

Monitoreo fenológico de bosque seco tropical mediante sensores a bordo de vehículo
aéreo no tripulado

José Antonio Ortiz Moreno

Trabajo de Grado para Optar el Título de ingeniero forestal

Director

Sandra Milena Díaz López

MSc en Uso, Manejo y Conservación del Bosque

Universidad Industrial de Santander

Instituto de proyección regional y a distancia (IPRED)

Programa Ingeniería Forestal

Bucaramanga

2026

Agradecimientos

Quiero dar un agradecimiento, en primer lugar, a todo el personal administrativo de la universidad por todo el apoyo recibido, principalmente económico, en mi formación. Igual que el personal docente de la universidad al que además también agradezco por todo lo enseñado durante este proceso de formación.

También agradezco al señor Delfo Uribe quien permitió que este trabajo se realizara en su predio brindando todo su apoyo durante las visitas realizadas para las tomas de datos. De la misma manera, a la profesora Sandra Díaz por dirigirme en el proyecto de grado y por todo el apoyo recibido de su parte.

A mi familia, por todo el apoyo brindado durante todo este tiempo para llegar hasta donde estoy.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción.....	10
1. Objetivos.....	14
1.1 Objetivo General.....	14
1.2 Objetivos Específicos.....	14
2. Marco Teórico	15
2.1 Bosque seco tropical	15
2.2 Fenología.....	15
2.3 Índice NDVI.....	16
2.4 Índice NDRE.....	16
2.5 Índice CIRE	16
2.6 Factores climáticos.....	17
2.7 fotogrametría.....	17
3. Metodología.	17
3.1 Organización previa.	18
3.2 Toma de datos de campo.....	19
3.3 Preparación de imágenes multiespectrales.....	20
3.4 Precipitación y temperatura	22
3.5 Procesamiento en Excel	22

4 Resultados.....	23
4.1 Análisis de procesos fenológicos.....	23
4.1.1 Especies arbóreas.....	23
4.1.2 Fructificación.....	24
4.1.3 Follaje.....	26
4.1.4 Patrones fenológicos por especie.....	28
4.1.5 Cambio en las parcelas.....	30
4.1.6 Índices.....	33
4.1.7 Descripción por parcelas.....	34
4.1.8 Relación con precipitación y temperatura.....	38
4.1.9 Análisis estadístico.....	42
5 Discusión.....	45
6 Conclusiones.....	48
7 Recomendaciones.....	49
Referencias Bibliográficas.....	50

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 Coordenadas parcelas permanentes (bs-T) Enciso Santander	19
Tabla 2 Clasificación NDVI utilizada.....	21
Tabla 3 Cantidad de especies arbóreas por parcela	23
Tabla 4 Estado de las hojas a través por mes.....	26
Tabla 5 Correlaciones entre las variables más importantes	42
Tabla 7 Promedios y desviación estándar	42

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 Mapa de ubicación de área de estudio	18
Figura 2 de frutos por especie	24
Figura 3 Cantidad de árboles con fructificación mensual.....	25
Figura 4 Compilación de fructificación por mes en porcentaje	26
Figura 5 Pérdida foliar mensual.....	27
Figura 6 Pérdida foliar por especie	28
Figura 7 Estado foliar por parcela.....	31
Figura 8 Fructificación por cada parcela	32
Figura 9 <i>Índice NDVI de especies arbóreas por mes</i>	33
Figura 10 Valores NDVI cada dos meses parcela 1	34
Figura 11 Valores NDVI por mes en la parcela 2.....	36
Figura 12 mes parcela 3	37
Figura 13 Valores NDVI por mes parcela 4	37
Figura 14 Mapa NDVI mayo	39
Figura 15 Mapa NDVI junio.....	39
Figura 16 Mapa NDVI octubre.....	40
Figura 17 Mapa NDVI noviembre.....	41
Figura 18 Precipitación y temperatura por mes	41

Figura 19 Índice NDRE	43
Figura 20 Índice CIRE	44

Resumen

Título: Monitoreo fenológico de bosque seco tropical mediante sensores a bordo de vehículo aéreo no tripulado*

Autor: José Antonio Ortiz Moreno**

Palabras Clave: Bosque seco tropical, UAS, Fenología, imágenes multiespectrales, NDVI.

Descripción:

El ecosistema de bosque seco tropical (bs-T) posee una gran diversidad de especies de flora y fauna además de endemismo de estas, lo que lo convierte en un ecosistema único, pero a su vez con gran interés para las comunidades, las cuales, en muchos casos hacen uso indiscriminado lo que ha causado una reducción aproximadamente un ocho por ciento del ecosistema que una vez llegó a existir. Por esto el estudio de estos ecosistemas se hace importante y conocer la fenología de las especies que lo componen se hace cada vez más importante afortunadamente con la tecnología se facilita esta clase de estudios. Por esto se empleó un vehículo aéreo no tripulado (UAV) con una cámara multiespectral instalada la cual posee la capacidad de tomar fotos en varios rangos del espectro. Utilizando estas imágenes para hallar índices como NDVI, CIRE y NDRE, además de esto se realizó la toma de datos fenológicos en las cinco parcelas y finalmente la descarga de datos de precipitación y temperatura de la plataforma Copernicus. con todo esto se encontró que la mayor actividad fenológica pertenece al mes de noviembre en donde ocurrió una disminución de aproximadamente 200 mm de precipitación lo que permite entender que con la llegada del periodo de sequía fue cuando más actividad se presentó en cuanto a fructificación y defoliación ya que no se presentó floración durante los meses de marzo a noviembre.

* Trabajo de Grado

** Instituto de proyección regional y educación a distancia. Programa ingeniería forestal, director: Sandra Milena Díaz López. MSc en Uso, Manejo y Conservación del Bosque

Abstract

Title: Phenological monitoring of tropical dry forest using sensors on board an unmanned aerial vehicle*

Author: José Antonio Ortiz Moreno**

Key Words: Tropical dry forest, monitoring, UAS, phenology, multispectral imaging, NDVI.

Description:

The tropical dry forest (tDF) ecosystem boasts a high diversity of flora and fauna, as well as a high degree of endemism, making it a unique ecosystem. However, it is also of great interest to local communities, which in many cases make indiscriminate use of this forest, causing significant damage, including the loss of its cover, leaving approximately eight percent of the ecosystem that once existed. Therefore, the study of these ecosystems is crucial, and understanding the phenology of the species that comprise them is increasingly important. Fortunately, technology facilitates this type of research. For this reason, we employed an unmanned aerial vehicle (UAV) with an installed multispectral camera capable of capturing images across various spectral ranges. Using this camera, we calculated indices such as NDVI, CIRE, and NDRE, and conducted field visits to further understand the phenology of these species. Within this framework, along with satellite precipitation and temperature data, it was found that the greatest phenological activity occurred in November, where a decrease of almost 200 mm of precipitation took place. This allows us to understand that the arrival of the dry season was when the most activity occurred in terms of fruiting and defoliation, since there was no flowering during the months of March to November.

* Degree Work

** Institute for regional outreach and distance education. Program forestry engineer, director:

Sandra Milena Diaz López. MSc in Forest Use, Management and Conservation

Introducción

El bosque seco tropical (bs-T) es un ecosistema ubicado entre los 0 hasta los 1000 m s.n.m aproximadamente superando los 24°C, abarcando cerca del 30 % del territorio de bosque a nivel global. Presentan una gran variedad de servicios ecosistémicos brindando alimentación para las comunidades y la fauna, además de hospedaje para estas últimas. Esto en gran medida por su alta diversidad donde encontramos especies que presentan pérdida de follaje como estrategia para las condiciones de alta temperatura y alta evapotranspiración (Cuellar-Cardozo et al., 2022). Además de esto, los bosques aportan madera y recursos forestales no maderables para la población, además de poseer un gran endemismo de especies de flora y fauna presentes en esos ecosistemas (Hardy et al., 2025).

Estos bosques se han visto reducidos a nivel global debido a distintos factores, principalmente por acción humana. Además de esto, solo se encuentra en áreas protegidas menos de un tercio de estos ecosistemas. En Colombia se han perdido cerca de 236.000km² equivalente a un 67 por ciento de este bosque lo que permite afirmar que estos bosques son muy explotados afectando los recursos que nos ofrece (Montano et al., 2022).

Es por esto, por lo que estos ecosistemas deben ser preservados para que las futuras generaciones puedan disfrutar y aprovechar de estos recursos de manera sostenible. Por eso conocer la fenología de estas especies encontradas en (bs-T) es muy importante, esto debido a que nos permite entender como es el comportamiento que presentan además de ver cómo como

van cambiando y tomar medidas que nos permitan contrarrestar o controlar estas prácticas que ponen en peligro estos ecosistemas. (Gray & Ewers, 2021).

Por esto la importancia de este tipo de bosques los cuales presentan especies endémicas que solo habitan en las condiciones adquiriendo resiliencia hídrica para adaptarse a las condiciones de temperatura. Además, las semillas pueden actuar como banco genético ayudando a mantener especies que resultan clave en la restauración y la biodiversidad. De esta manera al proteger estos bosques ayudamos a conservar las especies que dependen de los frutos o sombra de las especies arbóreas ayudando a mitigar afectaciones causadas en gran medida por la ganadería reyes (2026)

La fenología, juega un papel importante permitiéndonos estudiar eventos biológicos que ocurren a lo largo del ciclo de las plantas relacionados con las condiciones ambientales ya que nos permite conocer períodos de fructificación, floración y, en el caso de los (bs-T), la defoliación. Estos datos nos ayudan a ver como cada una de las especies va cambiando a través del tiempo y en base a esto poder realizar aprovechamiento sustentable o planificar estrategias para proteger o propagar estas especies (Cárdenas-Henao et al., 2015).

Una de las herramientas más importantes para analizar la fenología de las especies son los sistemas de información geográfica (SIG) mediante los cuales podemos analizar imágenes ya sea desde un satélite o un dron para realizar diversos análisis a partir de índices como el NDVI el cual nos permite analizar la vegetación y ver a través de un monitoreo como va cambiando el bosque.(Thapa et al., 2021).

Desde el año 2000, empezó a tomar fuerza la toma de imágenes multiespectrales para estudios de vegetación, suelo, agua etc. por medios de vehículos aéreos no tripulados (drones) (UAV). Fawcett et al., 2020, mediante esta tecnología, puede realizar estudios de fenología

incluso a escala de centímetros equipando estos UAV con cámaras multispectrales lo que elimina la necesidad de adquirir imágenes de satélite al poseer diferentes sensores lo cual nos permite realizar una gran diversidad de índices, además de poseer mayor precisión permitiendo incluso determinar mejor las copas de los árboles. Uno de los más importantes en este estudio es el NDVI. (Kleinsmann et al., 2023).

Por todo esto, es que el monitoreo fenológico de los ecosistema permite comprender el comportamiento que estos poseen y poder entender las problemáticas que estos ecosistemas presentan (Tmušić et al., 2020). Estas problemáticas que pueden ser causadas por el hombre son principalmente la expansión de la frontera agrícola y pecuaria reduciendo las áreas de bosque disponible y causando afectaciones en las áreas restantes, estas afectaciones se ven afectadas principalmente por la ganadería ya que suelen utilizar las plántulas como alimento. Además de esto la propagación de especies con potencial invasor que van desplazando las especies nativas.(Thapa et al., 2021).

En el caso del (bs-T) en Enciso es un ecosistema altamente intervenido, viéndose afectado principalmente por cabras que afectan la regeneración del bosque al utilizar el banco de plántulas como alimento, además la presencia de especies con potencial invasor son las principales causas de la pérdida de cobertura en este ecosistema. Es por esto, por lo que conocer cómo va cambiando el bosque, lo que hace que la fenología de las especies.

El uso de los UAS en este estudio son una gran herramienta ya que nos permite tomar imágenes que nos facilitan el monitoreo el cual por medio de imágenes multispectrales lo cual permite conocer el comportamiento que han presentado las especies en cuanto a follaje, frutos, flores atreves del periodo de estudio. Por tanto, este estudio de la fenología en el (bs-T) reitera su importancia, ya que, al conocer cómo va cambiando el bosque a través de tiempo, nos permite

comprender mejor cada uno de los procesos que allí ocurren y tomar medidas en caso de ser necesario para preservar el recurso a través del tiempo. Por otra parte, también podemos ver alteraciones que estén ocurriendo en cada una de las especies por alguna intervención ya sea natural o provocada.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Caracterizar la fenología de bosque seco tropical mediante imágenes multiespectrales y análisis de datos ambientales con el fin de entender la repuesta del ecosistema a los factores climáticos presentes en el entorno.

1.2 Objetivos Específicos

Identificar los patrones fenológicos de diferentes especies de Bosque seco tropical mediante (bs-T) mediante índices de vegetación NDVI, NDRE y CIRE y toma de datos fenológicos en las parcelas.

Relacionar variables climáticas (precipitación, temperatura) con variables fenológicas por medio de correlación entre estas variables con los índices NDVI, NDRE y CIRE.

Comparar cambios fenológicos en parcelas permanentes de (BS-T) de Enciso en un periodo comprendido entre mayo a noviembre.

2. Marco Teórico

2.1 Bosque seco tropical

Los (bs-T) son bosques que suelen tener temporadas secas que pueden llegar hasta los siete meses con bajas precipitaciones entre los 200 a los 1000 mm anuales donde las especies tiene que adaptarse a estas condiciones de alta temperatura y baja precipitación para poder sobrevivir, adaptando estrategias como la senescencia foliar para no perder agua. Todas estas adaptaciones que se puedan desarrollar una alta diversidad de flora las cuales permiten la presencia de un alto endemismo en estos bosques. (Cuellar-Cardozo, 2022)

Estos bosques son la base de muchas personas para obtener sustento debido a los servicios ecosistémicos que presentan. Por medio de lo que estos ofrecen como madera, frutos, productos forestales no maderables etc. Los cueles generan un ingreso económico y un endemismo y único. Es por esto por lo que estos bosques han resultado atractivos para las comunidades las cueles no solo los habitan, sino que también los explotan y en muchos casos de manera excesiva (Montano et.al., 2022)

2.2 Fenología

La fenología se encarga de estudiar el ciclo de la vida de las plantas y el ritmo biológico que presentan mostrando cómo se comportan los ciclos de floración, fructificación, dispersión de semillas etc. y su relación con las condiciones ambientales como por ejemplo la precipitación o la temperatura. Desde la ecología, es el puente que une las especies con la dinámica de los ecosistemas (Rosas 2022).

2.3 Índice NDVI

El NDVI (índice de vegetación normalizada) es una herramienta que nos permite analizar la vegetación con una gran variedad de estudios lo cual lo ha consolidado como una herramienta para analizar la dinámica de los bosques ya que muestra variaciones mínimas que permiten analizar pérdida y recuperación de área foliar en los bosques el cual emplea la siguiente fórmula

$$(NIR - RED) / (NIR + RED)$$

Esto se basa entre la diferencia de reflectancia entre las bandas Infrarrojo cercano (NIR) y rojo visible (RED) el cual refleja valores entre -1 y 1 (Casiano & Paz, 2022).

2.4 Índice NDRE

La índice diferencia normalizada de borde rojo NDRE más preciso debido a que este no maneja la banda roja, sino que por el contrario maneja la luz red Edge el cual reduce la saturación que puede tener el NDVI permitiendo detectar la concentración de clorofila manejando la siguiente formula.

$$(NIR - RED_EDGE) / (NIR + RED_EDGE)$$

Este índice es más preciso debido a que maneja mejor cuando la luz roja común no puede pasar por varias capas de hojas lo que la luz red Edge (Ferreira 2023).

2.5 Índice CIRE

El índice de clorofila de borde rojo (CIRE) también es muy preciso al realizar estudios de vegetación ya que también trabaja con la banda red Edge, ayudando a monitorear el comportamiento del dosel lo que permite detectar más a detalle eventos como la senescencia foliar, permitiendo analizar mas a detalle el desarrollo de los árboles en relación con el estrés hídrico o las condiciones del suelo y evaluando la capacidad fotosintética (Radočaj et al., 2025).

Este índice presenta la siguiente fórmula

$$(NIR / RED_EDGE) -1$$

2.6 Factores climáticos

La precipitación y la temperatura son dos factores muy importantes debido a que influyen en los patrones fenológicos de las especies. Diversos estudios han manifestado que los periodos de fructificación tienden a incrementar en periodo de alta precipitación, por otra parte, las bajas precipitaciones suelen causar defoliación en las especies. La temperatura puede generar procesos de floración siendo aceleradas o frenadas según las condiciones térmicas, estas condiciones reflejan como los procesos fenológicos están relacionadas con la precipitación y temperatura se ve reflejado en los procesos fenológicos principalmente con la defoliación y la fructificación (Revilla-Chávez et al., 2021).

2.7 fotogrametría

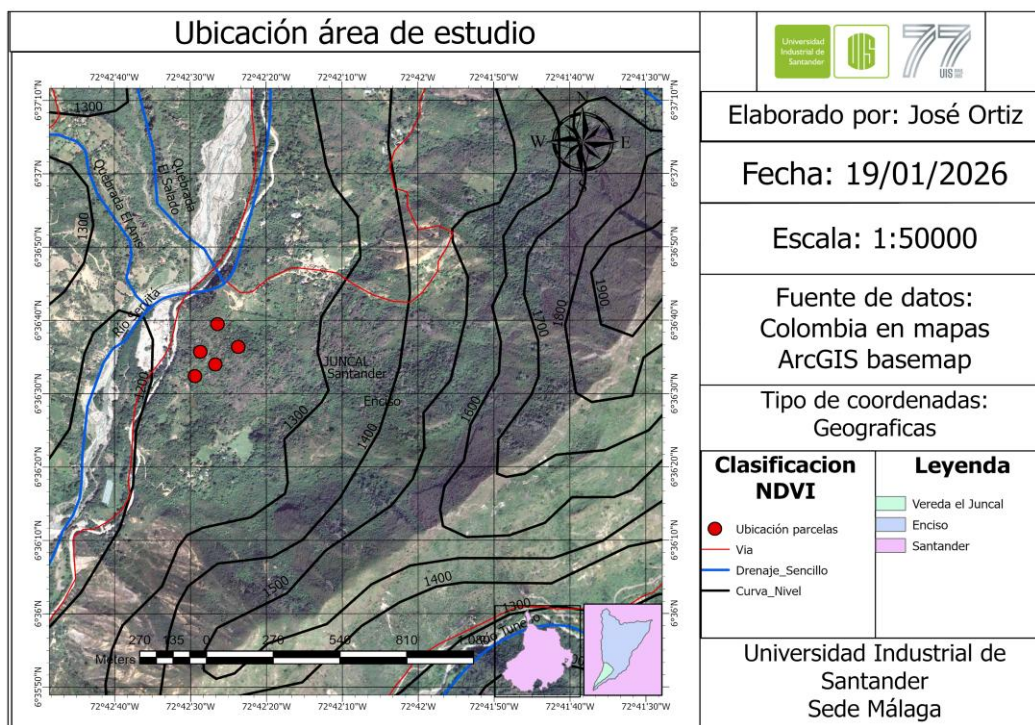
La fotogrametría es una herramienta muy importante que nos permite mediante vehículos aéreos no tripulados (UAV) el monitoreo de grandes extensiones de cobertura arbórea realizando seguimiento fenológico o de enfermedades. Para ello se suelen programar una ruta de vuelo para estos UAV. pero estos equipos suelen ser limitados por ello se instalan cámaras multispectrales que permiten tomar imágenes por ejemplo Parrott Secuoia que toma imágenes en los rangos del espectro NIR, RED, GREEN, RED_EDGE y RGB con 1.9 cm píxel a 60 metros, estas imágenes son procesadas posteriormente en softwares externos que permiten la creación de un solo ortomosaico a partir de todas las imágenes tomadas (García-Ferrer et al., [2020](#))

3. Metodología.

Para el desarrollo de la metodología se seleccionó el área de trabajo en la vereda el Juncal sector Juncalito del municipio de Enciso Santander. Donde se trabajó en cinco parcelas permanentes ubicadas en el (bs-T) establecidas por Jaimes y Rosales (2019) que se encuentra en la propiedad del señor Delfo Uribe como se muestra en la Figura 1.

Figura 1

Mapa de ubicación de área de estudio



La metodología del trabajo se realizó de la siguiente manera.

3.1 Organización previa.

En la fase de organización previa se realizó toda la consulta bibliográfica referente a todos los temas trabajados referentes a fenología, bosque seco tropical (bs-T), monitoreo con uso de drones, fotogrametría, sistemas de información geográfica (SIG). Además de planificar las tomas de datos que se realizaron en los últimos sábados de los meses de mayo, junio julio, agosto, octubre y noviembre.

También se realizó una visita previa en el mes de marzo con el fin de determinar cómo se encontraba el bosque antes de las salidas de campo.

3.2 Toma de datos de campo.

Los datos que se tomaron en campo se dividen en dos secciones, datos tomados con el dron en las parcelas permanentes datos en planillas de campo visitando cada fustal dentro de las parcelas ubicadas en este ecosistema con las coordenadas establecidas en la tabla 1.

Tabla 1

Coordenadas parcelas permanentes (bs-T) Enciso Santander

Coordenadas geográficas			Parcela
Latitud	Longitud		
6°36'35,7" N	72°42'28,7" W		1
6°36'34,0" N	72°42'26,7" W		2
6°36'36,4" N	72°42'23,7" W		3
6°36'32,4" N	72°42'29,4" W		4
6°36'39,5" N	72°42'26,4" W		5

Referente a los datos que fueron tomados en las parcelas se registraron datos de hojas, flores, frutos y semillas, los cuales tienen las siguientes variables, Las hojas se les tomaron datos de estado foliar, rebrotes, caída de hojas, Por otra parte, para las flores se registraron datos de porcentaje de flores, estado, Continuando con los frutos a los cuales se les tomaron datos de porcentaje de nacimiento, color, estado, maduración, Finalmente, con las semillas se registraron datos de porcentaje de semillas, estado, porcentaje caído, porcentaje dañado, color y las observaciones que surgieron de cada individuo, Estos datos fueron plasmados en planillas diseñadas una para cada parcela a los individuos encontrados en cada una de estas, A cada

individuo arbóreo se le registraron coordenadas para poder ubicarlo en las imágenes aéreas tomadas por el dron y la cámara multiespectral,

Las imágenes multiespectrales tomadas en el área de estudio fueron originadas con una cámara multiespectral PARROT SECUIA la cual se controló desde un celular arrojando imagen en los rangos NIR, RED EDGE, BLUE, GREEN Y RGB, Para la toma de estas imágenes se colocó y aseguro esta cámara con su sensor de luz en un dron MAVIC 3 PRO manipulado desde su mismo control al cual se le apagaron los sensores para evitar conflicto con la cámara multiespectral, Desde este, se tomaron también imágenes con su cámara integrada, las cuales, fueron utilizadas como referencia para georreferenciar las imágenes de la cámara multiespectral, Para el aterrizaje y despegue del dron se creó una plataforma de aterrizaje desde la cual se colocó el dron para evitar que la cámara multiespectral sufriera algún incidente,

El cubrimiento de las imágenes se programó en una sola ruta en el dron para que abarcara todas las cinco parcelas con un solo vuelo y se tomaron en los meses de mayo, julio, octubre y noviembre,

3.3 Preparación de imágenes multiespectrales,

Las imágenes que se obtuvieron con la cámara multiespectral se filtraron extrayendo las imágenes RGB de la cámara y posteriormente se subieron al software AGISOFT metashape profesional, Como segundo paso se realizaron los siguientes procesos en el software,

Se realizó una orientación de fotos para determinar en qué parte del orto mosaico va cada una de las fotos tomadas, Posteriormente se realizó una nube de puntos densa y una malla para determinar la orientación y como se traslapan, para de esta manera, generar una sola imagen de toda el área muestreada,

Las imágenes obtenidas en el software AGISOFT se exportaron al programa ARCGIS pro donde se georreferenciaron utilizando como guía la foto del dron la cual no presenta problemas con las coordenadas, después se realizaron índices de vegetación NDVI según la siguiente clasificación presente en la tabla 2,

Tabla 2

Clasificación NDVI utilizada

Clase	Valores NDVI	Descripción
1	(-1 - 0)	Ríos, quebradas, lagunas, nubes
2	(0 - 0,15)	Tierras degradadas, Asentamientos, vías, suelo sin cobertura vegetal,
3	(0,15 - 0,25)	Tierras cultivadas, herbazales, arbusto, pastizales, terreno arado para cultivo,
4	(0,25 - 0,40)	Vegetación leñosa, plantación arbustiva, bosque seco
5	(0,40 - 1)	Plantas densas en crecimiento, bosque húmedo

Nota, Clasificación propuesta por (Vargas 2017) citada por (Segura y Bejarano 2019)

Con estas imágenes se crearon imágenes NDVI de los meses de mayo, julio, octubre y noviembre, Para hallar los valores NDVI que se necesitaron de las imágenes se utilizaron las coordenadas de los árboles presentes en cada parcela a los cuales una vez localizados en la imagen se delimitaron las copas de estos, Y para esta delimitación se utilizó como referencia una imagen tomada con la cámara del dron, Además de esto para observar la actividad fotosintética y concentración de clorofila se hallaron los índices CIRE y NDRE respectivamente,

Para la georeferenciación de las imágenes de la cámara multiespectral se empleó como referencia la imagen de la cámara del dron debido a que estas imágenes no presentaban coordenadas, Además, para la delimitación de las copas de los árboles se utilizó esta misma imagen de dron, estos árboles fueron localizados en la imagen con coordenadas de GPS tomadas a cada uno de estos en las parcelas, Las especies arbóreas se identificaron en la primera visita de campo utilizando la guía de especies del Chicamocha y claves taxonómicas identificando las especies por cada parcela, la identificación se realizo para posteriormente junto con las

coordenadas de las especies arbóreas la creación del shape de las áreas de delimitación de las copas de cada uno de los individuos

3.4 Precipitación y temperatura

Para los datos de precipitación y temperatura, teniendo en cuenta que se contaba con una estación meteorológica, se descargaron de la plataforma del servicio climático de Copernicus “climate data store” la cual es de la Unión Europea, De esta plataforma se descargaron estos datos por días, Estos datos se procesaron en el programa XyGrib el cual permite abrir los archivos en el formato grib que es en el formato original de descarga, Posteriormente se localizó por medio de coordenadas el área de estudio en el programa XyGrib, después de localizar el área de estudio se extrajeron los datos de precipitación y temperatura y se organizaron en un archivo Excel y se calculó el promedio mensual para los meses de mayo, junio, julio agosto, octubre y noviembre, Finalmente, estos datos se anexaron a la base de datos principal.

3.5 Procesamiento en Excel

Los formatos de campo con los datos obtenidos en las parcelas se pasaron al software Excel donde se organizaron por parcelas y por meses, Posteriormente se comparó estos datos con las imágenes para revisar errores en los datos, además de esto se realizaron gráficas para mostrar el comportamiento de las variables a través de los meses de la toma de datos, además de esto, se realizaron correlaciones de Pearson entre la caída de hojas y los frutos con la temperatura el NDVI y la precipitación, además de sacar estadística básica como la media y desviación estándar entre los procesos fenológicos y las variables analizadas,

Finalmente, los valores de NDVI, NDRE y CIRE de cada especie arbórea fueron agregados en la base de datos de Excel y posteriormente se realizó todo el análisis e interpretación de los datos con ayuda de las tablas e imágenes presentadas en los resultados,

4. Resultados

4.1 Análisis de procesos fenológicos

Para los resultados se tomó en cuenta primero la fructificación, En segunda se trabajó la parte foliar, Con estos datos se trabajaron los patrones fenológicos por especie, posteriormente se analizó los índices de vegetación y se finalizó con la precipitación y temperatura, y con esto concluyó con las correlaciones

4.1.1 Especies arbóreas

Se identificaron 11 especies arbóreas en las parcelas permanentes en las cuales la parcela 1 conto con 33 especies al igual que la parcela 2 en cuanto a las parcelas 3, 4 y 5 contaron con 21, 20 y 15 respectivamente según la tabla 3. Esto nos muestra que todas las parcelas poseen composiciones florísticas diferentes no solo en cantidad, sino que también en distribución de especies, mostrando especies como *Dendropanax arboreus* y *Coccoloba lehmannii* los cuales se presenta un solo individuo dentro de los 122 muestreados.

Tabla 3

Cantidad de individuos por especie arbórea

Especies	Individuos por parcela					Total
	p1	p2	p3	p4	p5	
<i>Astronium graveolens</i>	21	2	10	2	7	42
<i>Solanaceae sp. 1</i>	0	22	1	4	0	27
<i>Bursera simaruba</i>	6	0	2	7	1	16
<i>Mimosoideae sp. 1</i>	2	1	3	2	6	14
<i>Machaerium biovulatum</i>	2	3	0	3	0	8
<i>Amyris sylvatica</i>	1	0	4	1	0	6
<i>Buchenavia tetraphylla</i>	0	2	0	1	0	3
<i>Quadrella odoratissima</i>	0	2	0	0	0	2

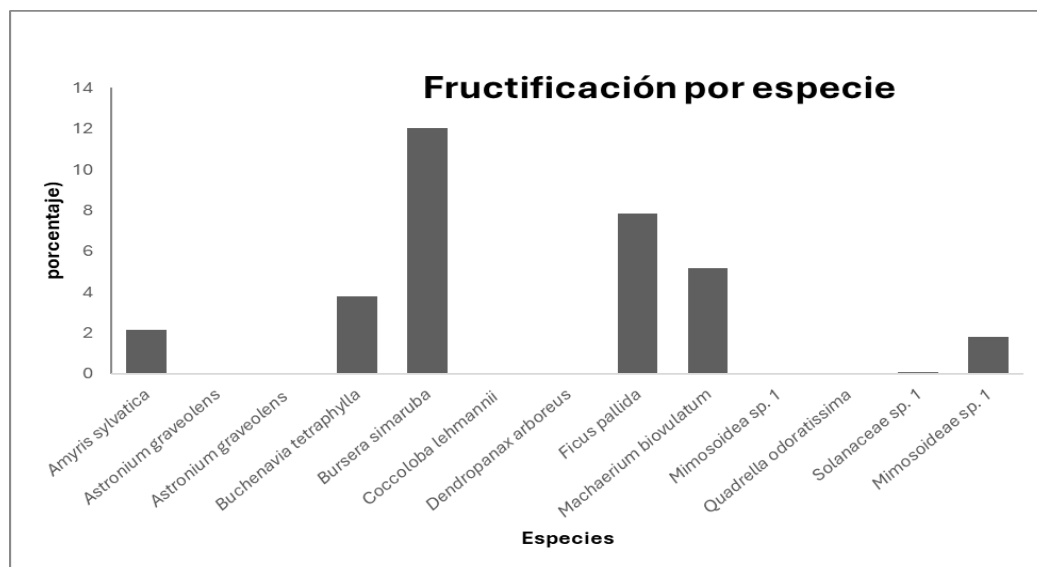
<i>Ficus pallida</i>	1	1	0	0	0	2
<i>Dendropanax arboreus</i>	0	0	1	0	0	1
<i>Coccoloba lehmannii</i>	0	0	0	0	1	1

4.1.2 Fructificación

Según los datos obtenidos en la figura 2 las especies que presentaron fructificaron encontrándose las especies *Bursera simaruba*, *Amyris sylvatica*, *Machaerium biovulatum*, *Buchenavia tetraphylla*, *Ficus pallida* y *Mimosoidea sp.1*, Siendo estas especies las más importantes ya que concentran toda la fructificación y por ende la producción de semillas, Las demás especies no presentaron fructificación a través del periodo de investigación y por lo tanto tampoco presentaron semillas, Por esto estas especies son las más aportan semillas para la regeneración del ecosistema,

Figura 2

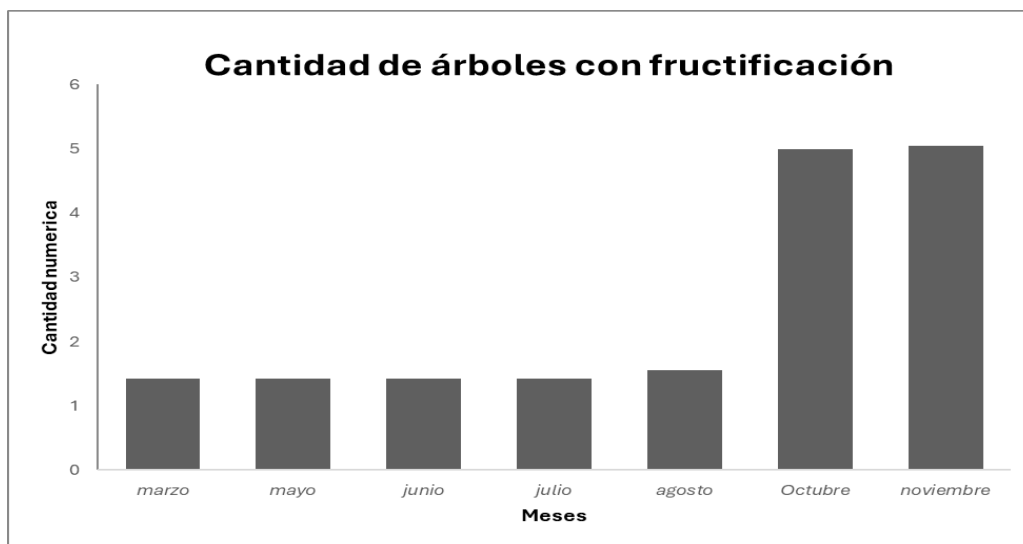
Porcentaje de frutos por especie



Según la figura 3 desde el mes de octubre se empezó a observar que estas especies empezaron su ciclo de fructificación, coincidiendo con el periodo de lluvias cuando comenzó a disminuir en este ecosistema, aunque no todos con excepción del *Bursera simaruba* el cual conto con individuos fructificados durante todo el periodo de toma de datos, aunque solamente en la parcela cuatro, En este caso se contó con un individuo que mencionado anteriormente posee frutos durante el periodo de toma de datos, aunque nunca llegaron a madurar,

Figura 3

Cantidad de árboles con fructificación mensual

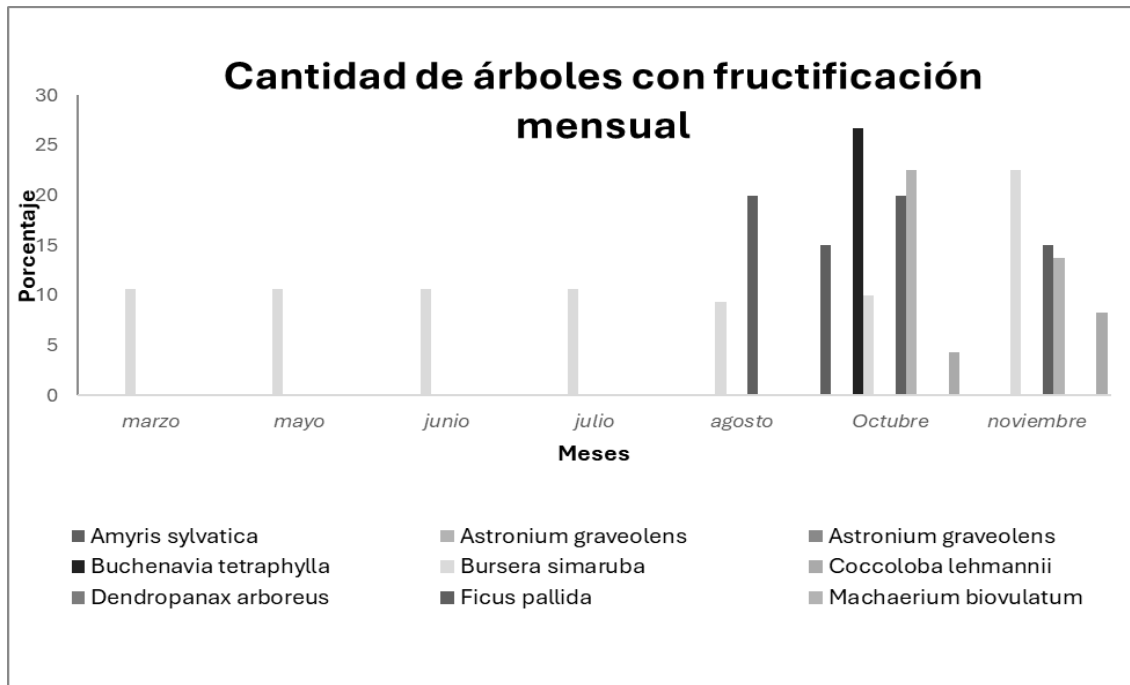


Según la figura 4 las especie *Bursera simarouba* y *Ficus pallida* son las especies más dominantes en cuanto a fructificación debido a que es la que más porcentaje de frutos obtuvo con un máximo del 25 por ciento y un mínimo del 10 por ciento, Además, cuando la época de lluvias empezó a disminuir en octubre se empezó a observar un crecimiento en la tasa de fructificación

de las especies lo que también se relaciona con la pérdida de follaje, además de esto ninguna especie presentó afectaciones en sus frutos,

Figura 4

Compilación de fructificación por mes en porcentaje



4.1.3 Follaje

Tabla 4

Estado de las fitosanitario por mes

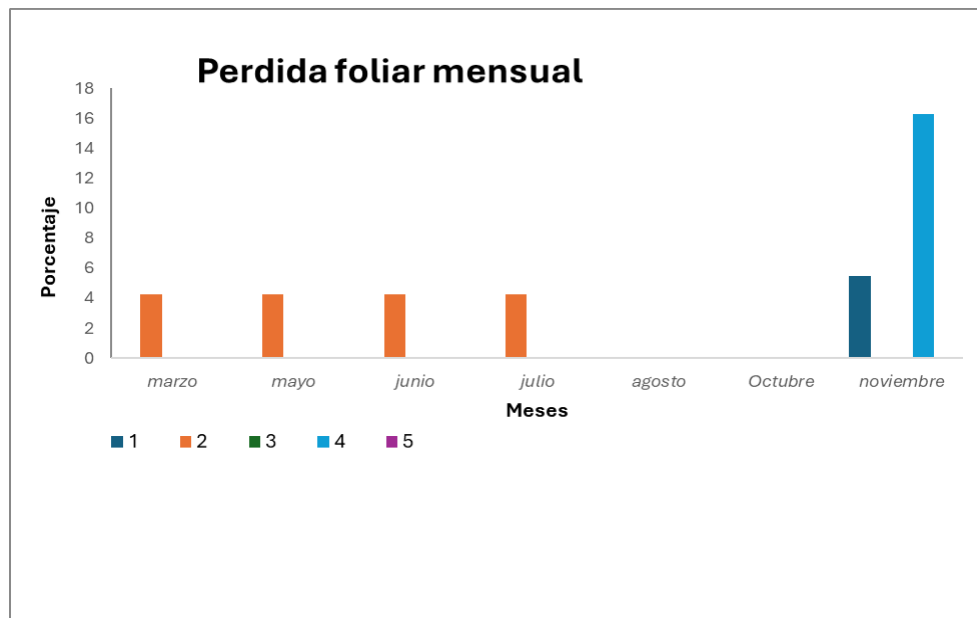
Estado foliar	meses						
	marzo	mayo	junio	julio	agosto	octubre	noviembre
amarillas	0	0	0	0	0	0	2
defoliación	2	2	2	2	0	0	0

necrosis	0	0	0	0	1	0	2
sano	120	120	120	120	120	120	116
secas	0	0	0	0	1	2	2

En el estado fitosanitario según lo mostrado en la tabla 4 no existen grandes afectaciones en este ecosistema con excepción de dos árboles por mes los cuales presentaron defoliación, Respecto a la pérdida de hojas en los primeros cuatro meses a solamente un *Bursera simaruba* presento caída de hojas perteneciente a la parcela 5 el cual es un individuo bifurcado, está pérdida se frenó en los meses de agosto y octubre debido a la pérdida total de su follaje, En el mes de noviembre, con la época de sequía iniciada se presentó la mayor cantidad de pérdida foliar por parte de la especie arbóreas como medida natural en estos ecosistemas conocida como senescencia foliar como aparece en la figura 5,

Figura 5

Pérdida foliar mensual



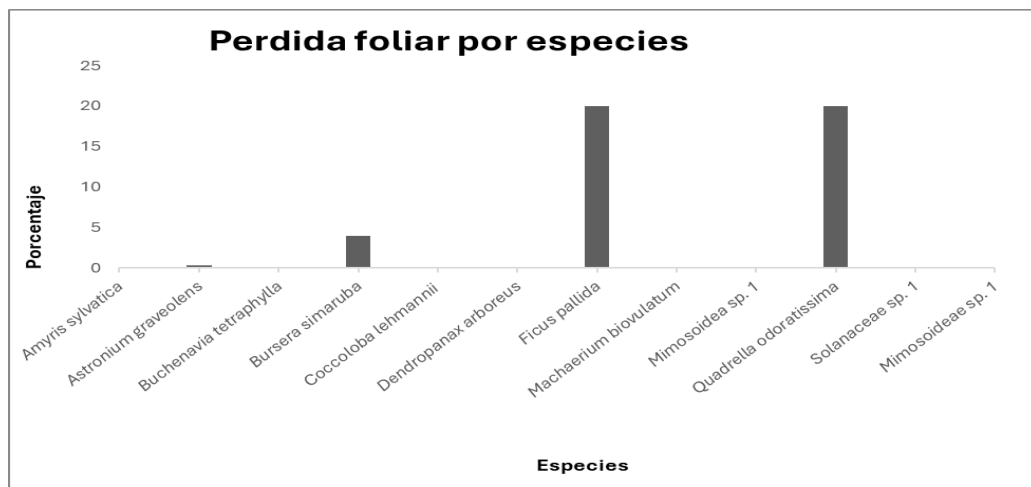
Respecto a las especies con pérdida foliar tenemos 2 especies las cuales son el *Ficus pallida* y el *Quadrella odoratissima* con un 25 por ciento y 23 por ciento respectivamente las

cuales como medida a la sequía empezaron con la perdida de hojas, aunque no se evidencian más especies debido a que finalizo la toma de daos en este momento,

Como se ve en la figura 6 al igual que con los frutos debido a que la toma de datos finalizó en noviembre no se evidenciaron más especies con frutos y perdida de hojas, Por otra parte, no se evidenció presencia de flores durante los meses de toma de datos de estas especies,

Figura 6

Pérdida foliar por especie



4.1.4 Patrones fenológicos por especie

Bursera simarouba

Especie en sincronía con la época de lluvia y sequias debido que empezó su etapa de fructificación con la llegada de la época de sequía al igual que la caída y hojas que fue más marcada en noviembre con valores altos de reproducción en época de sequía y rebrotes presentes en el mes noviembre cuando empezaron a surgir, En cuanto aflores no se presenciaron flores en ninguno de los individuos y uno de ellos en la parcela 4 presento frutos durante todo el periodo de la toma de datos,

Ficus pallida

Estas especies empezó su fructificación en agosto, pero comenzó a perder las hojas en un 21 por ciento en noviembre y presentó rebrotes de mes de octubre, en los meses anteriores no se presentó ningún cambio en el follaje ni tampoco en frutos, además d esto no se evidenciaron flores durante los meses de estudio,

Macherium biovulatum

En fructificación esta especie obtuvo en octubre un 22 por ciento y se redujo hasta un 14 por ciento en el mes de noviembre, En cuanto a hojas no presento caída de hojas durante el periodo de toma de datos, tampoco presento flores por lo que no presento mucha variación en su actividad fenológica,

Buchería tetraphylla

Su proceso de fructificación también comenzó en octubre alcanzando un 27 por ciento en este mismo mes, en el cual fue el único mes en presentar fructificación, Esta especie tampoco presentó flores durante la toma de datos y en cuanto al follaje no presento caída de las hojas ni afectaciones fitosanitarias, durante los meses previos no presentó ninguna variación,

Mimosoidea sp1

De las especies con fructificación esta fue la que obtuvo la tasa más baja debido a que solo una especie presentó frutos, aunque fueron estas las que presentaron las afectaciones fitosanitarias presentadas en la tabla 4 esta especie tampoco presentó caída de hojas ni presencia de flores durante la toma de datos,

Quadrella odoratissima

Esta especie fue de las que más defoliación evidencio llegando hasta un 20 por ciento en el mes de noviembre, aunque no presentó frutos y su follaje no obtuvo alteraciones durante el periodo analizado lo que indica periodos de reproducción en diferente época a la analizada

En cuanto a las demás especies se mantuvieron con una fenología baja o casi nula debido a que no presentaron frutos ni flores en este periodo y su follaje tampoco se vio alterado, esto indica que su periodo de reproducción o floración no coincidió con el periodo de toma de datos

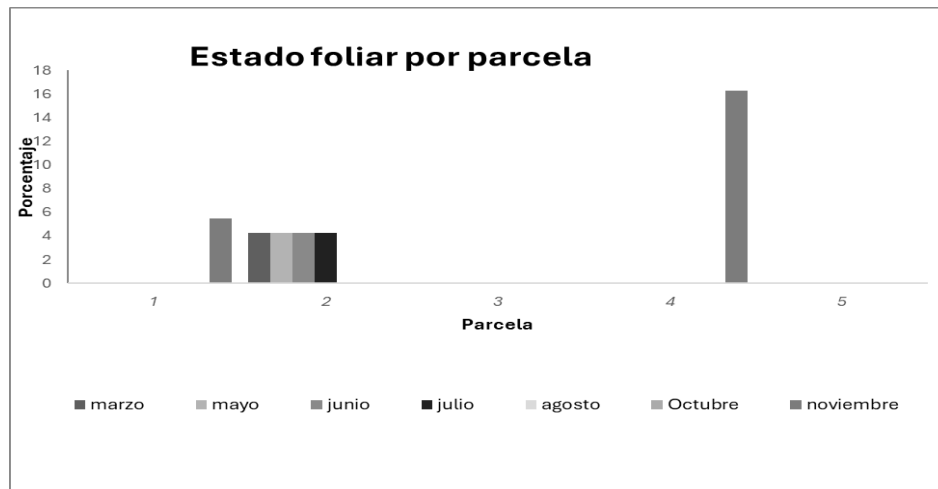
4.1.5 Cambio en las parcelas

Las parcelas uno, dos y cuatro son las únicas que presentaron una actividad fenológica notable, aunque en la parcela dos se mantuvo con baja actividad debido a que, durante el periodo de toma de datos, debido a que su actividad se mantuvo en un cinco por ciento, Por otra parte, la parcela 4 fue la que más actividad obtuvo, pero solamente durante el mes de noviembre donde el 15 por ciento de las especies presentaron caída de hojas por la entrada de la sequía,

La parcela 1 fue la que menos actividad presentó ya que solo en el mes de noviembre presentó defoliación en el cinco por ciento de sus individuos en su gran mayoría debido a que la mayor cantidad de individuos de esta parcela pertenecen a la misma especie (*Astronium graveolens*) individuo el cual durante toda la toma de datos no presentó variaciones ni indicios de frutos o semillas, además tampoco presentó flores,

Figura 7

Estado foliar por parcela



Respecto a fructificación mostrada en la figura 7 por parcela la diferencia fue más notable ya que en este caso la parcela 5 fue la única que no presento frutos,

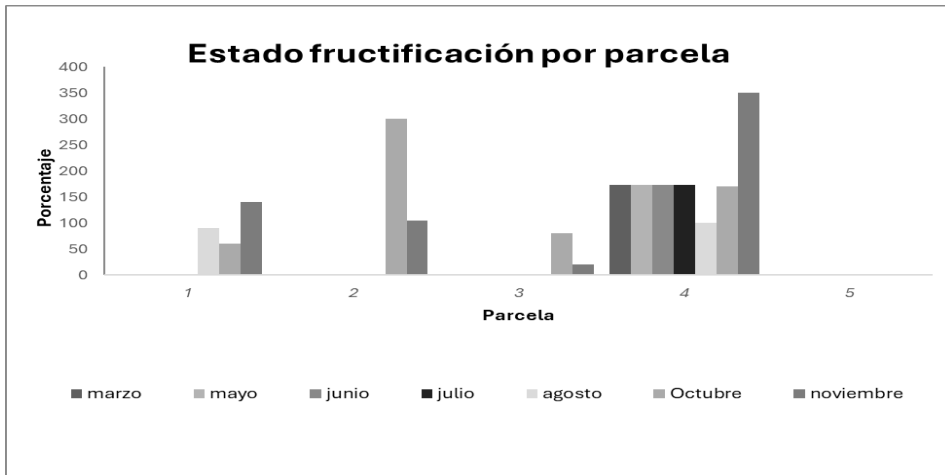
La primera en presentar frutos fue la 4 que obtuvo frutos de un *Bursera simarouba* el cual estaba fructificado desde el primer mes, la siguiente fructificación no se vería hasta agosto en la parcela 1 el cual el *ficus pallida* fructifico, pero en este mismo mes perdió sus frutos, En el mes de octubre más especies anteriormente mencionadas fructificaron con el periodo de lluvias, finalizando lo que dio campo también a que muchas especies igualmente mencionadas en los patrones fenológicos por especies empezaron su proceso de perdida de hojas, Finalmente, en noviembre con el periodo de sequía iniciado ocurrió la mayor actividad fenológica,

En el caso de la parcela 4 fue la que mayor actividad de fructificación obtuvo fue la especie *Bursera simarouba* presento un individuo fructificado durante todo el periodo de toma de datos siendo la única parcela con esta característica, Aportando en el mes de noviembre esta parcela con un 20 por ciento de sus individuos fructificados lo que indica que para este mes esta

parcela es la que más semillas aporta y por lo mismo en el proceso de regeneración del bosque según se muestra en la figura 8, en el caso de la parcela cinco cabe recalcar que se encuentra gravemente invadida por la especie *Uncaria tomentosa* (uña de gato) lo cual causa una gran preocupación ya que esta especie ha expandido casi en su totalidad en esta parcela,

Figura 8

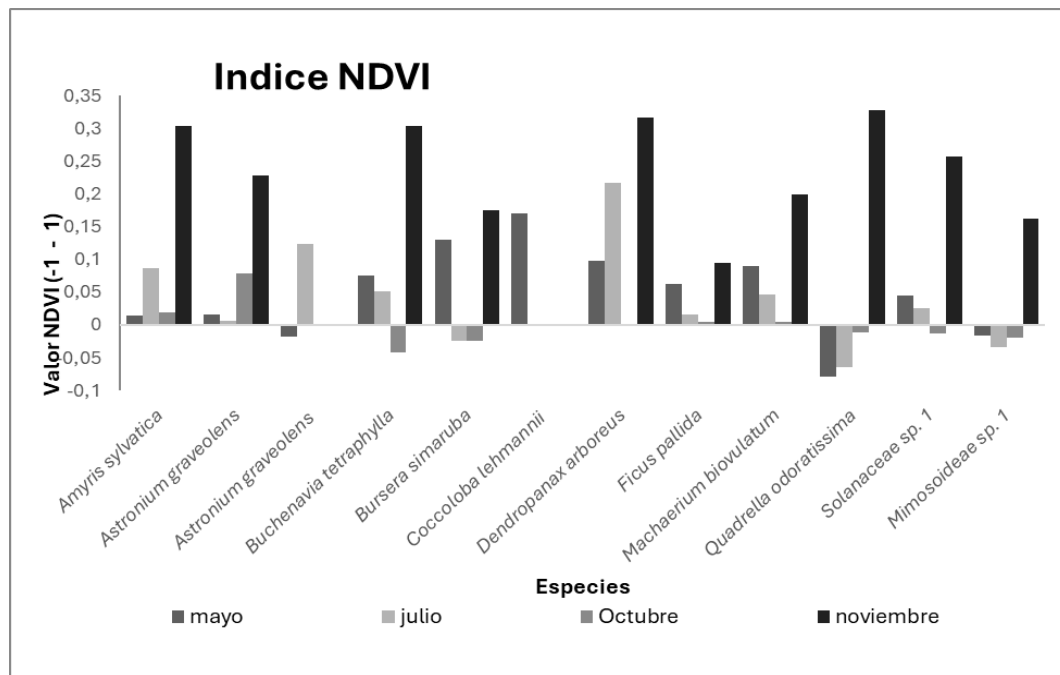
Fructificación por cada parcela



4.1.6 Índices

Figura 9

Índice NDVI de especies arbóreas por mes



Según la figura 9 los datos son a nivel general de las 5 parcelas para evidenciar como se encontraba el bosque a nivel general, pero se mostrarán también los datos para cada una de las parcelas,

En el mes de mayo, se presentan valores que en su mayoría son positivos indicando buena cobertura foliar en las especies con excepción de las especies *Quadrella odoratissima* y *Mimosoideae sp.1* las cuales presentaron valores negativos lo que sugiere una menor cantidad de hojas lo que desencadenó por ende una menor reflectancia en valores positivos, Para el mes de julio que fue el segundo mes de vuelo con el dron se presentan cambios leves, Esto debido a que las *Solanaceae sp.1* y *Bursera simaruba* caen a valores negativos y *Machaerium biovulatum* con *Astronium graveolens* bajan levemente su porcentaje de hojas manteniéndose relativamente

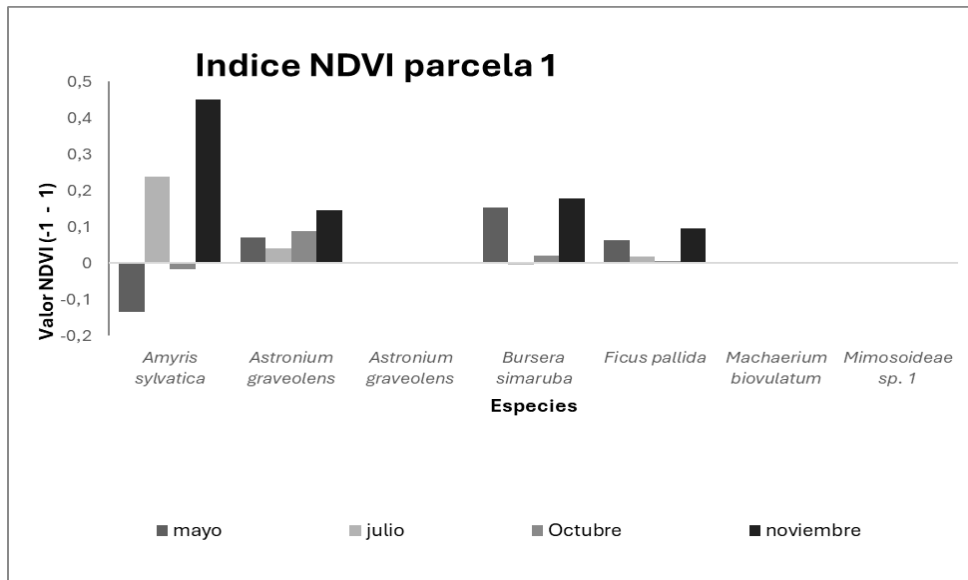
estable y con pocas variaciones fenológicas en cuanto a frutos y follaje, Con la perdida foliar de esas especies se empiezan a ver más las especies del sotobosque pertenecientes a latizales y especies arbustivas además de que el suelo es más visible desde la vista del dron debido a la perdida foliar de algunas especies reflejado en valores cercanos al 0,15, posteriormente se evidenció una recuperación significativa para el mes de noviembre mostrando también más actividad reproductiva de estas mismas,

4.1.7 Descripción por parcelas

En esta parcela siempre estuvo con una fenología con baja presencia foliar para el mes de mayo mostrando especies como *Amyris sylvatica* la cual presento bajo follaje reflejando dentro del área de la copa de esta especie más porcentaje de suelo, En cuanto a las especies *Macherium biovulatum* y *Mimosoideae sp,1* debido a que las copas de estas especies estaban ocultas por especies más altas no se pudo evidenciar cambios con las imágenes, Con excepción del *Amyris sylvatica* las demás especies fueron incrementando cobertura foliar llegando a su máximo valor en NDVI coincidiendo con los periodos de fructificación de las especies como se observa en la figura 10,

Figura 10

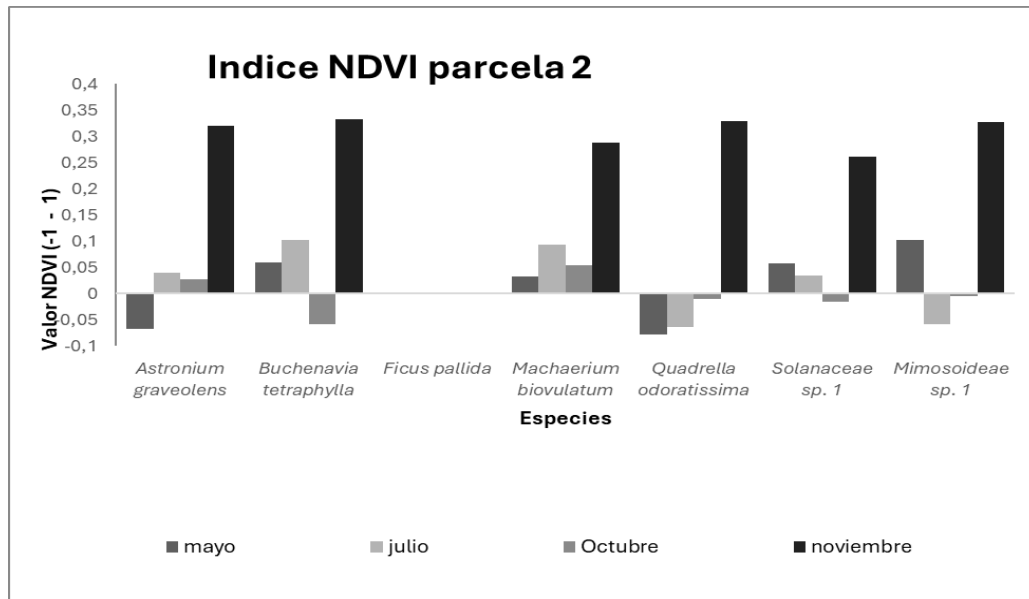
Valores NDVI cada dos meses parcela 1



Igual que con la parcela anterior según la figura 11 el *ficus pallida* al no observarse desde la parte superior por la cámara debido a estar oculto por las otras especies más altas, En esta parcela se presentó más actividad donde en los meses de mayo a julio se presentaron los menores valores de NDVI representando vegetación arbustiva o abierta según la clasificación empleada, esto indica baja presencia foliar lo que permitió que la vegetación más baja al dosel se viera reflejada en la imagen, esto cambia para noviembre donde se vio un incremento por la fructificación que se empezó a presentar este mes donde se presentó la mayor presencia de frutos de todo el periodo de la toma de datos pero en diferencia con los datos de las planillas para el mes de octubre donde en la imagen no se vio reflejado los frutos en esta parcela en gran medida porque este índice no está diseñado para que los frutos se observen por el contrario es un índice de vegetación,

Figura 11

Valores NDVI por mes en la parcela 2



En la parcela 3 destacan especies como el *Bursera simarouba* la cual perdió el follaje para el mes de julio presentando una cantidad de hojas relativamente mínimas en algunas ramas lo que permite observar el suelo desde la imagen además de esto se presentan especies como el *Astronium graveolens* el cual todos los individuos presentaban buen follaje y en comparación con la imagen nos indica un error al crear el orto mosaico por el software esto en medida porque de la totalidad de las fotografías de la cámara multiespectral no todas se pudieron colocar en el orto mosaico porque el software no fue capaz de localizar en que parte del mismo estaban estas imágenes no colocadas,

Volviendo al tema de los resultados de esta parcela su comportamiento es relativamente similar mostrando el mes de noviembre con su mayor periodo de fructificación y por ende mayor valor en el NDVI al igual que la parcela 4 donde el comportamiento es similar al de la parcela

con un valor NDVI que indica buena presencia foliar en las especies empezando su reducción de área foliar en los meses posteriores recuperándose finalmente en el mes de noviembre debido al incremento de frutos evidenciado en las figuras 12 y 13,

Figura 12

Valores NDVI por mes parcela 3

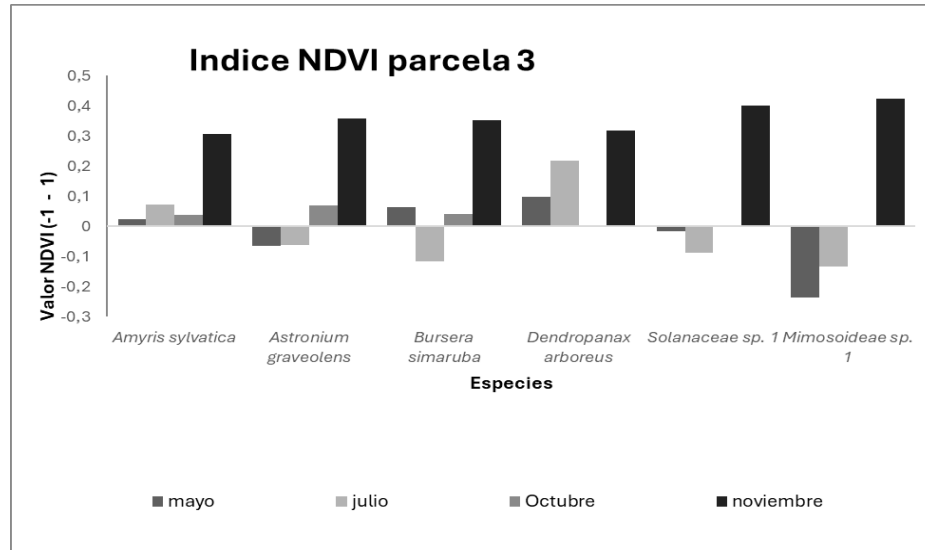
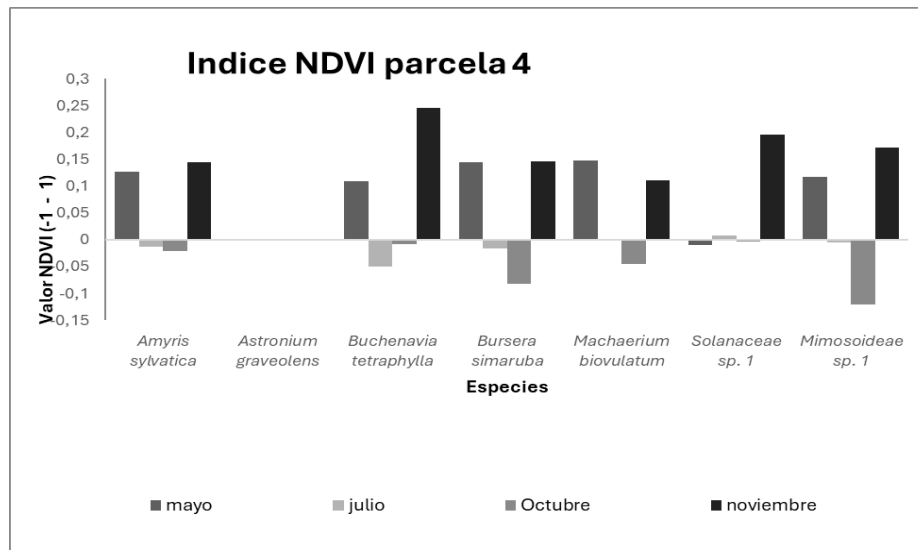


Figura 13

Valores NDVI por mes parcela 4



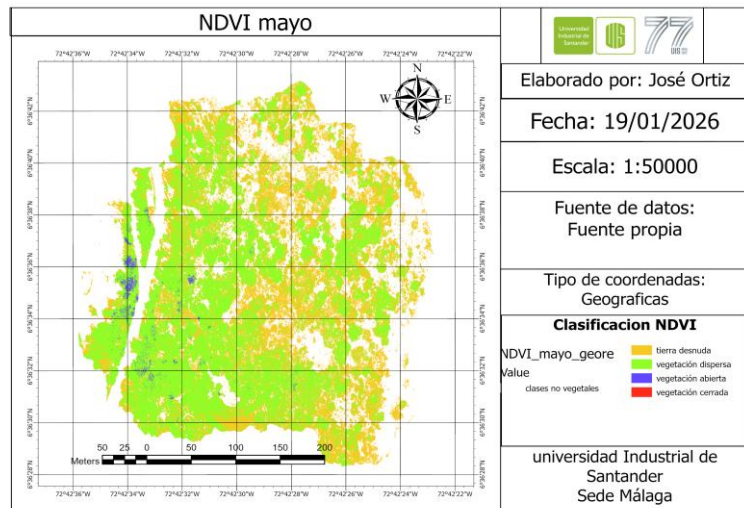
Para el estudio de la parcela 5 se mantuvo con valores positivos y las variaciones fueron muy pocas y como se evidencio con las tomas de datos en campo no se presentaron frutos en esta parcela además de estos no presento perdida de hojas en sus hojas lo bastante notables,

4.1.8 Relación con precipitación y temperatura

Inicialmente podemos ver en la figura 14 como la precipitación mensual se va reduciendo desde mayo hasta alcanzar su mínimo en el mes de julio y en relación con la fenología durante estos meses la fructificación se mantuvo baja solamente con un árbol al igual que la temperatura mensual la cual se reduce el aproximadamente un grado hasta el mismo mes, Donde posteriormente mejora la cantidad de precipitación mensual incrementando cada mes aproximadamente en 50 mm por mes mostrando como resultado un incremento en los la fructificación de más especies en cada una de las parcelas descritas anteriormente llegando a su máxima precipitación en el mes de octubre en donde para noviembre cae drásticamente la precipitación mensual por la entrada de la época de sequía, siendo en este es la máxima fructificación encontrada y en relación con la temperatura no se presenta mucha influencia ya que se mantuvo en una variación entre un grado centígrado aproximadamente lo cual es una variación mínima como para pensar en que influyo drásticamente en la fenología de las especies comparada con la precipitación en la cual en los primeros tres meses vario aproximadme te 50 mm y para los meses de octubre y noviembre vario 117mm y 195 mm vario respectivamente en comparación al mes anterior y estos cambios se ven reflejados en que al final de los meses de la toma de datos al presentar mayor variación coincide el incremento en la fructificación

Figura 14

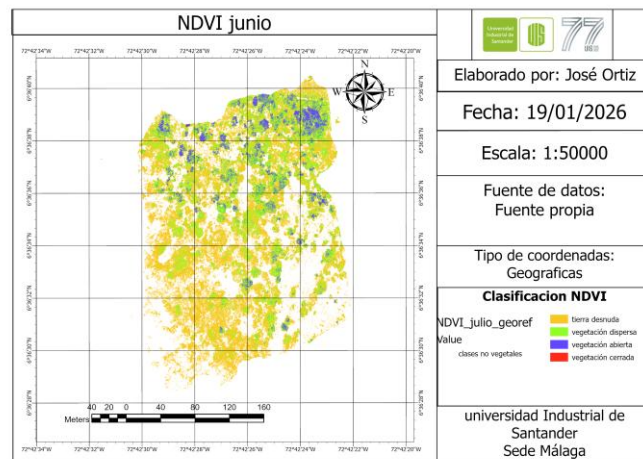
Mapa NDVI mayo



En la figura 14 la cual está a nivel general para todo el vuelo del dron se evidencia una vegetación en su mayoría dispersa por la baja presencia foliar en las especies donde la vegetación cerrada es muy escasa debido también a que muchos de estos árboles no conforman un dosel cerrado dejando en su mayoría espacios donde la vegetación herbácea es visible desde la altura de vuelo del dron,

Figura 15

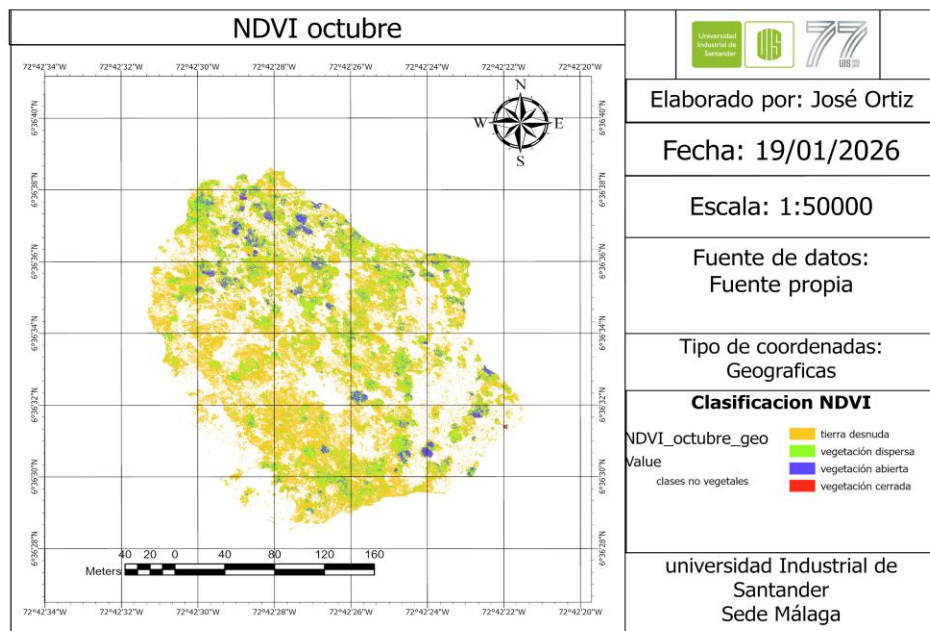
Mapa NDVI junio



Con la reducción de las lluvias se ve reducida la vegetación incrementando las tierras desnudas, aunque también algunas especies arbóreas mantienen su cobertura foliar reflejándose en un incremento en la vegetación en algunas áreas muy específicas del ecosistema como se muestra en la figura 15 mostrando resiliencia a la disminución de la precipitación, Este comportamiento se sigue manteniendo hasta el mes de octubre donde la precipitación incrementa como se muestra en la figura 16,

Figura 16

Mapa NDVI octubre



Finalmente, con el incremento en la precipitación a su máximo en el mes de octubre la vegetación recuperó cobertura foliar a pesar de los individuos los cuales presentaron defoliación la vegetación mostro como el área foliar incremento cerrando la vegetación reflejando más los valores superiores a 0,4 en NDVI según la clasificación utilizada como se evidencia en la figura 17,

Figura 17

Mapa NDVI noviembre

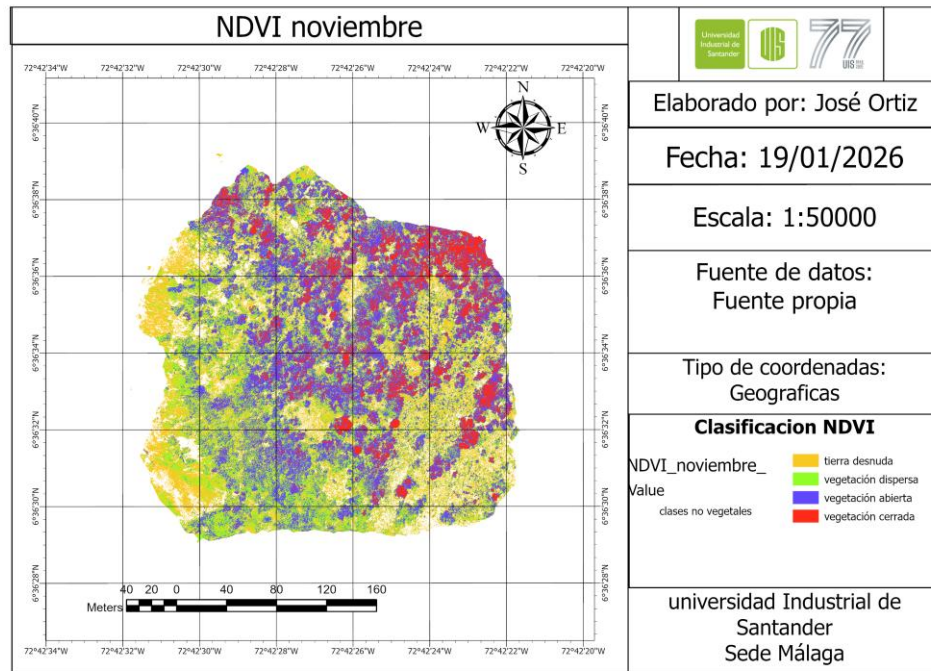
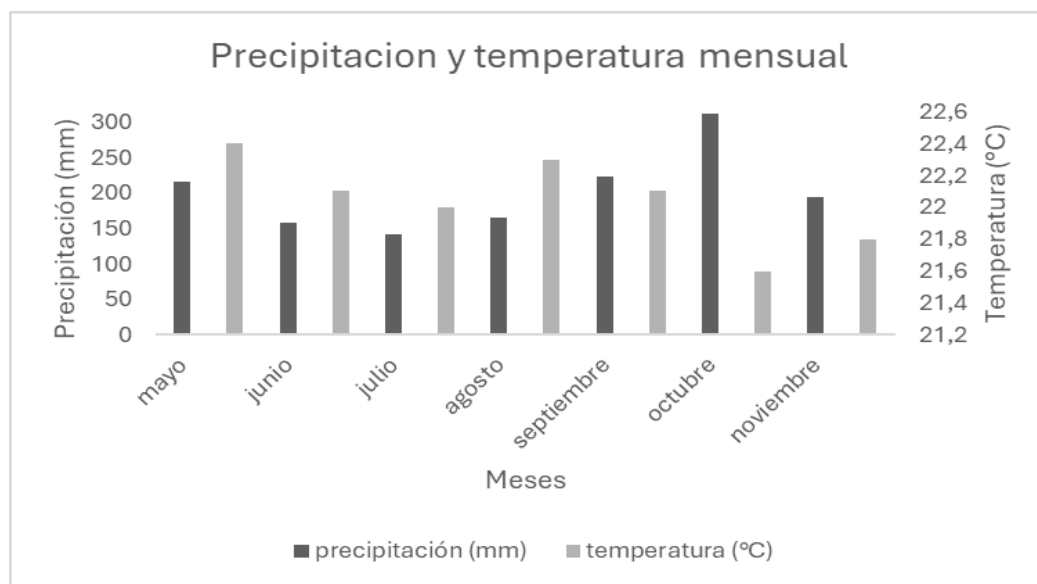


Figura 18

Precipitación y temperatura por mes



4.1.9 Análisis estadístico

Tabla 5

Correlaciones entre las variables más importantes

variable	Correlación con NDVI
Caída de hojas	0,97
% Frutos	0,51
Correlación con precipitación	
Caída de hojas	-0,36
% Frutos	0,52
Correlación con temperatura	
Caída de hojas	-0,12
% Frutos	0,43
Correlación con NDRE	
Caída de hojas	0,45
% Frutos	-0,12
Correlación con Cire	
Caída de hojas	0,71
% Frutos	0,04

Según las correlaciones realizadas en la tabla 5 se muestra que el NDVI y la defoliación refleja directamente la pérdida de hojas a medida que el NDVI disminuye, Además, el NDVI tiene el mismo comportamiento con la fructificación mostrando que parte de la fructificación se ve reflejada en el NDVI, Por otra parte, la precipitación y la fructificación muestra que influye en la negativamente ya que cuando la precipitación baja la fructificación tiende a subir, Esto nos permite observar que el NDVI es uno de los factores más confiables para analizar la dinámica foliar de las especies, pero no tan efectiva para fructificación,

Tabla 6

Promedios y desviación estándar

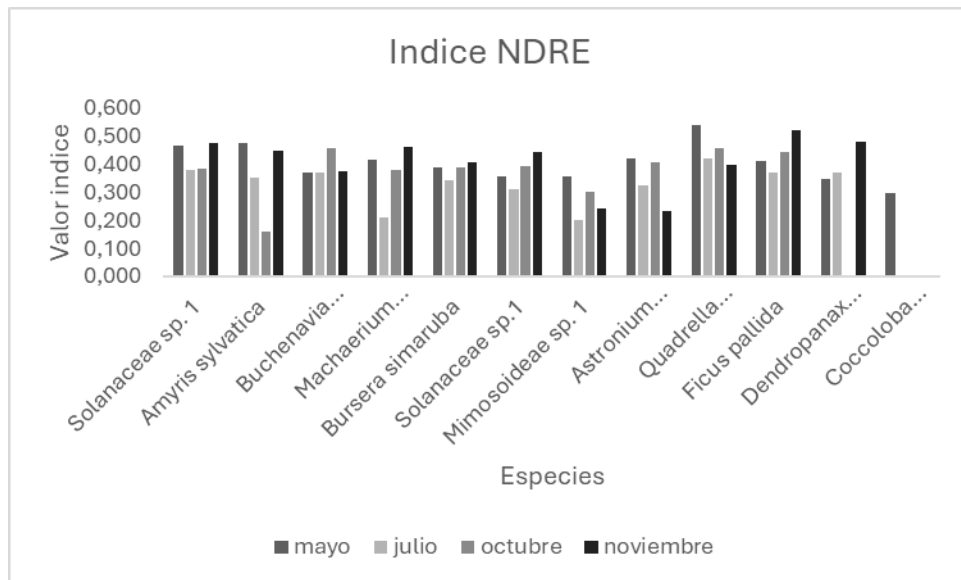
meses	Promedio de Caída de hojas	Promedio de valor NDVI	Promedio de % Frutos	temperatura	precipitación
-------	----------------------------	------------------------	----------------------	-------------	---------------

marzo	1,148		1,42	22,4	215
mayo	1,148	0,04	1,42	22,1	158
junio	1,148		1,42	22	142
julio	1,148	0,02	1,42	22,3	165
agosto	0,008		1,56	22,1	224
Octubre	0,000	0,01	5,00	21,6	312
noviembre	4,139	0,22	5,04	21,8	195
media	1,248	0,074	2,467	22,043	201,571
desviación estándar	1,198	0,078	1,51	0,239	49,630

Según la tabla 6 en cuanto a la actividad reproductiva, los porcentajes promedio de frutos y semillas fueron ambos de aproximadamente 2,467, con una desviación estándar de 1,745, lo cual sugiere una producción moderada pero no constante a lo largo del tiempo, La defoliación presentó un promedio de 2,108 y una desviación estándar de 2,406, lo que refleja una mayor variabilidad en este proceso fenológico.

Figura 19

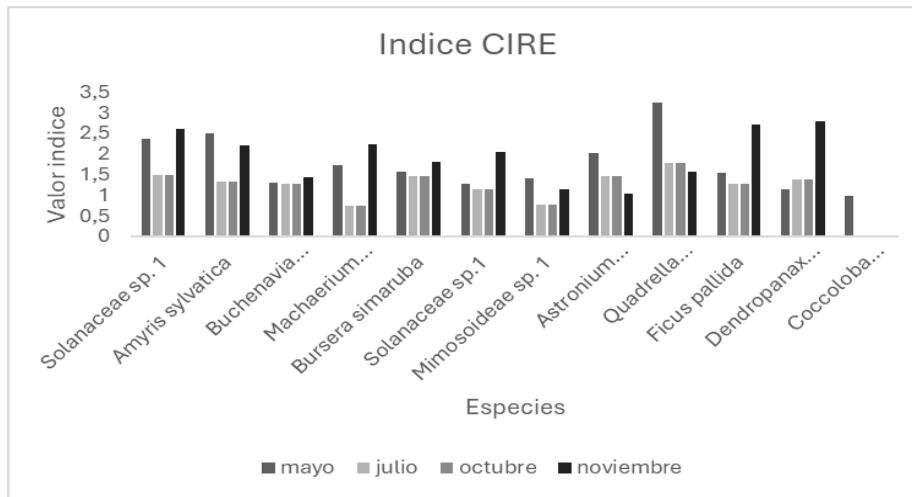
Índice NDRE



Teniendo en cuenta que por medio del índice NDRE se puede evidenciar la presencia de clorofila, en la figura 19 la cual muestra el índice NDRE podemos evidenciar que en general todas las especies mantienen un vigor alto como las especies como el *Ficus pallida* y *Astronium graveolens* mantienen valores altos lo que indica mayor concentración de clorofila en estas especies, con excepción de las especies *Coccoloba lehmannii* la cual en los meses de julio a noviembre presento valores de 0 y teniendo en cuenta que esta especie no se defolio al cien por ciento puede indicar que otras especies la cubrieron impidiendo que esta especie mostrara datos presentaba que no fueron vistos en campo igual que las *Solanaceae sp,1* las cuales presentaron en general buen follaje aunque se evidencio algunas manchas negras e las hojas lo que conlleva a una reducción ligeramente menor en comparación a las demás especies, Pero en general según este índice las especies mantuvieron buena concentración de clorofila con excepción de *Coccoloba lehmannii*, La cual al ser ocultada por especies más altas que bloquearon su follaje de la vista de la cámara mostro valores de 0 pero no indica que no presentara clorofila ya que esto indicaría problemas fitosanitarios que no presentaba en las visitas de campo,

Figura 20

Índice CIRE



A diferencia del índice NDRE donde podemos observar la concentración de clorofila existe otro índice más sensible para observar la actividad fotosintética el cual se muestra en la figura 20 y según este índice calculado los meses de mayo y noviembre son los que mayor actividad presentan, Para el caso de noviembre se relaciona con el periodo de precipitación más bajo con aproximadamente 200 mm similar a mayo, Para los meses siguientes hasta julio se ve como la precipitación disminuye, pero los factores de nubosidad presentes conllevan a una reducción de esta actividad fotosintética, Y en relación con el índice anterior vemos como la especie *Coccoloba lehmannii*, Al indicar sol o valores de actividad fotosintética para el mes de mayo nos muestra que esta especie estaba cubierta por arboles más altos que ocultaron su follaje lo suficiente para no ser detectada por la cámara, pero no indica que esta especie no realizara fotosíntesis o que no presentara clorofila porque esto indicaría problemas graves en su follaje o una defoliación lo cual no se evidencio en campo,

5 Discusión

Según López (2023), el cual identifico que los bosques que pierden follaje durante épocas de sequias la precipitación es el principal actor que acelera la actividad reproductiva lo que coincide con nuestra investigación donde la precipitación fue uno de los factores que más influencio en la fenología principalmente en la fructificación y perdida foliar, Por otra parte, la temperatura fue uno de los valores que más estable se mantuvo,

Martínez (2025) argumento que la estabilidad térmica no genera variaciones fenológicas significativas, igual que en este estudio donde la temperatura se mantuvo constante con variaciones leves demostrando que no influye drásticamente la fenología de estos bosques, similar a nuestro estudio donde la temperatura no afecto la fenología de las especies

La Fao (2024) ha recalcado que los patrones bimodales de lluvia en los andes determinan cual es la dinámica de la vegetación presente donde los meses más húmedos son los que más afectan la floración y fructificación,

Pérez (2021) dice que la estabilidad térmica mantiene los procesos metabólicos de las especies, pero la precipitación es la que regula los procesos ecológicos demostrando que anuqué en nuestro estudio no influjo en la fenología si es importante otros factores importantes en la reproducción de las plantas.

López (2021) documento que la precipitación mantiene una sincronía con la fenología en los bosques naturales, Igual que Gonzáles (2024) el cual reporto que en Paraguay la floración y fructificación se sincronizaron con las épocas de lluvia, Igual que en nuestro estudio donde en noviembre que fue el mes donde más se disminución de temperatura se presentó se vio reflejado con un aumento en la fructificación,

Martínez (2025) encontró que el NDVI refleja la dinámica de las especies reportando comportamientos similares en ecosistemas tropicales, lo que al igual que en nuestra investigación este índice nos permite detectar las variaciones que presentan las especies.

Ramírez (2025) identificó que el NDVI mantiene una correlación con la precipitación en ecosistemas de montaña, igual que este estudio donde el NDVI junto con la precipitación nos permiten ver como los cambios de la fenología se ven reflejados en los índices de vegetación, Por otra parte

Al igual que Cárdenas et al, (2021), describió que la defoliación fue la variable que más variabilidad mostró entre cada una de las especies entre los bosques secos tropicales del norte de Colombia, Igual que Carvajal et al, (2021) el cual sostuvo que la variabilidad es importante para la dispersión de los datos fenológicos igual que en nuestro estudio ya que se muestran diferencias marcadas en nuestras especies analizadas,

El NDVI nos mostró que este índice permite para analizar procesos de defoliación lo cual se respalda por Casiano y Paz (2022), quienes detectaron que este índice es el más eficaz para medir estos procesos, Además, Anaya y Valencia (2021) expresaron que este índice permite detectar cambios en el vigor foliar pero no necesariamente está ligado a la estacionalidad climática, Por otra parte, García y Zhingre (2025) concluyeron que este índice responde a eventos climáticos como la precipitación lo cual todo esto se alinea con lo encontrado en nuestro estudio,

Hernández et al, (2023) observó que el índice NDRE respondía mejor entre especies permitiendo detectar a las que tiene más tolerancia al estrés hídrico del mismo modo que Revelo-Luna et al, (2021) quien reveló que este índice es más sensible al determinar contenido de

clorofila lo que nos permite una mayor precisión al analizar la vegetación, a comparación del NDVI que suele tener más ruido por causa del suelo,

Por otra parte, Casiano y Paz (2022) también sostuvieron que los índices que se basan en borde rojo como el CIRE son más precisos que el NDVI, Del mismo modo Solis et al, (2021) validaron que este índice es más eficaz para determinar pigmentos fotosintéticos anunciando que este se correlaciona bastante con los datos de clorofila medidos en laboratorio,

6 Conclusiones.

El NDVI es una herramienta valida la dinámica foliar ya que nos permite observar el comportamiento de la vegetación, además comportamiento de esta ya que obtuvo una correlación muy fuerte con los periodos de defoliación,

La precipitación obtuvo una relación fuerte con los periodos de fructificación y defoliación ya que con el aumento de la precipitación empezaron los procesos de fructificación y con la reducción de esta la defoliación de las especies,

La fructificación en este estudio se vio más influenciada en los últimos meses principalmente en octubre y noviembre donde se observó su máxima fructificación con un incremento significativo en comparación a los primeros meses entre marzo y octubre donde sólo un árbol estuvo fructificado,

La temperatura fue la que menos influenció en los resultados debido a que durante todos los meses solamente varió un grado aproximadamente,

Durante el tiempo de estudio de la tesis no se evidenció presencia de flores en ninguna parcela durante los meses de la toma de datos,

Existen índices que pueden medir la clorofila y por ende la actividad fotosintética más eficientes que el NDVI los cuales son el NDRE y CIRE,

Los índices hallados nos mostraron que se presentó buena actividad fotosintética de las especies debido a su alta concentración de clorofila

7 Recomendaciones

Continuar con el estudio de ser posible durante los meses no manejados en este trabajo para complementar la información faltante referente a estos meses,

Utilizar datos de precipitación y temperatura tomados en campo mediante estación metrológica,

Emplear una cámara multispectral con la capacidad de tomar imágenes en el rango azul

Referencias Bibliográficas

- Anaya, J., & Valencia, R, (2021), Fenología y NDVI en bosques húmedos tropicales, *Revista Colombiana de Ecología*, 29(1), 45–60,
- Cárdenas, M., López, D., & Pérez, A, (2021), Efectos de la sequía en la fenología de bosques secos, *Bosques y Clima*, 12(3), 88–97,
- Cárdenas-Henao, M., Londoño-Lemos, V., Llano-Almario, M., González-Colorado, Á, M., Rivera-Hernández, K, L., Vargas-Figueroa, J, A., Duque-Palacio, O, L., Torres-González, A, M., Jiménez-Taquinas, Á, C., & Moreno-Cavazos, M, P, (2015), Fenología de cuatro especies arbóreas de bosque seco tropical en el Jardín Botánico Universitario, Universidad del Valle (Cali), Colombia, *Actualidades Biológicas*, 37(103), 121–130, <https://doi.org/10.17533/UDEA.ACBI.V37N103A01>
- Carvajal, D., Pérez, L., & Gómez, R, (2021), Microclimas y fenología en bosques secos, *Clima y Biodiversidad*, 5(2), 66–80,
- Casiano, J., & Paz, F, (2022), Evaluación de índices espectrales en plantaciones tropicales, *Revista de Teledetección*, 34(2), 55–70,
- Casiano, M., & Paz, F, (2022), Caracterización fenológica de bosques tropicales caducifolios usando información espectral, *Terra Latinoamericana*, 32(4), 259–274,
- Cuellar-Cardozo, J, A., Nossa-Silva, D., & Vallejo, M, I, (2022), Diversity and Floristic Structure in Riparian Areas of a Tropical Dry Forest Remnant, *Colombia Forestal*, 25(2), 70–84, <https://doi.org/10.14483/2256201X.19029>

- FAO, (2024), Monitoreo de la vegetación mediante sensores remotos en América Latina, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura,
- Fawcett, D., Jonathan, B, 2020 R, S, E, C,-M, spring phenology of individual tree crowns using drone-acquired N, pd., & Anderson, K, (2020), *Monitoring spring phenology of individual tree crowns using drone-acquired NDVI data Dominic* (p, 18),
- García, L., & Zhingre, M, (2025), Variabilidad fenológica en bosques amazónicos, Amazonía y
- Gray, R, E, J., & Ewers, R, M, (2021), Monitoring forest phenology in a changing world, *Forests*, 12(3), <https://doi.org/10.3390/f12030297>
- García-Ferrer, A., Revilla-Romero, B., & Jurado-Expósito, M. (2020). Evaluación de la consistencia de los datos obtenidos desde UAV por el sensor Sequoia para su aplicación en agricultura. Universidad de Córdoba / Universidad de Jaén.
- Hardy, N, G., Kuebbing, S, E., Duguid, M, C., Ashton, M, S., Sheban, K, C., Inman, S, E., & Martin, M, P, (2025), Non-native invasive plants in tropical dry forests: a global review of presence, impacts, and management, *Restoration Ecology*, 33(1), e14288, <https://doi.org/10.1111/REC.14288>
- Hernández, C., & Rojas, M, (2023), Aplicación de CIRE en especies amazónicas, *Revista de Fotogrametría Tropical*, 11(2), 77–89,
- Hernández, C., López, M., & Díaz, F, (2023), NDRE y estrés hídrico en bosques secos, *Ecología Funcional Tropical*, 10(1), 33–47,
- Kleinsmann, J., Verbesselt, J., & Kooistra, L, (2023), Monitoring Individual Tree Phenology in a Multi-Species Forest Using High Resolution UAV Images, *Remote Sensing 2023, Vol, 15, Page 3599, 15(14), 3599*, <https://doi.org/10.3390/RS15143599>

- López, J, (2023), Análisis espacio-temporal del NDVI en bosque semidecíduo piemontano, Revista CEDAMAZ, Universidad Nacional de Loja,
- López, L. J., & Petro, E. C. (2020). Evaluación de la diversidad y composición del banco de semillas del bosque seco tropical (Bs-T) en dos subregiones del departamento de Córdoba, Colombia [Trabajo de grado de pregrado, Universidad de Córdoba]. Repositorio Institucional Universidad de Córdoba. <https://repositorio.unicordoba.edu.co/handle/ucordoba/3455>
- Martínez, P, (2025), Dinámica estacional interanual del socioecosistema mediante índices espectrales, Revista Márgenes, 13,
- Montano, M., Durán, C., & Duarte, C, (2022), *Destrucción del Bosque Seco Tropical en el Valle Geográfico del Río Cauca* (Vol, 3, Issue 2022),
- Pérez, A, (2021), Respuesta ecofisiológica de árboles tropicales ante el cambio climático: sequía y temperatura, Revista Cubana de Ciencias Forestales,
- Radočaj, D., Plaščak, I., & Jurišić, M. (2025). Fusion of Sentinel-2 phenology metrics and saturation-resistant vegetation indices for improved correlation with maize yield maps. *Agronomy*, 15(6), Artículo [1329](https://doi.org/10.3390/agronomy15061329). <https://doi.org/10.3390/agronomy15061329>
- Ramírez, L, (2025), Análisis de las tendencias del NDVI y variables climáticas en bosques deciduos y páramos de Ecuador, *Bosques Latitud Cero*, 15(1),
- Revelo-Luna, J., Torres, E., & Salazar, H, (2021), Validación de NDRE en cafetales, *Agronomía Andina*, 13(1), 40–52,
- Revilla-Chávez, J, M., García-Soria, D, G., Pinedo-Ramírez, R, A., Casas-Reátegui, R., López-Galán, E, E., & Abanto-Rodríguez, C, (2021), Efecto de los factores climáticos en las fases fenológicas de *Mauritia flexuosa* Lf, *Scientia Agropecuaria*, 12(2), 213–224,

- Rosas, J, (2022), Propuesta metodológica para caracterizar los parámetros del clima en relación con los valores ideales y la fenología de los sembríos de café en Puno, *Revista de Investigación de Agroproducción Sustentable*, 6(1), 74, <https://doi.org/10.25127/aps.20221.857>
- Solis-Pino, D., Herrera, C., & Molina, V, (2021), Índices espectrales y clorofila en Coffea arabica, *Agroforestería Tropical*, 15(2), 90–104,
- Thapa, S., Garcia Millan, V, E., & Eklundh, L, (2021), Assessing forest phenology: A multi-scale comparison of near-surface (UAV, spectral reflectance sensor, phenocam) and satellite (MODIS, sentinel-2) remote sensing, *Remote Sensing*, 13(8), <https://doi.org/10.3390/rs13081597>
- Tmušić, G., Manfreda, S., Aasen, H., James, M, R., Gonçalves, G., Ben-Dor, E., Brook, A., Polinova, M., Arranz, J, J., Mészáros, J., Zhuang, R., Johansen, K., Malbeteau, Y., de Lima, I, P., Davids, C., Herban, S., & McCabe, M, F, (2020), Current practices in UAS-based environmental monitoring, *Remote Sensing*, 12(6), <https://doi.org/10.3390/rs12061001>
- UNALM, (2023), Fenología reproductiva en bosques amazónicos peruanos: influencia de la humedad y temperatura, *Revista Amazónica de Ciencias Ambientales*, 12(2), 89–104,