivos raster para proceder a disponerlos en una tabla que permita exportarlo al software de ofimática Excel, con el cual se realizará la regresión lineal múltiple considerando las coordenadas y considerando además los valores que extraídos de la variable dependiente.

i. El procedimiento para esto es el siguiente:

Abre ArcMap y carga el polígono:

Inicia ArcMap y abre tu proyecto existente.

Ve a "File" (Archivo) -> "Add Data" (Agregar datos) y selecciona el archivo que contiene el polígono que deseas utilizar.

ii. Añade una capa de puntos aleatorios:

Ve a "ArcToolbox" -> "Data Management Tools" (Herramientas de gestión de datos) -> "Feature Class" (Clase de entidad) -> "Create Random Points" (Crear puntos aleatorios).

En el cuadro de diálogo "Create Random Points" (Crear puntos aleatorios), selecciona la capa de polígono como "Input Features" (Entidades de entrada).

Define la cantidad de puntos aleatorios que deseas generar en el campo "Number of Points" (Número de puntos).

Especifica una ubicación y nombre de archivo para la capa de puntos aleatorios en el campo "Output Feature Class" (Clase de entidad de salida).

Ajusta cualquier otro parámetro según tus necesidades y preferencias.

Haz clic en "OK" para generar la capa de puntos aleatorios alrededor del polígono.

iii. Visualiza los puntos aleatorios:

Añade la capa de puntos aleatorios al mapa seleccionando "File" (Archivo) -> "Add Data" (Agregar datos) y eligiendo la capa de puntos aleatorios generada.

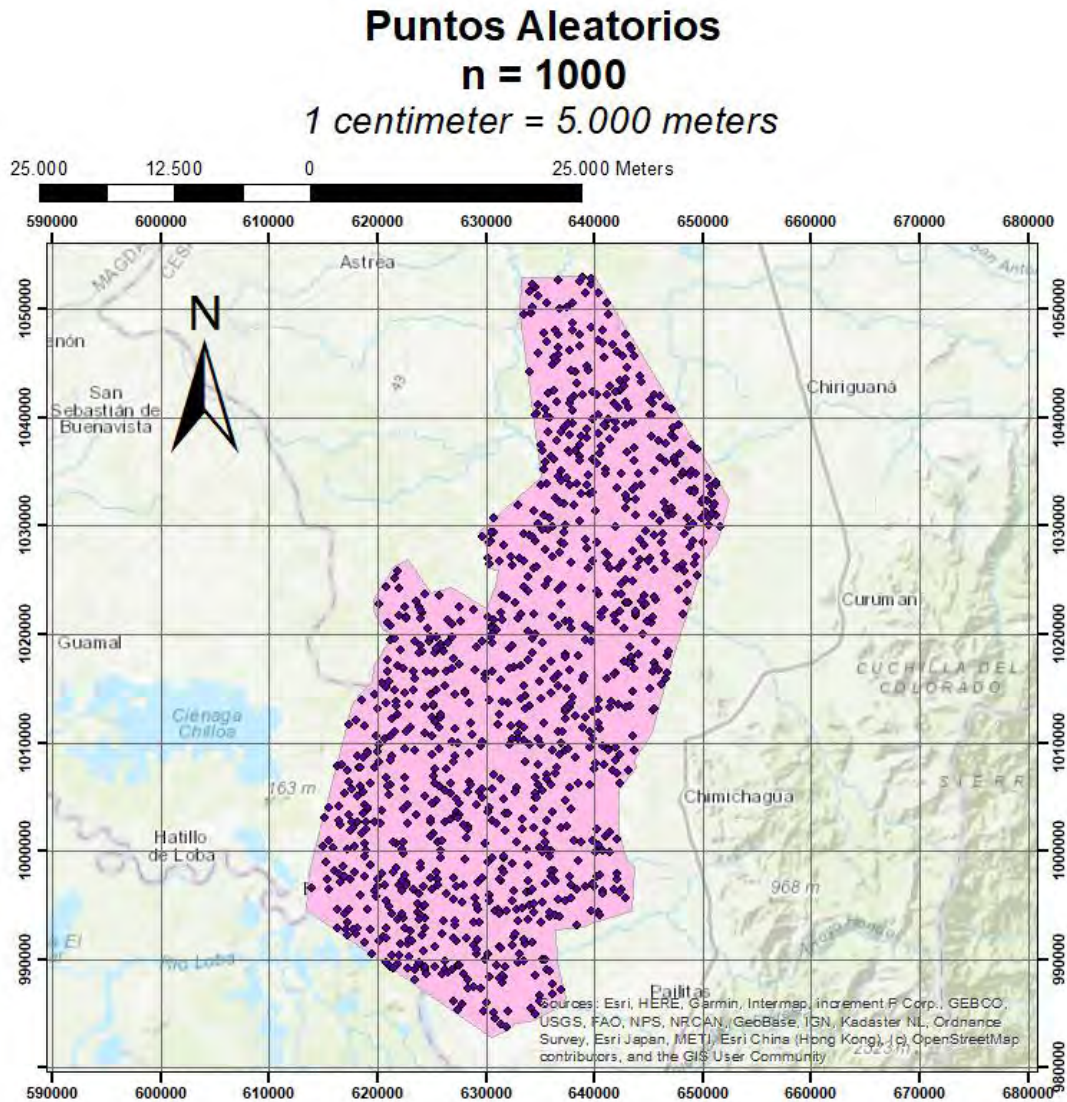
Ajusta la simbología y los estilos de visualización de los puntos según tus preferencias.

iv. Guarda y exporta los puntos aleatorios:

Si deseas guardar los puntos aleatorios como un archivo independiente, haz clic derecho en la capa de puntos aleatorios en la tabla de contenidos y selecciona "Data" (Datos) -> "Export Data" (Exportar datos). Especifica una ubicación y nombre de archivo para guardar los puntos aleatorios.

Se seleccionarán 1000 puntos separados 100 metros para mejorar la confiabilidad:

Figura 40. Puntos Aleatorios para Captación Muestral de Información



Elaborado por:	JUAN BENJUMEA ODUBER GARCÍA
----------------	--------------------------------

Leyenda
◆ Random_Points
■ CCZ_Poligono

Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 18N
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: WGS 1984
 False Easting: 500,000,0000
 False Northing: 0,0000
 Central Meridian: -75,0000
 Scale Factor: 0,9996
 Latitude Of Origin: 0,0000
 Units: Meter



Ingeniería
Ambiental y Sanitaria



Semillero MADS
Unidad de Innovación y Desarrollo de la UP



Nota: Elaborado por los Autores (2023) a partir del Software ArcGIS

El siguiente paso es realizar la extracción de la información raster a los puntos aleatorios, para ello se realiza el siguiente procedimiento:

i. Cargar el archivo raster y la capa de puntos aleatorios:

Abrir ArcMap y cargar el archivo raster que contiene los valores que se desean extraer.

Seleccionar la opción "Agregar datos" en el menú "Archivo" y cargar la capa de puntos aleatorios ya existente.

ii. Realizar la extracción de valores:

Acceder a la extensión "Spatial Analyst" en la barra de herramientas y seleccionar la opción "Extraction" -> "Extract Multi Values to Points" (Extraer valores múltiples a puntos).

Seleccionar la capa de puntos aleatorios como la "Entidad de puntos de entrada" en el cuadro de diálogo.

Seleccionar el archivo raster como el "Datos raster de entrada".

Especificar la ubicación y el nombre de archivo para el resultado de la extracción.

Ajustar cualquier otro parámetro necesario según las necesidades y preferencias del usuario.

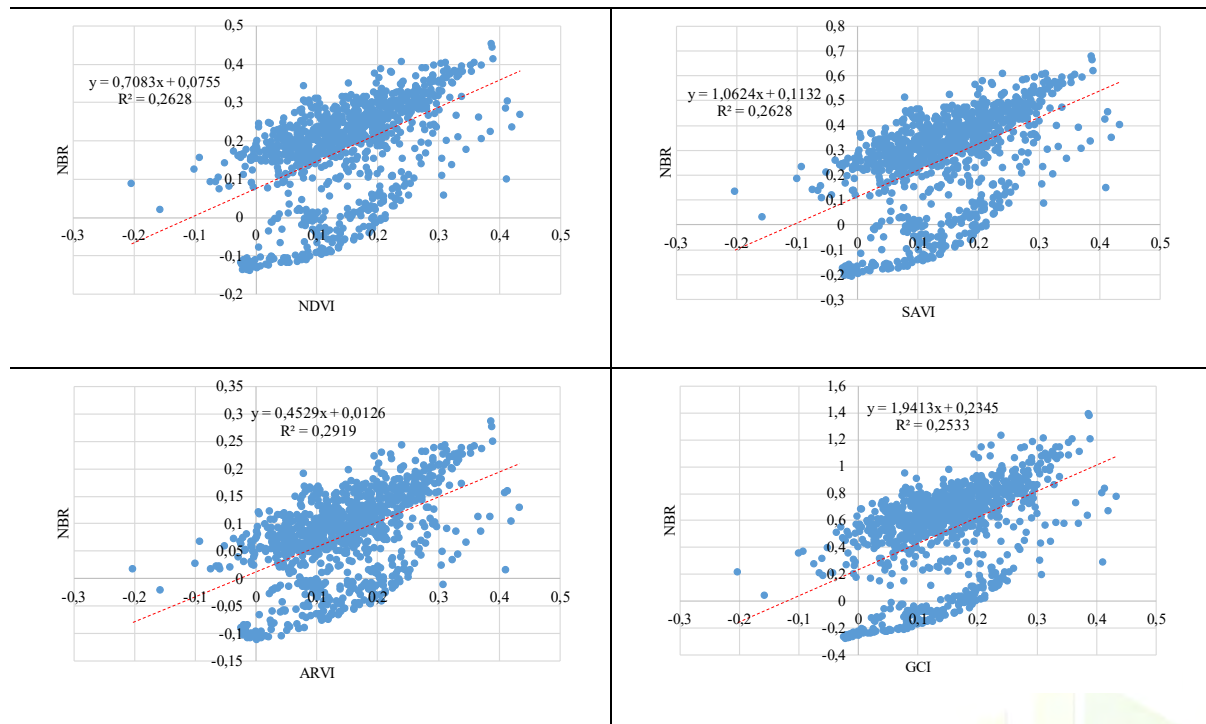
Hacer clic en "OK" para ejecutar la extracción de valores.

Con el desarrollo de este trabajo se puede extraer la información de las coordenadas de los 1000 puntos para llevarlos a Excel. El resultado de la aplicación de este trabajo siguiendo el procedimiento enlistado con antelación permite obtener la información de los indicadores de Vegetación de Diferencia Normalizado (NDVI) de Vegetación Mejorada (EVI), de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI), de Vegetación Resistente a la Atmósfera (ARVI), de Clorofila Verde (GCI) y el de Calcinación Normalizado (NBR), por cada año de estudio (2016, 2017, 2018, 2019 y 2020).

Un paso importante, antes de proceder a realizar la regresión lineal múltiple es verificar si gráficamente hay correlación, por lo cual, de manera secuencial se presenta este análisis, en complemento con los coeficientes y probabilidades con sus respectivos umbrales del modelo construido a partir de estos datos. Para este análisis se descarta un dato.

Tabla 7. Regresión Lineal Múltiple para el modelo matemático con datos del año 2016

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0,55211946
Coefficiente de determinación R ²	0,3048359
R ² ajustado	0,30203846
Error típico	0,07644466
Observaciones	1000

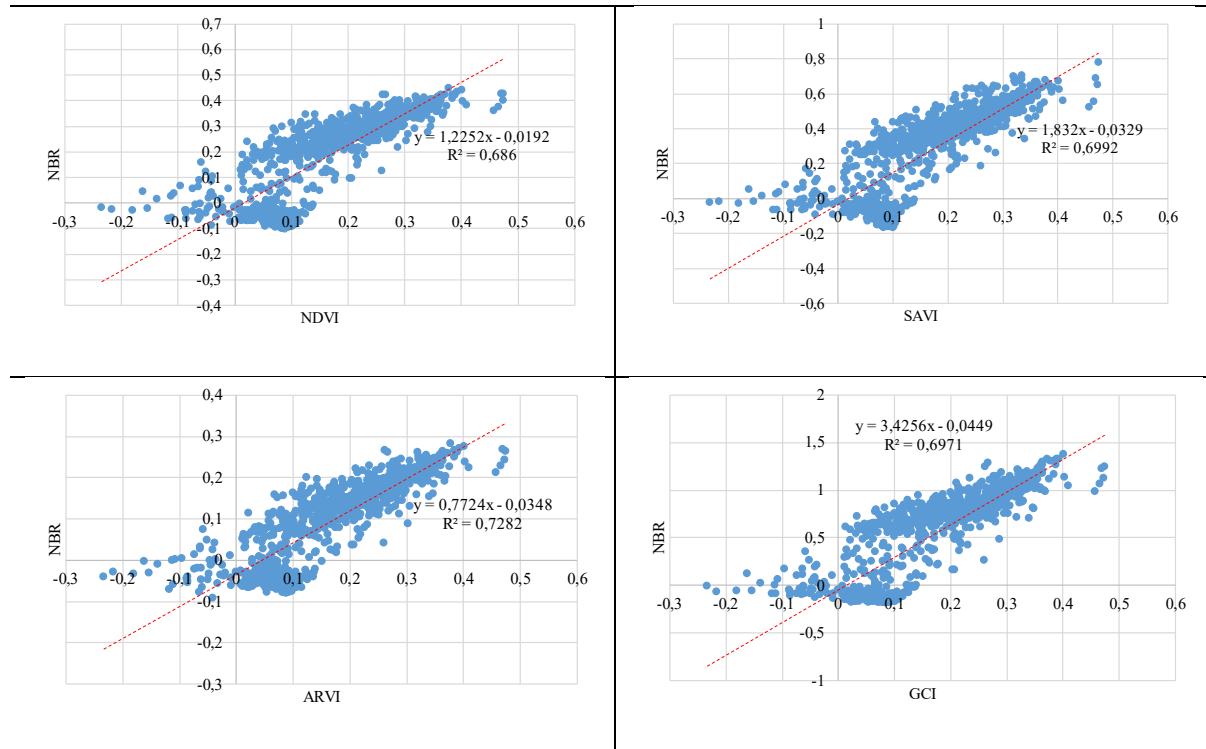


	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad
Intercepción	0,11693883	0,00674055	17,3485574	4,2279E-59
NDVI_CCZ_2016	299,706337	5722,37801	0,05237444	0,95824086
SAVI_2016	-200,321573	3815,06478	-0,05250804	0,95813444
ARVI_2016	1,43459491	0,19026659	7,53992021	1,0579E-13
GCI_2016	0,10342836	0,06152798	1,68099709	0,09307764

Nota: Elaborado por los Autores (2023) utilizando el método de Mínimos Cuadrados Ordinarios (Neter, Kutner, Nachtsheim, & Wasserman, 1996).

Tabla 8. Regresión Lineal Múltiple para el modelo matemático con datos del año 2017
Estadísticas de la regresión

Coefficiente de correlación múltiple	0,87745476
Coefficiente de determinación R ²	0,76992686
R ² ajustado	0,76900101
Error típico	0,05449156
Observaciones	1000

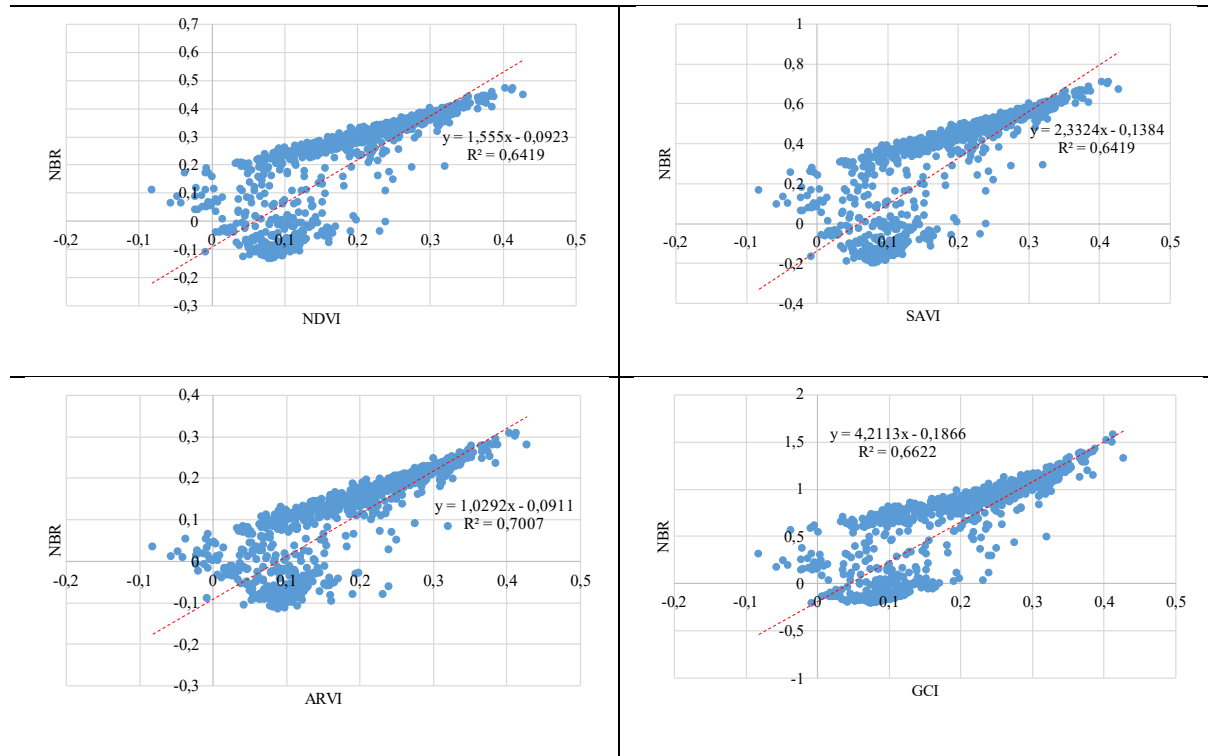


	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad
Intercepción	0,10002286	0,00355839	28,1090333	2,104E-128
NDVI_CCZ_2017	-1,79062784	0,13727813	-13,0437956	5,1827E-36
SAVI_2017	0,05397064	0,06670091	0,809144	0,41862596
ARVI_2017	2,34900011	0,13958954	16,8279094	4,1947E-56
GCI_2017	0,30669454	0,03665272	8,36757998	1,9758E-16

Nota: Elaborado por los Autores (2023) utilizando el método de Mínimos Cuadrados Ordinarios (Neter, Kutner, Nachtsheim, & Wasserman, 1996).

Tabla 9. Regresión Lineal Múltiple para el modelo matemático con datos del año 2018

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0,89390231
Coefficiente de determinación R ²	0,79906134
R ² ajustado	0,79825273
Error típico	0,04357132
Observaciones	999

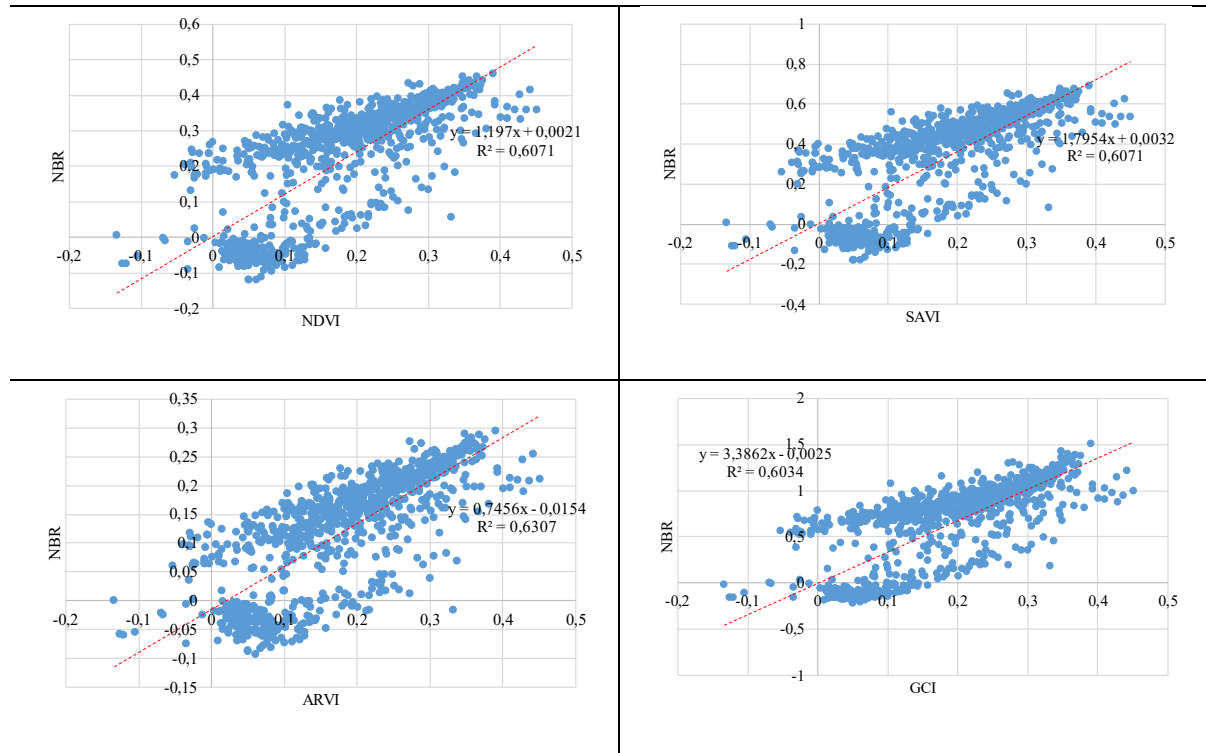


	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad
Intercepción	0,14694984	0,00378715	38,8021923	2,961E-201
NDVI_CCZ_2018	16236,7112	3347,60741	4,85024354	1,4306E-06
SAVI_2018	-10826,1068	2231,81695	-4,8508041	1,4266E-06
ARVI_2018	2,682523	0,10515197	25,5109146	7,866E-111
GCI_2018	0,32604082	0,03023905	10,7821117	1,0367E-25

Nota: Elaborado por los Autores (2023) utilizando el método de Mínimos Cuadrados Ordinarios (Neter, Kutner, Nachtsheim, & Wasserman, 1996).

Tabla 10. Regresión Lineal Múltiple para el modelo matemático con datos del año 2019

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0,79681645
Coefficiente de determinación R ²	0,63491646
R ² ajustado	0,63344731
Error típico	0,06646121
Observaciones	1000

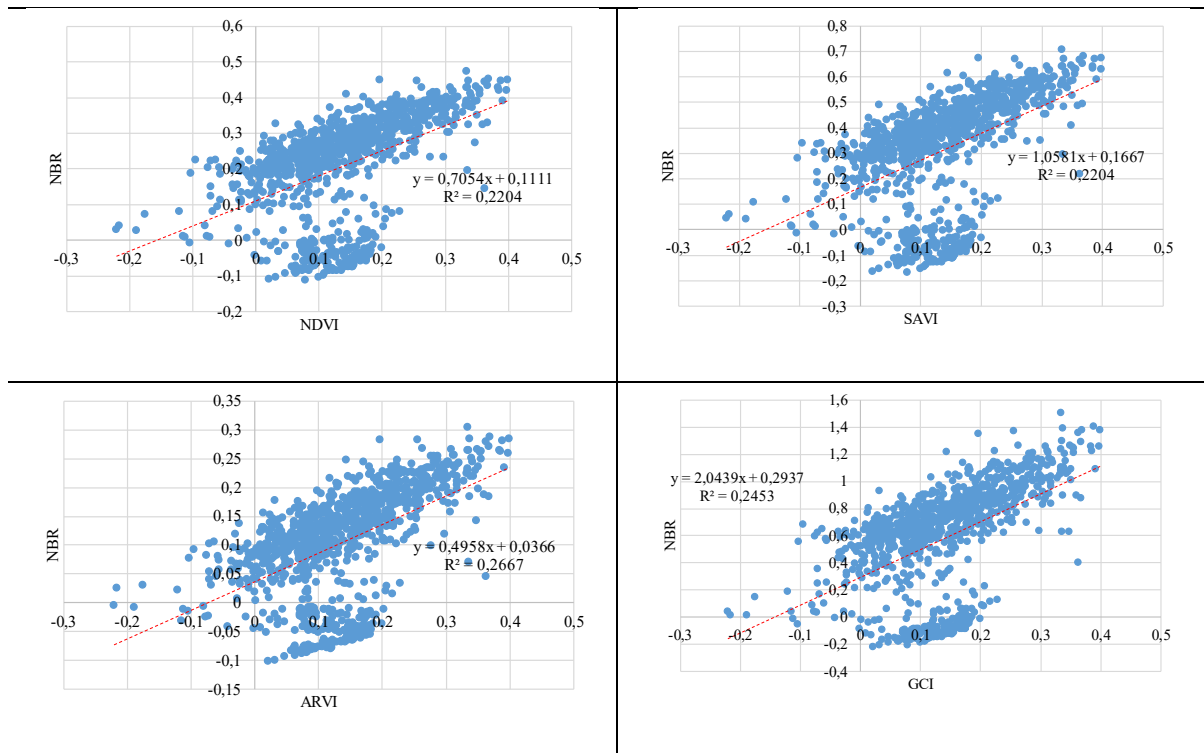


	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad
Intercepción	0,08275201	0,00439691	18,8205044	8,0072E-68
NDVI_CCZ_2019	5628,62227	5007,31982	1,12407884	0,26125097
SAVI_2019	-3752,84689	3338,34075	-1,12416532	0,2612143
ARVI_2019	1,35483908	0,15944045	8,49746128	7,0111E-17
GCI_2019	0,08071383	0,05070138	1,59194528	0,11171494

Nota: Elaborado por los Autores (2023) utilizando el método de Mínimos Cuadrados Ordinarios (Neter, Kutner, Nachtsheim, & Wasserman, 1996).

Tabla 11. Regresión Lineal Múltiple para el modelo matemático con datos del año 2020

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0,67124697
Coefficiente de determinación R ²	0,4505725
R ² ajustado	0,44836152
Error típico	0,07048808
Observaciones	1000



	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad
Intercepción	0,15909418	0,00671452	23,6940407	9,509E-99
NDVI_CCZ_2020	-5650,62002	5510,5532	-1,02541792	0,30541551
SAVI_2020	3765,00949	3673,82129	1,02482108	0,30569695
ARVI_2020	3,37864648	0,19711904	17,1401328	6,7859E-58
GCI_2020	0,50499642	0,05264947	9,5916717	6,732E-21

Nota: Elaborado por los Autores (2023) utilizando el método de Mínimos Cuadrados Ordinarios (Neter, Kutner, Nachtsheim, & Wasserman, 1996).

Como se aprecia en estas tablas, la distribución de la nube de puntos señala que sí existe una relación lineal entre la variable NBR y las variables NDVI, SAVI, ARVI y GCI, sin embargo, al realizar el análisis mediante validación estadística se observa que en la conformación de grupos que hay algunas que poseen una probabilidad mayor a 0,05 ($p\text{-value} > 0,05$) lo que significa que son estadísticamente no significativas.

Para el año 2016, el NDVI, el SAVI y el GCI poseen un *p-value* mayor a 0,05, por lo cual, el NBR no explicaría estas variables, pero si se encuentra una relación positiva con el ARVI, por lo cual, esto podría indicar que áreas con una mayor resistencia atmosférica (valores más altos del ARVI) están asociadas con una mayor severidad de calcinación (valores más altos del NBR). Esto podría sugerir que la presencia de una capa atmosférica más densa ha contribuido a la propagación y severidad de los incendios, ya que la resistencia atmosférica ha dificultado la dispersión y la mitigación del fuego en estas áreas.

Para el año 2017, el SAVI posee un *p-value* mayor a 0,05, por lo cual, el NBR no explicaría esta variable, pero si se encuentra una relación positiva con el ARVI y el GCI, por lo cual, se podría emitir la inferencia anterior en complemento a que la correlación positiva significativa para con el GCI, indica que a medida que aumenta la concentración de clorofila verde en la vegetación (reflejada por valores más altos del GCI), también se incrementa la severidad o extensión de la calcinación o daño causado por los incendios (reflejado por valores más altos del NBR). Esto podría sugerir que las áreas con una vegetación más densa y saludable (mayor concentración de clorofila verde) podrían ser más propensas a experimentar incendios más intensos o extensos.

Por otra parte, se encuentra una relación negativa con el NDVI, esto indica que áreas con una mayor densidad y salud de la vegetación (valores más altos del NDVI) están asociadas con una menor severidad de calcinación (valores más bajos del NBR). Esto sugiere que las áreas con una vegetación más densa y saludable son menos susceptibles a incendios intensos o extensos, ya que la vegetación densa actúa como una barrera natural que puede limitar la propagación del fuego.

Para el año 2018, todos los indicadores cumplen con *p-value* inferior a 0,05, por lo cual, el NBR explicaría adecuadamente una situación en torno a consumo vegetal por combustión, teniendo una relación positiva con el NDVI, el ARVI y el GCI, esto indica que a medida que aumenta la concentración de clorofila verde en la vegetación (reflejada por valores más altos del NDVI, SAVI y GCI), también se incrementa la severidad o extensión de la calcinación o daño causado por los incendios (reflejado por valores más altos del NBR). Esta relación positiva puede sugerir que áreas con una vegetación más densa, saludable y con mayor contenido de clorofila están más expuestas a incendios más intensos y extensos.

Por otra parte, se encuentra una relación negativa con el SAVI, esto indica una relación inversa entre la severidad de la calcinación (valores más altos del NBR) y la corrección del suelo en el cálculo del NDVI (valores más altos del SAVI). En otras palabras, las áreas con una mayor corrección del suelo en el cálculo del NDVI pueden estar menos afectadas por los incendios, lo que implica una menor severidad de calcinación. Esto podría sugerir que un suelo más saludable y con mayor capacidad de retener humedad puede actuar como una barrera o factor de protección frente a los incendios, reduciendo así su impacto y severidad en esas áreas.

Para el año 2019, tanto el NDVI, como el SAVI y el GCI poseen un *p-value* mayor a 0,05, por lo cual, el NBR no explicaría estas variables, pero si encuentra relación positiva con el ARVI por lo cual, existe la presencia de una capa atmosférica más densa que ha contribuido a la propagación y severidad de los incendios, ya que la resistencia atmosférica ha dificultado la dispersión y la mitigación del fuego en estas áreas.

Finalmente, para el año 2020 se presenta la misma situación que para el año 2016 y para el año 2019, pudiendo explicar solamente al ARVI y el GCI, con igual relación positiva, esto indicaría, que la variable de mayor asociación e interés es el ARVI, por lo cual, el principal elemento que tendría implicancia en las conflagraciones en el Complejo Cenagoso de Zapatosa se debería más a un fenómeno atmosférico.

6.2.2. Análisis De Varianza – ANOVA

Para constatar que la aplicación del método fue estadísticamente aceptable, entonces se procede a realizar las validaciones mediante el Análisis de Varianza o ANOVA, que consta en estimar el NBR a partir del modelo matemático construido con mínimos cuadrados *“solamente con las variables que son significativas para el modelo y en una segunda iteración en donde se descarten las que no aportan información estadísticamente comprobables o aceptables al intervalo de confianza del 95% trabajado”*.

Lo anterior implica realizar nuevamente las regresiones, pero esta vez descartando las variables que no fueron explicadas por el NBR por cada uno de los años, entonces, el resultado de estos modelos se presenta en los siguientes pliegos:

Figura 41. Modelo Matemático de Regresión Validado para el año 2016

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0,540314226
Coefficiente de determinación R ²	0,291939463
R ² ajustado	0,291229272
Error típico	0,077034325
Observaciones	1000

ANÁLISIS DE VARIANZA					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	1	2,439417515	2,439417515	411,0716942	8,48943E-77
Residuos	997	5,916484392	0,005934287		
Total	998	8,355901907			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad
Intercepción	0,094781656	0,003486926	27,18200592	3,4566E-122
ARVI_2016	0,644623877	0,031794178	20,27490306	8,48943E-77

Nota: Elaborado por los Autores (2023) utilizando el método de Mínimos Cuadrados Ordinarios (Neter, Kutner, Nachtsheim, & Wasserman, 1996).

Figura 42. Modelo Matemático de Regresión Validado para el año 2017

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0,877368403
Coefficiente de determinación R ²	0,769775314
R ² ajustado	0,769081169
Error típico	0,054482107
Observaciones	1000

ANÁLISIS DE VARIANZA					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	3	9,875133188	3,291711063	1108,954982	0
Residuos	995	2,953458492	0,0029683		
Total	998	12,82859168			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad
Intercepción	0,100407378	0,003525902	28,47707897	6,0652E-131
NDVI_CCZ_2017	-1,761899164	0,132584221	-13,28890532	3,24765E-37
ARVI_2017	2,379458806	0,134394812	17,70499002	3,4625E-61
GCI_2017	0,318371231	0,033686442	9,451019783	2,32319E-20

Nota: Elaborado por los Autores (2023) utilizando el método de Mínimos Cuadrados Ordinarios (Neter, Kutner, Nachtsheim, & Wasserman, 1996).

Figura 43. Modelo Matemático de Regresión Validado para el año 2018

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0,893902309
Coefficiente de determinación R ²	0,799061338
R ² ajustado	0,798252732
Error típico	0,043571324
Observaciones	1000

ANÁLISIS DE VARIANZA					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	4	7,50420196	1,87605049	988,1958046	0
Residuos	994	1,887069524	0,00189846		
Total	998	9,391271484			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad
Intercepción	0,146949837	0,003787153	38,80219228	2,961E-201
NDVI_CCZ_2018	16236,71124	3347,607412	4,850243543	1,43057E-06
SAVI_2018	-10826,1068	2231,816948	-4,850804097	1,42662E-06
ARVI_2018	2,682523003	0,105151973	25,5109146	7,8658E-111
GCI_2018	0,326040821	0,030239051	10,78211172	1,03665E-25

Nota: Elaborado por los Autores (2023) utilizando el método de Mínimos Cuadrados Ordinarios (Neter, Kutner, Nachtsheim, & Wasserman, 1996).

Figura 44. Modelo Matemático de Regresión Validado para el año 2019

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0,794175954
Coefficiente de determinación R ²	0,630715445
R ² ajustado	0,63034505
Error típico	0,06674186
Observaciones	1000

ANÁLISIS DE VARIANZA					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	1	7,585148667	7,585148667	1702,815054	6,7896E-218
Residuos	997	4,441112498	0,004454476		
Total	998	12,02626116			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad
Intercepción	0,072920877	0,003022247	24,12803339	1,1279E-101
ARVI_2019	0,845964642	0,02050069	41,26517969	6,7896E-218

Nota: Elaborado por los Autores (2023) utilizando el método de Mínimos Cuadrados Ordinarios (Neter, Kutner, Nachtsheim, & Wasserman, 1996).

Figura 45. Modelo Matemático de Regresión Validado para el año 2020

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0,521713381
Coefficiente de determinación R ²	0,272184852
R ² ajustado	0,270723376
Error típico	0,081046558
Observaciones	1000

ANÁLISIS DE VARIANZA					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	2,446647189	1,223323595	186,2396744	1,93421E-69
Residuos	996	6,542270353	0,006568545		
Total	998	8,988917543			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad
Intercepción	0,093529506	0,006241722	14,98456872	6,29721E-46
ARVI_2020	0,968570066	0,159641192	6,067168855	1,84722E-09
GCI_2020	-0,10176313	0,037134653	-2,740381866	0,006246536

Nota: Elaborado por los Autores (2023) utilizando el método de Mínimos Cuadrados Ordinarios (Neter, Kutner, Nachtsheim, & Wasserman, 1996).

Como se observa, cada uno de los modelos matemáticos tiene un $F >$ valor crítico de F (ver Análisis de Varianza en cada una de las figuras anteriores) lo que indica que este es estadísticamente significativo. Por otra parte, si se aprecia la *probabilidad* es inferior a 0,05 por lo cual las variables implicadas también son estadísticamente significativas.

6.2.3. Interpretación Gráfica Del Modelo

Por lo cual, los modelos matemáticos de regresión a utilizar quedan formulados mediante las funciones presentadas a continuación:

$$NBR_{2016} = 0,0947 + 0,6446 * ARVI_{2016}$$

$$NBR_{2017} = 0,1004 - 1,7618 * NDVI_{2017} + 2,37945 * ARVI_{2017} + 0,31837 * GCI_{2017}$$

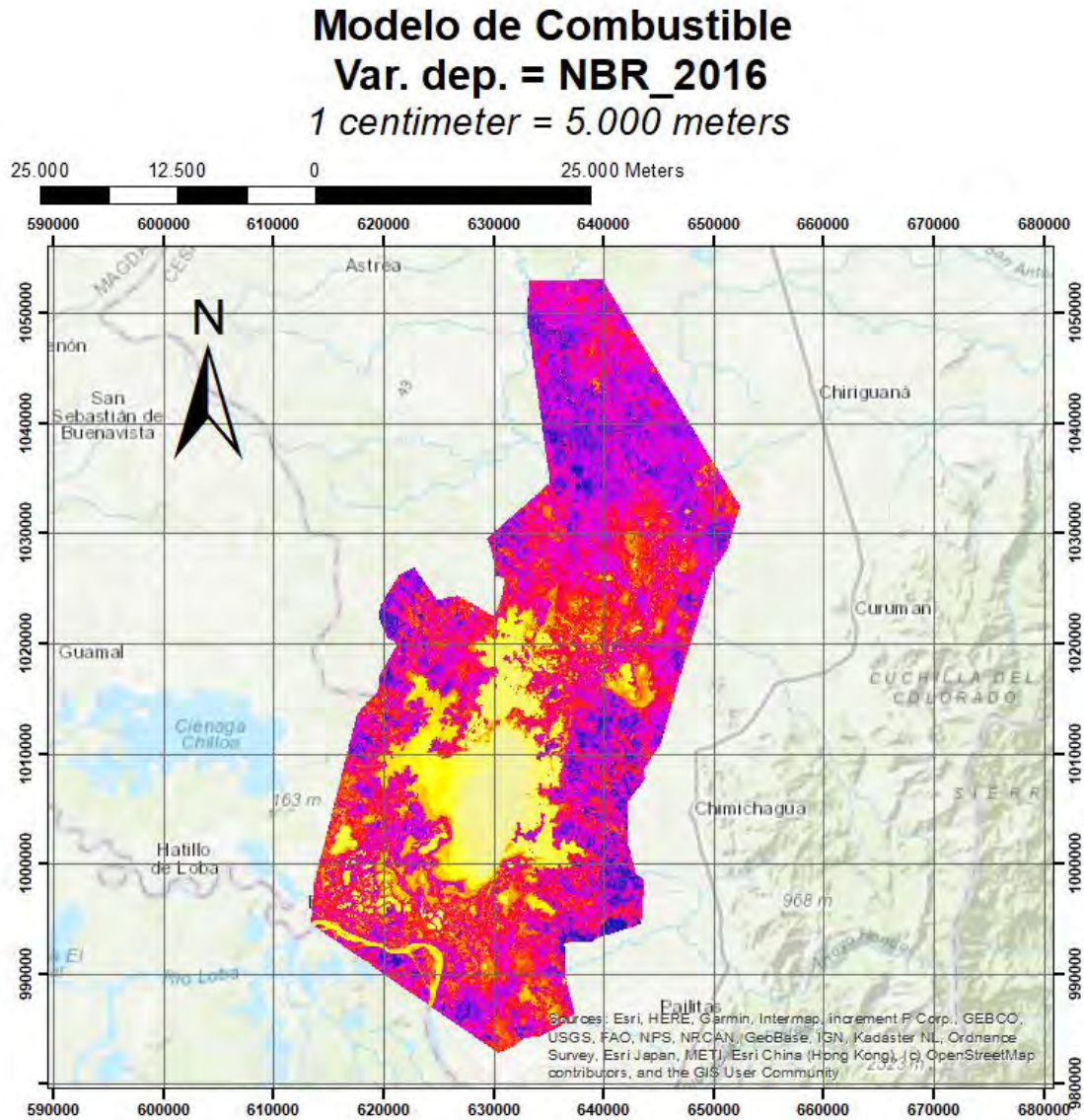
$$NBR_{2018} = 0,14694 + 16236,71 * NDVI_{2018} - 10826,11 * SAVI_{2018} + 2,6825 * ARVI_{2018} + 0,32604 * GCI_{2018}$$

$$NBR_{2019} = 0,00729 + 0,8459 * ARVI_{2019}$$

$$NBR_{2020} = 0,0935 + 0,96857 * ARVI_{2020} - 0,10176 * GCI_{2020}$$

Si se lleva al ArcGIS estas ecuaciones y se utiliza el álgebra de mapas como una herramienta para relacionar los valores de los archivos raster para cada una de las variables implicadas, entonces, se tendría el valor del Índice de Calcinación Normalizado – NBR así:

Figura 46. Modelo de Combustible para el Año 2016




Leyenda

Model_2016

Value

High : 0,303573



Low : -0,0121219

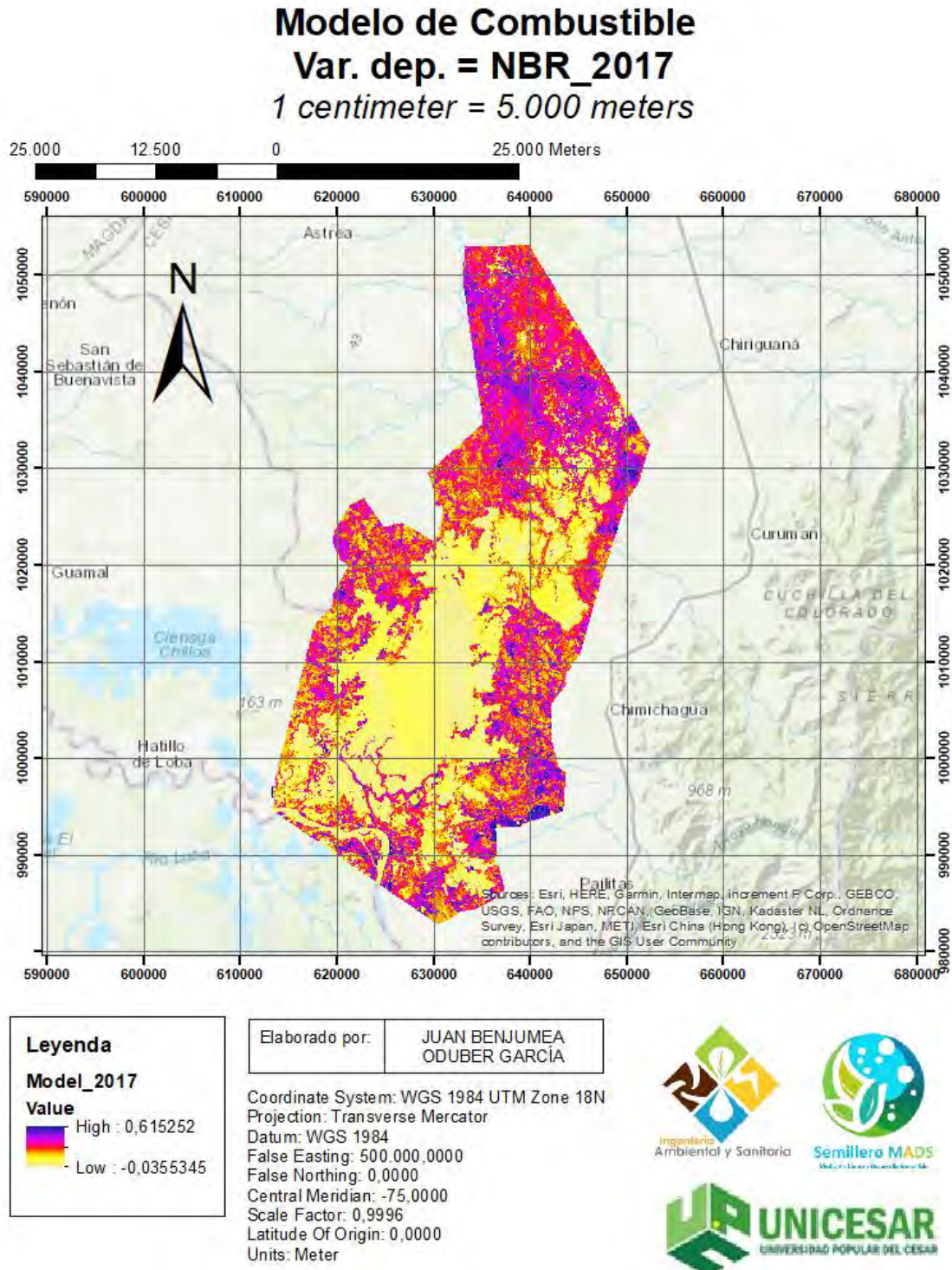
Elaborado por: **JUAN BENJUMEA
ODUBER GARCÍA**

Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 18N
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984
False Easting: 500.000.0000
False Northing: 0,0000
Central Meridian: -75,0000
Scale Factor: 0,9996
Latitude Of Origin: 0,0000
Units: Meter



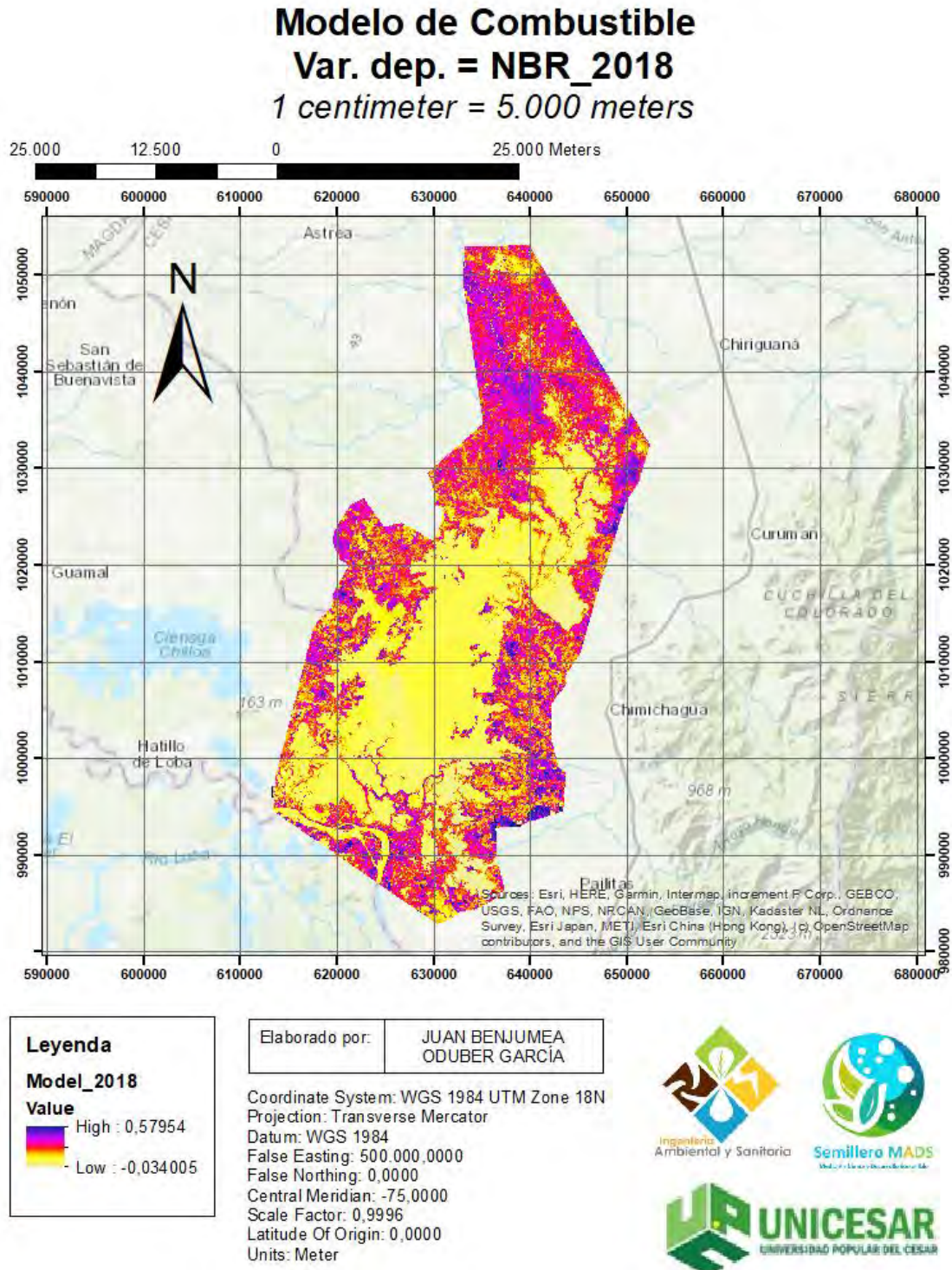
Nota: Elaborado por los Autores (2023) a partir del Software ArcGIS empleando imágenes satelitales del Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L2 obtenido del EarthData del USGS (2023).

Figura 47. Modelo de Combustible para el Año 2017



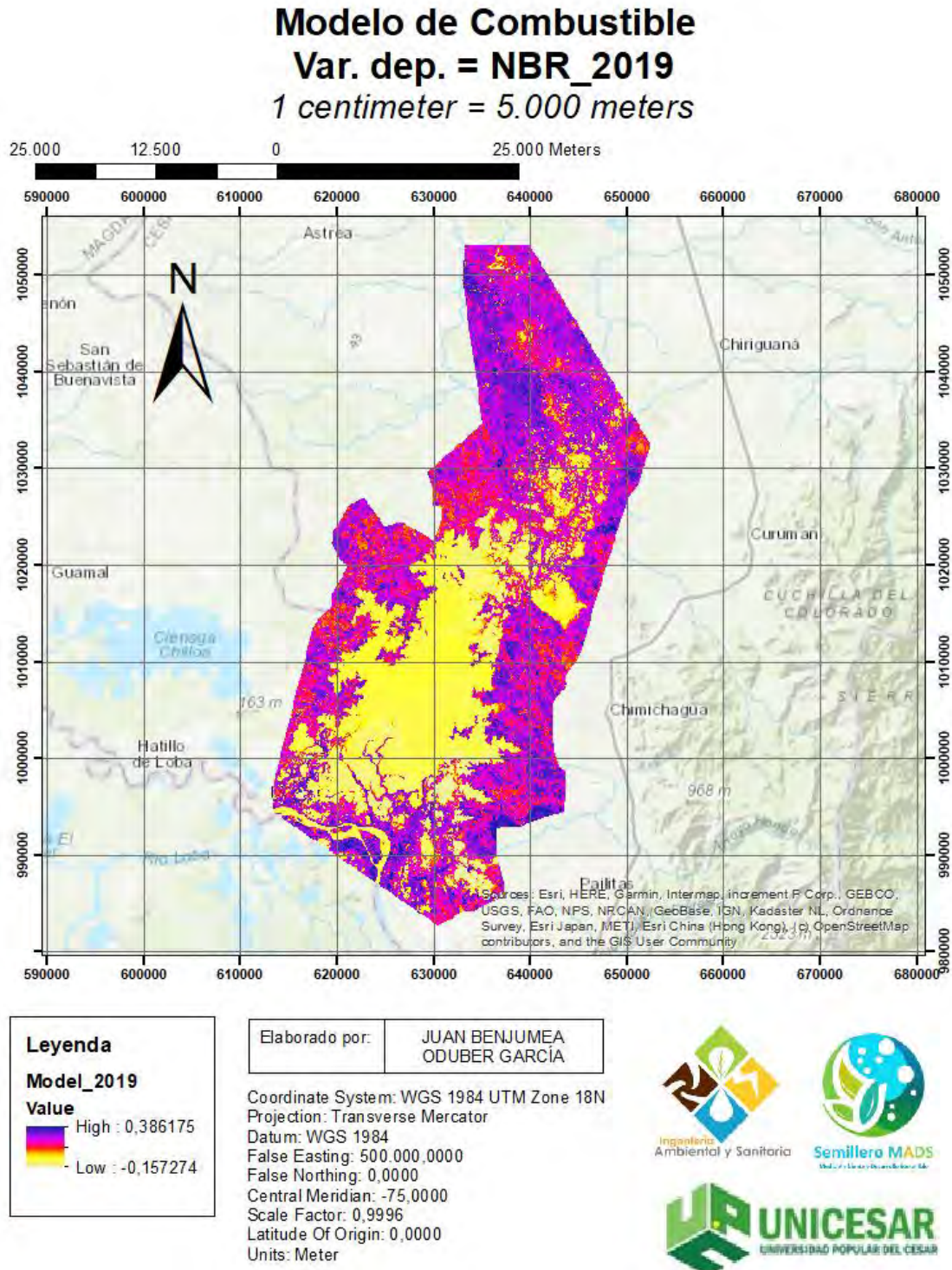
Nota: Elaborado por los Autores (2023) a partir del Software ArcGIS empleando imágenes satelitales del Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L2 obtenido del EarthData del USGS (2023).

Figura 48. Modelo de Combustible para el Año 2018



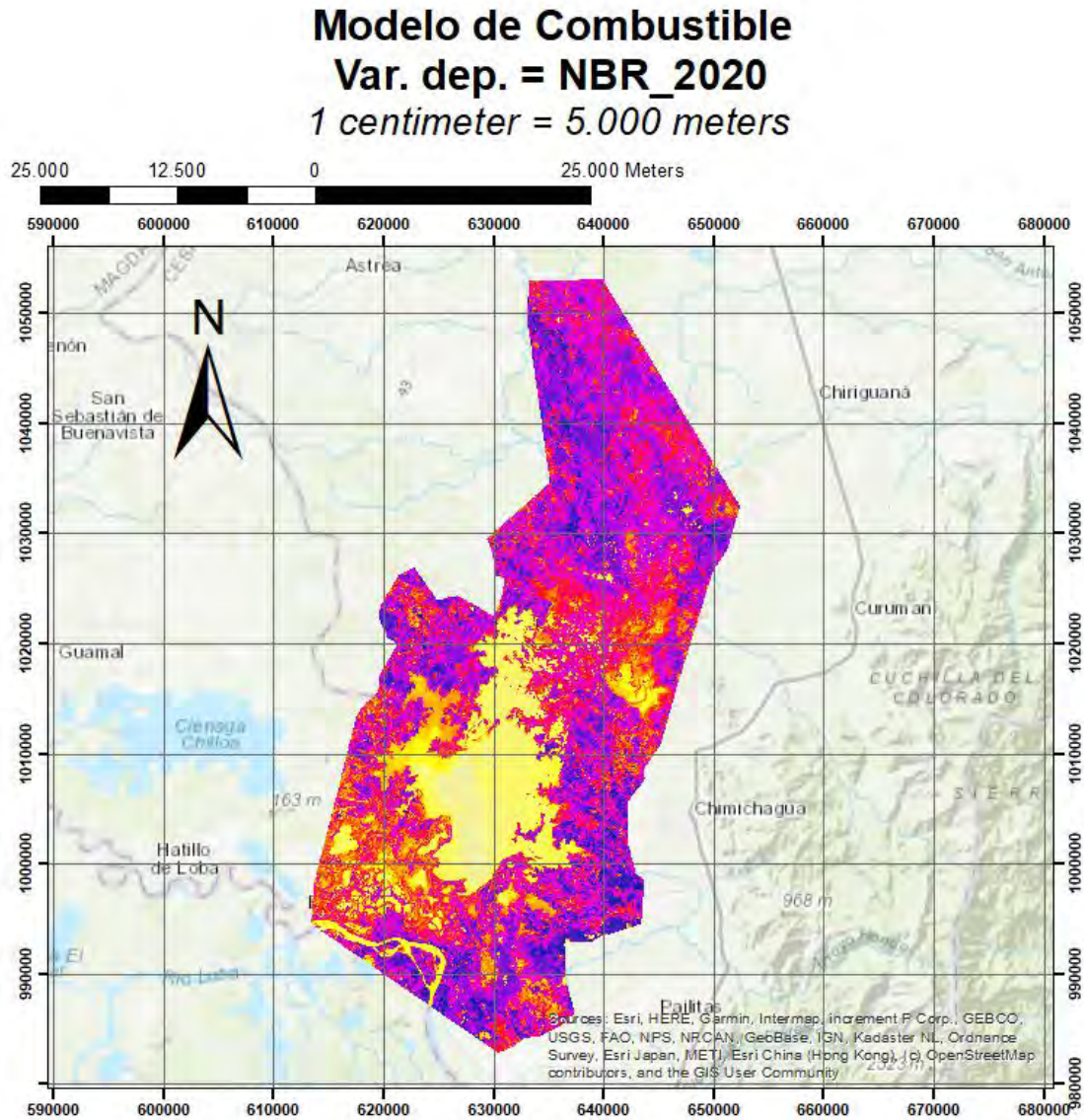
Nota: Elaborado por los Autores (2023) a partir del Software ArcGIS empleando imágenes satelitales del Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L2 obtenido del EarthData del USGS (2023).



Figura 49. Modelo de Combustible para el Año 2019



Nota: Elaborado por los Autores (2023) a partir del Software ArcGIS empleando imágenes satelitales del Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L2 obtenido del EarthData del USGS (2023).

Figura 50. Modelo de Combustible para el Año 2020



Leyenda	
Model_2020	
Value	
	High : 0,253185
	Low : 0,00891749

Elaborado por: **JUAN BENJUMEA
ODUBER GARCÍA**

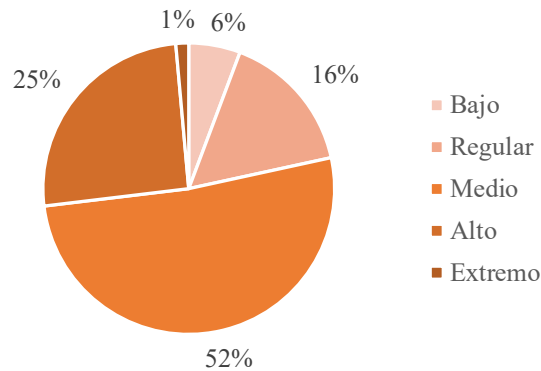
Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 18N
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984
False Easting: 500.000.0000
False Northing: 0,0000
Central Meridian: -75,0000
Scale Factor: 0,9996
Latitude Of Origin: 0,0000
Units: Meter



Nota: Elaborado por los Autores (2023) a partir del Software ArcGIS empleando imágenes satelitales del Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L2 obtenido del EarthData del USGS (2023).

Conforme a esto, cada uno de los modelos fueron categorizados y llevados a análisis en cinco categorías de riesgo, tal como se presenta para el año 2016 en la siguiente figura:

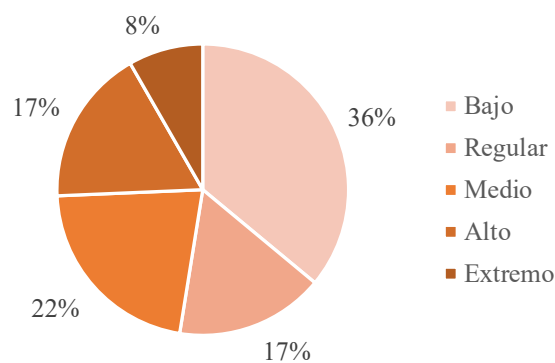
Figura 51. Clasificación del Porcentaje de Área de Riesgo Categorizada para el año 2016



Nota: Elaborado por los Autores (2023)

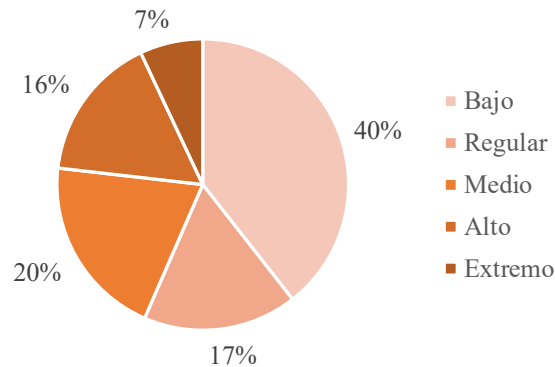
Tal como se aprecia, para el año 2016, el riesgo por producción de incendio forestal era medio en un alto porcentaje (52%), con una tendencia a avanzar a un riesgo alto (ya que este es el segundo valor más elevado (25%). Considerando que en este año solamente fueron condiciones atmosféricas las que pudieran generar o producir incendios.

Figura 52. Clasificación del Porcentaje de Área de Riesgo Categorizada para el año 2017



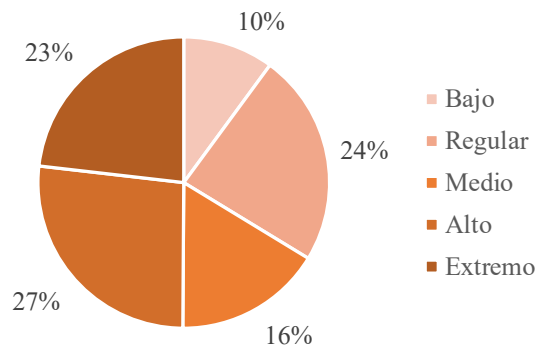
Nota: Elaborado por los Autores (2023)

En el año 2017, el riesgo por posible calcinación era mayoritariamente bajo con un 36%, con una pronunciada tendencia a ser medio, puesto que esta categoría también tiene el otro valor porcentual. Para este año era tendencial conflagraciones por salud vegetativa, condiciones atmosféricas y calcinación en vegetación alta densidad de clorofila.

Figura 53. Clasificación del Porcentaje de Área de Riesgo Categorizada para el año 2018


Nota: Elaborado por los Autores (2023)

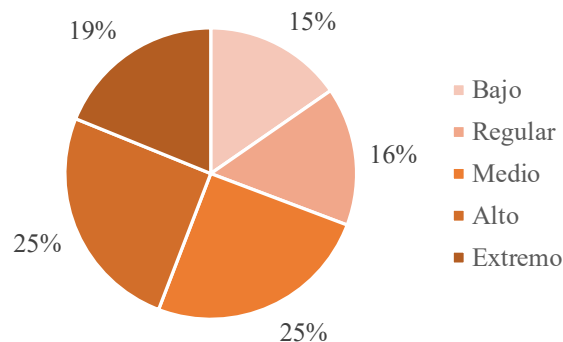
La clasificación porcentual para el año 2018 fue similar que la del 2017, pero con mayor valor en las categorías más adecuadas (con riesgo bajo y regular). Para este año se tenía un buen balance, ya que se veían implicados todos los indicadores y en especial el NDVI, el cual no se implica en ningún otro modelo.

Figura 54. Clasificación del Porcentaje de Área de Riesgo Categorizada para el año 2019


Nota: Elaborado por los Autores (2023)

Para el año 2019, el valor del riesgo era mayoritariamente alto y con tendencia a extremo, lo que implica una situación vegetativa que podría transmitir fácilmente conflagraciones, aunque estas dos categorías significaban un 50% del total, puesto que el otro 50% se distribuye en las categorías más bajas y deseables para este ecosistema.

Figura 55. Clasificación del Porcentaje de Área de Riesgo Categorizada para el año 2020



Nota: Elaborado por los Autores (2023)

Por último, para el año 2020 se tuvo un balance similar al año 2019, pero con una tendencia marcada entre medio y alto, teniendo un 50% del riesgo, más, sin embargo, un 19% aporta al valor extremo. Es de recordar que esta categoría implica los indicadores ARVI y GCI.

En resumidas cuentas, cuando los modelos matemáticos implican indicadores como el SAVI o el NDVI son modelos que no explican bien la calcinación normalizada. En cambio, cuando se evalúa el ARVI y el GCI se tienen buenos resultados que explican la calcinación normalizada.

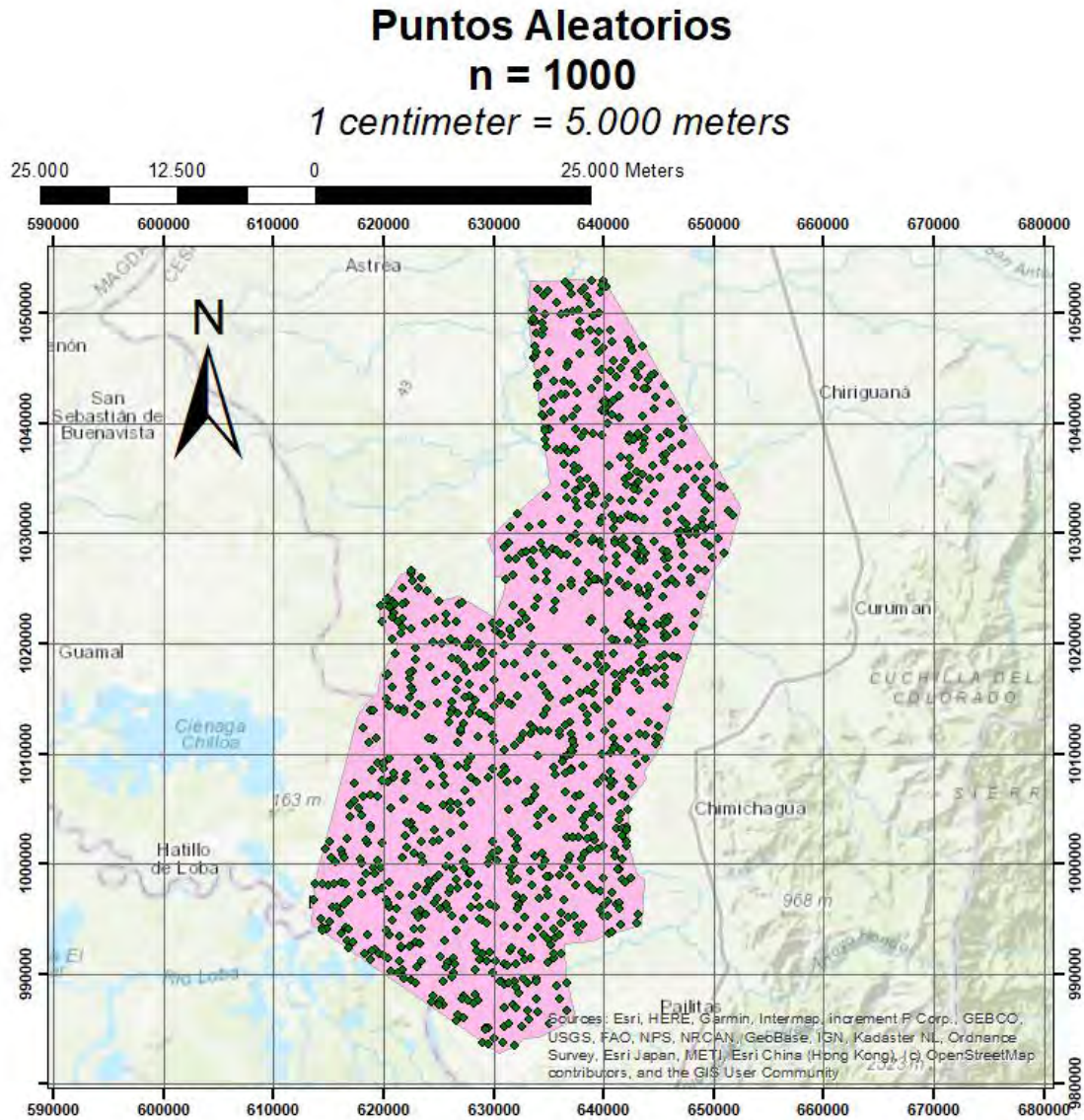
6.3. ZONIFICACIÓN DEL MODELO DE COMBUSTIBLE MEDIANTE LA CORRELACIÓN CON EL ÍNDICE DE CALCINACIÓN NORMALIZADA (NBR) PARA LA PROYECCIÓN ESTÁTICA DE FOCOS INCENDIARIOS MEDIANTE SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICO PARA EL COMPLEJO CENAGOSO DE ZAPATOSA

6.3.1. Representación Gráfica De Indicadores

Finalmente, para constituir el modelo definitivo, se considerará el promedio de los valores de los raster aplicables y estadísticamente evaluados y significativamente validados a un intervalo de confianza del 95% y utilizando nuevamente, empleando el Álgebra de Mapas de ArcGIS.

La representación multianual del NDVI, SAVI, ARVI y GCI, adecuados para la construcción de un modelo de combustible se hace con una nueva aleatorización de puntos, para diferenciar de la media y desviación estándar:

Figura 56. Puntos Aleatorios para la Comprobación Final del Modelo



Elaborado por: **JUAN BENJUMEA
ODUBER GARCÍA**

Leyenda

- ◆ Random_Points_1
- CCZ_Poligono

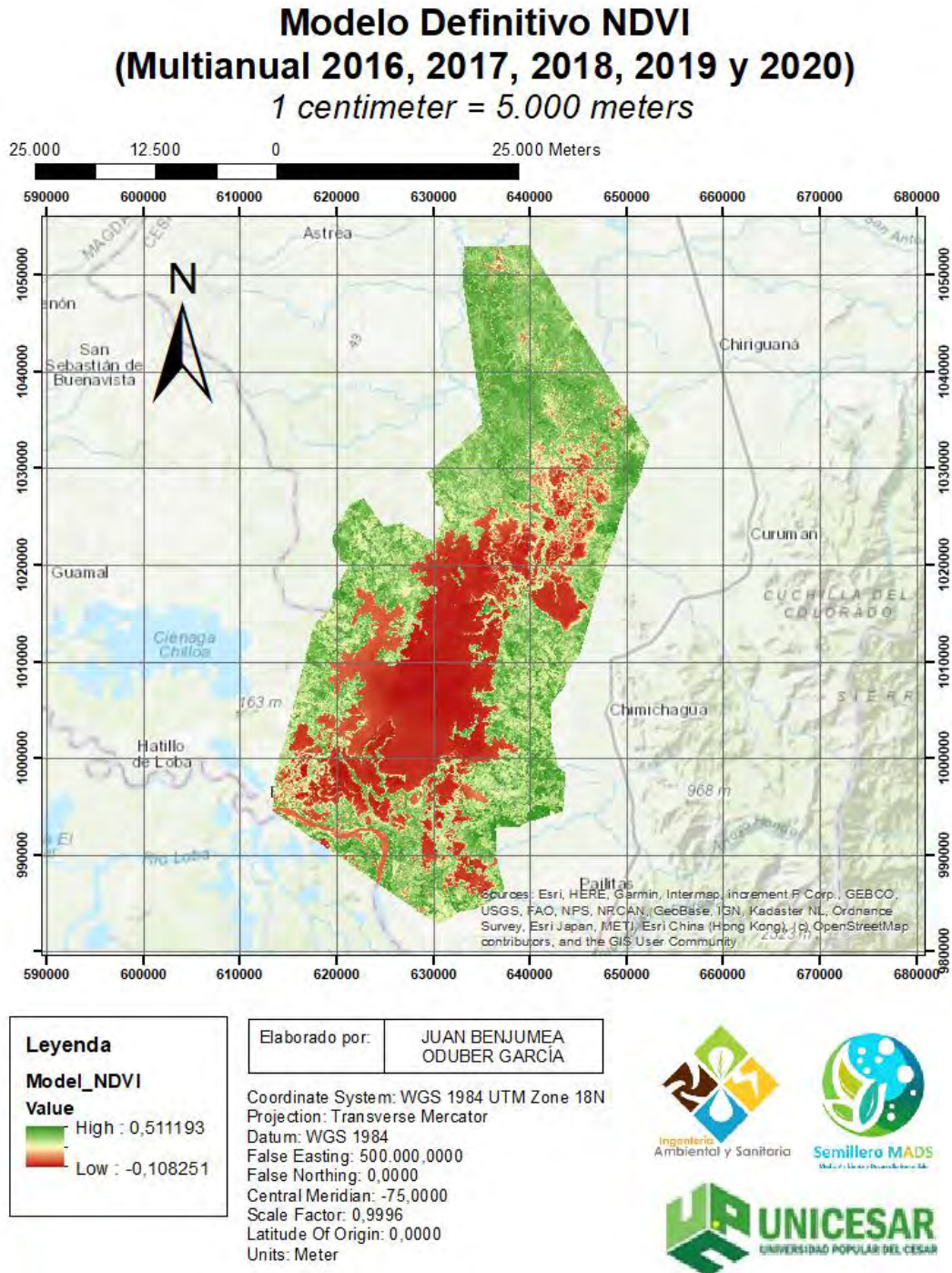
Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 18N
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984
False Easting: 500,000,000
False Northing: 0,0000
Central Meridian: -75,0000
Scale Factor: 0,9996
Latitude Of Origin: 0,0000
Units: Meter



Nota: Elaborado por los Autores (2023) a partir del Software ArcGIS

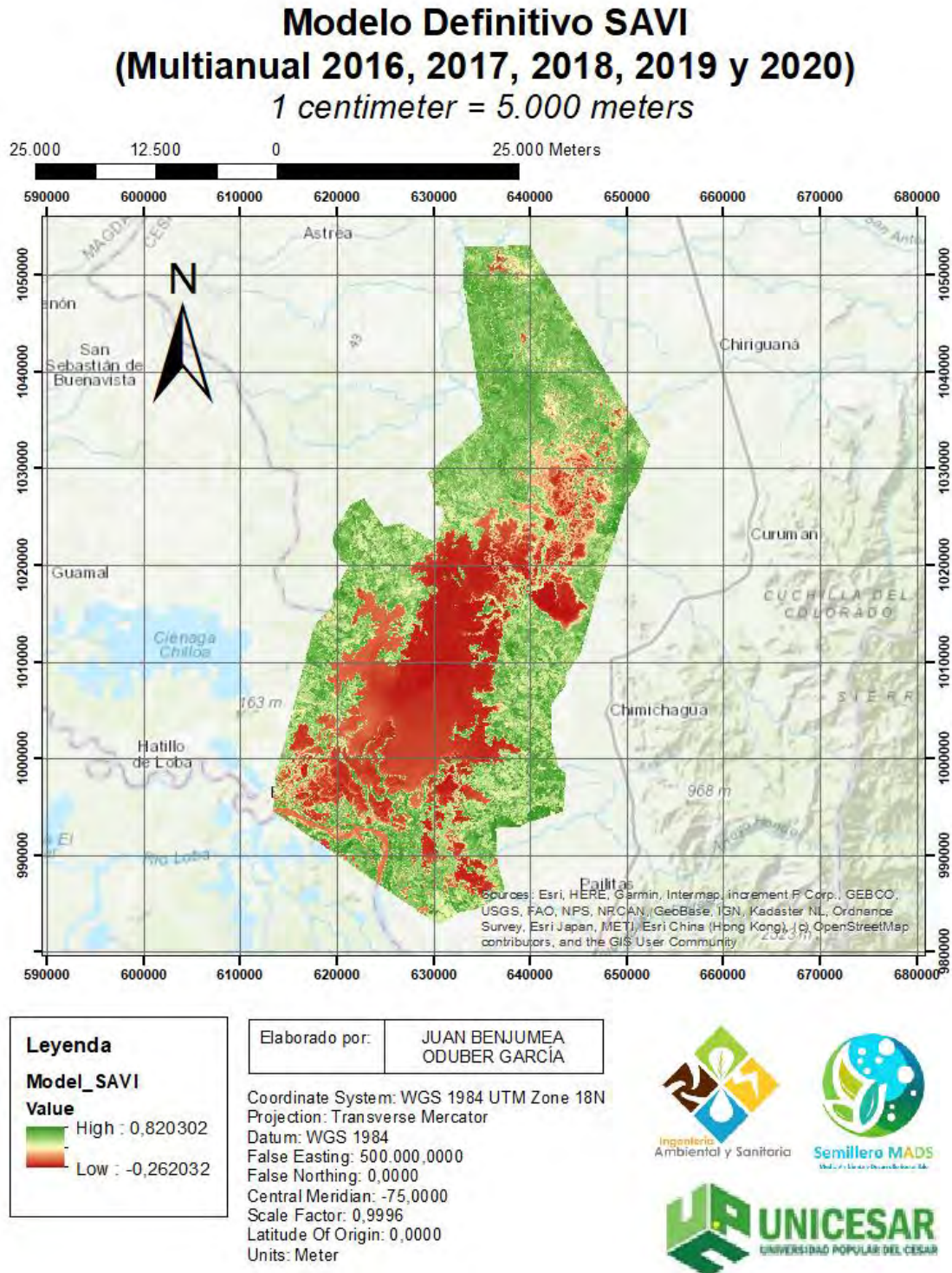
En este apartado se representan los modelos multianuales:

Figura 57. Modelo Estadísticamente Significativo Multianual Indicador NDVI



Nota: Elaborado por los Autores (2023) a partir del Software ArcGIS empleando imágenes satelitales del Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L2 obtenido del EarthData del USGS (2023).

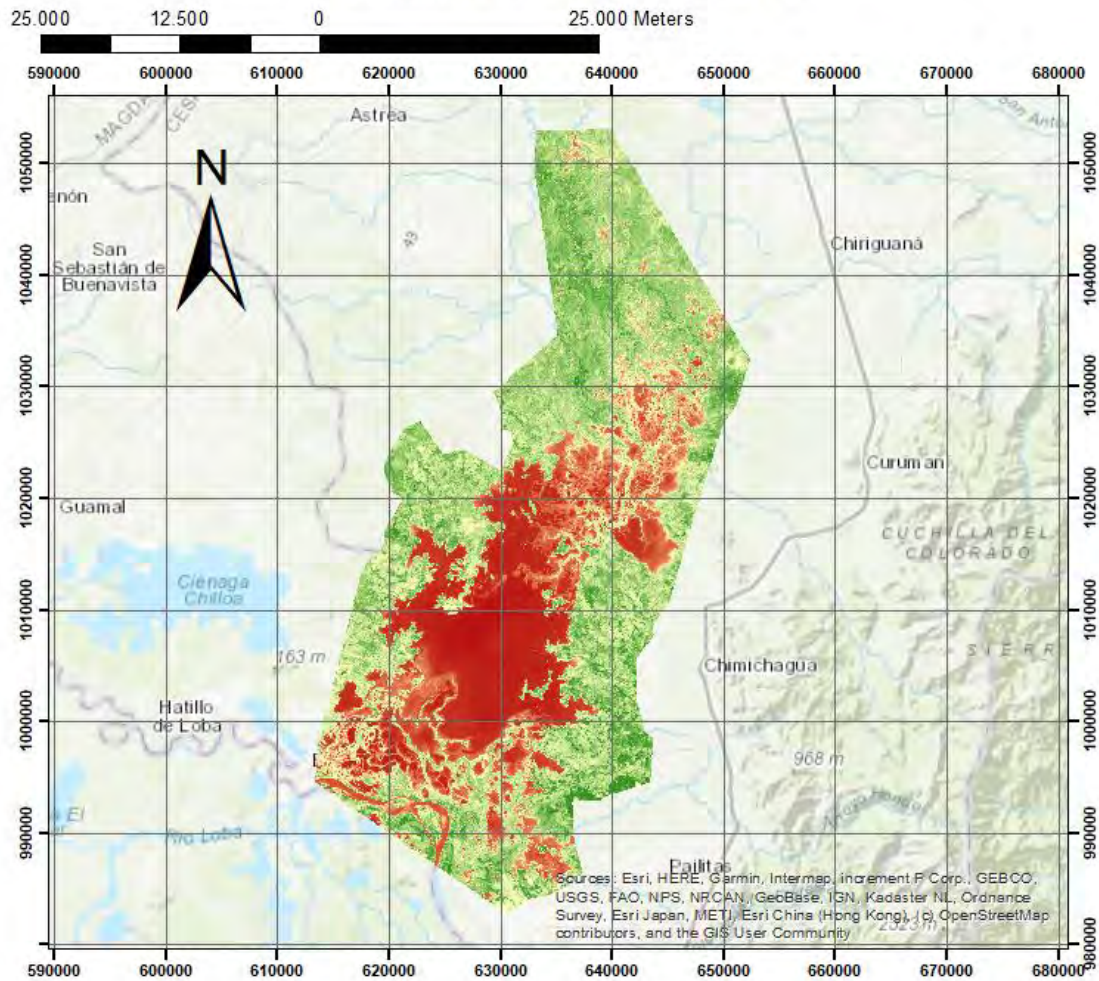
Figura 58. Modelo Estadísticamente Significativo Multianual Indicador SAVI



Nota: Elaborado por los Autores (2023) a partir del Software ArcGIS empleando imágenes satelitales del Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L2 obtenido del EarthData del USGS (2023).

Figura 60. Modelo Estadísticamente Significativo Multianual Indicador GCI

Modelo Definitivo GCI (Multianual 2016, 2017, 2018, 2019 y 2020) 1 centimeter = 5.000 meters



Leyenda	
Model_GCI	
Value	
	High : 1,73359
	Low : -0,200172

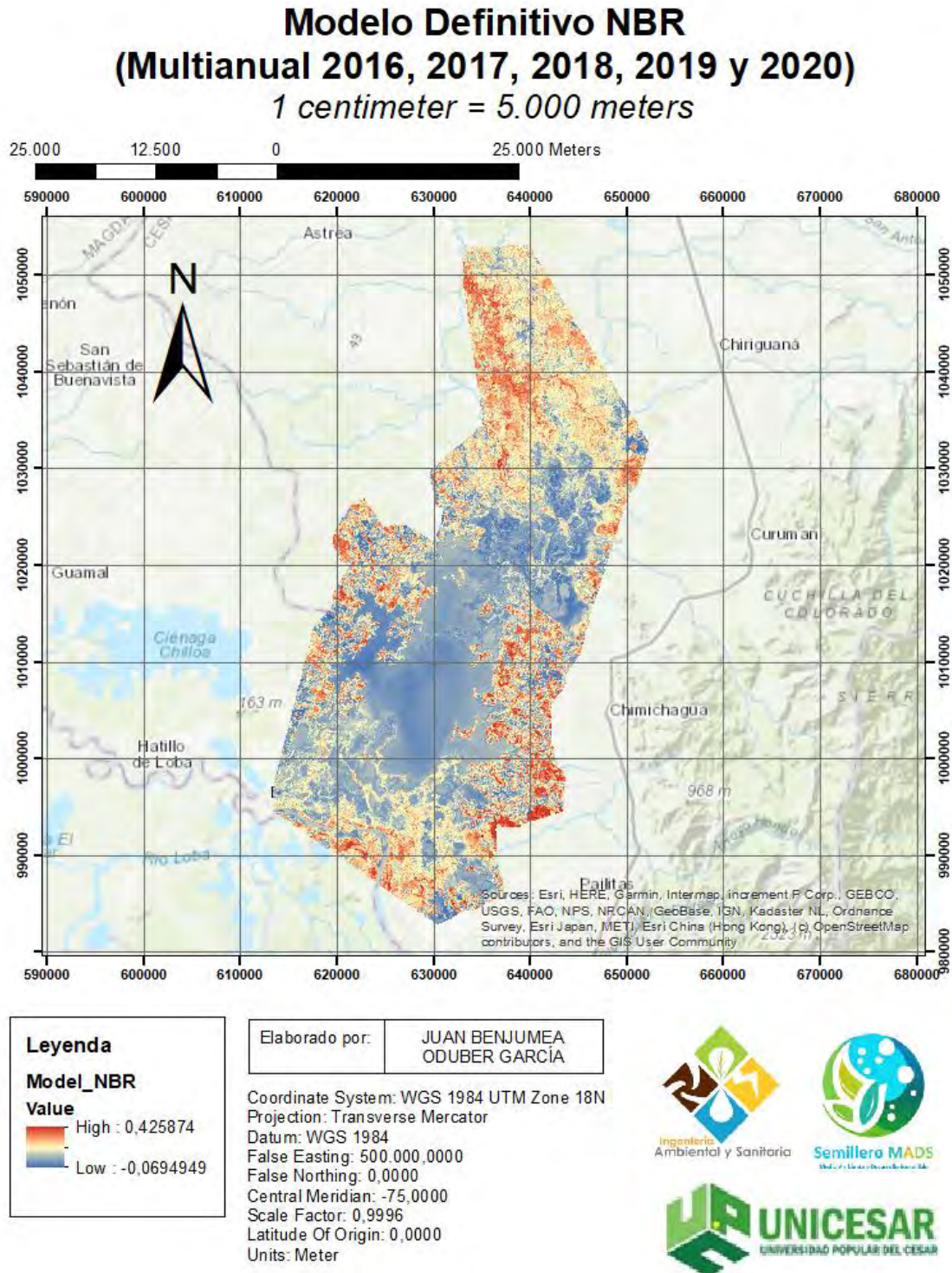
Elaborado por: **JUAN BENJUMEA
ODUBER GARCÍA**

Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 18N
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984
False Easting: 500.000.0000
False Northing: 0,0000
Central Meridian: -75,0000
Scale Factor: 0,9996
Latitude Of Origin: 0,0000
Units: Meter



Nota: Elaborado por los Autores (2023) a partir del Software ArcGIS empleando imágenes satelitales del Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L2 obtenido del EarthData del USGS (2023).

Figura 61. Modelo Estadísticamente Significativo Multianual Indicador NBR

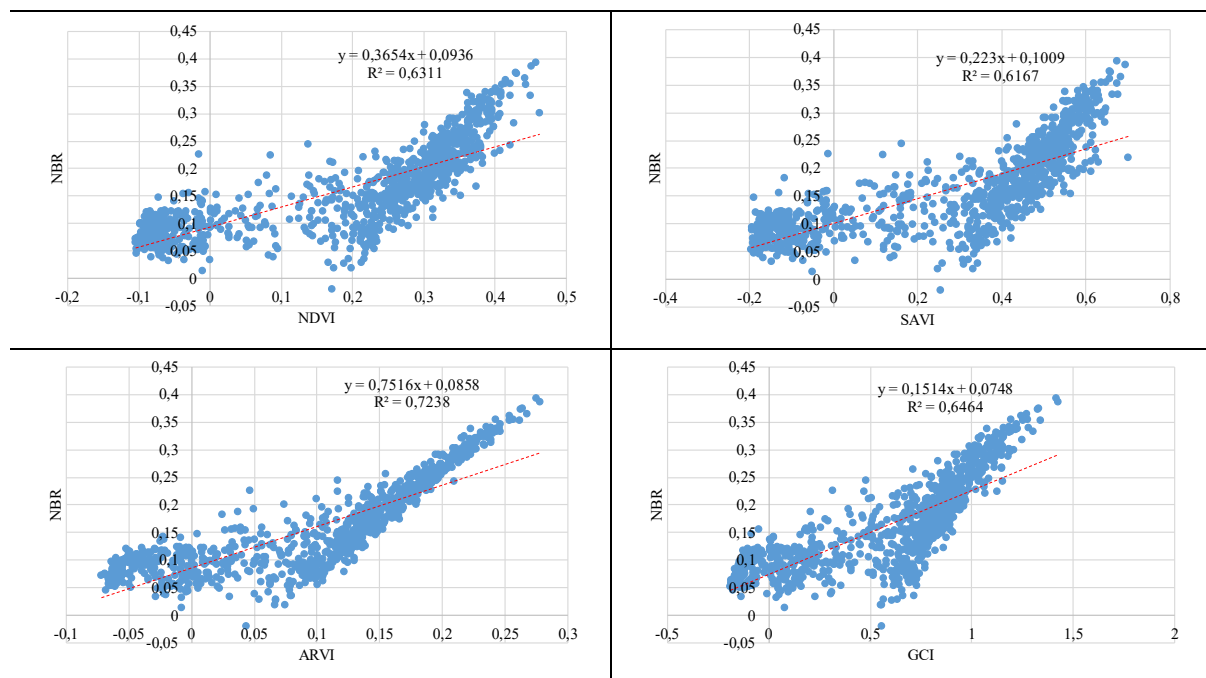


Nota: Elaborado por los Autores (2023) a partir del Software ArcGIS empleando imágenes satelitales del Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L2 obtenido del EarthData del USGS (2023).

6.3.2. Representación Gráfica Del NBR.

La extracción de la información en los puntos aleatorios ($n = 1000$) a partir de los modelos NDVI, SAVI, ARVI, GCI y NBR, consigue que la distribución de los puntos mantenga un patrón o tendencia lineal muy apropiada, tal como se observa en la dispersión de los datos de la tabla continua:

Tabla 12. Dispersión de los Datos para la Constitución del Modelo Definitivo



Nota: Elaborado por los Autores (2023)

Como se aprecia, las tendencias generan valores de coeficiente de correlación superior a 60%, lo que indica que la información geográfica entre cada una de las variables versus el NBR es moderadamente correlacionada, lo que implica una muy buena pero no excelente conformación de un posible modelo matemático.

Para ello, entonces se procede nuevamente a realizar la regresión lineal múltiple mediante el método de mínimos cuadrados ordinarios entre los 1000 datos extraídos desde ArcMAP y que conformaron la nube de dispersión de los gráficos anteriores. Considerando esto se procede a realizar también el Análisis de Varianza – ANOVA.

La primera iteración incluye todas las variables, sin embargo, se tuvo que llevar a cabo una segunda iteración, puesto que en la primera se obtuvo no significancia con los indicadores NDVI y SAVI ($p\text{-value} > 0,05$).

Los resultados de las iteraciones se presentan a continuación:

Figura 62. Primera Iteración del Modelo Final.

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0,866479119
Coefficiente de determinación R ²	0,750786064
R ² ajustado	0,749783191
Error típico	0,039479458
Observaciones	999

ANÁLISIS DE VARIANZA					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	4	4,667374138	1,166843534	748,6352485	4,6718E-298
Residuos	994	1,5492758	0,001558628		
Total	998	6,216649937			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad
Intercepción	0,099586192	0,002995774	33,24222857	1,5784E-163
Model_NDVI	-0,132524989	0,051452191	-2,575691872	0,010147464
Model_SAVI	0,022325954	0,023170014	0,963571017	0,335495396
Model_ARVI	1,499756853	0,073865717	20,30382864	6,07009E-77
Model_GCI	-0,123294375	0,019996085	-6,165925811	1,01759E-09

Nota: Elaborado por los Autores (2023) utilizando el método de Mínimos Cuadrados Ordinarios (Neter, Kutner, Nachtsheim, & Wasserman, 1996).

Figura 63. Segunda Iteración del Modelo Final.

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0,865399755
Coefficiente de determinación R ²	0,748916736
R ² ajustado	0,748412553
Error típico	0,03958744
Observaciones	999

ANÁLISIS DE VARIANZA					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	4,655753181	2,32787659	1485,405793	1,286E-299
Residuos	996	1,560896756	0,001567165		
Total	998	6,216649937			

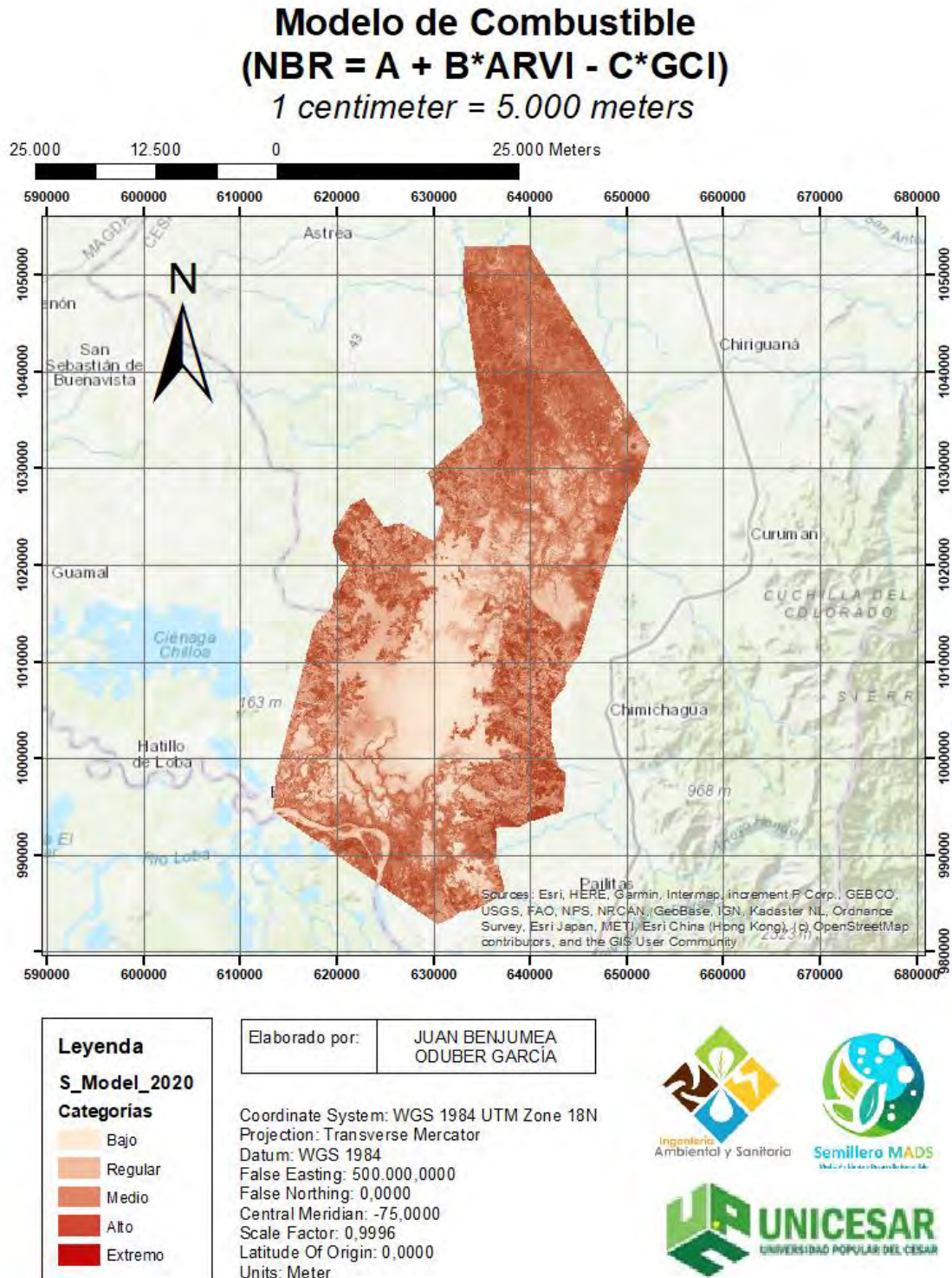
	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad
Intercepción	0,102637539	0,002518884	40,74722979	2,2112E-214
Model_ARVI	1,462073476	0,072489599	20,16942419	3,97042E-76
Model_GCI	-0,154383924	0,015454341	-9,989680137	1,84919E-22

Nota: Elaborado por los Autores (2023) utilizando el método de Mínimos Cuadrados Ordinarios (Neter, Kutner, Nachtsheim, & Wasserman, 1996).

El modelo matemático con ANOVA significativo se conformó y represento geográficamente a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{Modelo} = 0,10263 + 1,46027 * \text{Model}_{\text{ARVI}} - 0,15438 * \text{Model}_{\text{GCI}}$$

Figura 64. Modelo de Combustible



Nota: Elaborado por los Autores (2023) a partir del Software ArcGIS empleando imágenes satelitales del Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L2 obtenido del EarthData del USGS (2023).

7. CONCLUSIONES

La presente investigación inicia con la determinación de indicadores para la obtención del estado de salud vegetativa y ecosistémica del Complejo Cenagoso de Zapatosa, utilizando un Sistema de Información Geográfico. Para llevar a cabo esta labor, se recurrió al uso de imágenes satelitales del Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L2, de la Agencia Espacial de los Estados Unidos (NASA). Esta tarea de recolección de datos, no exenta de su respectiva complejidad, fue realizada a través del EarthExplorer del USGS, bajo un protocolo establecido que garantiza la adquisición de información pertinente y de calidad. Se seleccionaron cinco productos correspondientes a los años 2016 hasta 2020. Este procedimiento involucra la aplicación de filtros, establecimiento de parámetros de búsqueda, verificación de la calidad de la imagen y otros elementos que contribuyen a la relevancia de la información obtenida.

A partir de la obtención de imágenes satelitales del satélite Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L2 se ha logrado un importante primer paso en la dirección de determinar indicadores para la obtención del estado de salud vegetativa y ecosistémica del Complejo Cenagoso de Zapatosa. Esta información, que abarca un período de cinco años, ha proporcionado una visión detallada y única de la zona de estudio, permitiendo el análisis de variables ecosistémicas y vegetativas de gran relevancia. Sin embargo, cabe mencionar que cada imagen, rica en información geográfica, requiere de hardware especializado y un manejo cuidadoso debido a su tamaño y complejidad. En términos de bandas espectrales, cada una tiene su propia importancia y aplicación, y es esta diversidad la que permite una visión holística del estado de la vegetación y del ecosistema en su conjunto. En suma, el uso de esta tecnología satelital de la NASA ha demostrado ser una herramienta valiosa y esencial en este trabajo, siendo el cimiento para las conclusiones y futuras investigaciones en torno a esta materia.

El análisis de los índices de vegetación como NDVI, SAVI, ARVI, GCI y el índice de severidad de calcinación NBR en el Complejo Cenagoso de Zapatosa a lo largo de los años puede proporcionar una visión valiosa sobre la salud y condiciones de la vegetación, así como la severidad de los eventos de incendio en la zona. La variabilidad de estos índices, tanto en sus valores bajos como altos, puede ayudar a entender mejor los factores y condiciones que influyen en estos cambios, incluyendo las condiciones climáticas, la disponibilidad de agua, la

calidad del suelo, los cambios en la cobertura vegetal, la presencia de perturbaciones naturales o antropogénicas, y las prácticas de manejo de la tierra.

Es fundamental resaltar la importancia de la implementación de prácticas de manejo sostenible de la tierra, las medidas de prevención y control de incendios, así como la conservación de la vegetación y los humedales para mantener o mejorar la salud de la vegetación y mitigar los efectos negativos de los incendios en estas áreas. A medida que continuamos enfrentándonos a los retos planteados por el cambio climático y las actividades humanas, estos índices y su análisis pueden ser herramientas cruciales para la gestión y conservación efectiva de nuestros ecosistemas, permitiendo la toma de decisiones basada en datos para una mejor adaptación y resiliencia frente a estos desafíos.

En relación con las conclusiones del segundo objetivo específico de tu proyecto de grado, se ha demostrado que el uso de un Sistema de Información Geográfico (SIG) para construir un modelo de combustible basado en indicadores de estado de salud vegetativa y ecosistémica ha sido una estrategia efectiva. Esto se refleja en la relación significativa encontrada entre el Índice de Calcinación Normalizado (NBR) y los indicadores de vegetación como el GCI, ARVI, SAVI y el NDVI.

A lo largo del periodo de estudio de cinco años (2016-2020), se observaron variaciones en la relación entre el NBR y estos indicadores. En algunos casos, el NBR explicó bien ciertos indicadores, como el ARVI, mientras que en otros años no pudo explicar ciertos indicadores como el NDVI, SAVI y GCI. Es particularmente interesante el caso del año 2018, donde todos los indicadores tuvieron un p-value inferior a 0,05, sugiriendo que el NBR explicaría adecuadamente una situación de consumo vegetal por combustión.

Los análisis estadísticos realizados, como la regresión múltiple y el Análisis de Varianza (ANOVA), mostraron que las relaciones encontradas son estadísticamente significativas, reforzando así la utilidad de este enfoque para entender la dinámica de los incendios y la vegetación en el Complejo Cenagoso de Zapatosa. A través del uso de las ecuaciones de regresión derivadas, se pudo categorizar el riesgo de incendio en cinco niveles para cada año. Los resultados muestran variaciones anuales en el riesgo de incendio, lo que indica la importancia de considerar factores temporales en la gestión de incendios forestales.

Como conclusión, el análisis exhaustivo de datos y la interpretación precisa del modelo matemático finalmente seleccionado demuestran su relevancia en la zonificación del modelo de combustible en relación con el Índice de Calcinación Normalizada (NBR). El modelo, que utiliza variables geográficas que mantienen una correlación moderada con el NBR, es una herramienta eficaz para la proyección estática de los focos incendiarios en el Complejo Cenagoso de Zapatosa. La inclusión de la variable ARVI y la exclusión de las variables NDVI y SAVI, que no mostraron significación, refuerza la robustez del modelo y la validez de su aplicación en el Sistema de Información Geográfico.

Además, el método de mínimos cuadrados ordinarios y el Análisis de Varianza (ANOVA) empleados en el análisis proporcionan una base sólida para la precisión del modelo, como se evidencia por el intervalo de confianza del 95%. Esto establece un nuevo precedente para futuras investigaciones en este campo, permitiendo una mayor comprensión de los patrones de incendios y la correlación con las variables geográficas. Es esencial señalar que aunque la correlación es moderada y no excelente, el modelo resultante sigue siendo útil y relevante para la investigación. Este proyecto de grado, por tanto, proporciona una contribución importante a la identificación y prevención de los focos incendiarios en el Complejo Cenagoso de Zapatosa, abriendo el camino para futuras mejoras y refinamientos del modelo.



8. RECOMENDACIONES

Dada la efectividad y relevancia del modelo propuesto en el análisis y proyección de los focos incendiarios, se recomienda que futuras investigaciones y trabajos en este campo procuren la obtención de imágenes satelitales con mayor frecuencia y resolución. Estos conjuntos de datos adicionales permitirían mejorar la precisión y eficacia del modelo al proporcionar un espectro más amplio de información geográfica para el análisis. La exploración de diferentes plataformas y tipos de imágenes satelitales, como las de alta resolución espacial, espectral y temporal, podría revelar patrones y correlaciones aún más precisos con el NBR.

Además, se recomienda realizar un análisis más profundo de tratamiento y adecuación de los datos. Este análisis podría implicar el uso de técnicas avanzadas de preprocesamiento y postprocesamiento de imágenes, así como la adopción de enfoques más sofisticados de interpolación y análisis espaciales multivariante. Asimismo, sería conveniente realizar análisis de sensibilidad para evaluar la robustez del modelo a variaciones en los datos de entrada. Estas recomendaciones, junto con la realización de estudios de validación cruzada y la aplicación de técnicas estadísticas adicionales, podrían mejorar aún más la fiabilidad y utilidad del modelo.

A pesar de la correlación moderada observada con las variables geográficas incluidas en el modelo, se recomienda la inclusión y evaluación de otros indicadores en futuros estudios. Estos podrían ser otros índices de vegetación o incluso variables derivadas de sensores remotos, como la temperatura de la superficie, la humedad del suelo o la biomasa seca. La inclusión de estas variables adicionales podría proporcionar un modelo más completo y preciso, y permitir una comprensión más profunda de los factores que influyen en los focos de incendio en el Complejo Cenagoso de Zapatosa.

Con el fin de proporcionar un enfoque más exhaustivo y robusto para el análisis de las variables en cuestión, es recomendable considerar el uso de una serie de modelos matemáticos que vayan más allá de las relaciones lineales. Los modelos no lineales, como los logarítmicos, polinómicos, exponenciales o de potencias, pueden capturar relaciones más complejas entre las variables y proporcionar una representación más precisa del sistema estudiado.

Para el análisis y verificación de estos modelos, se podrían usar métodos estadísticos de ajuste y validación, como el error cuadrático medio, el coeficiente de determinación ajustado (R cuadrado ajustado) y los intervalos de confianza.

Respecto al software empleado, hay otros que se pueden utilizar; numerosas herramientas matemáticas y estadísticas capaces de realizar estos análisis avanzados. R y Python son dos lenguajes de programación ampliamente utilizados en la ciencia de datos que ofrecen una gran flexibilidad y potencia para realizar análisis estadísticos y ajuste de modelos. Además, disponen de extensas librerías para trabajar con datos geoespaciales. También se podrían considerar programas estadísticos más especializados como STATA o SPSS, los cuales ofrecen interfaces más amigables para usuarios no programadores.

Para una representación dinámica de la información, los softwares de simulación pueden ser una opción para considerar. Estos programas, como MATLAB, Simulink o incluso extensiones de ArcGIS como CityEngine, permiten a los usuarios modelar y simular sistemas complejos de forma dinámica y visual. Estos pueden ser de gran utilidad para entender y predecir el comportamiento de los focos de incendios en el Complejo Cenagoso de Zapotosa, y permiten interactuar con los modelos para explorar diferentes escenarios y evaluar el impacto de diversas variables.

Además de ArcGIS, otras herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) pueden proporcionar perspectivas adicionales y más detalladas sobre las zonas con mayor probabilidad de ser focos de incendios y su propagación. Por ejemplo, QGIS es un programa SIG de código abierto que proporciona una amplia gama de capacidades para la visualización, el manejo, la edición y el análisis de datos geoespaciales. GRASS GIS, también de código abierto, es otra alternativa que incluye capacidades avanzadas para el modelado geoespacial y la simulación, útiles para la evaluación de modelos matemáticos en este contexto.

Para la validación y evaluación de los modelos, es esencial la implementación de procedimientos post-procesamiento. Estos pueden incluir técnicas de validación cruzada, donde los datos se dividen en grupos para entrenar y probar el modelo, lo que ayuda a evaluar su rendimiento y su capacidad de generalización. En este contexto, sería recomendable también la inclusión de pruebas más complejas, tales como la simulación de Monte Carlo, que puede ayudar a entender la incertidumbre y la variabilidad en los modelos.

Para ello, es conveniente considerar la incorporación de datos históricos de incendios obtenidos de bases de datos globales, como la Global Wildfire Information System (GWIS) de la ESA o el Fire Information for Resource Management System (FIRMS) de la NASA. El uso de estos conjuntos de datos permitirá mejorar la robustez del modelo y proporcionará una perspectiva más precisa sobre la propagación de incendios en el Complejo Cenagoso de Zapatosa.

Los resultados obtenidos en este tipo de proyectos representan un aporte significativo a la ciencia, la ecología y la prevención de desastres naturales, pero para que estos resultados tengan un impacto significativo en la sociedad, es esencial que sean comunicados de manera efectiva y ampliamente reconocidos. Por lo tanto, se recomienda llevar este tipo de estudios a espacios de comunicación y divulgación científica, seminarios, talleres y conferencias internacionales. De esta manera, no solo se promoverán enfoques innovadores para la prevención de incendios y la lucha contra el cambio climático, sino que también se animará a más investigadores y responsables de políticas a aplicar y desarrollar aún más estos métodos.

Para consolidar y expandir el alcance de este trabajo, se sugiere publicar los resultados en revistas científicas revisadas por pares, contribuyendo así al cuerpo de conocimiento existente en este campo. Los hallazgos de la investigación y las metodologías utilizadas pueden proporcionar valiosos puntos de partida para futuros estudios y aplicaciones en diferentes contextos y ecosistemas. Además, la publicación y el acceso abierto de los datos y códigos utilizados en el estudio permitirán que otros investigadores puedan replicar, validar y potencialmente mejorar los métodos utilizados, asegurando que este trabajo contribuya a los esfuerzos globales de conservación y mitigación del cambio climático. Finalmente, este trabajo estará a disposición de quienes deseen replicarlo o adaptarlo a otros ecosistemas estratégicos, contribuyendo así a la construcción colectiva del conocimiento y a la prevención y control de incendios a nivel global.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACHS. (1992). *Prevención de Riesgos en Combate de Incendios Forestales*. Chile:Achs.
- Alonso, A. (2016). *Cartografiado de Combustibles Forestales Mediante Técnicas de Teledetección*. Universidad de La Laguna.
- APA. (2019). *Publication manual of the American Psychological Association*. Washington, DC: American Psychological Association (APA).
- Arenas, J., & Noy, B. (2019). *Análisis de la Severidad de un Incendio en un Relicto de Bosque Seco Tropical en Colombia*. Bogota: Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas.
- ARL SURA. (2017). *Glorasio SURA*. Servicio de Afiliación de Riesgos, Pensiones y Salud SURAMERICANA S.A.
- Barrios, M. (31 de marzo de 2021). *Incendio arrasó con 20 hectáreas de bosque protegido en Chimichagua, Cesar*. Obtenido de Diario Periódico El Heraldo: <https://www.elheraldo.co/cesar/incendio-arraso-con-20-hectareas-de-bosque-protegido-en-chimichagua-cesar-805680>
- BBC News Mundo. (18 de julio de 2022). *Qué son los incendios de sexta generación como los que arrasan ahora el sur de Europa*. Obtenido de BBC Noticias del Mundo: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-62206535>
- Beers, G. &. (2019). *Análisis de severidad de incendios mediante el Índice NBR*. Obtenido de <http://www.gisandbeers.com/analisis-severidad-incendios-indice-nbr/#:~:text=Los%20valores%20del%20%C3%ADndice%20NBR%20pueden%20ser%20trabajados,7%20%3E%200%2C66%3A%20Zonas%20quemadas%20con%20gravedad%20alta>
- Canul, K. (2016). *Índice de Vegetación Ajustada al Suelo (SAVI)*. Obtenido de <https://1library.co/article/%C3%ADndice-de-vegetaci%C3%B3n-ajustada-al-suelo-savi.zk0eggmy#:~:text=CLASIFICACI%C3%93N%20SAVI%20RANGO%20%28V%20alor%20de%20p%C3%ADxel%29%20CLASE%20TONALIDAD,->

%200.9%20Media%20Verde%20claro%20Vegetaci%C3%B3n%20densa%20semih
%C3%B

Capador, Y., Gonzalez, G., & Suarez, P. (2021). Análisis de la Cobertura Vegetal en Incendios Forestales Mediante Indices Espectrales: Cerros Orientales en Bogotá. *Avances: Investigacion en Ingenieria.*

CORPOMAG/UNIMAG. (2017). *Documento Síntesis para la declaratoria del Complejo Cenagoso de la Zapatosa cómo Área Protegida del convenio interadministrativo No. 205 de 2017, celebrado entre la Corporación Autónoma Regional del Magdalena y la Universidad del Magdalena.* Santa Marta, Magdalena, Colombia: Corporación Autónoma Regional del Magdalena.

El Tiempo. (06 de febrero de 2023). *La comunidad internacional se solidariza con Chile por los incendios.* Obtenido de Diario Periódico El Tiempo: <https://www.eltiempo.com/mundo/latinoamerica/la-comunidad-internacional-se-solidariza-con-chile-por-los-incendios-739617>

EMOL. (15 de Abril de 2014). *Infografía: conoce como se propagan y combaten los incendios forestales.* Obtenido de Empresa El Mercurio S.A.P.: : <https://www.emol.com/noticias/nacional/2014/04/15/655486/infografia-conoce-como-se-propagany-combaten-los-incendios-forestales.html>

EOS. (s.f.). *NDVI: qué es y cómo calcularlo.* Obtenido de <https://eos.com/es/make-an-analysis/ndvi/>

ESRI. (s.f.). *Raster Calculator Process.* Obtenido de ESRI: <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/extensions/spatial-analyst/raster-calculator.htm>

Fernández, Ó. (2016). *Estimación de modelos de combustible basada en datos de sensores remotos.* Oviedo (Asturias), España: Universidad de Oviedo.

Gitelson, A., Gritz, Y., & Merzlyak, M. (2003). Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in

higher plant leaves. *J. Plant Physiol*, 160, 271-282. doi:<https://doi.org/10.1078/0176-1617-00887>

Haboudane, D., Miller, J. R., Pattey, E., Zarco-Tejada, P. J., & Strachan, I. B. (2004). Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: modeling and validation in the context of precision agriculture. *Remote Sensing of Environment*, 337-352.

Hernández S., R., & Mendoza T., C. (2018). *Metodología de la Investigación las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. Ciudad de México D.F.: McGraw Hill.

Hernández S., R., Fernández C., C., & Baptista L., P. (2014). *Metodología de la Investigación*. Ciudad de México D.F.: McGraw Hill.

Holdridge, L. (1982). *Ecología Basas en Zonas de Vida*. San José de Costa Rica: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.

Huete, A. (1998). A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). Department of soil and water science. University of Arizona, Tucson, Arizona 85721. *Remote Sens. Environ*(25), 295-309. doi:9. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(96\)00112-5](https://doi.org/10.1016/0034-4257(96)00112-5)

IDIGER. (2016). *Caracterización General del Escenario de Riesgo por Incendio Forestal*. Recuperado el 17 de enero de 2023, de Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático: <https://www.idiger.gov.co/rincendio/#:~:text=Entre%202010%20y%202022%2C%20se,incendios%20forestales%20con%2039%20eventos>.

Jimenez, A., Urrego, L., & Toro, L. (2016). Evaluación Del Comportamiento De Incendios De La Vegetación En El Norte De Antioquia (Colombia): Análisis Del Paisaje. *Colombia Forestal*, 161-180.

Johnson, B., Stevens, D. K., & Roberts, D. A. (2019). Remote sensing of vegetation and fire: Interactions between biophysical signals and environmental conditions. *In Remote sensing of fire*, 49-83.

- Kaufman, Y., & Tanré, D. (1992). Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 97-131.
- Key, C., & Benson, N. (2006). *Landscape assessment: Sampling and analysis methods. FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System*. Odgen, UT, EEUU: USDA Forest Service Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-164-CD.
- Ley 1523 de 2012. (2012). *política nacional de gestión del riesgo de desastres*.
- MINAMBIENTE. (25 de febrero de 2022). *Incendios en Colombia se reducen en un 11 %*. Obtenido de Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible: <https://www.minambiente.gov.co/uncategorized/incendios-en-colombia-se-reducen-en-un-11/>
- Mitchell, T. (2015). *Introducing ArcGIS Pro*. Esri Press.
- Muñoz, P. (2013). *Apuntes de Teledeteccion: Indices de vegetacion*. Ciren.
- Neter, J., Kutner, M. H., Nachtsheim, C. J., & Wasserman, W. (1996). *Applied Linear Statistical Models*. McGraw-Hill Education.
- ONU. (07 de septiembre de 2022). *Los incendios forestales empeoran la calidad del aire y dañan la salud de las personas y los ecosistemas*. Obtenido de Organización de las Naciones Unidas - Noticias ONU: [https://news.un.org/es/story/2022/09/1514021#:~:text=Audioteca-,Los%20incendios%20forestales%20empeoran%20la%20calidad%20del%20aire%20y%20da%C3%B1an,las%20personas%20y%20los%20ecosistemas&text=El%20cambio%20clim%C3%A1tico%20aumenta%20el,puede%20favorecer%](https://news.un.org/es/story/2022/09/1514021#:~:text=Audioteca-,Los%20incendios%20forestales%20empeoran%20la%20calidad%20del%20aire%20y%20da%C3%B1an,las%20personas%20y%20los%20ecosistemas&text=El%20cambio%20clim%C3%A1tico%20aumenta%20el,puede%20favorecer%20)
- Plan de Desarrollo Departamental. (2020). *Lo Hacemos Mejor*.
- Plan de Desarrollo Municipal . (2020). *Chimichagua Productiva*.
- Plana, E., Font, M., & Serra, M. (2016). *Los incendios forestales, guía para comunicadores y periodistas*. Proyecto eFIRECOM.

- Resco de Dios, V. (22 de septiembre de 2020). *Incendios en América Latina: la catástrofe que está afectando a gran parte del continente americano*. Obtenido de BBC News Mundo: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-america-latina-54249424>
- Ressl, R., & Cruz, I. (2012). Detección y monitoreo de incendios forestales mediante imágenes de satélite. *CONABIO. Biodiversitas*, 12-13.
- Rouse, J., Haas, R., Schell, J., & Deering, D. (1974). Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains. *Third ERTS Symposium (Washington, DC: NASE)*, 309-317.
- Salgado, P. (2021). *Cartografía para modelos combustibles utilizando tecnologías geoespaciales para la predicción de incendios forestales en la Reserva Geobotánica Pululahua*. Ecuador: Espe, Universidad de las Fuerzas Armada.
- SIPECIF. (2007). *Problemática de los Incendios Forestales*. Obtenido de Sistema Nacional de Prevención y Control de Incendios Forestales: <http://www.scep.gob.gt/>
- Thenkabail, P. S., Smith, R. B., & De Pauw, E. (2000). Hyperspectral vegetation indices and their relationships with agricultural crop characteristics. *Remote Sensing of Environment*, 158-182.
- UNGRD. (2019). *Cartilla "Lo que usted debe saber sobre incendios de Cobertura Vegetal"*. Bogotá D.C., Colombia: Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres.
- UNICESAR. (2021). *Acuerdo N°003 del 08 de julio de 2021 "por medio del cual se adoptan las líneas de investigación de los programas de Pregrado de la Facultad de Ingeniería y Tecnológicas sede Valledupar, y se dictan otras disposiciones"*. Valledupar, Cesar: Universidad Popular del Cesar.
- UNICESAR. (2023). *Lineamientos y Guía Orientadora para la Estructuración de Informes de Prácticas Académicas en el Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria de la Universidad Popular del Cesar*. Valledupar, Cesar, Colombia: Universidad Popular del Cesar.

USGS. (September de 2020). *Landsat 8 (L8) Data Users Handbook*. Obtenido de United States Geological Survey: <https://www.usgs.gov/media/files/landsat-8-18-data-users-handbook>

USGS. (2023). *Earth Data*. Obtenido de United States Geologic Survey: Recuperado de <https://earthexplorer.usgs.gov/user-manual>

Vargas, D., & Campos, C. (2018). Modelo de vulnerabilidad ante incendios forestales para el Área de Conservación Guanacaste, Costa Rica. *UNED*, 435-446.

WWF. (2020). *Informe incendios forestales 2020: El planeta en llamas*. Recuperado el 15 de enero de 2023, de World Wilde Foundation: <https://www.wwf.es/?54921/Informe-incendios-forestales-2020-El-planeta-en-llamas>

ANEXOS

ANEXO I. Código de Proceso ArcPython

Literal A. Proceso Iterativo Cálculo NDVI

Figura 65. Código de Proceso para cálculo del NDVI en ArcPython

```
import arcpy

# Ruta de las imágenes satelitales
ruta_imagenes = r"C:\ruta\imagenes"

# Ruta de salida para los resultados del NDVI
ruta_salida = r"C:\ruta\salida"

# Obtener la lista de archivos de imagen en la ruta especificada
lista_imagenes = arcpy.ListRasters("*", "TIF", ruta_imagenes)

# Iterar sobre cada imagen satelital
for imagen in lista_imagenes:

    # Crear el objeto Raster de la imagen
    raster = arcpy.Raster(os.path.join(ruta_imagenes, imagen))

    # Obtener las bandas necesarias para el cálculo del NDVI
    banda_roja = raster - raster.meanRaster
    banda_infrarroja = raster - raster.meanRaster

    # Calcular el NDVI
    ndvi = arcpy.sa.Float(banda_infrarroja - banda_roja) / arcpy.sa.Float(banda_infrarroja +
    banda_roja)

    # Guardar el resultado del NDVI en la ruta de salida
    nombre_salida = imagen.replace(".tif", "_NDVI.tif")
    ndvi.save(os.path.join(ruta_salida, nombre_salida))
    print("NDVI calculado para:", imagen)

    print("Proceso completo.")
```

Nota: Tomado por los Autores (2023) a partir de *Introducción ArcGIS Pro. (Mitchell, 2015)*

Literal B. Proceso Iterativo Cálculo SAVI

Figura 66. Código de Proceso para cálculo del SAVI en ArcPython

```
import arcpy

from arcpy.sa import *

# Ruta de las imágenes satelitales
ruta_imagenes = r"C:\ruta\imagenes"

# Ruta de salida para los resultados del SAVI
ruta_salida = r"C:\ruta\salida"

# Obtener la lista de archivos de imagen en la ruta especificada
lista_imagenes = arcpy.ListRasters("*", "TIF", ruta_imagenes)

# Iterar sobre cada imagen satelital
for imagen in lista_imagenes:

    # Crear el objeto Raster de la imagen
    raster = arcpy.Raster(os.path.join(ruta_imagenes, imagen))

    # Obtener las bandas necesarias para el cálculo del SAVI
    banda_roja = raster - raster.meanRaster
    banda_infrarroja = raster - raster.meanRaster

    # Calcular el SAVI
    savi = ((banda_infrarroja - banda_roja) / (banda_infrarroja + banda_roja + 0.5)) * (1 + 0.5)

    # Guardar el resultado del SAVI en la ruta de salida
    nombre_salida = imagen.replace(".tif", "_SAVI.tif")
    savi.save(os.path.join(ruta_salida, nombre_salida))

    print("SAVI calculado para:", imagen)

    print("Proceso completo.")
```

Nota: Tomado por los Autores (2023) a partir de *Introducción ArcGIS Pro. (Mitchell, 2015)*

Literal C. Proceso Iterativo Cálculo ARVI

Figura 67. Código de Proceso para cálculo del ARVI en ArcPython

```
import arcpy

from arcpy.sa import *

# Ruta de las imágenes satelitales
ruta_imagenes = r"C:\ruta\imagenes"

# Ruta de salida para los resultados del ARVI
ruta_salida = r"C:\ruta\salida"

# Obtener la lista de archivos de imagen en la ruta especificada
lista_imagenes = arcpy.ListRasters("*", "TIF", ruta_imagenes)

# Iterar sobre cada imagen satelital
for imagen in lista_imagenes:

    # Crear el objeto Raster de la imagen
    raster = arcpy.Raster(os.path.join(ruta_imagenes, imagen))

    # Obtener las bandas necesarias para el cálculo del ARVI
    banda_roja = raster - raster.meanRaster
    banda_infrarroja = raster - raster.meanRaster
    banda_azul = raster - raster.meanRaster

    # Calcular el ARVI
    arvi = (banda_infrarroja - (2 * banda_roja) + banda_azul) / (banda_infrarroja + (2 *
    banda_roja) + banda_azul)

    # Guardar el resultado del ARVI en la ruta de salida
    nombre_salida = imagen.replace(".tif", "_ARVI.tif")
    arvi.save(os.path.join(ruta_salida, nombre_salida))
    print("ARVI calculado para:", imagen)

    print("Proceso completo.")
```

Nota: Tomado por los Autores (2023) a partir de *Introducción ArcGIS Pro. (Mitchell, 2015)*

Líteral D. Proceso Iterativo Cálculo GCI

Figura 68. Código de Proceso para cálculo del GCI en ArcPython

```
import arcpy

from arcpy.sa import *

# Ruta de las imágenes satelitales
ruta_imagenes = r"C:\ruta\imagenes"

# Ruta de salida para los resultados del GCI
ruta_salida = r"C:\ruta\salida"

# Obtener la lista de archivos de imagen en la ruta especificada
lista_imagenes = arcpy.ListRasters("*", "TIF", ruta_imagenes)

# Iterar sobre cada imagen satelital
for imagen in lista_imagenes:

    # Crear el objeto Raster de la imagen
    raster = arcpy.Raster(os.path.join(ruta_imagenes, imagen))

    # Obtener las bandas necesarias para el cálculo del GCI
    banda_infrarroja = raster - raster.meanRaster
    banda_verde = raster - raster.meanRaster

    # Calcular el GCI
    gci = (banda_infrarroja / banda_verde) - 1

    # Guardar el resultado del GCI en la ruta de salida
    nombre_salida = imagen.replace(".tif", "_GCI.tif")
    gci.save(os.path.join(ruta_salida, nombre_salida))

    print("GCI calculado para:", imagen)
    print("Proceso completo.")
```

Nota: Tomado por los Autores (2023) a partir de *Introducción ArcGIS Pro. (Mitchell, 2015)*

Líteral E. Proceso Iterativo Cálculo NBR

Figura 69. Código de Proceso para cálculo del NBR en ArcPython

```
import arcpy

from arcpy.sa import *

# Ruta de las imágenes satelitales
ruta_imagenes = r"C:\ruta\imagenes"

# Ruta de salida para los resultados del NBR
ruta_salida = r"C:\ruta\salida"

# Obtener la lista de archivos de imagen en la ruta especificada
lista_imagenes = arcpy.ListRasters("*", "TIF", ruta_imagenes)

# Iterar sobre cada imagen satelital
for imagen in lista_imagenes:

    # Crear el objeto Raster de la imagen
    raster = arcpy.Raster(os.path.join(ruta_imagenes, imagen))

    # Obtener las bandas necesarias para el cálculo del NBR
    banda_infrarrojo_medio = raster - raster.meanRaster
    banda_infrarrojo_cercano = raster - raster.meanRaster

    # Calcular el NBR
    nbr = (banda_infrarrojo_cercano - banda_infrarrojo_medio) / (banda_infrarrojo_cercano
    + banda_infrarrojo_medio)

    # Guardar el resultado del NBR en la ruta de salida
    nombre_salida = imagen.replace(".tif", "_NBR.tif")
    nbr.save(os.path.join(ruta_salida, nombre_salida))

    print("NBR calculado para:", imagen)

    print("Proceso completo.")
```

Nota: Tomado por los Autores (2023) a partir de *Introducción ArcGIS Pro. (Mitchell, 2015)*

Líteral F. Proceso Iterativo Conversión Raster A Shape

Figura 70. Código de Proceso para Conversión de Raster a Shape

```
import arcpy

# Especifica la ruta del archivo raster de entrada y salida
raster_path = r"C:\Ruta\al\Archivo\Raster.tif"
output_shapefile = r"C:\Ruta\al\Archivo\Salida.shp"

# Realiza la reclasificación del archivo raster

reclassified_raster = arcpy.sa.Reclassify(raster_path, "Value", arcpy.sa.RemapRange([[0,
10, 1], [11, 20, 2]]))

# Convierte el raster reclasificado a un shapefile

arcpy.RasterToPolygon_conversion(reclassified_raster, output_shapefile,
"NO_SIMPLIFY")

print("El archivo raster se ha convertido correctamente a un shapefile.")
```

Nota: Tomado por los Autores (2023) a partir de *Introducción ArcGIS Pro. (Mitchell, 2015)*