
Análisis de la variación de Temperatura de la Superficie Terrestre (TLS) y del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en el área de influencia indirecta del Distrito Regional de Manejo Integrado (DRMI) Desierto de la Tatacoa.

Paula Andrea Betancourt Herrera

363217242

Carolina Campos Carrasco

363217207

Universidad de Cundinamarca
Facultad de Ciencias Agropecuarias
Programa de Ingeniería Ambiental
Seccional Girardot

2022

Análisis de la variación de Temperatura de la Superficie Terrestre (TLS) y del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en el área de influencia indirecta del Distrito Regional de Manejo Integrado (DRMI) Desierto de la Tatacoa.

Paula Andrea Betancourt Herrera

363217242

Carolina Campos Carrasco

363217207

Trabajo de investigación presentado como requisito para optar al título de Ingeniera Ambiental

Director

Héctor Fabio Cruz Cuellar

MSc. en Geomática

Universidad de Cundinamarca
Facultad de ciencias agropecuarias
Programa de Ingeniería ambiental
Seccional Girardot

2022



Nota de Aceptación

Firma presidente Comité de Trabajo de Grado

Firma Jurado

Firma Jurado

Dedicatoria

Paula Andrea Betancourt Herrera

Quiero dedicar este trabajo de investigación principalmente a Dios por guiarme y darme la fortaleza y la oportunidad de culminar este largo y fructuoso camino.

A mi madre Gloria María Herrera y mi padre Hugo Fernando Betancourt Ramírez, quienes con su dedicación, amor y esfuerzo, me han enseñado el valor de la familia, que durante toda mi vida han luchado por brindarme lo necesario, han sido mi apoyo y guía en cada etapa, sin ellos este logro no sería posible.

A mis abuelos y tío quienes han brindado su amor y cariño incondicionalmente toda mi vida, quienes me apoyaron en cada etapa y siempre me motivaron a seguir a pesar de las adversidades.

Para mi fiel compañera lissy, quien desde el momento que llego a mi vida ilumino mi camino.

A mi compañero de vida, quien es parte fundamental en este proceso, quien me ha brindado su amor y apoyo, incentivándome a ser mejor cada día y que siempre creyó en mis capacidades.

Carolina Campos Carrasco

Para mis padres que gracias a su amor y educación formaron los cimientos necesarios para convertirme en la mujer que hoy en día soy, que con cariño y esfuerzo me apoyaron en cada decisión y estuvieron conmigo superando cada obstáculo.

A mi abuela por enseñarme a ser una mujer fuerte, a creer en mí y en lo que puedo lograr, ha siempre dar sin recibir nada a cambio, a ella que estuvo conmigo al inicio de este camino y aunque no pudo llegar al final sé que desde cielo guía cada uno de mis pasos.

A mis hermanos por ser mi motivación y la fuente que me inspira cada día a ser mejor persona, por estar en cada momento de alegría y tristeza y por ser mi mayor escudo frente a cada una de las dificultades.

Y finalmente a mi compañero, la persona que siempre creyó en mí, la cual ha estado en cada momento apoyándome, dándome ánimos a no desistir, sufriendo conmigo las derrotas y alegrándose de cada uno de mis triunfos.

Agradecimientos

Queremos agradecer a la universidad de Cundinamarca y a todo el cuerpo docente del programa de Ingeniería ambiental por las enseñanzas y conocimientos brindados durante nuestro proceso de formación como ingenieras ambientales.

A nuestro tutor Héctor Fabio Cruz por guiarnos y brindarnos sus conocimientos para la elaboración del presente trabajo de investigación, quien dedico su tiempo para enseñarnos, motivarnos y animarnos a seguir y no desistir.

Paula Andrea Betancourt Herrera

Quiero agradecer a mi familia, quienes creyeron fielmente en mí, y son el motivo principal de mi vida, sin ustedes yo no habría llegado hasta donde estoy.

A mis amigas y compañeras tanto de vida como de profesión, Liliana, Maryuri, Tatiana y Vanessa, quienes me han enseñado el valor de la amistad, y me han brindado su apoyo y cariño, gracias por ser parte de este proceso.

A carolina campos, por ser mi compañera en este proyecto, gracias por la dedicación, empeño y esfuerzo, que hoy se ve reflejado en este logro.

Carolina Campos Carrasco

Quiero agradecer a mi familia, a mi tía Sandra, a mis compañeras de aventuras Leidy, Lina, Jineth y Vanessa y a todas las personas que de una u otra manera contribuyeron en la realización de este sueño. Gracias por confiar en mí y apoyarme en esta travesía.

A Paula Betancourt, gracias por ser mi compañera y por dedicar cuerpo y alma al desarrollo de esta investigación.

Tabla de contenido

Resumen.....	11
Abstract	12
Introducción	13
Planteamiento Del Problema.....	16
Justificación.....	18
Objetivos	20
Objetivo general	20
Objetivos específicos	20
Marco Referencial	21
Marco teórico	21
Marco legal.....	24
Diseño Metodológico	25
Fase Preliminar.....	27
Fase En Campo	27
Fase De Ejecución.....	29
Procesamiento Landsat 7.....	32
Procesamiento Landsat 8.....	34
Reclasificación NDVI y TLS	37
Análisis estadístico.....	39

Resultados y Discusión	41
Análisis del índice de vegetación de diferencia normalizada	41
Análisis de la Temperatura de la superficie terrestre	45
Análisis estadístico ANOVA NDVI y TLS	50
Análisis de la Correlación entre NDVI y TLS	52
Análisis datos obtenidos en campo vs los obtenidos mediante imágenes satelitales	57
Conclusiones	60
Recomendaciones.....	62
Bibliografía	63
Anexos.....	72

Lista de Tablas

Tabla 1	Datos Obtenidos en Campo.....	28
Tabla 2	Imágenes satelitales Landsat 7 y 8.....	29
Tabla 3	Imágenes Satelitales Obtenidas Desde La Plataforma USGS-EarthExplore	30
Tabla 4	Constantes de calibración Imágenes Landsat.....	32
Tabla 5	Clasificación NDVI.....	37
Tabla 6	Temperatura máxima y mínima	38
Tabla 7	Clasificación de TLS.....	38
Tabla 8	Tamaño de muestra representativa.....	40
Tabla 9	Resultados de NDVI en términos de área y categoría.....	43
Tabla 10	Porcentajes por categoría de NDVI 2000 – 2022.....	44
Tabla 11	Resultados de TLS en términos de área y categoría	48
Tabla 12	Porcentajes por categoría de TLS 2000 – 2022	49
Tabla 13	Coefficiente de correlación de Pearson	54
Tabla 14	Datos en campo vs imagen satelital	58

Lista de Figuras

Figura 1	Mapa delimitación área de estudio DRMI.....	26
Figura 2	Metodología de la investigación.....	26
Figura 3	Fórmula general NDVI.....	31
Figura 4	Procesamiento Landsat 7	32
Figura 5	Formula radiancia espectral de la banda térmica.....	33
Figura 6	Formula Temperatura de la superficie terrestre	33
Figura 7	Procesamiento Landsat 8	34
Figura 8	Formula PV	34
Figura 9	Fórmula de emisividad a partir del Índice de Proporción Vegetal PV	35
Figura 10	Cálculo de radiancia espectral atmosférica TOA	35
Figura 11	Formula Temperatura de Brillo.	36
Figura 12	Formula temperatura superficial.....	37
Figura 13	Formula # tamaño de la muestra representativa población finita.....	39
Figura 14	Mapa temático NDVI 2000 – 2022	41
Figura 15	Mapa temático NDVI Reclasificado 2000 – 2022.....	42
Figura 16	Mapas temáticos TLS 2000 -2022.....	46
Figura 17	Mapas temáticos TLS Reclasificado 2000 -2022	47
Figura 18	Resultados análisis estadístico ANOVA NDVI	50
Figura 19	Resultados análisis estadístico ANOVA TLS	51
Figura 20	Gráfico de dispersión NDVI y TLS.....	53
Figura 21	Fuerza y dirección del coeficiente de correlación	54
Figura 22	Mapa puntos de muestreo Tatacoa	57

Resumen

El presente trabajo de investigación consiste en la realización de un análisis multitemporal para determinar la relación en los procesos de desertificación, empleando el Índice de Vegetación Normalizada (NDVI) y la Temperatura de la Superficie Terrestre (TLS) para el área de estudio, que se encuentra comprendido entre los departamentos de Huila y Tolima, considerándose un ecosistema desértico, afectado por procesos de desertificación causados principalmente por la pérdida de cobertura vegetal en la zona entre otras variables.

Con base en esta problemática, el objetivo principal de la investigación es identificar si existen cambios de la cobertura vegetal y de TLS en términos de área a través de un análisis multitemporal entre los años 2000 y 2022. La metodología utilizada se basó en la obtención y procesamiento de imágenes satelitales Landsat 7 y Landsat 8, el cálculo del NDVI y de TLS, y el análisis de varianza calculado para dichas variables. Por lo cual se logró determinar que en términos de área se presentó una variación en cada una de las categorías de NDVI y TLS, aunque estadísticamente dichos cambios no fueron significativos. Además, se comprobó la existencia de una correlación entre NDVI y TLS teniendo en cuenta que para el coeficiente de correlación de Pearson en la mayoría de los años el resultado fue negativamente fuerte.

Palabras clave: Análisis multitemporal, Coberturas vegetales, Correlación, Temperatura superficial, Desertificación, Desierto de la Tatacoa

Abstract

The present research work consists of carrying out a multi-temporal analysis to determine the relationship in desertification processes, using the normalized vegetation index (NDVI) and the temperature of the land surface (TLS) for the study area, which are It is located between the departments of Huila and Tolima, and is considered a desert ecosystem, affected by desertification processes caused mainly by the loss of vegetation cover in the area, among other variables. Based on this problem, the main objective of the research is to identify whether changes in plant cover and TLS are triggered in terms of area through a multi-temporal analysis between the years 2000 and 2022. The methodology used was based on obtaining and processing of Landsat 7 and Landsat 8 satellite images, the calculation of NDVI and TLS, and the analysis of variance calculated for these variables. Therefore, it was possible to determine that in terms of area there was a variation in each of the NDVI and TLS categories, although these changes were not statistically significant. In addition, the existence of a correlation between NDVI and TLS was verified, taking into account that for the Pearson correlation coefficient in most years the result was negatively strong.

Key words: Multitemporal analysis, Vegetation covers, Correlation, Surface temperature, Desertification, Desert Tatacoa

Introducción

Alrededor del mundo los suelos se han visto afectados por la desertificación lo que implica que estos pierdan sus características fundamentales y afecten la productividad de los ecosistemas. Este fenómeno se ha convertido en un problema a nivel social, económico y ambiental. Granados et al. (2013), definen la desertificación como:

La degradación de las tierras de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas, que resulta de factores de origen climático y de actividades antropogénicas como la deforestación, el sobrepastoreo, la expansión de áreas agrícolas hacia áreas frágiles y la sobreexplotación de la vegetación para uso doméstico. La precipitación es escasa o poco uniforme en muchas regiones áridas del mundo; así, muchas áreas carecen de agua suficiente para permitir la vida, excepto en forma limitada.

En ese sentido Colombia es uno de los países que pertenecen al convenio de naciones unidas de lucha contra la desertificación (UNCCD), el cual implemento el protocolo de degradación de suelos y tierras por Desertificación. Según el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT, 2005) en el país:

El proceso de desertificación se ha hecho evidente en zonas que antes estaban cubiertas de vegetación y presentan alta productividad agrícola, como Villa de Leyva en el departamento de Boyacá, la cuenca alta del río Chicamocha, la Sabana de Bogotá, la región del Patía y el área de influencia del desierto de la Tatacoa. Como se citó en (Rojas et al, 2019, p. 137)

Por su parte, la pérdida de cobertura vegetal es uno de los indicadores del avance en los procesos de desertificación, además juegan un papel determinante en “los flujos de energía y en el ciclo hidrológico, se puede observar en la forma como las plantas absorben, reflejan o transmiten la radiación solar, y en la capacidad de interceptar y transpirar el agua obtenida a través de la precipitación” BONAN et al., 2004, como se citó en (Carvajal y Pabón, 2016, p. 189). En este sentido las condiciones de temperatura de la superficie terrestre dependen principalmente de la cubierta vegetal y la cantidad de radiación que llegue a la superficie. Según Barbáchano (2020):

La estimación de la temperatura superficial está condicionada, principalmente, por el contenido de vapor de agua de la atmósfera (especialmente sensible en la zona intertropical) y la emisividad de la superficie estudiada. Por todo ello, una correcta estimación de la temperatura superficial implica necesariamente la consideración y corrección de estos factores. (p. 19)

En ese contexto, el uso de técnicas a partir de sensores remotos empleando imágenes satelitales como el análisis multitemporal mediante la teledetección permite evaluar, analizar y mitigar los cambios en la vegetación.

La teledetección ha contribuido con la obtención de información del estado de las coberturas y ha permitido el estudio de su relación con la temperatura radiante. Incluso, se afirma que los sensores remotos termales infrarrojos son la única posibilidad que existe para obtener datos de temperatura sobre áreas extensas de la superficie terrestre, a diferentes resoluciones espaciales y temporales (SOBRINO et al., 1994; COLL et al., 2005), como se citó en (Carvajal y Pabón, 2014, p. 96).

Para lograr esto, la información satelital entregada a través de una imagen multibanda, debe ser categorizada y agrupada, para permitir discriminar un área con características particulares de otra. Una forma de expresar esta categorización o agrupamiento es mediante la elaboración de índices de vegetación (Muñoz, 2013).

Usualmente el índice de vegetación es una combinación de las bandas espectrales, siendo el producto de varios valores espectrales que son sumados, divididos, o multiplicados en una forma diseñada para producir un simple valor que indique la cantidad o vigor de vegetación dentro de un píxel. Permittiéndonos estimar y evaluar el estado de salud de la vegetación, en base a la medición de la radiación que las plantas emiten o reflejan (Diaz, 2015, p.42)

De acuerdo con lo anterior, este proyecto de investigación se enfocó en el análisis multitemporal mediante el procesamiento de imágenes satelitales para diferentes periodos de tiempo a fin de identificar la variación de NDVI y TLS y su relación sobre los procesos de desertificación para el área de estudio.

Planteamiento Del Problema

La desertificación, el proceso por el cual las tierras se hacen más secas, está aumentando en todo el mundo. Más de 6,100 millones de hectáreas son zonas áridas y semiáridas. El 40 % de la superficie del planeta son tierras secas. Se estima que 70 % de las tierras secas productivas están actualmente amenazadas por diversas formas de desertificación. Esto afecta directamente el bienestar y el futuro de una sexta parte de la población mundial (Sánchez, et al., 2013). En Colombia, se estima que para el 2004 el 78.9% de las zonas secas presentan algún nivel de desertificación (MAVDT, 2004).

Por su parte, el Distrito Regional de Manejo Integrado La Tatacoa no es ajeno a la problemática nacional, debido a que presenta condiciones climáticas y botánicas de zonas tropicales áridas y semiáridas” (Olaya et al, 2000, p.27), además en esta zona vienen desarrollando actividades dedicadas principalmente a la ganadería extensiva, la agricultura y el turismo de modo que, dichas actividades han generado de manera directa e indirecta impactos negativos en el ambiente y sus componentes acelerando la degradación de los suelos. Según lo mencionado en el Plan de Manejo de la Tatacoa (2015) este ecosistema:

Presenta una morfología generada, por procesos endógenos y exógenos, de tipo: climatológicos, litológicos, erosivos, de remoción en masa, factores que concuerdan con estudios anteriores, se caracteriza por sufrir acelerados procesos de degradación del ecosistema y un incremento acelerado en el proceso de desertificación. (p. 27)

Considerando que el DRMI se encuentra inmerso en el área de estudio, nace la importancia de analizar la influencia en los procesos de desertificación según los cambios de NDVI y TLS. Es por esto por lo que, en este trabajo de investigación se pretende responder las

siguientes preguntas: (1) ¿Se logra evidenciar cambios significativos en términos de área para el Índice de diferencia Normalizada y la Temperatura Superficial Terrestre durante los últimos 22 años?, y (2) ¿Existe una la relación entre las variables de NDVI y TLS con respecto a los procesos de desertificación?

Justificación

Muchos factores interrelacionados contribuyen a la desertificación, incluido el crecimiento demográfico, la demanda de mayores niveles de producción, las tecnologías que aumentan la explotación de los recursos y el cambio climático, además la desertificación representa una amenaza universal que tiene un fuerte impacto en las formas de subsistencia de millones de personas tanto dentro de las tierras secas como fuera de ellas (UNCCD, 2017).

De esta forma se encontró mediante la información suministrada por el sistema alertas tempranas Tremarcos-Colombia, que dentro del área de estudio se encuentran delimitados Resguardos indígenas, Parque Arqueológico, Hallazgos arqueológicos, Distribución de Especies y el distrito regional de manejo integrado la Tatacoa, como se muestra en el anexo 5, adicionalmente esta área de estudio está comprendida por dos municipios y categorizada según las zonas de vidas como Bosque seco tropical (bs-T) a Bosque muy seco tropical (bms-T), lo que incrementa la importancia de monitorear y evaluar las variaciones en términos de NDVI y TLS sobre esta zona de estudio.

Por lo tanto, el análisis multitemporal como herramienta de la teledetección enfocado al índice de vegetación de diferencia normalizada y de temperatura de la superficie terrestre, no solo permite la ampliación de la información sobre teledetección, SIG, degradación, desertificación, entre otros, sino también realizar el análisis de la dinámica espaciotemporal del ecosistema y a su vez hacer seguimiento a los procesos ambientales y generar información base sobre el estado del suelo en términos de cobertura y temperatura a través del paso del tiempo, permitiendo de esta forma sustentar nuevas estrategias o planes de acción para la desertificación, ya que actualmente no se cuenta con grandes soportes de información científica sobre el crecimiento de la desertificación relacionada con el NDVI y TLS, para ello se realizará un

análisis multitemporal y estadístico con los datos obtenidos para interpretar los cambios entre los años 2000 y 2022.

Objetivos

Objetivo general

Determinar la variación de la temperatura de la superficie terrestre mediante el análisis de la pérdida de cobertura vegetal para el área de influencia indirecta del DRMI mediante análisis multitemporal entre los años 2000 a 2022.

Objetivos específicos

- Calcular el índice de vegetación NDVI y la Temperatura de la Superficie Terrestre TLS a través de imágenes satelitales
- Determinar los cambios en la vigorosidad de la vegetación y de temperatura en términos de área para el intervalo de tiempo establecido, por medio del análisis estadístico de varianza
- Analizar la relación entre las variables NDVI y TLS y su influencia en los procesos de desertificación

Marco Referencial

Marco teórico

Pérdida de la vegetación

La pérdida de la cubierta vegetal es el primer paso del proceso de deterioro del suelo; si éste no se controla a tiempo, provocará que el paisaje se desertifique (Stocking y Murnaghan, 2003), (Muñoz, López, Hernández, Soler y López, 2009). La pérdida de vegetación se da por diversos factores entre ellos la deforestación, los incendios forestales, la expansión agrícola y urbana. Sin embargo las inadecuadas prácticas en procesos extractivos causan pérdidas significativas, de esta manera la pérdida de cobertura vegetal ocasiona un desequilibrio en la dinámica ambiental en los componentes aire, suelo, agua, fauna y flora.

Satélite Landsat 8

Incorpora dos instrumentos de barrido: Operational Land Imager (OLI), y un sensor térmico infrarrojo llamado Thermal Infrared Sensor (TIRS). Las bandas espectrales del sensor OLI, proporcionan una mejora de los instrumentos de las misiones Landsat anteriores, debido a la incorporación de dos nuevas bandas espectrales: un canal profundo en el azul visible (banda 1), diseñado específicamente para los recursos hídricos e investigación en zonas costeras, y un nuevo canal infrarrojo (banda 9) para la detección de nubes cirrus. Adicionalmente una nueva banda de control de calidad se incluye con cada producto de datos generado. (Ariza, 2013, p. 8)

Teledetección

La Teledetección tiene por finalidad identificar y caracterizar los materiales de la superficie terrestre y los procesos que en ella ocurren a partir de la radiación electromagnética procedente de la misma, entendiéndose por tal tanto la emitida por la propia superficie terrestre como la reflejada de la que le llega del sol, prevaleciendo una sobre otra en función del intervalo espectral considerado. En la región óptica del espectro, o espectro solar (0.4-3.0 μ m), la radiación procedente de las superficies es la radiación solar reflejada. (Gilbert, González, García, 1997, p.1)

NDVI

El Índice de Vegetación Diferencial Normalizado, es el más conocido de todos, y es el más utilizado para todo tipo de aplicaciones. La razón fundamental es su sencillez de cálculo y disponer de un rango de variación fijo (entre -1 y $+1$), lo que permite establecer umbrales y comparar imágenes. Valores muy bajos de NDVI, del orden de 0.1, corresponden a áreas rocosas, arenosas o nevadas. Valores de 0.2 a 0.3 pueden corresponder a áreas pobres con arbustos o pasturas naturales. A partir de estos valores tendremos los niveles correspondientes a praderas, cultivos, forestaciones etc. dependiendo del valor alcanzado. (Muñoz, 2013, p.4)

Landsat 7

Fue lanzado desde la Base de la Fuerza Aérea Vandenberg en California el 15 de abril de 1999 en un cohete Delta II. El satélite lleva el sensor Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+). Este instrumento fue mejorado a partir de diseños de instrumentación anteriores. Las características principales de Landsat 7 incluyen una banda pancromática con una resolución espacial de 15

metros, un calibrador solar de apertura completa a bordo, un cinco por ciento de calibración radiométrica absoluta y un canal infrarrojo térmico con una mejora de cuatro veces en la resolución espacial sobre Thematic Mapper (TM).

Degradación de las tierras

Reducción o la pérdida de la productividad biológica o económica y la complejidad de las tierras agrícolas de secano, las tierras de cultivo de regadío o las dehesas, los pastizales, los bosques y las tierras arboladas, ocasionada, en zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas, por los sistemas de utilización de la tierra o por un proceso o una combinación de procesos, incluidos los resultantes de actividades humanas y pautas de poblamiento, tales como: • la erosión del suelo causada por el viento o el agua, • el deterioro de las propiedades físicas, químicas y biológicas o de las propiedades económicas del suelo, y • la pérdida duradera de vegetación natural.

Desertificación

Degradación de las tierras de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas resultantes de diversos factores, tales como las variaciones climáticas y las actividades humanas.

Zonas Áridas, Semiáridas y Subhúmedas Secas

Son aquellas zonas en las que la proporción entre la precipitación anual y la evapotranspiración potencial está comprendida entre 0,05 y 0,65, excluidas las regiones polares y subpolares.

R- estudio

Es un conjunto integrado de programas para manipulación de datos, calculo y gráfico. Entre otras características dispone de almacenamiento y manipulación efectiva de datos, operadores

para calculo sobre variables indexadas (Arrays), en particular matrices, una amplia, coherente e integrada colección de herramientas para análisis de datos, posibilidades graficas para análisis de datos, que funcionan directamente sobre pantalla o impresora, y un lenguaje de programación bien desarrollado, simple y efectivo, que incluye condicionales, ciclos, funciones recursivas y posibilidad de entradas y salidas.

Marco legal

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.

Decreto 1076 de 2015: Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Resolución 017 de 2008: Por el cual se declara la ecorregión de la Tatacoa como Parque Natural Regional y se dictan normas para su administración y manejo sostenible.

Resolución 016 2011: Por el cual se modifica el acuerdo No 017 del 2008 que declara el Parque Natural Regional La Tatacoa y se dictan normas para su administración y manejo.

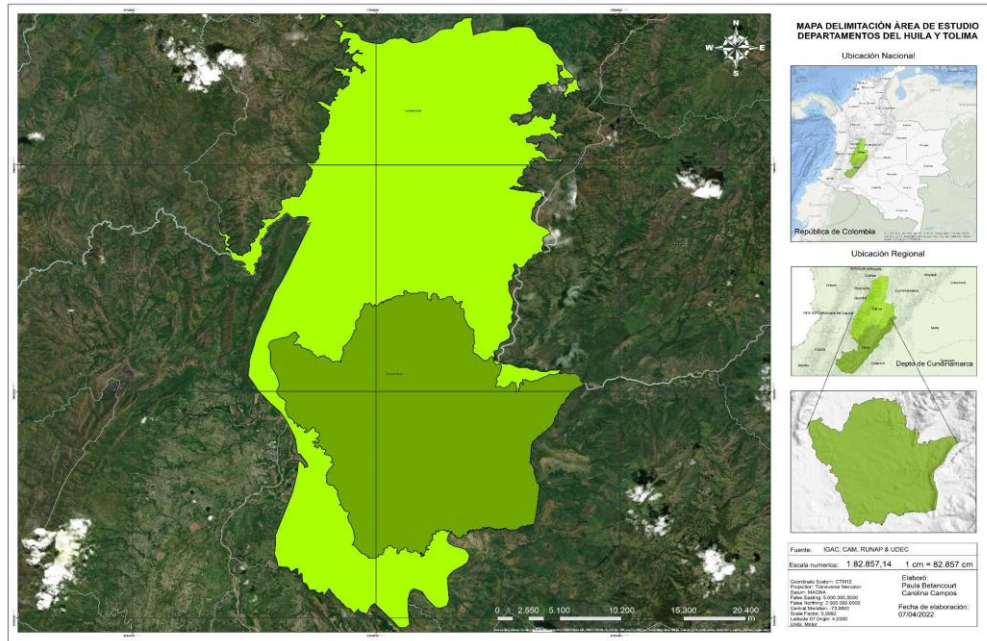
Resolución 008 2014: Por el cual se homologa la denominación del Parque Natural Regional la Tatacoa con la categoría de Área Protegida Distrito Regional De Manejo Integrado.

Resolución 012 de 2015: por el cual se adopta el plan de manejo del distrito regional de manejo integrado (DRMI) la tatacoa, localizado en los municipios de Villa vieja y Baraya, en el departamento del Huila.

Diseño Metodológico

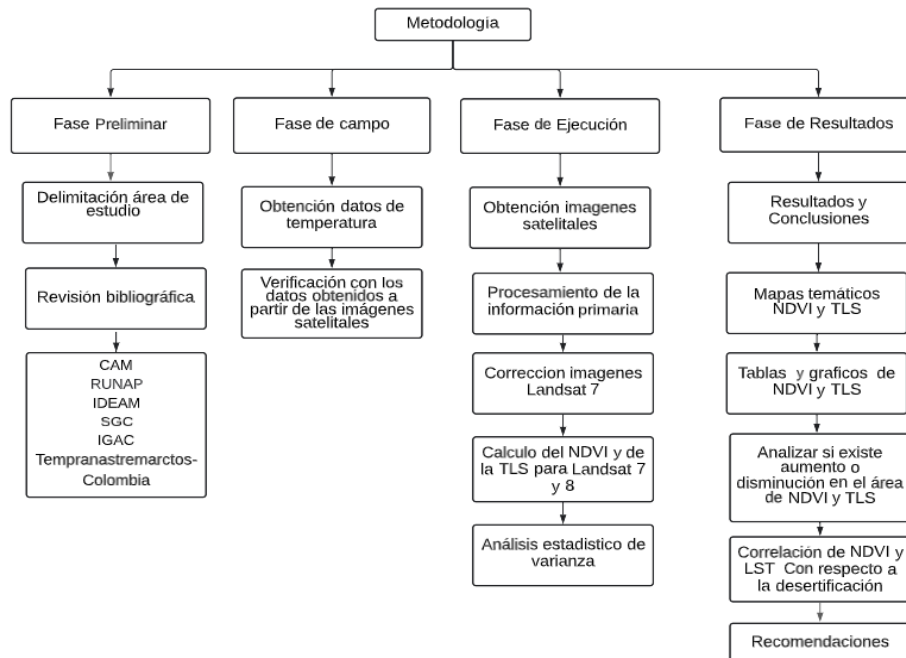
Para la delimitación del área de estudio (Figura 1) se definió como eje central el Distrito Regional de Manejo Integrado, la Tatacoa en jurisdicción de los municipios de Villa Vieja y Baraya, en el departamento del Huila, a su vez se tuvieron en cuenta las zonas de vida (Bosque seco bs-T - Bosque muy seco bms-T) tanto del departamento del Tolima como del Huila, abarcando las veredas Las Brisas, Mercadillo, Balsillas, Anacarco, Pueblo Nuevo, Yaco, Montefrío, La Molana, Tinajas, Velu, Los Medios, La Palmita y La Unión, San Juanito en el municipio de Natagaima Depto. Tolima; y en el Depto. Huila se encuentra las veredas Potosí, Golondrinas, La Calera, San Juanito, Polonia y Hato Nuevo en el municipio de Villa Vieja; Pata, Río Aipe, El Callejón, y La Manga en el municipio de Aipe; San Isidro Bajo, Mesa Redonda en el municipio de Tello y Arenoso en el municipio de Baraya. El enfoque de la investigación es cuantitativo, ya que permite el análisis de la información recolectada de la zona de estudio a través de herramientas estadísticas y procesamiento de información geográfica. Además, como parte del proceso de investigación, se identifica que el universo muestral corresponde a las zonas de vida de los departamentos del Tolima y Huila. Así mismo, se determina como población homogénea las veredas localizadas dentro del área de estudio y como muestra el área del Desierto de la Tatacoa. De acuerdo con lo anterior, la investigación se realizará en cuatro fases expuestas en la metodología de la investigación (Figura 2).

Figura 1
 Mapa delimitación área de estudio DRMI



Nota. Elaboración Propia

Figura 2
 Metodología de la investigación



Nota. Elaboración Propia

Fase Preliminar

En esta fase se debe llevar a cabo la recolección y revisión de la información sobre las características ambientales y geomorfológicas de la zona de estudio, los cuales se obtendrán a través de las Instituciones Públicas de apoyo técnico y científico como lo son; la Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena (CAM), el Registro Único Nacional de Áreas Protegidas (RUNAP), el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), el Servicio Geológico Colombiano (SGC), el Sistema de Alertas Tempranas Tremarctos- Colombia y el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).

Fase En Campo

Para el desarrollo de esta fase se llevó a cabo una visita al distrito regional de manejo integrado, desierto de la tatacoa, donde se tomaron los datos de temperatura de la superficie terrestre, mediante un medidor portátil de pH directo a suelos, el cual arroja datos de pH y Temperatura del suelo en un rango de -5.0 a 105.0 °C.

Para definir los puntos donde se tomarían los registros de temperatura se realizó mediante el software ArcGIS una grilla de muestreo aleatorio teniendo en cuenta las vías de acceso al desierto de la tatacoa, de esta forma se seleccionó puntos al azar con una distancia entre 200 y 400 metros aproximadamente, una vez en campo los datos del muestreo (TLS y Coordenadas) se registraron en el aplicativo QField. Cabe resaltar que los datos se tomaron en un solo día, debido a que las condiciones climatológicas no favorecieron la toma de datos para el segundo día propuesto. De esta forma se obtuvieron un total de 44 datos, como se muestra a continuación:

Tabla 1
Datos Obtenidos en Campo

ID	Temperatura °C	Magna Sirgas	
		X	Y
1	34,3	4757382,84	1923497,99
2	34,3	4757382,84	1923497,99
3	40	4757291,63	1923315,16
4	41,1	4757228,14	1923120,79
5	42,5	4757159,51	1922938,25
6	41,4	4757102,14	1922768,11
7	36,2	4757134,11	1922560,08
8	38,8	4756980,1	1922453,3
9	37,8	4756885,46	1922301,08
10	38	4756810,56	1922129,34
11	34,4	4756722,2	1921947,96
12	40,2	4756664,03	1921759,96
13	41,1	4756539,31	1921595,88
14	39,8	4756494,69	1921442,37
15	38,5	4756454,1	1921258,19
16	43,6	4756365,04	1921078,51
17	40,1	4756307,34	1920917,5
18	36,4	4756217,71	1920720,94
19	40	4756119,72	1920336,78
20	41	4756001,8	1919986,93
21	41,1	4755769,31	1919632,13
22	37,4	4755611,85	1919302,41
23	41,9	4755341,34	1919006,83
24	31,6	4766763,63	1915893,37
25	33,6	4766398,88	1915815,96
26	32,1	4766060,58	1915981,3
27	31,7	4765685,77	1915893,9
28	31,9	4765296,15	1915870,07
29	36,5	4764920,39	1915760,44
30	36,9	4764559,63	1915599,71
31	32,3	4764194,01	1915514,75
32	36,7	4763969,24	1915244,82
33	32,5	4763807,81	1914846,11
34	32,5	4763683,35	1914583,41
35	33,7	4763315,94	1914523,01
36	32,7	4762995,14	1914682,3
37	33,8	4762619,34	1914840,13
38	33,8	4762258,45	1914838,77

39	33,2	4761868,96	1914737,51
40	33,6	4761571,22	1914517,2
41	35,5	4761321,12	1914743,2
42	33	4761085,82	1915001,74
43	36,2	4760857,41	1915261,47
44	35,4	4760494,91	1915448,35

Nota. Elaboración Propia

Con estos datos se busca validar la información obtenida a través del procesamiento de las imágenes satelitales en cuanto al incremento de temperatura, específicamente para el año 2022.

Fase De Ejecución

Para la obtención de las imágenes satelitales, se hizo uso del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), teniendo en cuenta la fecha de lanzamiento de los satélites Landsat 7 (1999) y Landsat 8 (2013), de esta forma, las imágenes satelitales Landsat 7 se descargaron partir del año 2000 al 2013, mientras que las imágenes Landsat 8 desde el año 2014 al 2022. Para la elección de estas se tuvo en cuenta que el porcentaje de nubosidad en el área de estudio fuera menor a 10 %, en base a este criterio se obtuvieron un total de 22 imágenes para 14 años como muestra a continuación:

Tabla 2

Imágenes satelitales Landsat 7 y 8

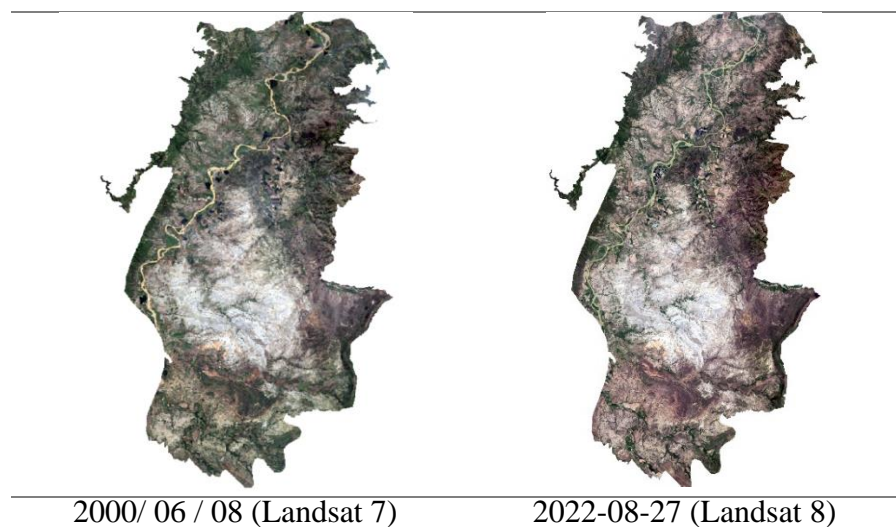
SATÉLITE	AÑOS	TEMPORADA
Landsat 7	2000-06-11	Seca
	2000-08-30	Seca
	2003-01-11	Seca
	2006-05-11	Lluviosa
	2007-02-03	Seca
	2009-10-26	Lluviosa
	2010-01-14	Seca
	2010-01-30	Seca
	2010-10-30	Lluviosa
	2011-09-30	Lluviosa
2013-03-11	Lluviosa	

Landsat 8	2013-03-27	Lluviosa
	2013-10-05	Lluviosa
	2015-01-08	Seca
	2015-12-22	Seca
	2017-10-08	Lluviosa
	2018-03-27	Lluviosa
	2020-03-07	Lluviosa
	2020-03-22	Lluviosa
	2021-03-25	Lluviosa
	2021-07-15	Seca
	2022-08-27	Seca

Nota. Elaboración Propia

Es de resaltar que, Colombia presenta un régimen de precipitación bimodal, con dos temporadas lluviosas durante el año, marcadas por el desplazamiento de la Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT), de sur a norte durante el primer semestre y de norte a sur en el segundo. Las épocas de mayores lluvias están distribuidas en los meses de marzo-mayo y septiembre-noviembre respectivamente; separadas por dos periodos seco o de menores precipitaciones en los meses de diciembre-febrero y junio-agosto a mitad de año (Núñez & Verbist, 2018).

Tabla 3
Imágenes Satelitales Obtenidas Desde La Plataforma USGS-EarthExplore



Nota. Elaboración Propia

Teniendo en cuenta que el sensor Landsat 7 desde junio de 2003, ha entregado imágenes con lagunas de datos causadas por la falla del corrector de línea de escaneo (SLC), se realizó la corrección mediante el software QGIS, haciendo uso de los datos inmersos en la carpeta que se descarga de la página del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), siguiendo la metodología propuesta en la figura 4.

Una vez realizada la corrección de las imágenes Landsat 7, se procederá a calcular el índice de vegetación Normalizado NDVI, para las 22 imágenes satelitales tanto Landsat 7 (Bandas 4 y 3) como Landsat 8 (Bandas 4 y 5) mediante la siguiente fórmula:

Figura 3
Fórmula general NDVI

$$NDVI = \frac{Irc - R}{Irc + R}$$

Fuente: (Tucker, 1979; Tucker y Sellers, 1986).

Donde: NDVI: Índice Normalizado de Vegetación

Irc: Reflectancia de la superficie de la tierra en el intervalo del espectro electromagnético correspondiente a 725 -1100 nm (Infrarrojo Cercano).

R: Reflectancia de la superficie de la tierra en el intervalo del espectro electromagnético correspondiente a 580 – 680 nm (Rojo).

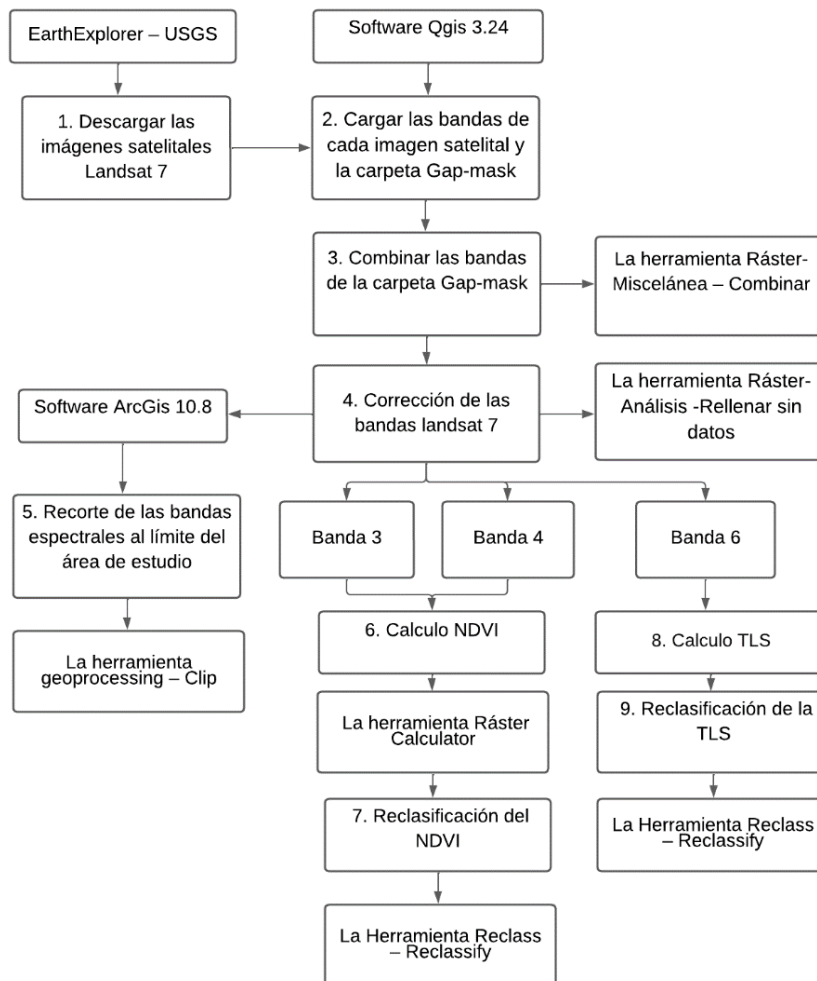
Igualmente se presentan los coeficientes de calibración para las imágenes Landsat

Tabla 4
 Constantes de calibración Imágenes Landsat

Satélite	K1	K2
Landast- 4 TM	671,62	1284,3
Landast- 5 TM	607,76	1260,6
Landast- 7 ETM+	666,09	1282,7
Landast- 8 TIRS Banda 10	774,89	1321,08
Landast- 8 TIRS Banda 11	480,89	1201,14

Procesamiento Landsat 7

Figura 4
 Procesamiento Landsat 7



Nota. Elaboración Propia

Para calcular la temperatura de la superficie terrestre para las imágenes satelitales Landsat 7, primero se calculó la radiancia espectral de la banda térmica teniendo en cuenta los datos inmersos en las carpetas descargadas del USGS para cada año, donde se encuentra un archivo tipo texto (TML), con los valores fijos necesarios para despejar la siguiente formula:

Figura 5
Formula radiancia espectral de la banda térmica

$$L\lambda = \left(\frac{LMAX\lambda - LMIN\lambda}{QCALMAX - QCALMIN} \right) * (QCAL - QCALMIN) + LMIN\lambda$$

Donde:

$L\lambda$: radiancia espectral de la banda térmica

LMAX y LMIN: valores de radiancia máxima y mínima para la banda 6

QCALMAX y QCALMIN: son los valores máximo y mínimo de la radiancia calibrada

Posterior a calcular la radiancia espectral se determina la TLS, haciendo uso de las constantes de calibración **tabla 4**.

Figura 6
Formula Temperatura de la superficie terrestre

$$TLS = \frac{K2}{\ln \left(\frac{K1}{L} + 1 \right)}$$

Donde:

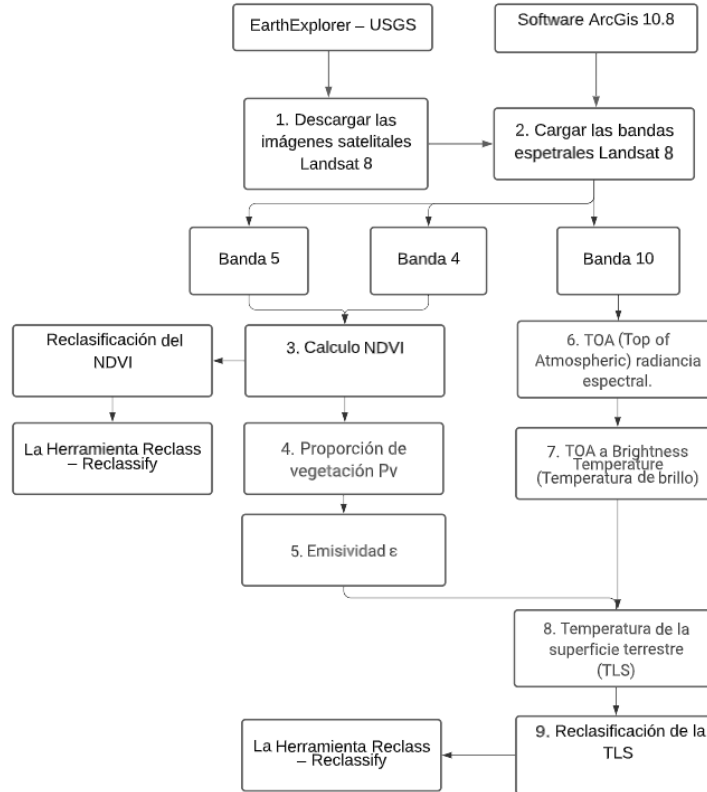
K1 Y K2: Constantes de calibración

In: Logaritmo natural

Procesamiento Landsat 8

Figura 7

Procesamiento Landsat 8



Nota. Elaboración Propia

Una vez realizado el cálculo NDVI se definió el Índice de Proporción Vegetal (PV) debido a que este permite aislar la emisividad de las diferentes coberturas.

Figura 8

Formula PV

$$P_v = \left[\frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \right]^2$$

Nota. (Carlson & Ripley, 1997, como se citó en Barbáchano, 2020).

Así mismo se calcula la emisividad a partir del P_v teniendo en cuenta que la emisividad de la superficie terrestre (LSE (ϵ)) debe conocerse para estimar la LST, ya que la LSE es un factor de proporcionalidad que escala la radiancia del cuerpo negro (ley de Planck) para predecir la radiancia emitida, y es la eficiencia de transmitir energía térmica a través de la superficie en la atmósfera (Avdán y Jovanovska, 2016)

Figura 9

Fórmula de emisividad a partir del Índice de Proporción Vegetal P_v

$$\epsilon_{TM6} = 0.004 P_v + 0.986$$

Nota. (Sobrino, Jiménez-Muñoz & Paolini, 2004)

De igual manera se calculó la radiación espectral atmosférica (TOA) teniendo en cuenta los datos suministrados por USGS los cuales consisten en una serie cuantificada, calibrada y escalada de niveles digitales ND, representando los datos de una imagen multiespectral adquirida por ambos sensores: OLI Operational Land Imagen y el TIRS Thermal Infrared Sensor. Los datos de las bandas del sensor TIRS y OLI están derivados en 16 bits en formato no cifrado y pueden ser reescalados a los valores de reflectancia y o radiancia en el espectral de la atmosfera TOA, usando para ello los coeficientes radiométricos provistos en el archivo de metadato MTL.txt de la banda 10, tal y como se describe a continuación (Ariza, 2013).

Figura 10

Cálculo de radiancia espectral atmosférica TOA

$$L_\lambda = M_L Q_{cal} + A_L$$

Nota. USSG, 2013

Donde:

L_{λ} = Radiancia espectral TOA (Watts/(m² * srad * μ m))

M_L =Factor de cambio de escala multiplicativo específico de banda de los metadatos
(RADIANCE_MULT_BAND_x, donde x es el número de banda)

A_L =Factor de cambio de escala aditivo específico de banda de los metadatos
(RADIANCE_ADD_BAND_x, donde x es el número de banda)

Q_{cal} = valores de píxel de producto estándar cuantificados y calibrados (DN)

Posteriormente las bandas obtenidas por el sensor TIRS pueden ser convertidas de radiancia espectral a temperatura de brillo en grados Kelvin (k) usando para ello la constante térmica suministrada en el archivo de metadatos:

Figura 11

Formula Temperatura de Brillo.

$$T = \frac{k_2}{\ln\left(\frac{k_1}{L_{\lambda}} + 1\right)}$$

Nota. USSG, 2013.

Donde:

T = Temperatura de brillo de la parte superior de la atmósfera (K)donde:

L_{λ} =Radiancia espectral TOA (vatios/ (m² * srad * μ m))

K_1 =Constante de conversión térmica específica de banda de los metadatos
(K1_CONSTANT_BAND_x, donde x es la banda térmica número)

K_2 =Constante de conversión térmica específica de banda de los metadatos
(K2_CONSTANT_BAND_x, donde x es el número de banda térmica)

Finalmente, se calculará la temperatura de la superficie a partir de los valores de brillo de la imagen mediante la siguiente fórmula:

Figura 12
Formula temperatura superficial

$$T_s = \frac{BT}{\left\{ 1 + \left[\frac{\lambda \cdot BT}{\rho} \cdot \ln \varepsilon \right] \right\}}$$

Nota. M, Stathopoulou., Cartalis, C. 2016

Reclasificación NDVI y TLS

Una vez obtenidos los ráster de NDVI y TLS para cada una de las imágenes satelitales, estos se reclasificaron mediante el software ArcGIS, para NDVI se tuvo en cuenta la siguiente clasificación:

Tabla 5
Clasificación NDVI

Descripción	Clasificación	Rango	
Suelo desnudo y/ agua	1	≤	0
Muy baja. Suelo árido a vegetación ligera	2	0	0,2
Baja Cantidad de vegetación	3	0,2	0,4
Moderadamente baja. Cantidad de vegetación media	4	0,4	0,6
Moderadamente Alta. Cantidad de vegetación medio – alta	5	0,6	0,8
Alta. Vegetación densa	6	0,8	≥ 1

Nota. Elaboración Propia

Por el contrario, para definir los rangos de temperatura de la superficie terrestre se tuvieron en cuenta los datos de temperatura máxima y mínima para cada imagen como se muestra en la tabla 6, estos datos se agruparon en un total de 6 intervalos con una amplitud cada uno de 7 como se muestra en las tablas 7.

Tabla 6
Temperatura máxima y mínima

Año	Imagen	Tem-Max	Tem-Min
2000	11/06/2000	33,161	8,057
	30/08/2000	34,976	7,084
2003	11/01/2003	37,779	9,659
2006	11/05/2006	32,376	9,340
2007	3/02/2006	42,977	22,556
2009	26/10/2009	30,525	8,057
	14/01/2010	39,782	19,973
2010	30/01/2010	38,282	17,925
	30/10/2010	37,779	15,539
2011	30/09/2011	37,273	16,736
	11/03/2013	33,161	17,629
2013	27/03/2013	39,284	5,111
	28/03/2013	39,533	9,659
2015	08/01/2015	37,722	14,906
	22/12/2015	40,778	23,208
2017	8/10/2017	38,096	4,160
2018	27/03/2018	31,164	14,285
2020	07/03/2020	35,919	15,400
	22/03/2020	34,491	12,674
2021	25/03/2021	28,429	11,597
	15/07/2021	41,551	18,848
2022	27/08/2022	29,777	7,773

Nota. Elaboración Propia

Tabla 7
Clasificación de TLS

Intervalos		Clasificación
4,160	11,160	1
11,160	18,160	2
18,160	25,160	3
25,160	32,160	4
32,160	39,160	5
39,160	46,160	6

Nota. Elaboración Propia

Una vez reclasificados todos los datos correspondientes al índice de vegetación de diferencia normalizada y de temperatura de la superficie terrestre, estos se convirtieron de ráster a polígono, para obtener un mejor análisis de la información.

Análisis estadístico

Para realizar correctamente el análisis estadístico se realizó una grilla de muestreo para toda el área de estudio mediante el software ArcGIS conformada por un total de 513 cuadrantes, con la finalidad de elegir la muestra representativa de la grilla., Se utilizó la siguiente fórmula para población finita:

Figura 13

Formula tamaño de la muestra representativa población finita

$$n = \frac{N * Z_a^2 * p * q}{e^2 * (N - 1) + Z_a^2 * p * q}$$

Donde:

n: Tamaño de la muestra buscado

N: Tamaño de la población o universo

Z: parámetro estadístico que depende del nivel de confianza (NC)

e: Error de estimación máximo aceptado

p: Probabilidad de que ocurra el evento estudiado

q: (1 - p): Probabilidad de que no ocurra el evento estudiado

Tabla 8
Tamaño de muestra representativa

Parámetro	Valor
N	513
Z	1,960
P	50,00%
Q	50,00%
e	5,00%
n	220

Nota. Elaboración Propia

De acuerdo con lo anterior se obtuvo que la muestra representativa sería de 220 cuadrantes, estos se eligieron aleatoriamente para establecer la grilla final, de la cual, mediante el software ArcGIS, se realizó la extracción de datos por máscara, tomando en cuenta esta y la capa tipo polígono de NDVI y TLS.

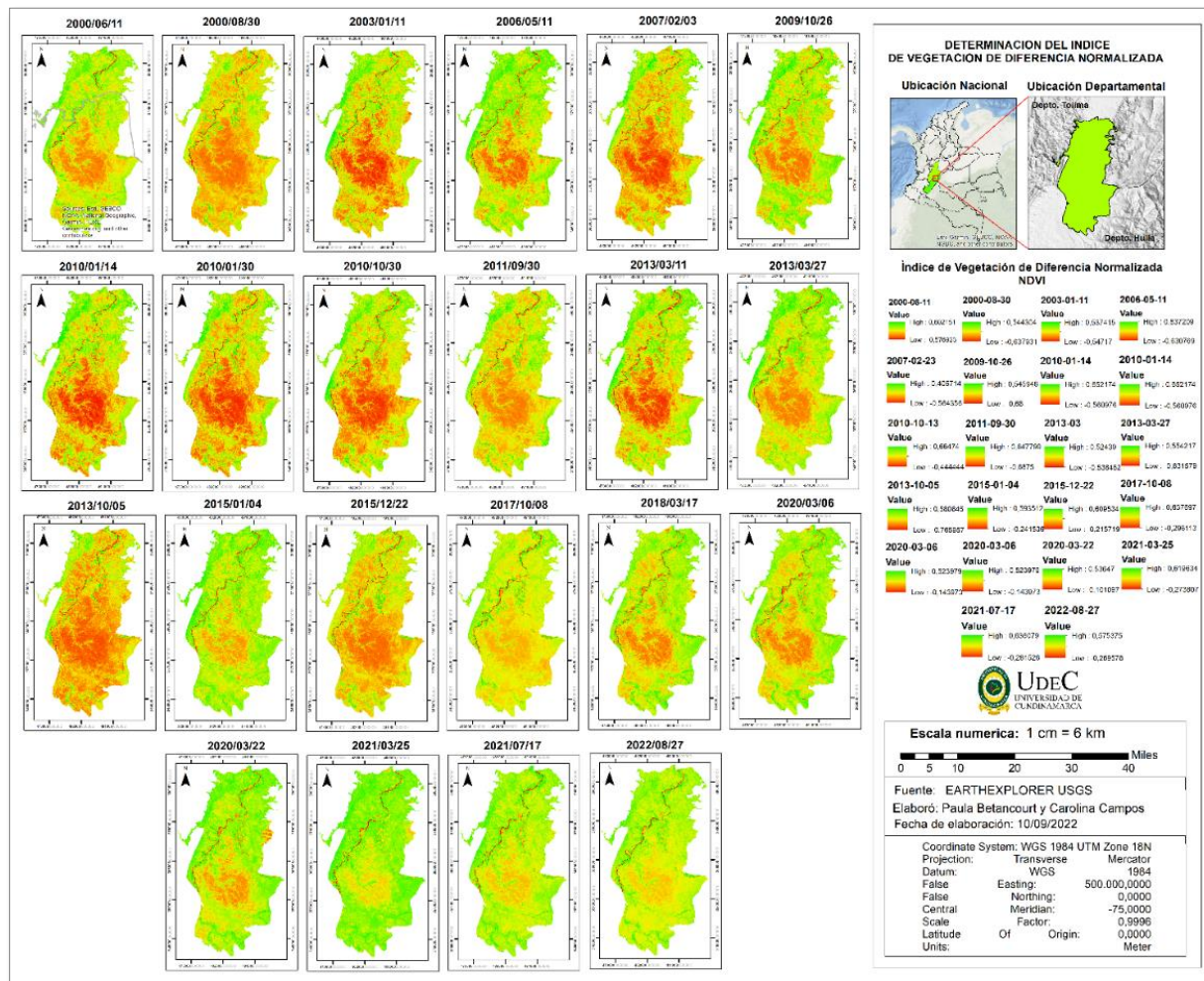
Seguidamente, para el análisis estadístico se utilizó el software R Estudio, mediante el cual se realizó un análisis de varianza para las variables de NDVI y TLS, según la categoría, año y área mediante box plots el cual permite establecer la relación entre una variable numérica y una categórica, y ver si hay relación funcional entre ambas, por otra parte, se obtuvo los gráficos de dispersión de correlación teniendo en cuenta el ráster de cada una de las variables (NDVI y TLS) y el valor medio de los 220 cuadrantes para cada uno de los años a estudiar a fin de determinar una medida de la relación lineal entre dos variables numéricas.

Resultados y Discusión

Análisis del índice de vegetación de diferencia normalizada

A continuación se presentan los mapas temáticos y resultados obtenidos a través del procesamiento de imágenes satelitales y el análisis estadístico de varianza para el índice de vegetación de diferencia normalizado desde el año 2000 al 2022.

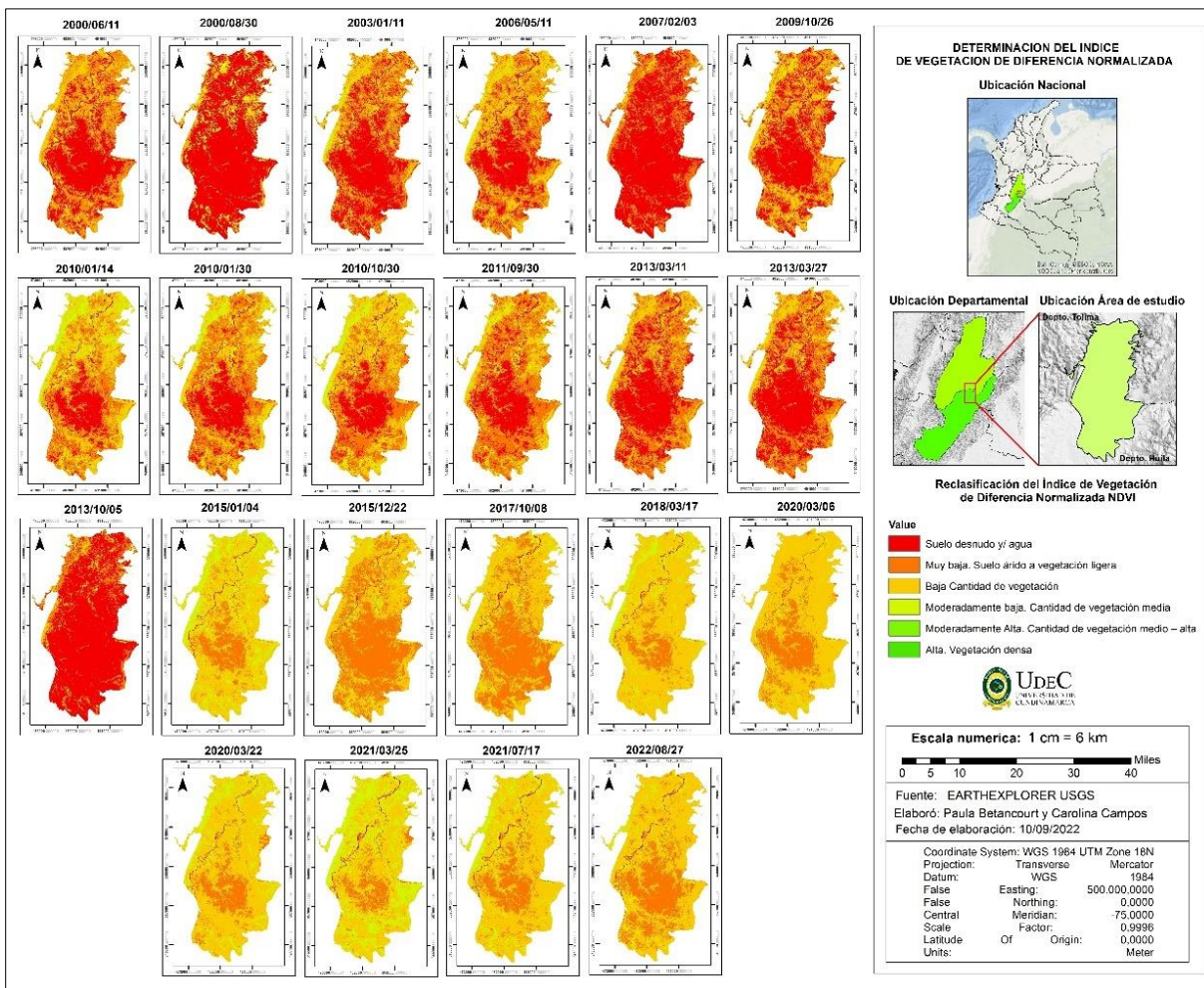
Figura 14
 Mapa temático NDVI 2000 – 2022



Nota. Elaboración Propia

Como se logra observar en la figura 14, los mapas obtenidos se presentan en una escala de color que va de tonalidades verdes a rojas, en este siendo los valores de NDVI cercanos a -1 se ven reflejados en tonalidades rojas representando los suelos desnudos. Así mismo, cuando los valores se encuentran cerca de +1 indica abundante vegetación.

Figura 15
Mapa temático NDVI Reclasificado 2000 – 2022



Nota. Elaboración Propia

Como se explicó anteriormente, el NDVI se reclasificó en 6 categorías dentro de las cuales según los resultados obtenidos en el área de estudio del 2000 al 2013 se destacan principalmente los suelos desnudos (color rojo), suelo árido a vegetación ligera (color naranja) y

baja cantidad de vegetación (color amarillo). Sin embargo, del 2015 al 2022 los suelos desnudos fueron remplazados en su mayoría por suelo árido a vegetación ligera (color naranja), baja cantidad de vegetación (color amarillo) y cantidad de vegetación media (color amarillo claro). Cabe mencionar que durante los años 2020 y 2021 se evidencia un crecimiento prolongado de la categoría cantidad de vegetación media- alta (verde claro) el cual se redujo nuevamente en el año 2022.

Por otra parte, los datos obtenidos mediante la extracción de información a partir de la grilla de muestreo y la capa de polígono para NDVI se presentan en la tabla 9, estos se agruparon por año y categoría con respecto al área de ocupación según cada clasificación.

Tabla 9
Resultados de NDVI en términos de área y categoría

Años	Descripción	Suelo desnudo y/ agua	Muy baja. Suelo árido a vegetación ligera	Baja Cantidad de vegetación	Moderadamente baja. Cantidad de vegetación media	Moderadamente Alta. Cantidad de vegetación medio – alta	Alta. Vegetación densa
		1	2	3	4	5	6
		Clasificación	1	2	3	4	5
	Rango	≤0	0 - 0,2	0,2 – 0,4	0,4 – 0,6	0,6 – 0,8	0,8 - ≥ 1
11/06/2000		22863,1862	17311,5457	8726,02601	599,151997	0,090107	0
30/08/2000		39570,5874	7354,30037	2433,60029	141,511927	0	0
11/01/2003		23569,7693	15614,8364	9386,26647	929,127914	0	0
11/05/2006		16091,4254	17457,4512	14353,1812	1597,94227	0	0
3/02/2007		36031,2479	11714,7948	1753,95733	0	0	0
26/10/2009		20218,2911	15952,2512	12468,5963	860,861435	0	0
14/01/2010		9686,89408	17307,6978	16530,8942	5957,29881	17,215091	0
30/01/2010		12658,4137	20664,8245	13054,2507	3119,08719	3,423979	0
30/10/2010		10299,8587	19164,7873	15379,2471	4626,9094	29,19755	0
30/09/2011		13732,7317	23544,662	10038,2631	2177,16668	7,176499	0
11/03/2013		20895,9602	18760,7689	9631,72128	211,549609	0	0
27/03/2013		23113,7389	16998,9095	8952,4383	434,913256	0	0
5/10/2013		40272,9607	6815,81341	2213,3543	197,871593	0	0
4/01/2015		323,06511	8965,27369	29379,2478	10832,4134	0	0
22/12/2015		301,759879	27460,48	19348,4912	2389,17882	0,090103	0
8/10/2017		486,639165	24443,7008	21739,966	2824,91851	4,775559	0
17/03/2018		297,842217	6600,38891	36309,883	6291,8859	0	0
6/03/2020		129,647193	12587,2682	34814,3748	1968,70979	0	0
22/03/2020		259,127447	8472,51928	34276,2238	6492,12944	0	0
25/03/2021		510,732242	5808,71675	26598,8277	16581,0925	0,630764	0
15/07/2021		491,536695	9689,92533	32438,5651	6879,43221	0,540658	0
27/08/2022		458,883222	16976,1256	28987,9063	3077,08483	0	0

Nota. Elaboración Propia

Según la tabla 9, se logra evidenciar que la cobertura vegetal del área de estudio es nula con respecto a la categoría 6 de alta vegetación y vegetación densa, puesto que no presenta datos, lo que indica que durante los últimos 22 años la cobertura vegetal se encuentra comprendida principalmente entre las categorías 1 y 4, puesto que, con respecto a la categoría 5 solo 11 años entran en la clasificación de vegetación Moderadamente Alta y Cantidad de vegetación medio – alta.

Tabla 10
Porcentajes por categoría de NDVI 2000 – 2022

Años	Descripción	Suelo desnudo y/ agua	Muy baja. Suelo árido a vegetación ligera	Baja Cantidad de vegetación	Moderadamente baja. Cantidad de vegetación media	Moderadamente Alta. Cantidad de vegetación medio – alta	Alta. Vegetación densa							
								Clasificación	1	2	3	4	5	6
								Rango	≤0	0 - 0,2	0,2 – 0,4	0,4 – 0,6	0,6 – 0,8	0,8 - ≥ 1
11/06/2000		46,18825495	34,9728196	17,6283354	1,21040807	0,00018203	0							
30/08/2000		79,94058061	14,8571725	4,91636422	0,28588268	0	0							
11/01/2003		47,61569556	31,545124	18,9621545	1,87702609	0	0							
11/05/2006		32,5079301	35,2675782	28,9963257	3,2281662	0	0							
3/02/2007		72,7903998	23,6662521	3,54334814	0	0	0							
26/10/2009		40,84503253	32,2267701	25,1890834	1,73911401	0	0							
14/01/2010		19,569483	34,9650461	33,3957459	12,0349471	0,03477796	0							
30/01/2010		25,57255293	41,7471202	26,3722236	6,30118624	0,00691713	0							
30/10/2010		20,80779535	38,716742	31,0691861	9,34729172	0,05898495	0							
30/09/2011		27,74289232	47,5649737	20,2793194	4,39831653	0,01449798	0							
11/03/2013		42,21406101	37,9005432	19,4580228	0,42737295	0	0							
27/03/2013		46,69442202	34,3412313	18,0857339	0,87861264	0	0							
5/10/2013		81,35951657	13,76932	4,47142283	0,39974059	0	0							
4/01/2015		0,652656788	18,111664	59,3520158	21,8836634	0	0							
22/12/2015		0,609615917	55,4757172	39,087861	4,82662388	0,00018203	0							
8/10/2017		0,983109424	49,3812137	43,9191232	5,70690608	0,00964759	0							
17/03/2018		0,601701448	13,334119	73,353299	12,7108806	0	0							
6/03/2020		0,261913521	25,4288246	70,3320703	3,97719149	0	0							
22/03/2020		0,523489792	17,1162006	69,2448966	13,115413	0	0							
25/03/2021		1,031782307	11,7347813	53,7350055	33,4971566	0,00127427	0							
15/07/2021		0,993003424	19,5756067	65,5324547	13,8978428	0,00109224	0							
27/08/2022		0,927036812	34,2952032	58,5614269	6,21633299	0	0							

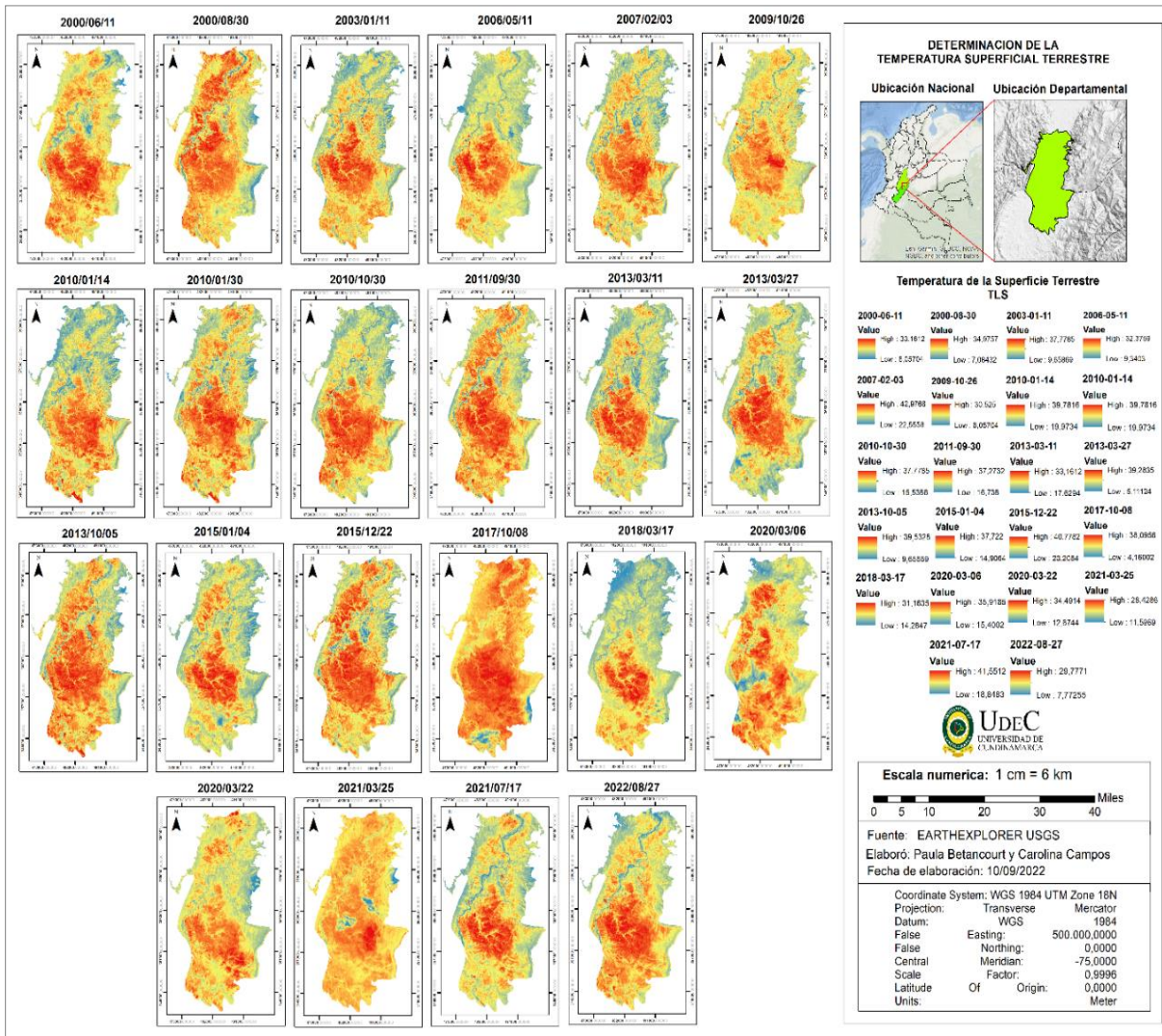
Nota. Elaboración Propia

De acuerdo con la tabla 10, para la categoría de Suelo desnudo y/ agua, el año 2013 presento el mayor porcentaje con un 81,35%, mientras que en el 2020 (marzo 06), se evidencio el menor porcentaje con un valor de 0,26 %., para la categoría Muy baja. Suelo árido a vegetación ligera, el año 2015 (Diciembre, 22) tuvo el mayor porcentaje 55,47 %, y el año 2021 el menor valor con un 11,7347813%., Para la categoría Baja Cantidad de vegetación, el año con mayor porcentaje fue el 2018, con el 73,35 % y el 2007 con el menor porcentaje., así mismo, para la categoría Moderadamente baja. Cantidad de vegetación media, el 2021 (marzo, 25), presento el mayor valor, con el 33,49 %, al igual que la categoría anterior el porcentaje más bajo fue en año 2007., para la categoría Moderadamente Alta. Cantidad de vegetación medio – alta, el año 2010 (octubre, 30) presento el mayor porcentaje con 0,05%, siendo el valor mínimo cero (0), representado por trece años., finalmente para la categoría Alta. Vegetación densa, no se envician valores, para ninguno de los años.

Análisis de la Temperatura de la superficie terrestre

Al igual que el NDVI para el análisis de Temperatura de la superficie terrestre se presentan los mapas temáticos correspondientes a cada año y los resultados obtenidos a través del procesamiento de imágenes satelitales y el análisis estadístico de varianza del 2000 al 2022.

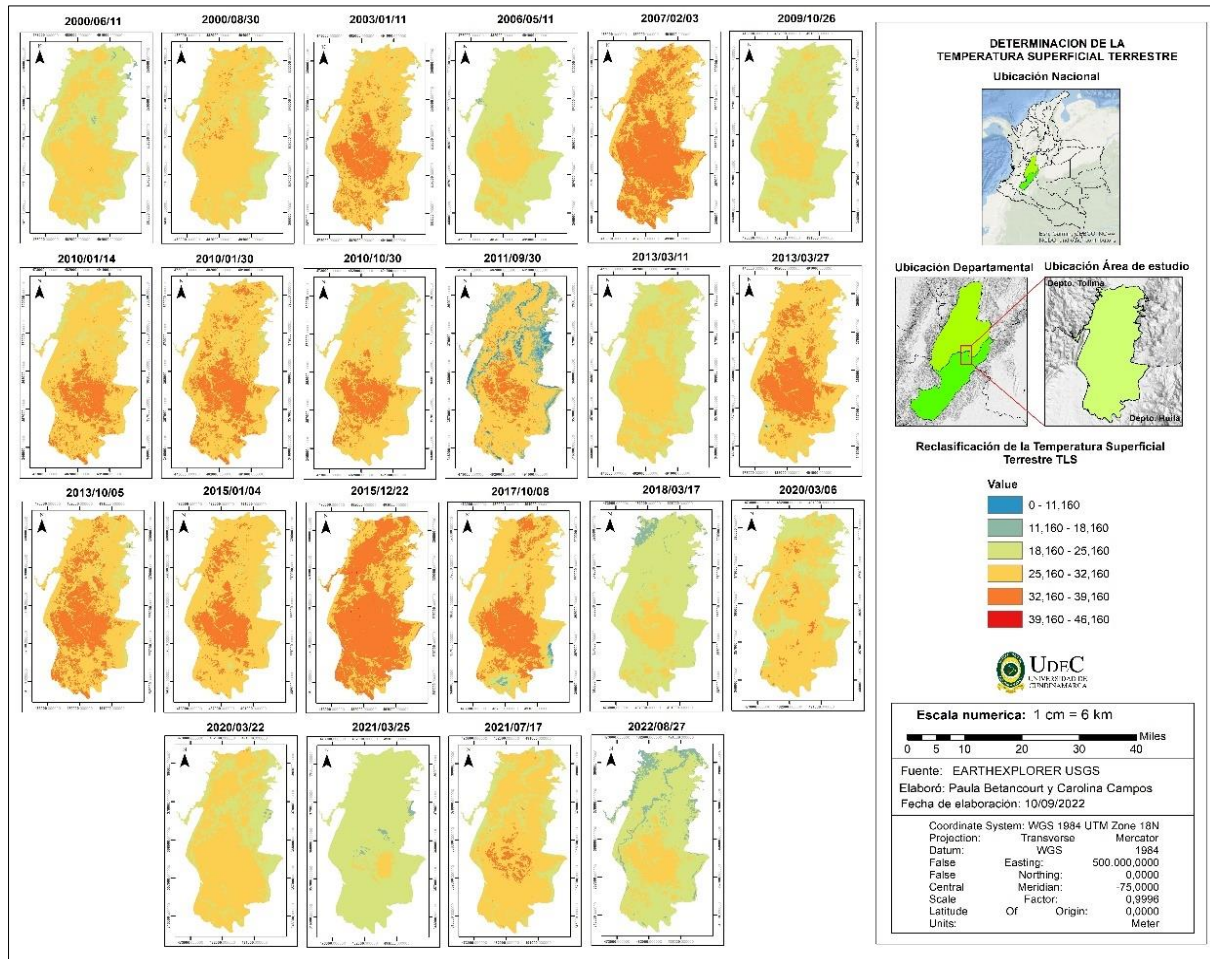
Figura 16
 Mapas temáticos TLS 2000 -2022



Nota. Elaboración Propia

En la ilustración 16, se presentan los mapas obtenidos de TLS para cada uno de los años, la escala de color va de tonalidades azules a rojas, en este siendo las tonalidades azules representan valores de temperatura $\leq 0 - 11,160$, mientras que las tonalidades rojas rangos de $39,160 - 46,160$.

Figura 17
Mapas temáticos TLS Reclasificado 2000 -2022



Nota. Elaboración Propia

Teniendo en cuenta la categorización designada para cada uno de los valores de temperatura (Figura 17), se determina que en el área de estudio del 2000 al 2017 se denotan suelos con temperaturas que van de los 25 °C a 39 °C, exceptuando el año 2013 el cual teniendo en cuenta que la imagen fue tomada en temporada lluviosa la temperatura disminuyó encontrándose de 18 °C a 32 °C. Por otra parte, para los años 2020 y 2021 (julio 17) se destacan suelos en donde la mayoría de su área se encuentra con temperaturas de 25 a 32 °C lo contrario a los años 2018, 2021 (marzo 25), y 2022 en donde gran parte de su área presenta TLS de 18 a 25 °C y solo en una pequeña parte se encuentra de 25 a 32 °C.

En la tabla 11 se presentan los datos obtenidos a través de la extracción de información de la grilla de muestreo y el ráster reclasificado, para la Temperatura de la superficie terrestre con respecto al área de ocupación por categoría para cada uno de los años

Tabla 11
Resultados de TLS en términos de área y categoría

Años	Clasificación	1	2	3	4	5	6
	Rango	≤0 – 11,160	11,160 – 18,160	18,160 – 25,160	25,160 – 32,160	32,160 – 39,160	39,160 – 46,160
11/06/2000		0	247,706043	19517,6216	29695,2058	39,466531	0
30/08/2000		0	10,827607	9621,612729	39066,439177	801,120502	0
11/01/2003		0	0	1666,08497	33860,32664	13973,5884	0
11/05/2006		0	81,694258	34043,8831	15374,15223	0,27033	0
3/02/2007		0	0	257,355889	19086,14498	29899,6276	256,871533
26/10/2009		0	0	32975,5871	16524,41288	0	0
14/01/2010		0	0	3184,14556	35959,30751	10356,5469	0
30/01/2010		0	0	1321,7597	33210,59047	14967,6498	0
30/10/2010		0	1,081274	4407,76395	35337,2625	9753,89229	0
30/09/2011		1446,46859	5161,61143	899,873526	36076,39289	5915,65353	0
11/03/2013		0	0,090102	21971,2473	27528,21209	0,450544	0
27/03/2013		1,002119	8,584314	1368,31324	31158,85211	16963,2482	0
5/10/2013		0	0	1890,16285	30743,96962	16865,8348	0,0327
4/01/2015		0	0	1237,69685	35815,10885	12447,1943	0
22/12/2015		0	0	104,404792	13760,68262	35609,5249	25,387633
8/10/2017		43,862889	388,782718	2700,7741	30279,89804	16086,6823	0
17/03/2018		0	944,284674	39102,24	9453,475324	0	0
6/03/2020		0	42,863237	11804,1034	36575,39276	1077,64065	0
22/03/2020		0	56,27463	13636,4649	35807,26045	0	0
25/03/2021		0,090106	547,472723	46681,1049	2271,332315	0	0
15/07/2021		0	0	7552,74823	39451,52231	2495,72946	0
27/08/2022		0	2876,94827	35301,8005	11321,25118	0	0

Nota. Elaboración Propia

Según la información agrupada y presentada en la tabla 11, se puede evidenciar que para la TLS la mayor cobertura con respecto al área se encuentra comprendida entre las categorías 3, 4 y 5 respectivamente, mientras que las categorías 1, 2 y 6, no representan datos importantes ya que en su mayoría los valores son nulos.

Tabla 12
Porcentajes por categoría de TLS 2000 – 2022

Años	Clasificación	1	2	3	4	5	6
	Rango	≤0 – 11,160	11,160 – 18,160	18,160 – 25,160	25,160 – 32,160	32,160 – 39,160	39,160 – 46,160
11/06/2000		0,00	0,50	39,43	59,99	0,08	0,00
30/08/2000		0,00	0,02	19,44	78,92	1,62	0,00
11/01/2003		0,00	0,00	3,37	68,40	28,23	0,00
11/05/2006		0,00	0,17	68,78	31,06	0,00	0,00
3/02/2007		0,00	0,00	0,52	38,56	60,40	0,52
26/10/2009		0,00	0,00	66,62	33,38	0,00	0,00
14/01/2010		0,00	0,00	6,43	72,65	20,92	0,00
30/01/2010		0,00	0,00	2,67	67,09	30,24	0,00
30/10/2010		0,00	0,00	8,90	71,39	19,70	0,00
30/09/2011		2,92	10,43	1,82	72,88	11,95	0,00
11/03/2013		0,00	0,00	44,39	55,61	0,00	0,00
27/03/2013		0,00	0,02	2,76	62,95	34,27	0,00
5/10/2013		0,00	0,00	3,82	62,11	34,07	0,00
4/01/2015		0,00	0,00	2,50	72,35	25,15	0,00
22/12/2015		0,00	0,00	0,21	27,80	71,94	0,05
8/10/2017		0,09	0,79	5,46	61,17	32,50	0,00
17/03/2018		0,00	1,91	78,99	19,10	0,00	0,00
6/03/2020		0,00	0,09	23,85	73,89	2,18	0,00
22/03/2020		0,00	0,11	27,55	72,34	0,00	0,00
25/03/2021		0,00	1,11	94,31	4,59	0,00	0,00
15/07/2021		0,00	0,00	15,26	79,70	5,04	0,00
27/08/2022		0,00	5,81	71,32	22,87	0,00	0,00

Nota. Elaboración Propia

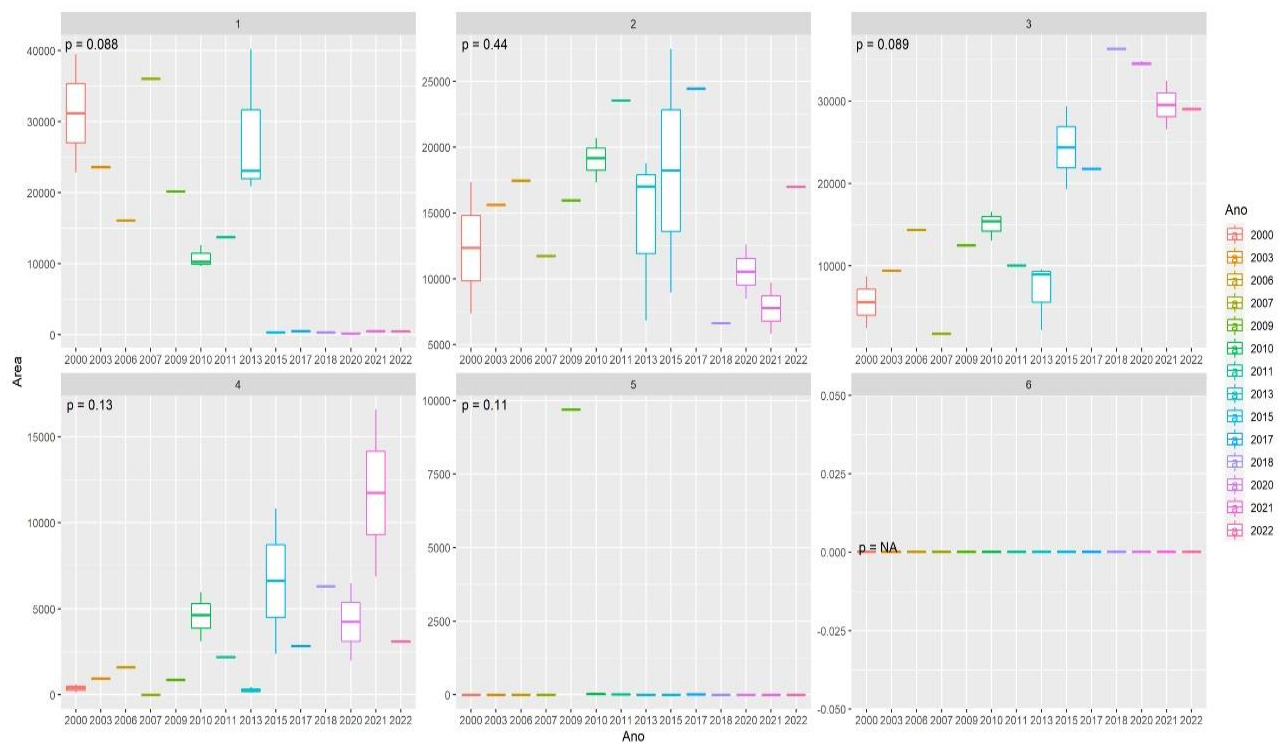
De acuerdo con la tabla 12, se evidencia que para la categoría 2, el año 2011 presentó el mayor porcentaje con un 10,43 %, mientras que para la categoría 3 fue el año 2021 (marzo, 25) con un valor de 94,31%., de la misma forma para la categoría 4 fue el año 2021 (julio, 15) con un 79,70 %., mientras que, para la categoría 5, fue el año 2015 (diciembre, 22), con un 71,94%., además, se evidencia que las categorías uno (1) y seis (6), están representadas solo por dos cada una en porcentajes muy bajos. En comparación con el año 2000 (junio, 6), se puede evidenciar que el año 2022 (agosto, 27), incremento el porcentaje de ocupación en las categorías 2 y 3, mientras que se redujo considerablemente para la categoría 4.

Análisis estadístico ANOVA NDVI y TLS

El análisis estadístico de varianza para las variables de NDVI y TLS se llevó a cabo mediante la elaboración de box plots, que es un gráfico que permite visualizar rápidamente la dispersión de una serie de datos, está formado por una caja rectangular y unas líneas (o bigotes) de los cuales destacan los siguientes valores: Los límites de la caja indican el primer y el tercer cuartil (Q1 y Q3). Y la línea vertical dentro de la caja es la mediana (equivalente al segundo cuartil Q2). Los límites de los bigotes (o brazos) son los valores extremos, es decir, el valor mínimo y el valor máximo de la serie de datos. Los puntos fuera de los bigotes son los valores atípicos (outliers), o dicho con otras palabras, datos que probablemente se han medido mal y por tanto no deberían tenerse en cuenta en el estudio estadístico. (probabilidad y estadística, 2022)

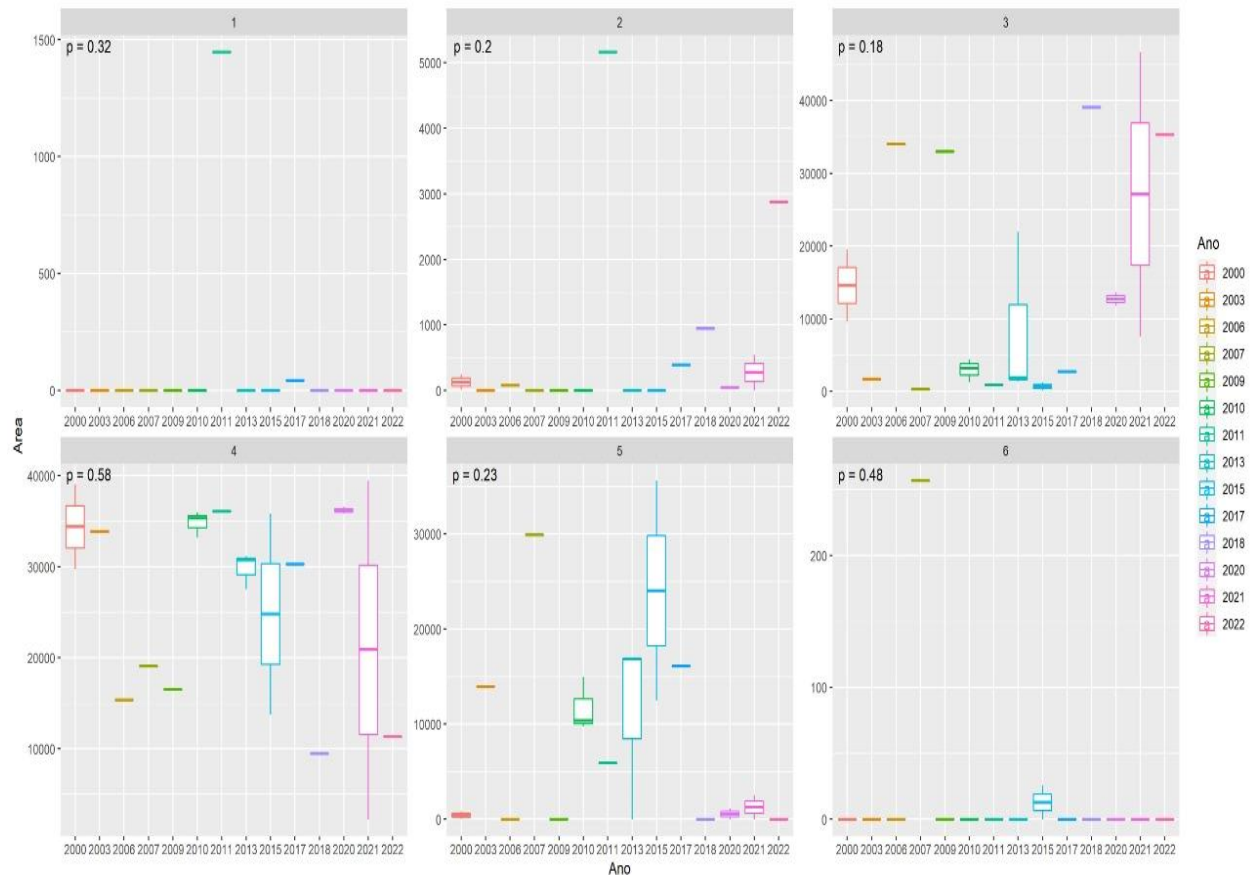
Figura 18

Resultados análisis estadístico ANOVA NDVI



Nota. Elaboración Propia

Figura 19
Resultados análisis estadístico ANOVA TLS



Nota. Elaboración Propia

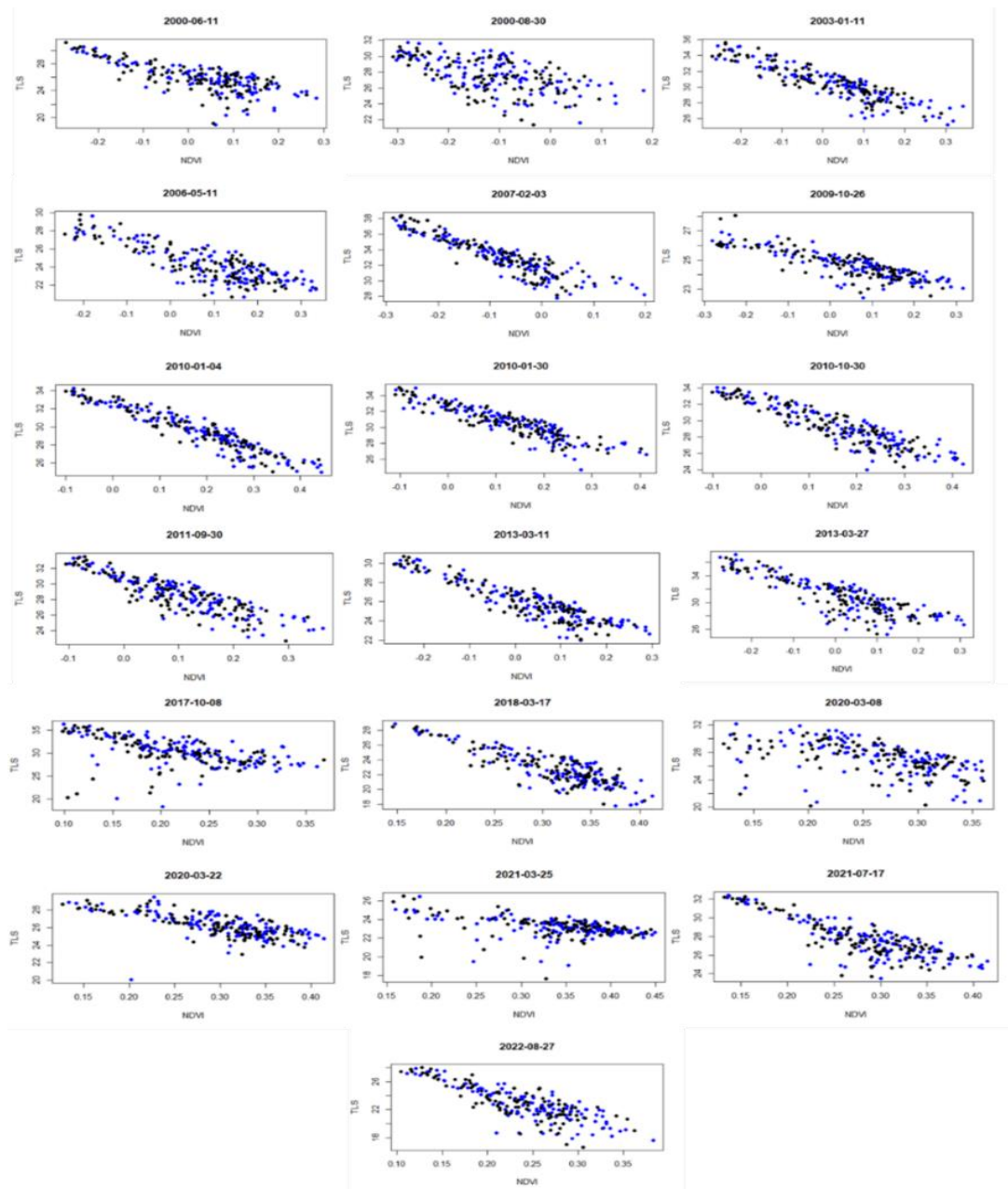
En relación con los gráficos (figura 18 y 19), se pudo observar que los datos se agruparon por categorías con respecto a los años en donde, para ambas variables (NDVI y TLS), no se encontraron valores atípicos. Así mismo, a fin de establecer estadísticamente la existencia de un cambio significativo en términos de área para cada categoría se comparó el valor p con el nivel de significancia para evaluar la hipótesis nula. La hipótesis nula indica que las medias de población son todas iguales. Por lo general, un nivel de significancia (denotado como α o alfa) de ≤ 0.05 funciona adecuadamente. Un nivel de significancia de ≥ 0.05 indica un riesgo de 5% de concluir que existe una diferencia cuando no hay una diferencia real (Molina, 2017). En ese

sentido, de acuerdo con los valores p obtenidos para NDVI y TLS no se obtuvieron estadísticamente cambios significativos ya que dichos valores se encuentran por encima de ≥ 0.05 . Sin embargo, como se observa en la tabla 10 y 12 con respecto a los porcentajes en términos de área es evidente la variabilidad de los datos, pero no los suficientemente considerables para denotar un cambio estadísticamente significativo. Dicho esto, hay que tener en cuenta que la mayoría de las imágenes satélites fueron tomadas durante periodos lluviosos (Tabla 2) lo cual influye directamente en el crecimiento y desarrollo de la cobertura vegetal. De tal manera que se reducen las posibilidades de evidenciar un incremento en la TLS y en los procesos de desertificación, según Sánchez et al. (2010) las temperaturas del suelo son influenciadas por sus coberturas naturales y, especialmente, por residuos orgánicos u otros tipos de coberturas protectoras, aplicadas en su superficie. En periodos de calor mantienen la superficie del suelo más fresca que en los casos en que no existe cobertura.

Análisis de la Correlación entre NDVI y TLS

A fin de establecer la relación entre NDVI y TLS se realizó un gráfico de dispersión de correlación en el Software R-Estudio teniendo en cuenta el ráster de cada una de las variables y el valor medio de los 220 cuadrantes para cada uno de los años a estudiar.

Figura 20
Gráfico de dispersión NDVI y TLS



Nota. Elaboración Propia

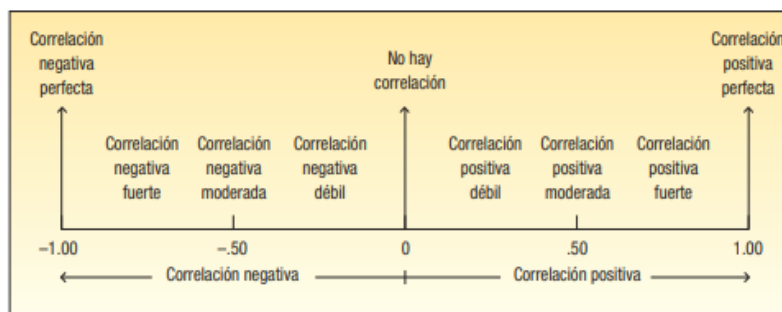
Así mismo, se calculó el coeficiente de correlación de Pearson (Tabla 13), el cual busca definir la fuerza de la relación entre dos conjuntos de variables en escala de intervalo o de razón, adoptando cualquier valor de -1.00 a +1.00 (Lind & Marchal , 2012, p. 465)

Tabla 13
Coefficiente de correlación de Pearson

Años	Nivel de correlación
2000-06-11	-0.7656784
2000-08-30	-0.56762
2003-01-11	-0.9020909
2006-05-11	-0.8306113
2007-02-03	-0.9082224
2009-10-26	-0.84247
2010-01-14	-0.9443182
2010-01-30	-0.9092103
2010-10-30	-0.9084552
2011-09-30	-0.8733261
2013-03-11	-0.9101847
2013-03-27	-0.8475833
2013-10-05	-0.8003851
2015-01-08	-0.8572363
2015-12-22	-0.817782
2017-10-08	-0.5043411
2018-03-27	-0.8620736
2020-03-07	-0.5030021
2020-03-22	-0.7106528
2021-03-25	-0.4301319
2021-07-15	-0.82759
2022-08-27	-0.8261554

Nota. Elaboración Propia

Figura 21
Fuerza y dirección del coeficiente de correlación de Pearson.



Nota. Lind & Marchal (2012)

Teniendo en cuenta los resultados del coeficiente de correlación se determina que los años con más fuerza de relación son 2003, 2007, 2010 (Enero 14) y 2013 (Marzo 11) con valores de -0.90, -0.90, -0.94 y -0.91 respectivamente, demostrando una correlación negativamente fuerte. Sin embargo, los años 2000 (Agosto 30), 2020 (Marzo 7) y 2021 (Marzo 25), presenta una fuerza de correlación negativamente modera a negativamente débil con valores de -0.56, -0.50 y 0.43, lo cual indica que para esos años pueden llegar a existir otras variables influyentes.

Dicho esto, en la Grafica 3 se logra observar una correlación negativa en cada uno de los años, lo cual según Lind & Marchal (2012) esto sucede cuando se presenta un crecimiento de X y a su vez se observa una tendencia a disminuir de Y. Es decir, que a medida que los valores de NDVI aumentan los de TLS disminuyen. Según Preciado y Sanabria, (2021) La distribución espacial de la TLS está estrechamente relacionada con la disminución de la cobertura vegetal determinado como otro factor de variabilidad térmica, mientras la cobertura de NDVI disminuye modo que se presenta una correlación en el aumento de la TLS.

Ahora bien, es importante mencionar que aunque no se encontraron cambios significativos con respecto a la pérdida de cobertura vegetal o al incremento de TLS, relacionados con los procesos de desertificación, se debe tener en cuenta que este proceso se puede incrementar tanto por los valores extremos de la precipitación y temperatura dentro de la variabilidad climática como por los efectos derivados del cambio climático, por ello, es necesario controlar y monitorear principalmente la pérdida de suelo, vegetación entre otros (IGAC, IDEAM y MAVDT, 2010). Teniendo en cuenta que las plantas desempeñan un papel fundamental dentro del ecosistema, ya que conectan la atmósfera con el suelo y se encargan de distribuir el calor y el agua, generando unas condiciones micro y mesoclimáticas que dependen en gran

medida del tipo de vegetación y del tamaño del área cubierta por la misma (Carvajal y Pabón 2016, p. 189)

Agregando a lo anterior, según la Organización Meteorológica Mundial (2006) el clima ejerce una gran influencia sobre el tipo de vegetación, la biomasa y la diversidad de las tierras secas. La precipitación y la temperatura determinan la distribución potencial de la vegetación terrestre, y constituyen los principales factores en la génesis y evolución del suelo. Las precipitaciones influyen también en la producción de vegetación. Las plantas y animales de tierras secas exhiben muy diversas adaptaciones fisiológicas, anatómicas y de comportamiento al estrés hídrico y térmico que conllevan las fuertes variaciones diurnas y estacionales de la temperatura, de la precipitación y de la humedad del suelo. (p.10)

Así mismo, el cambio y la variabilidad del medio ambiente natural interactúan con las causas humanas del cambio en el uso de la tierra. Las condiciones altamente variables de los ecosistemas impulsadas por las variaciones climáticas amplifican las presiones derivadas de las altas demandas sobre los recursos de la tierra, especialmente en condiciones climáticas secas a subhúmedas. Los cambios naturales y socioeconómicos pueden operar como eventos sincrónicos pero independientes. (p.217)

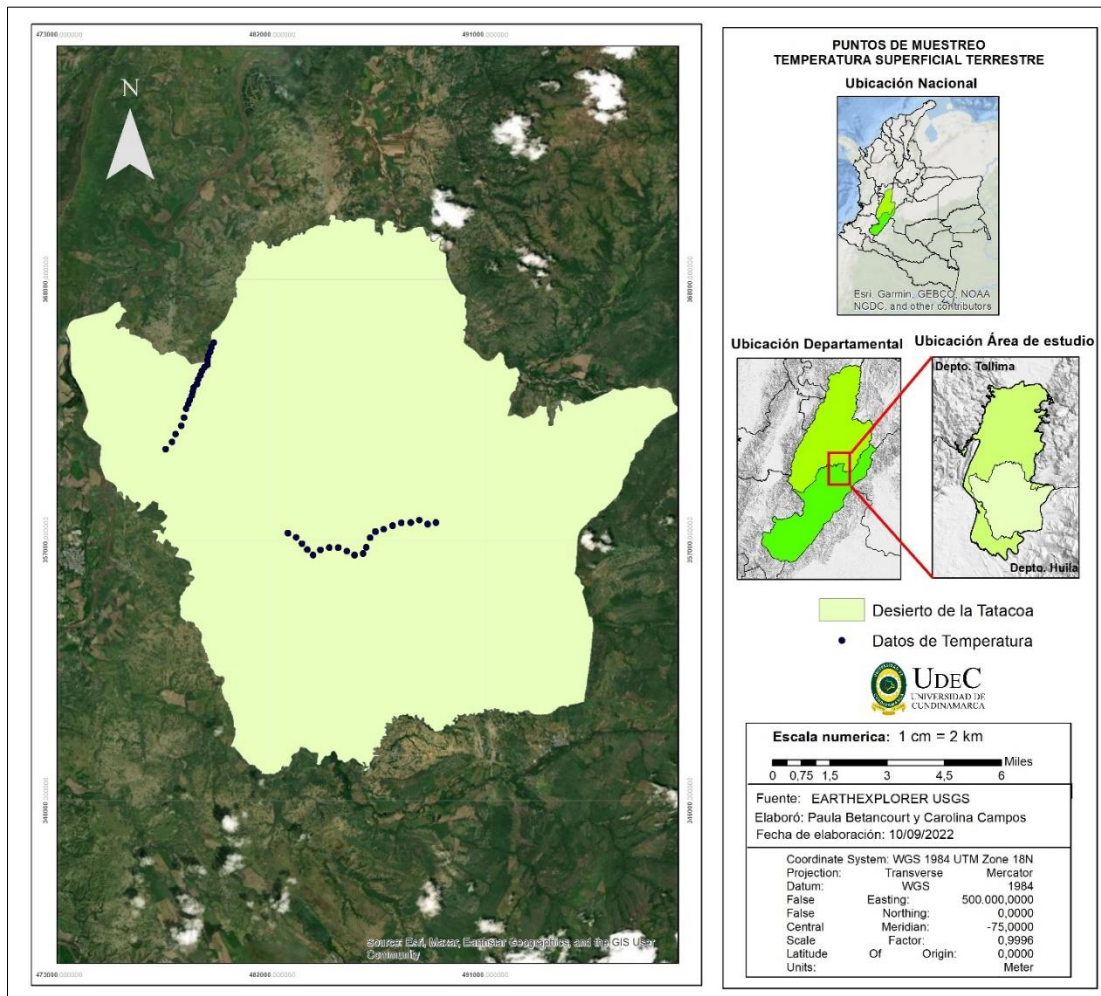
En resumen, el conocimiento de la temperatura superficial en escalas espaciales y temporales más amplias, es una necesidad para diversas aplicaciones, entre las que se encuentran los estudios climáticos y ambientales. Una manera interesante para evaluar este parámetro a gran escala, es el uso de la observación desde el espacio por medio de satélites y sus respectivas bandas termales infrarrojas (SOBRINO et al., 1994). Además, la temperatura superficial se convierte en un factor importante en los estudios de cambio global, específicamente en lo que

respecta al balance de calor y el monitoreo del cambio climático (SRIVASTAVA et al., 2009)., como se citó en (Carvajal y Pabón 2016, p. 192)

Análisis datos obtenidos en campo vs los obtenidos mediante imágenes satelitales

A continuación, se presenta el mapa temático correspondiente a los 44 puntos de muestreo de temperatura superficial terrestre realizados en el desierto de la tatacoa como se mencionó anteriormente.

Figura 22
Mapa puntos de muestreo Tatacoa



Nota. Elaboración Propia

Obtenidos los puntos de muestreo, mediante el software ArcGIS, se extrajo la información correspondiente a TLS y NDVI, por píxel mediante la herramienta “ExtractMultiValuesToPoints”, teniendo en cuenta los ráster sin reclasificar, solo para la imagen satelital del año 2022, con la finalidad de comparar los datos en campo y los obtenidos a través de imágenes satelitales, como se muestra a continuación:

Tabla 14
Datos en campo vs imagen satelital

Datos en campo		Imagen Satelital	
Punto	T ° C	TLS	NDVI
1	34,3	21,1215	0,389312
2	34,3	21,1215	0,389312
3	40	23,4716	0,232511
4	41,1	26,6589	0,186364
5	42,5	26,9874	0,133848
6	41,4	25,8221	0,249247
7	36,2	26,7669	0,195327
8	38,8	27,3989	0,138166
9	37,8	27,6064	0,152394
10	38	27,9437	0,162185
11	34,4	28,0412	0,18207
12	40,2	28,7637	0,098316
13	41,1	28,6621	0,095796
14	39,8	27,8207	0,115665
15	38,5	27,1583	0,122475
16	43,6	28,0206	0,066928
17	40,1	28,2502	0,096696
18	36,4	27,5038	0,143222
19	40	27,7835	0,090376
20	41	27,9997	0,082433
21	41,1	26,146	0,105224
22	37,4	26,72	0,153125
23	41,9	26,5345	0,144513
24	31,6	26,485	0,16499
25	33,6	27,2798	0,124075
26	32,1	27,5505	0,12668
27	31,7	27,4853	0,121088
28	31,9	27,4152	0,119178
29	36,5	27,6508	0,105345

30	36,9	27,2448	0,109219
31	32,3	27,3009	0,102241
32	36,7	26,9733	0,129712
33	32,5	27,2425	0,099783
34	32,5	27,2892	0,103944
35	33,7	26,8374	0,115699
36	32,7	26,9898	0,095555
37	33,8	27,3124	0,160523
38	33,8	28,1528	0,116919
39	33,2	27,1676	0,115002
40	33,6	26,6826	0,112781
41	35,5	27,0483	0,113757
42	33	27,3289	0,101971
43	36,2	26,9334	0,147482
44	35,4	26,6825	0,135745
Promedio	36,57	26,93	0,141981

Nota. Elaboración Propia

Según la **tabla 14**, se puede evidenciar que los datos de TLS obtenidos en campo son mayores con respecto a los obtenidos mediante las imágenes satelitales, lo cual, puede deberse a que los datos de campo se tomaron el 11 de mayo de 2022 y los de las imágenes satelitales tres meses después específicamente para la el 27 de agosto. Teniendo en cuenta el promedio de los datos y la categorización de TLS y NDVI descritas en las **tablas 5 y 7**, La TLS en campo se encuentra en la categoría 5 entre el rango 32,160 a 39,160, mientras que la TLS a partir de imágenes satelitales se encuentra en la categoría 4, que corresponde a el rango 25,160 a 32,160., Además, para el NDVI, se evidencia que se encuentra en la categoría Muy baja. Suelo árido a vegetación ligera.

Conclusiones

- A través de la metodología empleada se logró identificar que para el índice de vegetación de diferencia normalizada, las categorías 1 y 2 presentaron una reducción en comparación del año 2000 (junio 11) y 2022 (agosto, 27), teniendo en cuenta que el porcentaje de ocupación en términos de área pasó de 46,18% a 0,92% y de 34,97% a 34,29%, respectivamente. Por el contrario para las categorías 3 y 4 se evidenció un incremento pasando de 17,6283354% a 58,561%, y de 1,21040807% a 6,21633299%.
- Los resultados obtenidos con respecto a la Temperatura superficial terrestre TLS muestran que para la categoría 3 el año 2000 presentó un menor porcentaje en términos de área con un 39,43%, mientras que en el 2022 éste fue de 71,32% aumentando en un 80%. Así mismo, para la categoría 4 el año 2000 (junio 11) presentó un porcentaje del 59,99% reduciéndose a 22,97% en el año 2022. Además, se evidencia que las categorías uno (1) y seis (6), están representadas solo por dos datos cada una en porcentajes muy bajos.
- Teniendo en cuenta los resultados obtenidos es importante mencionar que para el área de estudio no se presentaron cambios estadísticamente significativos puesto que los valores obtenidos de p-value eran mayores a 0,05. Sin embargo, en términos de área sí se pueden evidenciar dichos cambios.
- Después de aplicar el análisis estadístico, se evidenció que existe una correlación negativa para las variables de NDVI y TLS, demostrando estadísticamente que dichas

variables son inversamente proporcionales una con la otra ya que, cuando los valores de NDVI disminuye los valores para TLS aumentan. Sin embargo, la TLS no solo dependen de la cobertura vegetal sino también de la influencia de diferentes factores como el climatológico.

- El cambio y la variabilidad climática promueven la incidencia de factores que influyen en los procesos de desertificación, tales como, el aumento de la temperatura que a su vez es una de las consecuencias la perdida y cambio de cobertura vegetal., de esta forma las afectaciones no solo serán a nivel de ecosistema, sino de población y en las actividades asociadas en relaciona esta.
- El estudio de las variables ambientales mediante herramientas SIG y teledetección, permite adquirir información de grandes superficies del territorio, para el estudio, evaluación y seguimiento de los recursos naturales, cambio climático, ordenamiento territorial, entre otros, de forma que permita la apropiación del conocimiento y la elaboración de estrategias que contribuyen al mejoramiento de los ecosistemas afectados.

Recomendaciones

- Se recomienda la obtención de las imágenes MODIS (MOD11) las cuales proporcionan datos de Temperatura y Emisividad de la Superficie del Terreno, y tienen un ancho de franja de visualización de 2.330 km y vistas de toda la superficie de la Tierra cada uno a Dos días.
- Para el análisis y procesamiento de la información espaciales es preciso tener en cuenta la estación climática en las cuales fueron tomadas las imágenes satelitales puesto que esto puede interferir significativamente en los resultados esperados.

Bibliografía

- Arboit, E. & Mangione, S. (2018) Análisis multitemporal y multiespacial del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y del índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) en centros urbanos forestados y oasis irrigados, con climas secos. Boletín de Estudios Geográficos n. 109, febrero – junio 2018, pp. 13 – 60.
https://bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/11458/02-arboit-mglione.pdf
- Ariza, A. (2013) Productos LDCM - Landsat 8, Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
<https://www.un-spider.org/sites/default/files/LDCM-L8.R1.pdf>
- Ariza, A. (2013). Descripción y Corrección de Productos Landsat 8 LDCM (Landsat Data Continuity Mission). INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI.
<https://www.un-spider.org/sites/default/files/LDCM-L8.R1.pdf>
- Avdán, U., & Jovanovska, G. (2016) Algoritmo para el mapeo automatizado de la temperatura de la superficie terrestre utilizando datos satelitales LANDSAT 8
<https://doi.org/10.1155/2016/1480307>
- Barbáchano, R. M. (2020). Estimación de la temperatura superficial en imágenes históricas Landsat 5 mediante corrección atmosférica monocanal en el térmico para la cuenca del río Tempisque-Bebedero (Costa Rica). Revista Geográfica de América Central, 65(2), 17-32. Doi: <https://doi.org/10.15359/rgac.65-2.1>

Camacho, Raúl., Camacho, J. M., Balderas, M. A., y Sánchez, M. (2017). Cambios de cobertura y uso de suelo: estudio de caso en Progreso Hidalgo, Estado de México. Madera y Bosques, 23 (3), p39-60. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61753521004>

Carvajal, A. F. y Pabón, J.D. (2014). TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE TERRESTRE EN DIFERENTES TIPOS DE COBERTURA DE LA REGIÓN ANDINA COLOMBIANA. Sociedade & Natureza, 26 (1),95-112.
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=321330589008>

Carvajal, A. F. y Pabón, J.D. (2016). TRANSFORMACIÓN DE LA SUPERFICIE TERRESTRE POR LA ACTIVIDAD HUMANA Y SU RELACIÓN CON EL CAMBIO CLIMÁTICO. Sociedade & Natureza, 28(2), 185-198, DOI:
<http://dx.doi.org/10.1590/1982-451320160201>

Cogliati, M. G. (2015). ESTUDIO DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL DE LA TEMPERATURA DE SUPERFICIE EN EL NORTE DE LA PROVINCIA DEL NEUQUÉN CON IMÁGENES SATELITALES. Meteoróloga, 40 (2), 19 – 32.
<https://www.researchgate.net/publication/317533252>

Complutense De Madrid].

https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&url=https://eprints.ucm.es/31423/1/TFM_Juan_Diaz_Cervignon.pdf&ved=2ahUKEwiZub_72db0AhUbVTABHaX3AIkQFnoECACQAQ&usg=AOvVaw3JX7pr8cMb8pj6V1iLkDBc

Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena. (2015). PLAN DE MANEJO AMBIENTAL DISTRITO REGIONAL DE MANEJO INTEGRADO - DRMI LA

- TATACOA. <https://cam.gov.co/areas-protegidas/planes-de-manejo/category/205-drmi-tatacoa.html?download=1371:pma-drmi-la-tatacoa>
- Díaz, J. J. (2015). Estudio de Índices de vegetación a partir de imágenes Aéreas tomadas desde
FAO y PNUMA 2020. *El estado de los bosques del mundo 2020. Los bosques, la biodiversidad y las personas*. Roma. <https://doi.org/10.4060/ca8642es>
- Gil, J & Castañeda, JA (2005). Una mirada al valor de p en investigación. *Revista Colombiana de Psiquiatría*, XXXIV (3),414-424. ISSN: 0034-7450.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=80634308>
- Gilabert, M. A., González, J. y García (1997). Acerca de los Índices de Vegetación. *Revista de Teledetección*, 1- 10. http://www.aet.org.es/revistas/revista8/AET8_4.pdf
- Granados, D., Hernández, M. A., Vásquez, A. & Ruíz, P. (2013). Los procesos de desertificación y las regiones áridas. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 19(1), 45-66. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2011.10.077>
- Granados-Sánchez, Dundefined., Hernández-García, M. Á., Vázquez-Alarcón, A. Á., & Ruíz-Puga, P. Á. (2013). LOS PROCESOS DE DESERTIFICACIÓN Y LAS REGIONES ÁRIDAS. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 19 (1),45-66. ISSN: 2007-3828. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62926254004>
- Lambin, E. F., Geist, H. J. y Erika, L. (2003). Dynamics Of Land-Use And Land-Cover Change In Tropical Regions. *Annual Reviews Environ Resour*, 205-246.
<https://doi.org/10.1146/annurev.energy.28.050302.105459>

Lind, A., & Marchal, W. (1967). *Estadística aplicada a los negocios y la economía* (15).

McGRAW-HILL INTERAMERICANA EDITORES.

https://eduvirtual.cuc.edu.co/moodle/pluginfile.php/523770/mod_resource/content/1/Estadistica%20para%20Administraion%20y%20Negocios.pdf

M, Stathopoulou., Cartalis, C. (2016) Daytime urban heat islands from Landsat ETM+ and

Corine land cover data: An application to major cities in Greece.

<https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.06.014>

Munizaga, J.A., Fernández, L., Álvarez, G. y Lobo, A. (2017). SEGUIMIENTO Y

EVALUACIÓN DE LA TEMPERATURA EN SUPERFICIE DE VERTEDEROS EN ZONAS ÁRIDAS A TRAVÉS DEL ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE IMÁGENES SATELITALES LANDSAT. Memorias del VII Simposio Iberoamericano en Ingeniería de Residuos: hacia una Economía Circular, 1- 7.

https://www.researchgate.net/publication/317589399_Seguimiento_y_Evaluacion_de_la_Temperatura_en_Superficie_de_Vertederos_en_Zonas_Aridas_a_traves_del_Analisis_Multitemporal_de_Imagenes_Satelitales_Landsat_Monitoring_and_Evaluation_of_Land_Surface_Tem

Muñoz, D. J., López, G. F., Hernández, M. M., Soler, A. A. y López, G. J. (2009). Impacto de la

Pérdida de la Vegetación Sobre las Propiedades de un Suelo Aluvial. *Terra*

Latinoamericana, 27 (3), 237 - 246.

www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792009000300008

Muñoz, P. (2013). Índices de Vegetación.

<http://bosques.ciren.cl/bitstream/handle/123456789/26389/Tema%20Indices%20de%20vegetaci%C3%B3n%20Pedro%20Mu%C3%B1oz%20A.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Muñoz., P. (2013) Apuntes de Teledetección: Índices de vegetación.

https://www.researchgate.net/publication/327558326_Apuntes_de_Teledeteccion_Indices_de_vegetacion

Naciones Unidas Convención de Lucha contra la Desertificación. (2017). Perspectiva global de la tierra, primera edición Bonn, Alemania. ISBN: 978-92-95110-52-6.

[GLO_Full_Report_low_res_Spanish.pdf \(unccd.int\)](#)

Olaya, A. , Sánchez, M.y Tovar, A. (2000).Directrices para zonificación, uso y manejo del desierto La Tatacoa. Revistas Científicas Indexadas Universidad Surcolombiana, 27- 46.

<https://core.ac.uk/download/229702713.pdf>

Organización Meteorológica Mundial. (2006). El clima y la degradación de las tierras, ISBN 92-63-30989-2. interieur FR (wamis.org)

Ortiz, N.H. y Polania, R.M.(2013). Identificación y descripción del avance del proceso de desertificación en el ecosistema estratégico desierto de La Tatacoa. Periodo 1975 a 1993.

Revista Ingeniería y Región, 148-158. DOI: 10.25054/22161325.767.

https://www.researchgate.net/publication/323195337_Identificacion_y_descripcion_del_avance_del_proceso_de_desertificacion_en_el_ecosistema_estrategico_desierto_de_La_Tatacoa_Periodo_1975_a_1993

- Parastatidis, David & Mitraka, Zina & Chrysoulakis, Nektrarios & Abrams, Michael. (2017).
Online Global Land Surface Temperature Estimation from Landsat. Remote Sensing. 9.
1208. 10.3390/rs9121208. <https://www.mdpi.com/2072-4292/9/12/1208>
- Paula, A., Zambrano, L., & Paula, P. (2018). Análisis Multitemporal de los cambios de la
vegetación, en la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo como consecuencia del
cambio climático. Enfoque UTE, 9(2), 125-137.
<https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v9n2.252>
- Perry, Mike & Ghent, Darren & Jimenez, Carlos & Dodd, Emma & Ermida, Sofia & Trigo,
Isabel & Veal, Karen. (2020). Multisensor Thermal Infrared and Microwave Land
Surface Temperature Algorithm Intercomparison. Remote Sensing. 12. 4164.
10.3390/rs12244164. <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/24/4164>
- Preciado-Barragán, H.; Sanabria-Buitrago, M. (2021). Identificación de la variabilidad térmica
de superficie entre 1999 y 2018 a través del análisis de imágenes satelitales. Estudio caso:
municipio de Zipaquirá, Colombia. Revista Ontare, 9, (páginas). DOI:
<https://doi.org/10.21158/23823399.v9.n0.2021.3179>
- Probabilidad y estadística net. (2022). Diagrama de caja y bigotes (boxplot).
<https://www.probabilidadyestadistica.net/diagrama-de-caja-y-bigotes-boxplot/>
- Ramankutty, N. y Foley. J. A. (1999). Estimating historical changes in global land cover:
Croplands from 1700 to 1992. GLOBAL BIOGEOCHEMICAL CYCLES, 13 (4),p 997-
1027.
<https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&url=https://agupubs.onlinelibrary.>

wiley.com/doi/10.1029/1999GB900046&ved=2ahUKEwjEl5zB7db0AhWiSjABHRyHC
McQFnoECBIQAQ&usg=AOvVaw2_WQKD2cR1yBFMgdMrL4zr

Rehman, Saif & Ahmad, Hafiz & Rehman, Abdul & Ali, Sarwar & Ahmad, Atif & Junaid,

Usama & Atiq, Muhammad & Imran, Imran. (2019). Land Surface Temperature (LST).
1. 1-14.

https://www.researchgate.net/publication/359343023_Land_Surface_Temperature_LST

Rojas, C. A., Pérez, U. & Fernández, F. (2019). Dinámica espaciotemporal de los procesos de
desertificación y revegetalización natural en el enclave seco de La Tatacoa, Colombia.

Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía, 28 (1), 134-151.

<http://dx.doi.org/10.15446/rcdg.v28n1.63130>

Solanky, Vijay & Singh, Sangeeta & Katiyar, Sunil. (2018). Land Surface Temperature

Estimation Using Remote Sensing Data. 10.1007/978-981-10-5801-1_24.

https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-10-5801-1_24

Soto, J. E., Garzon, J. y Jimenez, G. (2020). Análisis de islas de calor urbano usando imágenes

Landsat: caso de estudio Armenia-Colombia 1996-2018. Revista ESPACIOS, 41 (08), 1-

15. <https://www.revistaespacios.com/a20v41n08/a20v41n08p09.pdf>

UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión. [Tesis en máster, Universidad

UNCCD. (s.f). Convención de las Naciones Unidas De Lucha Contra La Desertificación en los Países Afectados por Sequía Grave O Desertificación en Particular En África.

UNCCD_Convention_text_SPA.pdf

USGS (2013). Using the USGS Landsat Level-1 Data Product. <https://www.usgs.gov/landsat-missions/using-usgs-landsat-level-1-data-product>

USGS. (s.f). Landsat 7 proporciona una nueva perspectiva global del archivo consistente a largo plazo. Landsat 7 | Servicio Geológico de los Estados Unidos (usgs.gov)

Vargas, T. C. y Rosales, C. A. (2014). Pérdida de la cobertura vegetal y sus repercusiones ambientales y legales. *Geoenseñanza*,19, p. 61-79.

https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&url=http://www.saber.ula.ve/bitstream/handle/123456789/42301/articulo_4c.pdf%3Fsequence%3D2%26isAllowed%3Dy&ved=2ahUKEwi5t_7029b0AhWgRDABHRvCCqwQFnoECAUQAQ&usg=AOvVaw236IoEITQL9bWfxtgMy0QN

Velázquez, A., Duran, E., Larrazábal, A., López, F. y Medina, C. (2010). La cobertura vegetal y los cambios de uso del suelo. *Atlas Tepalcatepac cap 4*, 28-32.

https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&url=http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/601/cobertura.pdf&ved=2ahUKEwjC0a_K49b0AhWWTjABHcoUA-cQFnoECAMQAQ&usg=AOvVaw2f_lv7xOGPcK2D0iGY99f1

Sánchez-Sáenz, C.M., Menezes de Souza, Z.; Eiji Matsura, E., Salomão de Freitas, N.R.,(2010).

EFFECTO DE LA COBERTURA EN LAS PROPIEDADES DEL SUELO Y EN LA

PRODUCCIÓN DE FRÍJOL IRRIGADO. Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación

Científica 13 (2): 41-50. <http://www.scielo.org.co/pdf/rudca/v13n2/v13n2a06.pdf>

Anexos

Anexo 1. GDB Tesis Betancourt - Campos

<https://drive.google.com/drive/folders/1oWj98NoGjCer-u2KAXI0HWAAKFOhOH8v?usp=sharing>

Anexo 2. Imagen tomada en campo



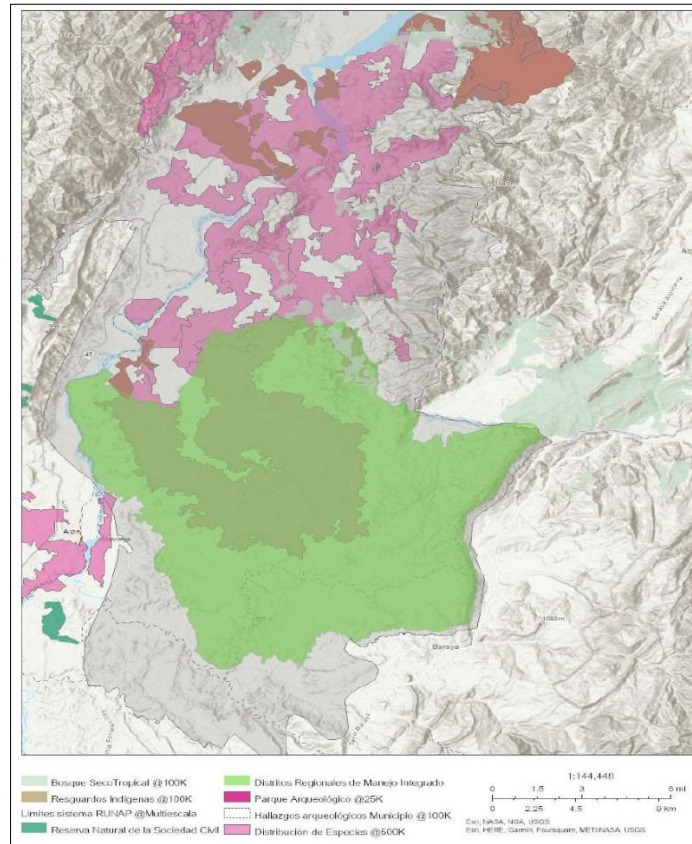
Nota. Elaboración propia

Anexo 4. medidor portátil de pH directo a suelos



Nota. Elaboración propia

Anexo 5. Información Termactros *Colombia*



Nota. Termactros Colombia (2022)