

Propuesta de
***Protocolo para la estimación integral de
contenidos de carbono y biodiversidad en
humedales del Magdalena Medio y Bajo***

**Anexo 2. Resultados de análisis geoespaciales y de
teledetección para la ventana piloto del Complejo Cenagoso
de Zapatosa**

**Lina María Parada Alzate
Profesional SIG Agua y Biodiversidad**



Propuesta de Protocolo para la estimación integral de contenidos de carbono y biodiversidad en humedales del Magdalena Medio y Bajo

Ecopetrol S.A

Santiago Martínez Ochoa
Xiomara Sanclemente Manrique
Lorena Ortiz Melo
Maria Juliana Salcedo Hernández
Adriana Velandia Valero
Jorge Gaviria Chicuasique
Apoyo técnico y Administrativo del
Convenio Específico No. 3044288

Fundación Natura Colombia

Clara Ligia Solano Gutiérrez
Directora ejecutiva

Nancy Vargas Tovar
Subdirectora técnica

Lorena Franco Vidal
Subdirectora técnica

Sandra Galán
Subdirectora técnica

Mauricio Rosas Hurtado
Jefe financiero y contable

Andrea Gutiérrez de Piñeres
Jefe administrativa y de gestión
humana

Eliana Marcela Garzón Fierro
Jefe de comunicaciones

Gustavo Andrés Segura Clavijo
Jefe de proyecto CO2 Humedales

Autores

Equipo técnico CO₂ Humedales

Claudia Patricia Andramunio-Acero
Profesional monitoreo de carbono
Líder técnica del protocolo

Yesid Fernando Rondón-Martínez
Profesional de apoyo transversal

Yennifer García-Murcia
Profesional de biomasa y materia
orgánica muerta

Yenny Beatriz Mendoza Plazas
Profesional de suelos y sedimentos

Mónica Tatiana López-Muñoz
Profesional de biodiversidad

Lina María Parada Alzate
Profesional SIG agua y biodiversidad

Jhenny Liliana Salgado Vásquez
Profesional estadístico y gestión de la
información

Luis Alfredo Moreno-Pérez
Profesional de apoyo local

Patricia Téllez Guio
Sidney Adriano Pérez Villegas
Profesionales SIG Datos de Actividad

Colaboradores técnicos

José Andrés Posada-García
Nathalie Morales García
Javier Sunyer MacLennan
Liliana Ospina Calle
Carolina Bustamante-Gil
Osvar Cupitra Gómez
Santiago Cañón Escobar
Profesionales de campo y análisis

Michelle Hernández Fernández
Cristhian Alfonso Pimiento Ordóñez
Luz Patricia Hernández Arango
Sandra Milena Palacio Taborda
Nicolas Romero-Peña
Profesionales Fundación Natura de
apoyo en el proceso de formulación e
implementación

Colaboradores locales

Francisco Villalobos Ríos
Danilson Segovia Zambrano
Rodolfo Segovia Daza
Vicente Buitrago Segovia
Deibis Armando Martínez Martínez
Omaida Rangel Rangel
Genaro Madrid Álvarez
Alvenis Carpio Castro
Elvin Dewin Cabarcas Monterrosa
Jorge Adolfo Rangel Piñeres
Jaider Guerra Guillen
Celso Moreno Mejía
Fabio Moreno Mejía
Omar Antonio Morales Hurtado
Teobaldo Cervantes Cadena
Edilso Iglesia Machado

Edición

Danyth Janneth Fandiño Lerma
Líder de comunicaciones CO2
Humedales

Diego Alejandro Quintero Candela
Lina Daniela Mutis Prado
Diseño gráfico

Andrea Julieth Castellanos Leal
Diagramación

Claudia Campos Rozo
Corrección de estilo

Alejandro Peña García
José Manuel Pantoja Surmay
Fotografías

Cítese como:

Andramunio-Acero, C., Rondón-Martínez, Y., García-Murcia, Y., Mendoza, Y., López-Muñoz, M., Parada, L., Salgado, J., Moreno-Pérez, L., Téllez, P. y Pérez, S. (2024). Propuesta de *Protocolo para la estimación integral de contenidos de carbono y biodiversidad en humedales del Magdalena Medio y Bajo*. Fundación Natura Colombia, Ecopetrol S. A.

ISBN digital: en trámite

Aviso legal

© Fundación Natura Colombia
Todos los derechos reservados. Se autoriza la reproducción y difusión del contenido de este documento para fines educativos u otros fines no comerciales, con previa autorización de los titulares de los derechos de autor y citando la fuente. Se prohíbe la reproducción de este documento para fines comerciales.

Esta publicación se realizó en el marco del Proyecto CO₂ Humedales, Convenio Específico No. 3044288 entre Fundación Natura Colombia y Ecopetrol S.A.

INTRODUCCIÓN

A través de datos espaciales se logró una caracterización detallada del Complejo Cenagoso de Zapatosa (CCZ), en la que se identificaron los distintos patrones de distribución de la biodiversidad. Este tipo de análisis ha permitido obtener una visión detallada y multidimensional de este complejo, y ha revelado aspectos clave de su estructura, dinámica y salud ambiental. En este contexto, el presente anexo se centra en los resultados obtenidos mediante el análisis de datos geoespaciales y de teledetección, con un enfoque particular en el inventario de datos geográficos y el análisis de variables hidrometeorológicas, de cambios en la extensión del humedal y de índices espectrales a partir de datos vectoriales y ráster. Estos resultados proporcionaron información valiosa que contribuye a la comprensión integral del CCZ y sienta las bases para su gestión y conservación efectivas en el futuro.

BÚSQUEDA Y DESCARGA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DISPONIBLE PARA EL COMPLEJO CENAGOSO DE ZAPATOSA

Se presenta el inventario cartográfico de mapas disponibles para la ventana piloto, los cuales se organizaron de acuerdo con el tipo de cartografía, base o temática. Este inventario se realizó siguiendo las fases sugeridas para la generación de inventarios de información geográfica para humedales en la propuesta de *Protocolo para la estimación de contenidos de carbono en Humedales del Magdalena Medio y Bajo*¹ (Andramunio-Acero et al., 2024), a partir de la identificación de las principales fuentes de datos y de la información geográfica hasta la fecha, con cubrimiento espacial para el CCZ.

Se recopilaron 44 insumos cartográficos² producidos por entidades públicas, privadas y mixtas, como la Fundación Natura, el Instituto de

¹ De aquí en adelante, este documento se nombra como propuesta de Protocolo.

² La información completa se encuentra en las bases de datos del proyecto, que está estructurada en un repositorio virtual. Para una consulta más detallada, se recomienda realizar la solicitud oficial directamente a la Fundación Natura.

Investigaciones Alexander von Humboldt (IAvH), el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), Agrosavia y las Corporaciones Autónomas Regionales (CAR). Los insumos geográficos revisados fueron elaborados entre el año 2011 y el 2022.

ANÁLISIS DE VARIABLES HIDROMETEOROLÓGICAS PARA EL COMPLEJO CENAGOSO DE ZAPATOSA

El análisis de variables hidrometeorológicas ofrece una visión detallada y fundamentada de las condiciones climáticas y la dinámica hídrica en la ventana de implementación. Este estudio se llevó a cabo a través de la aplicación de la metodología descrita en la sección “Etapa de muestreo” de la propuesta de Protocolo, con el propósito de comprender mejor los patrones climáticos y los flujos de agua que caracterizan al CCZ. Esto se hizo mediante la recopilación y el análisis de datos hidrometeorológicos, para comprender las tendencias, las variabilidades y los posibles impactos ambientales que puedan influir en la gestión y conservación de este ecosistema vital.

PROCESAMIENTO DE DATOS DE VARIABLES HIDROMETEOROLÓGICAS BÁSICAS

Se analizaron datos reportados por estaciones convencionales del IDEAM, relacionados con precipitación, temperatura, humedad relativa, brillo solar y velocidad del viento, para el periodo comprendido entre el año 1991 y el 2020. La base de datos pasó por el proceso de revisión, control de calidad del dato, homogeneización y completitud.

Se seleccionaron datos diarios de las estaciones ubicadas dentro del área de estudio o en sus proximidades, en un radio de aproximadamente 50 km desde el límite externo, con el objetivo de establecer tendencias a escala regional. Se identificó el intervalo de cada serie dentro del periodo evaluado, priorizando aquellas completas para los 30 años; no obstante, también se consideraron series con periodos iguales o superiores a 20 años cuando no se contaba con suficientes series completas.

Los análisis se hicieron a partir de diagramas de barras generados para los valores medios mensuales multianuales; así mismo, se analizaron valores máximos y mínimos para presentar las características por cada estación. A continuación, se presenta la descripción de cada variable básica analizada.

Precipitación

Se analizaron datos que iban desde el año 1991 hasta el 2020 de registros de 37 estaciones localizadas. Se observó que la precipitación en el CCZ sigue un patrón de regímenes bimodales:

- └ Dos temporadas secas: una de diciembre a febrero y otra de junio a agosto.
- └ Dos temporadas de lluvias: una de abril a mayo y otra de octubre a noviembre.

Temperatura media

Los valores reportados por las 30 estaciones del IDEAM oscilan entre 17,1 °C y 30,5 °C. En los primeros meses del año se presentan valores medios que aumentan cerca de marzo y abril, pero disminuyen entre mayo y junio. Para el segundo semestre del año los valores incrementan en julio, y entre octubre y noviembre disminuyen de nuevo. Al finalizar la época de lluvias, cerca de diciembre, hay aumentos de los valores y comienza la época seca.

Temperatura máxima

A partir de los datos reportados por 29 estaciones del IDEAM se evidencia que los valores más bajos se presentan en los meses de enero y febrero, aumentan hacia mediados del año y luego disminuyen de nuevo en noviembre y diciembre. Los valores reportados para el CCZ van desde los 22°C hasta los 40°C.

En cuanto a la relación de la temperatura máxima mensual multianual con la precipitación, se puede afirmar que durante las temporadas de aguas bajas la temperatura máxima disminuye y en temporadas de aguas altas aumenta. Sin embargo, aunque en este caso la distribución de los datos es normal, no tiene un patrón bimodal, como ocurre con la precipitación.

Temperatura mínima

Los valores registrados por 29 estaciones del IDEAM demostraron una relación de la temperatura mínima más directa con la precipitación, dado que al aumentar las lluvias incrementan los valores de la primera, lo que

representa una distribución mensual multianual muy similar, con patrones bimodales.

Humedad relativa

De acuerdo con los valores registrados por las 29 estaciones analizadas para el CCZ, hay una relación directa entre la humedad relativa y la temperatura, pues estas variables determinan los niveles de la precipitación mediante el proceso de evaporación del agua. A partir de las gráficas generadas se infiere que la humedad relativa mensual multianual aumenta entre abril y junio y entre septiembre y noviembre, por lo cual se afirma que el patrón de distribución de los datos es similar al de los valores de precipitación.

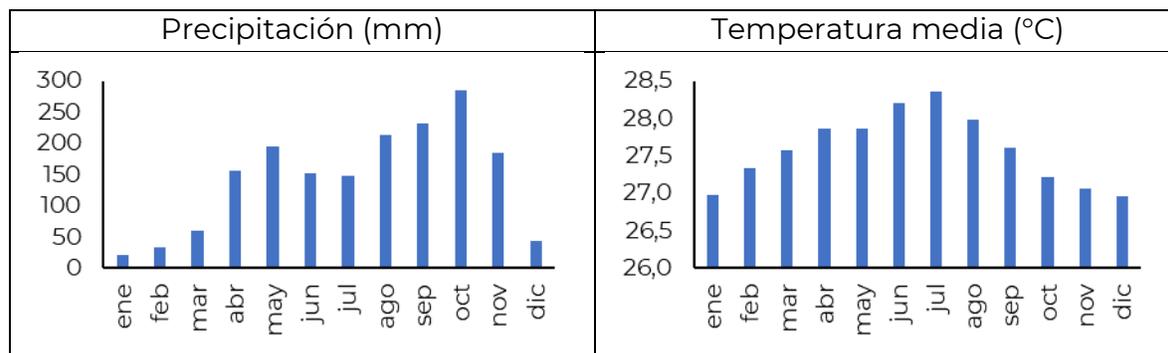
Brillo solar

Para el área de estudio, se contó con un total de 24 estaciones climatológicas, con datos de series históricas entre el periodo 1991-2020 de brillo solar diario (horas de sol al día), localizadas dentro y en un radio de 200 Km alrededor del DRMI-RAMSAR.

Velocidad del viento

No se contó con estaciones climáticas distribuidas dentro del área de estudio; no obstante, se obtuvieron datos de observaciones in situ para 25 estaciones localizadas alrededor. Con base en estos registros, se infirió que los valores medios mensuales multianuales más altos se presentan en febrero y marzo, y los más bajos, en agosto y septiembre.

A partir de los valores de la media mensual multianual de las variables analizadas se generaron gráficas por cada estación (ver ejemplos, Figura 1).



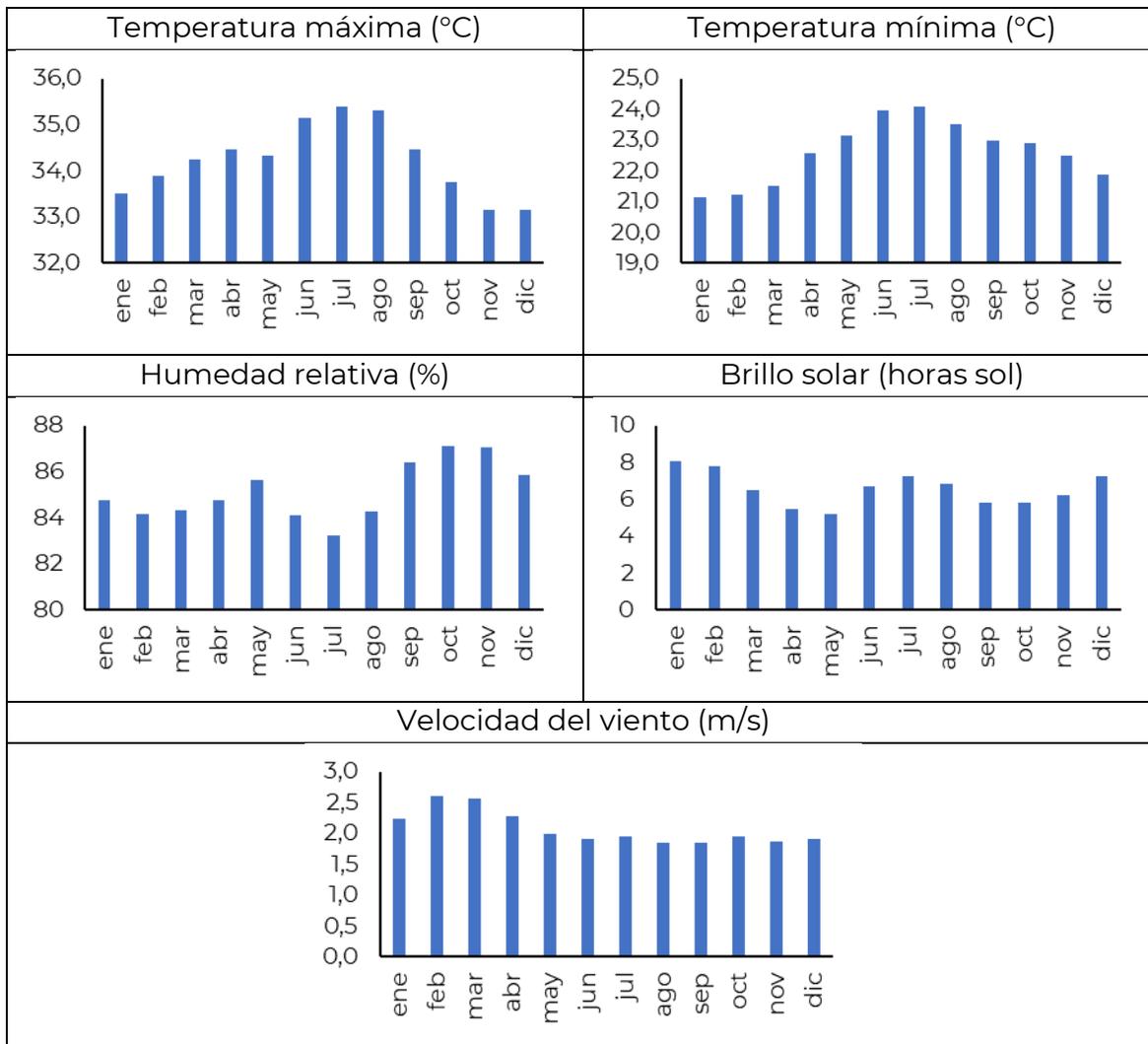


Figura 1. Ejemplos de gráficas de barras generadas con datos de los valores de la media mensual multianual de las variables hidrometeorológicas analizadas. Fuente: elaboración propia (2024).

Una vez los datos fueron organizados y revisados, se procedió a la generación de las superficies ráster, cuya interpolación (IDW) generó 12 mapas de valores mensuales multianuales por variable (Figura 2).

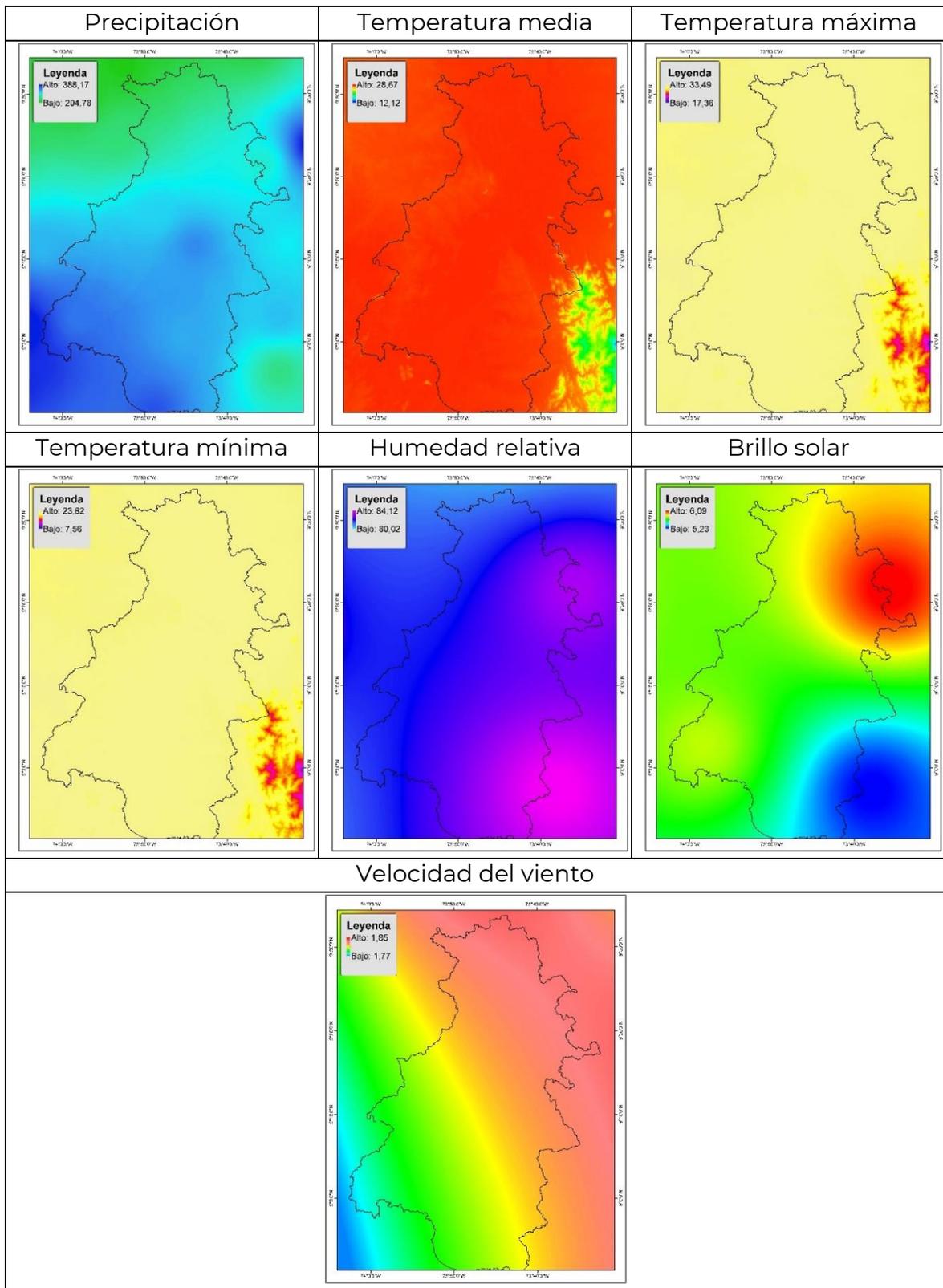


Figura 2. Ejemplos de mapas de las variables analizadas, generados mediante interpolación (IDW) a partir de valores mensuales multianuales. Fuente: elaboración propia (2024).

CÁLCULO DE VARIABLES COMPLEMENTARIAS

Capacidad de almacenamiento de agua en el suelo

Los cálculos de la capacidad de almacenamiento de agua se hicieron a partir de los valores de arena, arcilla y materia orgánica para cada Unidad Cartográfica de Suelos (UCS), con base en los valores de los estudios de suelos del departamento del Cesar. A partir de los resultados de textura, que reportan el porcentaje de arena y arcilla, se hizo la extrapolación para tener los datos a las diferentes profundidades (0-25 cm, 25-50 cm y 0-50 cm). Lo mismo se hizo con los valores de materia orgánica, tercera variable a tener en cuenta para realizar los cálculos. Dado que el contenido de agua se encuentra principalmente a la profundidad de 0-25 cm, se compilaron los valores de las tres variables para el análisis de su disponibilidad en el suelo del CCZ.

Con este fin, los valores de arena, arcilla y materia orgánica se ingresaron en el aplicativo SWAP y se analizó el resultado de la clase de textura resultante en la aplicación para comparar la clasificación de las UCS (Tabla 1).

Tabla 1. Porcentaje de arenas, arcillas y materia orgánica por UCS; disponibilidad del agua en suelos (Disp_agua); y clase de textura de SPAW para el Complejo Cenagoso de Zapatosa.

FID	UCS	Unidad suelos IPCC	Arena	Arcilla	MO	Disp_agua (cm)	Clase de textura SWAP
0	CA	Cuerpo de agua	CA	CA	CA	NA	NA
1	LWDb2	Arcillas de alta actividad	19	44	2,0	0,14	Arcilloso
2	LWDC2	Arcillas de alta actividad	19	44	2,0	0,14	Arcilloso
3	LWDD2	Arcillas de alta actividad	19	44	2,0	0,14	Arcilloso
4	LWEa2	Arenales	71	17	1,0	0,08	Franco arenoso
5	LWEb2	Arenales	71	17	1,0	0,08	Franco arenoso
6	LWFa	Arenales	56	26	1,5	0,10	Franco arcillo arenoso
7	LWFc	Arenales	56	26	1,5	0,10	Franco arcillo arenoso
8	LWFC2	Arenales	56	26	1,5	0,10	Franco arcillo arenoso
9	PVBa	Arcillas de alta actividad	19	32	1,1	0,16	Franco arcillo limoso

FID	UCS	Unidad suelos IPCC	Arena	Arcilla	MO	Disp_agua (cm)	Clase de textura SWAP
10	PVCb2	Otros suelos minerales	66	19	3,2	0,10	Franco arenoso
11	PVDa	Arcillas de alta actividad	56	27	0,7	0,10	Franco arcillo arenoso
12	PVDa1	Arcillas de alta actividad	56	27	0,7	0,10	Franco arcillo arenoso
13	PVEa1	Arcillas de alta actividad	33	35	1,4	0,13	Franco arcilloso
14	PVEa2	Arcillas de alta actividad	33	35	1,4	0,13	Franco arcilloso
15	PVEb2	Arcillas de alta actividad	33	35	1,4	0,13	Franco arcilloso
16	PVHa	Arcillas de alta actividad	33	35	1,4	0,13	Franco arcilloso
17	PVJd3	Arcillas de alta actividad	56	27	0,7	0,10	Franco arcillo arenoso
18	PWFa1	Arenales	51	18	1,9	0,12	Franco
19	PWFa2	Arenales	51	18	1,9	0,12	Franco
20	PWFb2	Arenales	51	18	1,9	0,12	Franco
21	PWHa	Arenales	51	18	1,9	0,12	Franco
22	RVAa	Arenales	50	23	1,0	0,11	Franco arcillo arenoso
23	RVBa	Otros suelos minerales	89	8	0,3	0,04	Arenoso
24	RWAa	Arcillas de alta actividad	24	34	1,2	0,15	Franco arcilloso
25	RWCa	Arcillas de alta actividad	8	34	1,7	0,17	Franco arcillo limoso
26	RWEa	Arcillas de alta actividad	35	35	1,4	0,13	Franco arcilloso
27	RWEb	Arcillas de alta actividad	35	35	1,4	0,13	Franco arcilloso
28	RWEb2	Arcillas de alta actividad	35	35	1,4	0,13	Franco arcilloso
29	RWKai	Humedales	16	54	2,9	0,12	Arcilloso
30	ZU	Zonas urbanas	ZU	ZU	ZU	ZU	NA

Fuente: elaboración propia (2024).

Según lo expuesto en la tabla anterior, se observa que los valores más bajos de disponibilidad de agua se presentan en suelos arenosos y los valores más altos (>0,10) en suelos francos y suelos arcillosos o su combinación (francos arcillosos). Esto se debe a que los suelos arenosos, como es el caso de las UCS de LWE, LWF, RVA, PWF o PWH, tienen las siguientes características:

- └ Son superficiales, moderadamente profundos o profundos.
- └ Están bien drenados.
- └ Presentan texturas gruesas, medias o finas.
- └ Son ligeramente ácidos.
- └ Tienen una fertilidad natural baja y moderada.

Por el contrario, los suelos arcillosos, que corresponden a UCS como LWD, PVB, PVD, PVE, PVH, PVJ, RWA, RWC, RWE, poseen las siguientes características:

- └ Son suelos profundos y moderadamente profundos.
- └ Presentan texturas finas y moderadamente finas.
- └ Están entre bien e imperfectamente drenados.
- └ Son fuertemente ácidos y moderadamente alcalinos.
- └ Tienen una fertilidad natural moderada y alta.
- └ Presentan un drenaje pobre.

Lo anterior indica que, a mayor contenido de arcillas, el suelo presenta más humedad, por haber mayor disponibilidad de agua y tener drenaje pobre, lo que genera más retención del recurso hídrico. Los valores de disponibilidad de agua se asociaron con las unidades cartográficas de suelos del CCZ y se generó el mapa para la profundidad de 0-25 cm, donde se observa que los valores más altos se presentan en los municipios de Chiriguana, Curumaní y Pailitas (Figura 3).

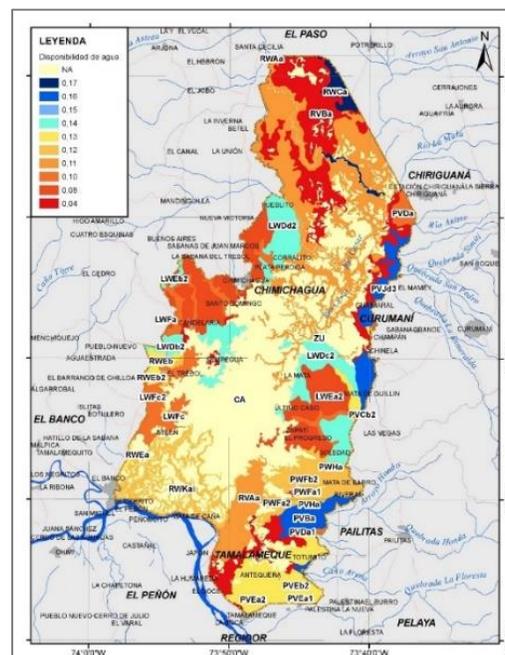


Figura 3. Mapa de disponibilidad de agua del suelo para la profundidad 0-25 cm del Complejo Cenagoso de Zapatosa. Fuente: elaboración propia; a partir de valores calculados en SPAW (2024).

En cuanto al potencial matricial (kPa), que es el grado de retención del agua por las fuerzas de adsorción y capilaridad, es mayor en suelos arcillosos debido a la capacidad de retención de humedad y agua que presentan las arcillas (Tabla 2). Respecto a la conductividad hidráulica (mm/hr), parámetro que rige el flujo del agua en un acuífero, los valores por UCS demostraron que hay mayor conductividad en suelos francos (PWF, PWH, RVB).

Tabla 2. Valores de potencial matricial y conductividad hidráulica en suelos de 0-25 cm del Complejo Cenagoso de Zapatosa.

UCS	Clase de textura SWAP	Potencial matricial (kPa)	Conductividad hidráulica (mm/hr)
LWD	Arcilla	114	1,30E-03
LWE	Franco arenoso	9	2,19E+00
LWF	Franco arcillo arenoso	16	3,49E-01
PVB	Franco arcillo limoso	36	4,19E-02
PVC	Franco arenoso	16	3,12E-01
PVD	Franco arcillo arenoso	892	7,89E-07
PVE	Franco arcilloso	1193	4,26E-06
PVH	Franco arcilloso	1193	4,26E-06
PVJ	Franco arcillo arenoso	151	6,15E-05
PWF	Franco	54	1,03E-03
PWH	Franco	54	1,03E-03
RVA	Franco	93	3,82E-04
RVB	Franco	19	1,16E-02
RWA	Franco arcilloso	968	9,95E-06
RWC	Franco arcillo limoso	1020	1,35E-05
RWE	Franco arcilloso	1195	3,92E-06
RWK	Arcilloso	1479	1,99E-06

Fuente: elaboración propia (2024); a partir de valores calculados en SPAW.

Evapotranspiración de referencia (Eto)

Este parámetro se estimó con base en de la ecuación de FAO Penman-Monteith (Allen et al., 1998; FAO, 2006). Así, se observó la variabilidad

espacial de la evapotranspiración de referencia media mensual para cada uno de los doce meses del año (ejemplo, Figura 4).

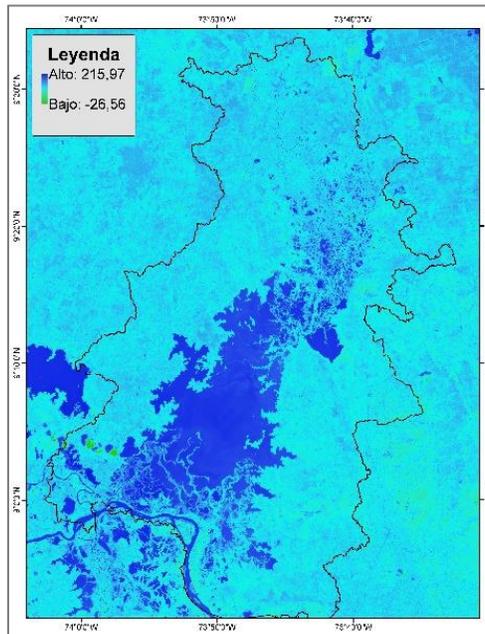


Figura 4. Ejemplo del mapa de evapotranspiración de octubre, media mensual (mm/mes). Fuente: elaboración propia (2024).

La evapotranspiración en el área fluctúa entre un valor mínimo de 47,0 mm/mes, que se presenta en octubre y está localizada principalmente hacia sectores del suroriente, y un valor máximo de 249,4 mm/mes, que se presenta sobre los cuerpos de agua. En general, el periodo de mayor evapotranspiración se da en los meses de enero, febrero y marzo, y el de menor evapotranspiración, en los meses de septiembre, octubre y noviembre.

Modelo de balance hídrico, oferta de agua

A partir de lo descrito en la metodología de la sección “Etapa de premuestreo” de la propuesta de Protocolo referente al modelo de balance hídrico, oferta de agua, se obtuvieron las capas ráster requeridas para ejecutarlo para la temporada seca (diciembre, enero y febrero) y la temporada de lluvias (septiembre, octubre y noviembre). En la Figura 5 se presentan las capas utilizadas para el trimestre más seco y el mapa de escorrentía superficial, resultado del modelo.

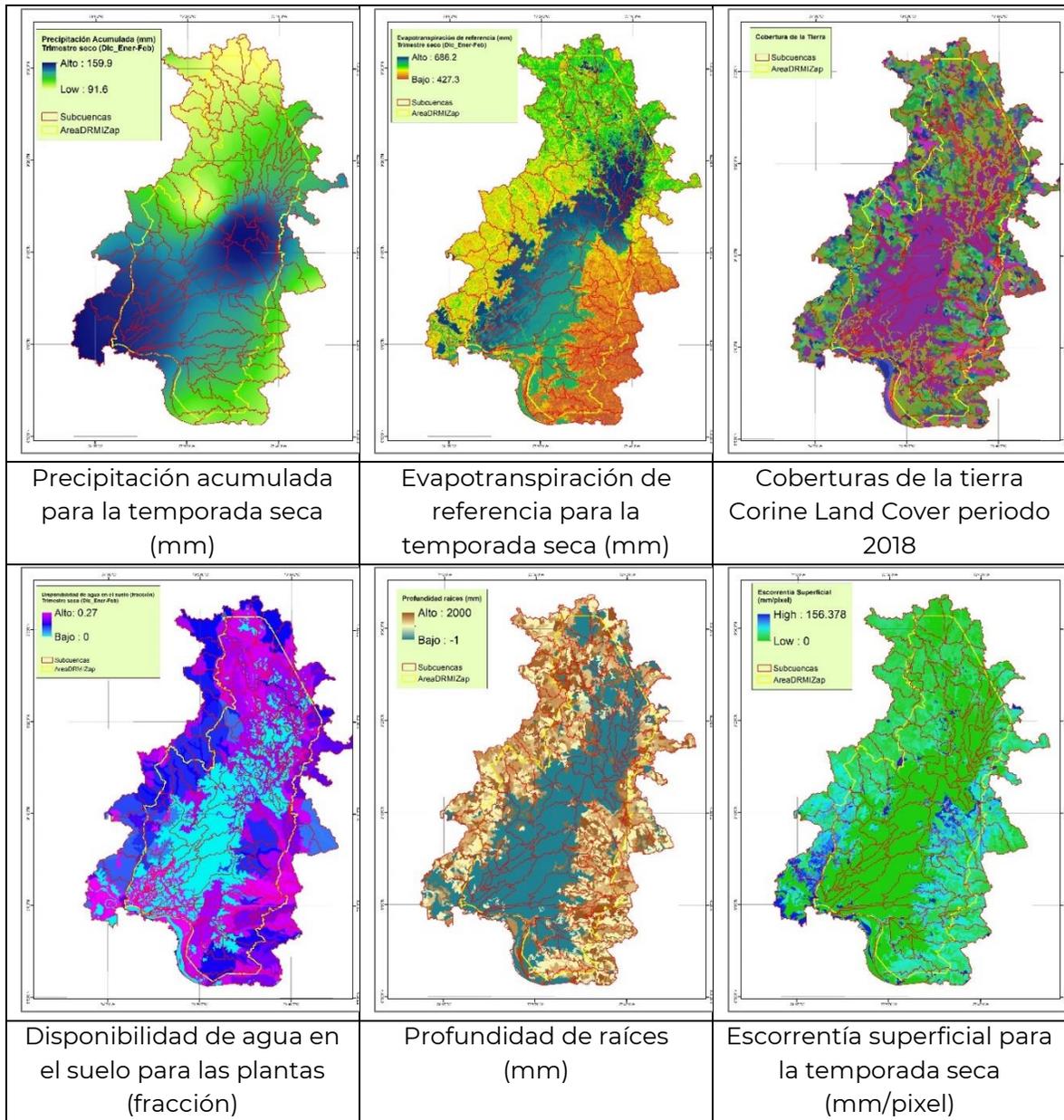


Figura 5. Capas ráster generadas para la ejecución del modelo de balance hídrico y escorrentía superficial en la temporada seca. Fuente: elaboración propia (2024).

Luego se obtuvieron los resultados de escorrentía superficial a partir de la ejecución del modelo para la temporada de lluvias (Figura 6).

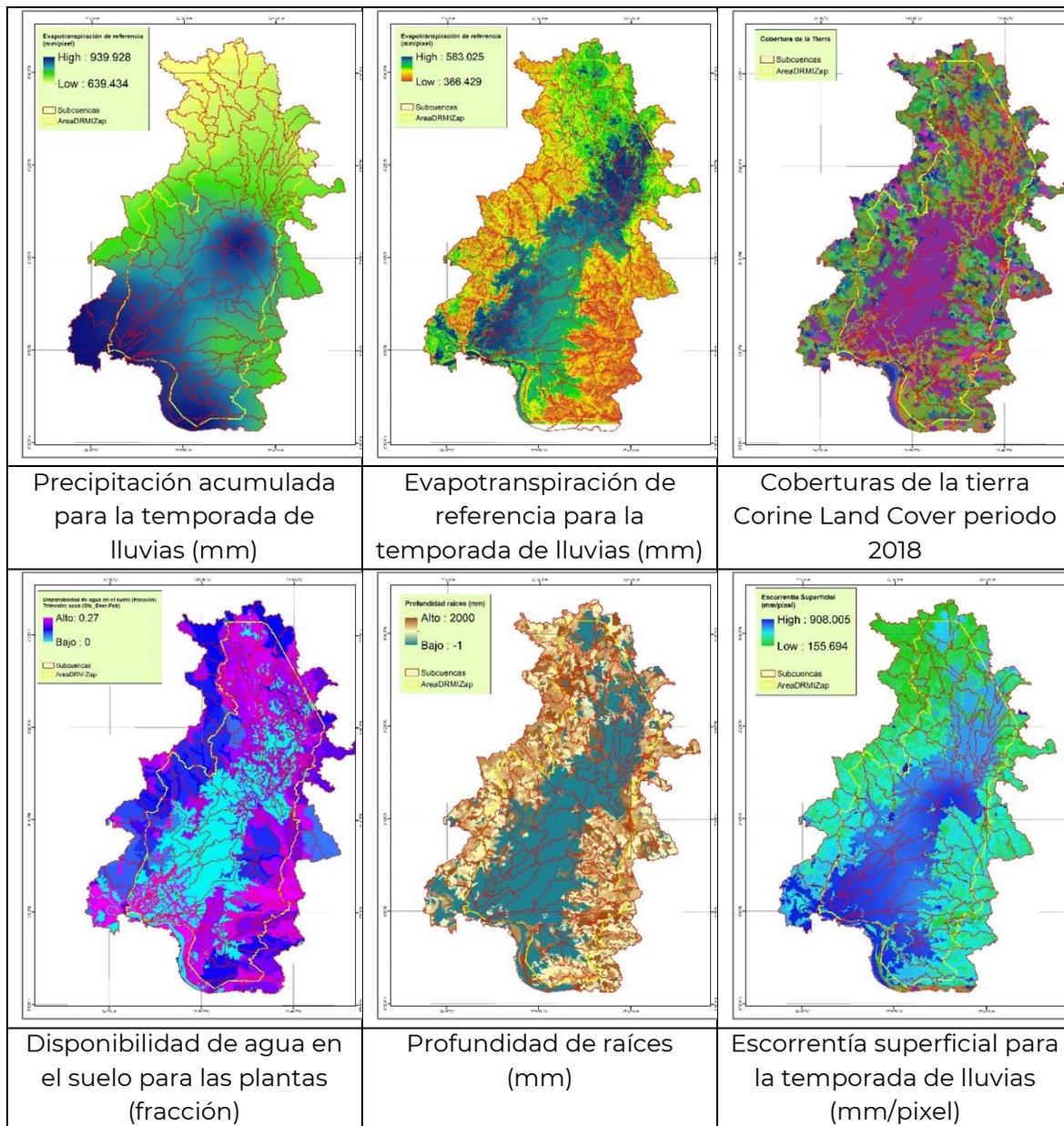


Figura 6. Capas ráster generadas para la ejecución del modelo de balance hídrico y escorrentía superficial para la temporada de lluvias. Fuente: elaboración propia (2024).

Los resultados muestran que durante la temporada seca se presentaron altas tasas de evapotranspiración, mientras que las entradas de agua en forma de precipitación son escasas, lo que da como resultado una escorrentía superficial deficitaria en la mayor parte del CCZ, con valores cercanos a cero, en especial en los cuerpos cenagosos. Sin embargo, en sectores del oriente del área de estudio se mantienen valores medios de escorrentía y algunos sectores muy puntuales, más localizados al sur,

mantienen niveles altos de escorrentía. Por el contrario, durante la temporada de lluvias se presentaron menores tasas de evapotranspiración en comparación con los valores de precipitación que se presentan durante esos meses, lo que produce una escorrentía superficial en aumento en la mayor parte del CCZ, a excepción de sectores hacia el noroccidente del área.

ANÁLISIS DE EXTENSIÓN DEL HUMEDAL

En esta sección se exponen los resultados obtenidos mediante la implementación de la metodología presentada en la sección “Etapa de premuestreo” de la propuesta de Protocolo, referente al análisis de cambios de extensión del humedal. Los procesos se realizaron en la plataforma Google Earth Engine (GEE), por medio del uso de imágenes de radar Sentinel-1 para la temporada seca (diciembre a febrero) y para la temporada de lluvias (septiembre a noviembre) de los años 2016, 2018, 2020 y 2022, establecidos a partir de los análisis de variables hidrometeorológicas.

El primer resultado fueron los compuestos de medianas (Figura 7), generados según la disponibilidad de datos de radar Sentinel-1 para las temporadas de interés, a partir de la ejecución del código para búsqueda y la descarga de imágenes satelitales.

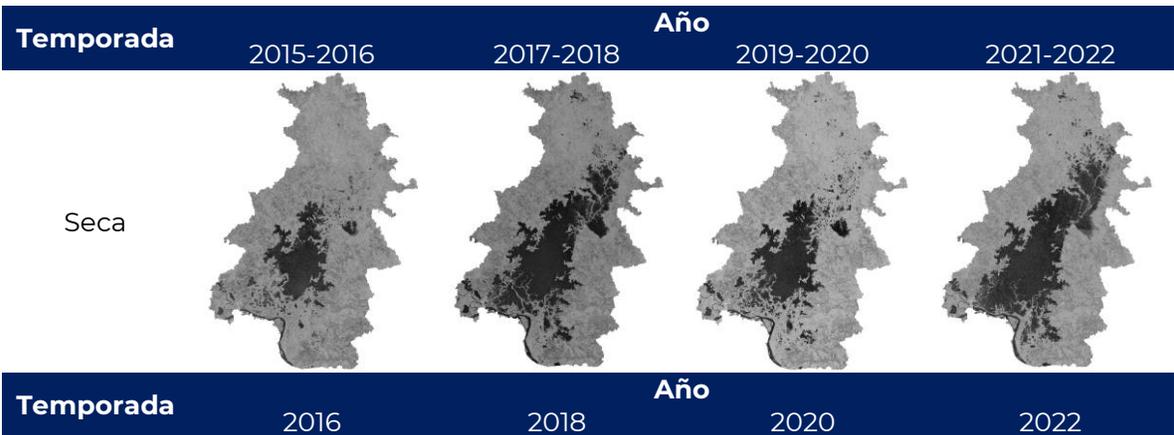




Figura 7. Compuestos de medianas de Sentinel-1 para la ventana piloto del Complejo Cenagoso de Zapatosa. Temporada seca y temporada de lluvias de los años 2016, 2018, 2020 y 2022. Fuente: elaboración propia (2024).

A partir de los compuestos de medianas y de 100 puntos de entrenamiento por clase (Agua y No agua), almacenados en formato *shapefile*, al ejecutar el algoritmo con el código creado se obtuvieron las clasificaciones para el análisis de cambios de extensión del humedal (Figura 8).

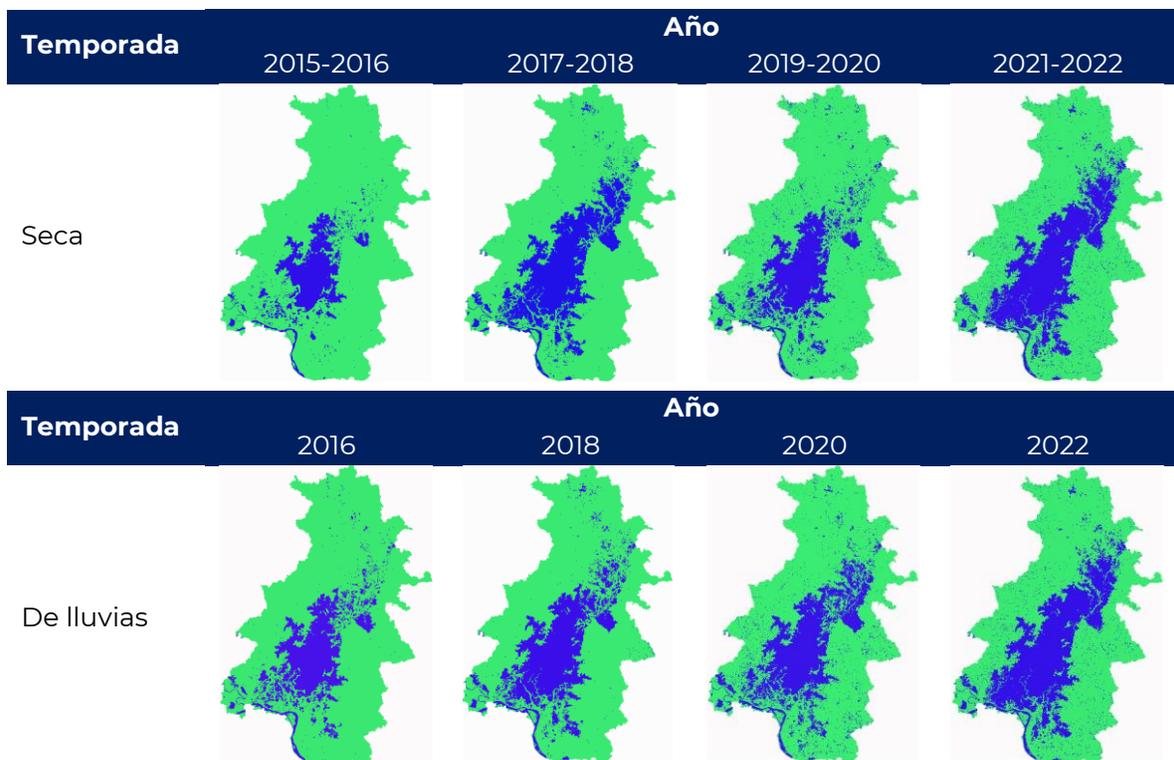


Figura 8. Imágenes Sentinel-1 del Complejo Cenagoso de Zapatosa clasificadas como Agua y No agua. Temporada seca y temporada de lluvias de los años 2016, 2018, 2020 y 2022. Fuente: elaboración propia (2024).

Con las líneas de código integradas para generar la matriz de confusión, se calcula la precisión de clasificación y el índice Kappa de cada proceso por temporada; los resultados demostraron que las clasificaciones tuvieron una alta precisión, de más del 95 %. Esto sugiere una concordancia significativa entre las muestras de entrenamiento y las clasificaciones realizadas con el algoritmo *Random Forest* en GGE (Tabla 3).

Tabla 3. Análisis de precisión de la clasificación supervisada con *Random Forest* para la temporada seca y la temporada de lluvias de los años 2016, 2018, 2020, 2022.

Temporada/Año	Matriz de confusión	Precisión entrenamiento	Índice Kappa
Seca/2015-2016	0: [0,0,0] 1: [0,94,6] 2: [0,2,98]	0,96	0,92
De lluvias/2016	0: [0,0,0] 1: [0,96,4] 2: [0,0,100]	0,98	0,96
Seca/2017-2018	0: [0,0,0] 1: [0,96,4] 2: [0,0,100]	0,99	0,99
De lluvias/2018	0: [0,0,0] 1: [0,96,4] 2: [0,0,100]	1	1
Temporada seca/2019 -2020	0: [0,0,0] 1: [0,96,4] 2: [0,0,100]	1	1
Temporada de lluvias/ 2020	0: [0,0,0] 1: [0,96,4] 2: [0,0,100]	1	1
Temporada seca/ 2021-2022	0: [0,0,0] 1: [0,100,0] 2: [0,1,99]	0,99	0,99
Temporada de lluvias/ 2022	0: [0,0,0] 1: [0,100,0] 2: [0,1,99]	0,99	0,99

Fuente: elaboración propia (2024).

Se analizó la extensión del humedal para la temporada seca y para la temporada de lluvias mediante una diferenciación de los polígonos clasificados como “Agua” que no corresponden a humedales, por ejemplo, ríos y caños, de acuerdo con la definición operativa de humedal establecida. Según esto, los mapas finales generados para cada

temporada presentan la clase Agua, que incluye solo lo que corresponde a superficie de agua de humedal, y la clase No agua, que comprende las áreas inundables del ecosistema (Figura 9).

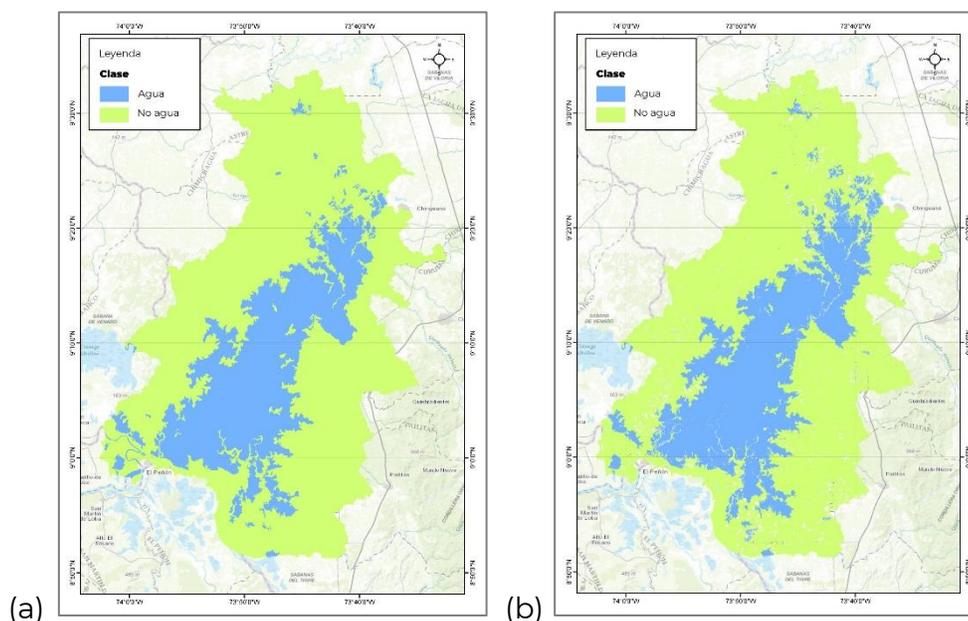


Figura 9. Mapas de clases Agua y No agua de la temporada seca (a) y la temporada de lluvias (b), para el periodo de análisis (2016-2022). Fuente: elaboración propia (2024).

A partir de los resultados del procesamiento de los datos geográficos, a la clase Agua corresponden 67 322,2 ha en la temporada seca y 66 036,66 ha en la temporada de lluvias (Tabla 4).

Tabla 4. Hectáreas ocupadas por las clases humedal y no humedal en la temporada seca y la temporada de lluvias.

Temporada	Área “Agua” (ha)	Área “No agua”(ha)
Seca	67 322,2	161 169,7
Lluvias	66 036,66	153 301,5

Fuente: elaboración propia (2024).

La ausencia de cambios en la extensión del humedal durante la temporada de lluvias, a pesar del incremento en las precipitaciones, se atribuye a la capacidad limitada de almacenamiento del ecosistema que impide retener mayor cantidad de agua, así como a la presencia predominante de ciertas especies de vegetación que actúan como un

factor restrictivo, lo que dificulta la expansión física del área inundada. De igual manera, la colmatación en humedales es producida por diferentes factores: (i) acumulación de sedimentos y materiales orgánicos en su lecho, que llegan a través del flujo de agua desde ríos o quebradas; (ii) procesos naturales de retención de sedimentos por la vegetación; (iii) descomposición de materiales orgánicos; y (iv) actividades humanas, como la deforestación, la agricultura intensiva y la urbanización, que contribuyen a la colmatación al aumentar la erosión del suelo y alterar el flujo de agua. Así, estos factores generan impactos negativos en la salud del humedal, ya que afectan la diversidad biológica, los hábitats acuáticos y su capacidad para proporcionar servicios ecosistémicos.

ANÁLISIS DE ÍNDICES ESPECTRALES

En esta sección se presentan los resultados obtenidos al implementar la metodología descrita en la sección de “Indicadores Ambientales” de la propuesta de Protocolo para calcular siete índices espectrales de agua, vegetación y quemas:

- └ NDVI: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada.
- └ SAVI: Índice de Vegetación Ajustado al Suelo.
- └ LAI: Índice de Área Foliar.
- └ GCI: Índice de Clorofila.
- └ NDWI: Índice de Diferencia de Agua Normalizado.
- └ MNDWI: Índice de Diferencia de Agua Normalizado Modificado.
- └ NBRI: Índice Normalizado de Área Quemada.

Los procesos se realizaron en la plataforma GEE a partir de conjuntos de datos de imágenes ópticas Sentinel-2 para la temporada seca (diciembre a febrero) y para la temporada de lluvias (septiembre a noviembre) de los años 2016, 2018, 2020 y 2022. Como primer proceso se generaron los mosaicos de imágenes Sentinel-2; después, previo a la descarga se visualizaron sobre la plataforma GEE en verdadero color (bandas 4-3-2) y en falso color (8-4-2) para revisar el cubrimiento total del área de interés (Figura 10).

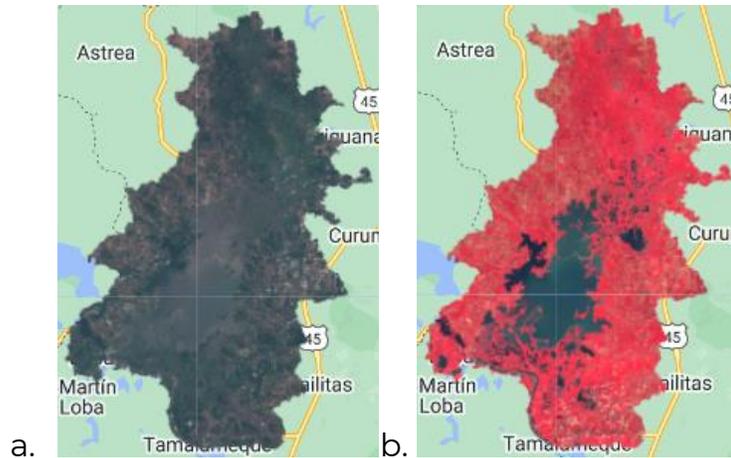


Figura 10. Ejemplos de compuestos de medianas de imágenes ópticas Sentinel-2 generados en GEE para la ventana piloto del Complejo Cenagoso de Zapotoca en verdadero color (a) y falso color (b). Fuente: elaboración propia (2024).

RESULTADOS DEL CÁLCULO DE ÍNDICES ESPECTRALES

Al ejecutar los procesos en GEE para calcular los siete índices descritos de acuerdo con los códigos creados, se obtuvieron ocho resultados en formato ráster para cada uno: cuatro archivos de la temporada seca y cuatro de la temporada de lluvias.

ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA (NDVI)

En relación con el NDVI calculado para el CCZ, los valores resultantes más altos se asocian con la vegetación adyacente al espejo de agua, así como con la vegetación acuática que crece sobre este (Figura 11).

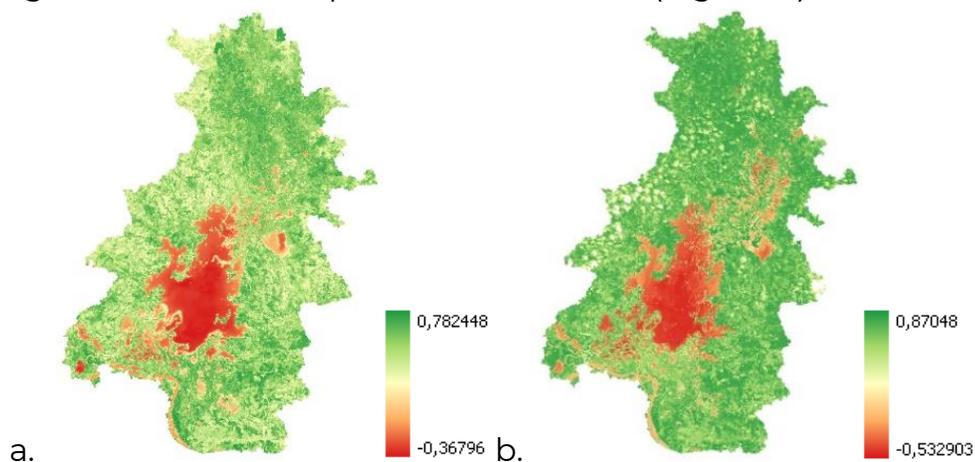


Figura 11. Ejemplos del NDVI del año 2020 para la temporada seca (a) y la temporada de lluvias (b). Fuente: elaboración propia (2024).

Para el CCZ, los valores que tienden a -1 indican que la reflectancia del infrarrojo es menor a la reflectancia del rojo, lo cual ocurre cuando hay presencia de agua; los valores alrededor de 0 indican que no hay diferencia entre la reflectancia del infrarrojo y la reflectancia del rojo, como es el caso de suelos desnudos y áreas sin vegetación; y los valores que oscilan entre 0,5 y 1 indican mayor vigor vegetal. Se evidencian diferencias significativas entre una temporada y otra: en la temporada de lluvias aumenta el vigor de la vegetación, lo que incrementa la frecuencia de valores por encima de 0,8.

ÍNDICE DE VEGETACIÓN AJUSTADO AL SUELO (SAVI)

Los cálculos del SAVI arrojaron mejores resultados frente al NDVI por su ajuste negativo. Esto generó una reducción notoria del fondo del suelo al aplicar en la ecuación el factor de corrección del brillo del suelo (L) de 0,5, debido a que el área de estudio presenta diferentes coberturas. De esta manera, se ajustaron los valores del índice y se diferenciaron muy bien las zonas con presencia de vegetación de las que no presentan el vigor de la vegetación (Figura 12).

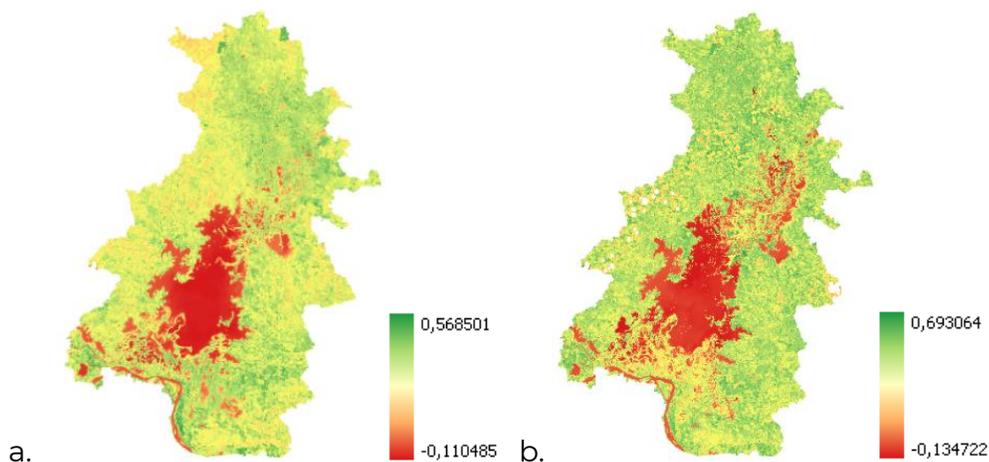


Figura 12. Ejemplos del SAVI del año 2020 para la temporada seca (a) y la temporada de lluvias (b). Fuente: elaboración propia (2024).

Los valores del SAVI del CCZ de -1 a 0 sugieren la presencia de agua o áreas carentes de vegetación, mientras que aquellos entre 0,01 y 0,37 indican una presencia reducida de vegetación. En el intervalo de 0,38 a 0,76 se observa una moderada presencia de vegetación, y valores que oscilan entre 0,7 y 1 indican un vigor vegetal más significativo y una salud general mejorada. Durante la temporada de lluvias se registra un incremento en

los valores del SAVI, que llegan hasta 0,69. Esta elevación se interpreta como un indicativo de una salud vegetal mejorada, particularmente en las áreas situadas en la parte norte y suroriental, e indican un impacto positivo de las precipitaciones en la vegetación de dichas regiones.

ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR (LAI)

Otra de las fórmulas usadas para la estimación de biomasa en el Complejo Cenagoso de Zapatos fue la del LAI, un parámetro biofísico que define la relación del área foliar frente a la superficie de terreno por unidad (ejemplo, Figura 13).

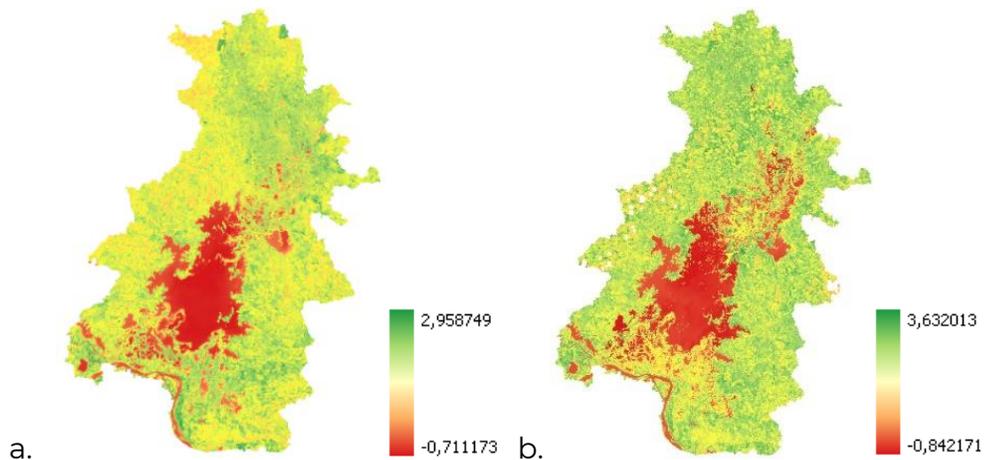


Figura 13. Ejemplos del LAI del año 2020 para la temporada seca (a) y la temporada de lluvias (b). Fuente: elaboración propia (2024).

Los valores de -1 a 0 en la escala indican la ausencia de vegetación y la presencia de superficies acuáticas. El rango de 0 a 1,5 señala la existencia de áreas con una presencia moderada de superficie foliar; y los valores comprendidos entre 1,6 y 3,5 indican la presencia de superficie foliar, incluyendo la que cubre el suelo. En el caso específico del CCZ, durante la temporada seca se observa que los valores más elevados llegan hasta 2,95, con una frecuencia cercana a los 2700 píxeles. En contraste, durante el periodo de lluvias los valores del Índice de Área Foliar (LAI) aumentan a 3,63 como máximo, lo que evidencia un mayor número de píxeles en tonalidades verdes y sugiere una mayor cantidad de área foliar.

ÍNDICE DE CLOROFILA (GCI)

El índice de clorofila se calculó como complemento del NDVI (Figura 14), dado que este realza únicamente las coberturas terrestres compuestas

por estructura vegetal. De esta manera, el GCI estima el contenido de clorofila de vegetación terrestre y acuática como indicador del estado fenológico, de la presencia de algas en el agua y de enfermedades de la vegetación, entre otros factores.

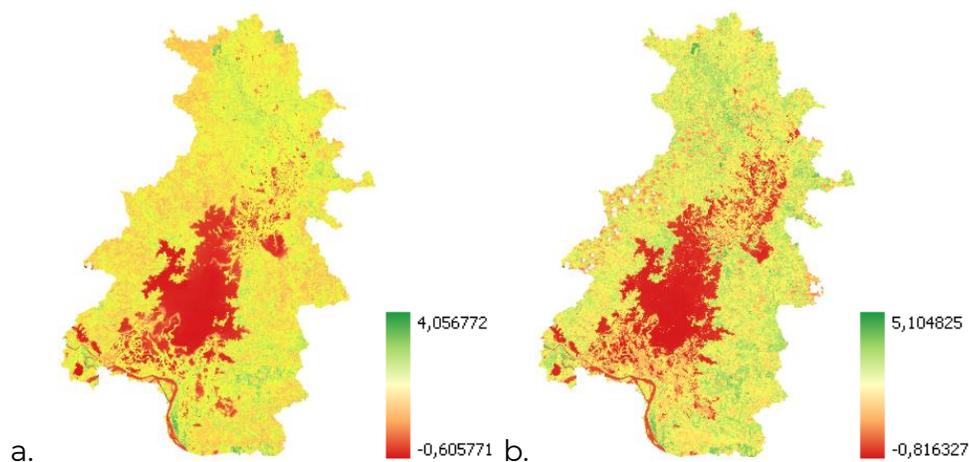


Figura 14. Ejemplos del GCI del año 2020 para la temporada seca (a) y la temporada de lluvias (b). Fuente: elaboración propia (2024).

Los valores de 0 a 2,0 indican un bajo contenido de clorofila, mientras que valores superiores a 2,1 e inferiores a 6 sugieren un mayor contenido de esta, tanto en la vegetación terrestre como acuática. En el contexto específico del CCZ, al igual que con los índices NDVI, SAVI y LAI, se observa un aumento en los valores del GCI durante la temporada de lluvias. Este incremento está asociado con los niveles elevados de precipitación y humedad, que producen un mayor vigor vegetal y, en el caso del GCI, reflejan un aumento en el contenido de clorofila en las coberturas vegetales. Cabe destacar que el GCI permite distinguir de manera más precisa las zonas con alta biomasa, ya que sus valores pueden interpretarse para estimar el contenido de clorofila en el dosel y monitorear la actividad fotosintética de las plantas, según estudios previos (Gitelson et al., 2003).

ÍNDICE DE AGUA DE DIFERENCIA NORMALIZADA (NDWI)

Para calcular el NDWI se suprimieron las coberturas vegetales y se realzaron las superficies de agua. De este modo, en las imágenes resultantes se evidencia la extensión de los cuerpos de agua; los de principal interés, en este caso, son las ciénagas que componen el CCZ (Figura 15). Esto ocurre debido a que se cambia la banda roja por la verde, de tal manera que el resultado es el contrario del NDVI (McFeeters, 2013).

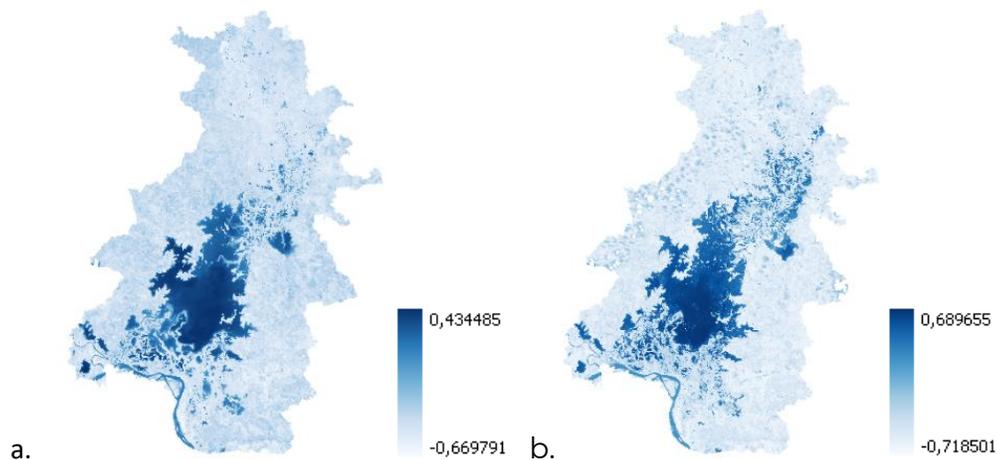


Figura 15. Ejemplos del NDWI del año 2020 para la temporada seca (a) y la temporada de lluvias (b). Fuente: elaboración propia (2024).

Cuando los valores del NDWI son cercanos a -1, significa presencia de áreas con vegetación o suelos desnudos extremadamente secos; valores de 0 a 0,4, sequía moderada; y valores entre 0,5 y 1 evidencian la existencia de superficies acuáticas. En el CCZ hubo un aumento significativo en los valores del NDWI durante la temporada de lluvias, y llegaron a alcanzar niveles de hasta 0,68; por el contrario, en la temporada seca, los valores disminuyeron, hasta un 0,43. Es esencial destacar que, a pesar de la existencia del espejo de agua, este no abarca la totalidad del ecosistema de humedal; como resultado, se observa una predominante frecuencia de valores negativos, tanto en la temporada seca como en la temporada de lluvias. Este fenómeno se atribuye a que la mayor concentración de valores en el rango negativo indica áreas donde la presencia de agua es limitada o la humedad es baja.

ÍNDICE DE AGUA DE DIFERENCIA NORMALIZADA MODIFICADO (MNDWI)

En la ecuación para su cálculo se reemplazó el infrarrojo cercano por el infrarrojo de onda corta (SWIR); así, se obtuvieron resultados más exactos que los del NDWI, debido a que el SWIR tiene una longitud de onda más amplia y esto permite una mayor separabilidad de los valores del espectro electromagnético a partir de la reflectancia de esta banda (Figura 16).

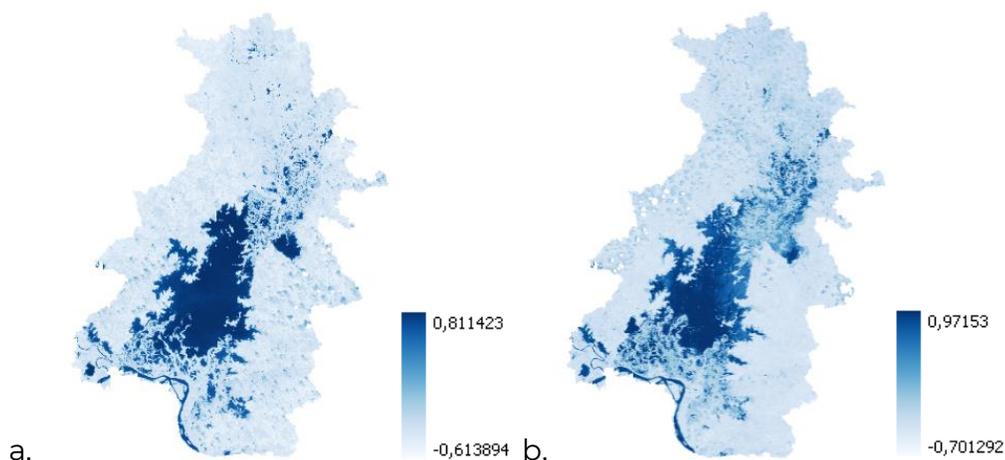


Figura 16. Ejemplos del MNDWI del año 2020 para la temporada seca (a) y la temporada de lluvias (b). Fuente: elaboración propia (2024).

Los valores obtenidos para el índice MNDWI proporcionan valiosa información sobre las condiciones ambientales del humedal. Rangos negativos, desde -1 hasta 0, indican la presencia de suelos desnudos y secos, mientras que valores entre 0 y 0,4 señalan una sequía moderada. En el intervalo de 0,5 a 1 se evidencia la presencia de superficies acuáticas. Contrariamente a los índices de vegetación, este índice revela que la mayoría de los píxeles exhiben valores negativos, debido a que la mayor proporción de estos corresponde a coberturas aledañas al espejo de agua, las cuales no tienen una alta humedad ni un recurso hídrico significativo. En cuanto a las variaciones entre temporadas, durante la temporada seca los valores máximos son inferiores a los de la temporada de lluvias, ya que esta última experimenta un aumento de humedad debido a las intensas precipitaciones, principalmente en los meses de septiembre y octubre.

En conclusión, se determina que el MNDWI presenta resultados más efectivos en la separación del espejo de agua y en la evaluación del contenido de humedad en comparación con el NDWI, cuyos resultados fueron de valores inferiores.

ÍNDICE NORMALIZADO DE ÁREA QUEMADA (NBRI)

A partir de los resultados obtenidos con el cálculo del NBRI (Figura 17) se analizó la caracterización espectral de la vegetación del CCZ según dos tipos de comportamiento:

- + Formación y deposición de carbón y cenizas como consecuencia de la combustión de la vegetación. En este caso, a nivel de imágenes de

satélite los valores de pixel varían rápidamente, ya que lo que deja el incendio se degrada a causa del viento y la lluvia, y los rastros desaparecen en pocas semanas o meses después de ocurrido el evento.

- ✦ Alteración de la estructura y cantidad de la vegetación. Estos daños son más estables en el tiempo, pero es más difícil identificar los efectos del fuego, pues se pueden confundir con otros daños de la vegetación causados por diferentes factores (p. ej., deforestación, estrés vegetal), dado que las respuestas espectrales son similares (Ji et al., 2011).

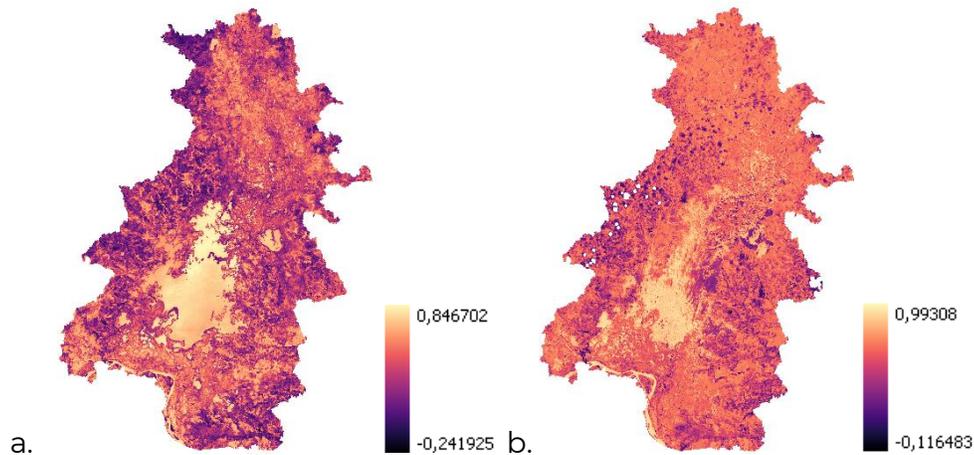


Figura 17. Ejemplos del NBRI del año 2020 para la temporada seca (a) y la temporada de lluvias (b). Fuente: elaboración propia (2024).

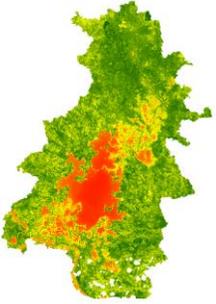
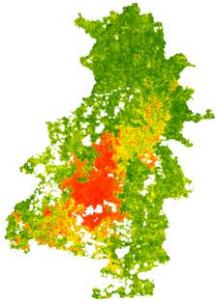
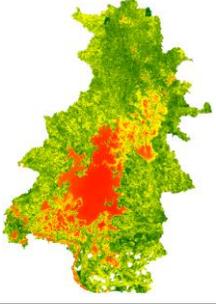
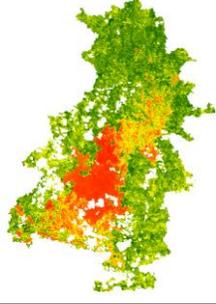
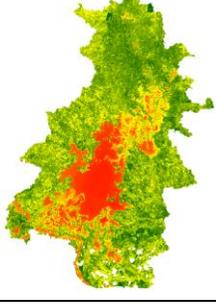
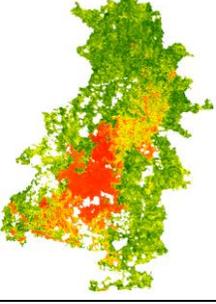
Los resultados del NBRI para el CCZ sugieren que no hay quemados o que hay crecimiento de vegetación posterior al fuego cuando hay valores negativos de -0,1 a 0,1; valores entre 0,1 y 0,6 corresponden a zonas quemadas; y valores mayores a 0,61 indican presencia de superficies de agua.

ANÁLISIS DE CAMBIOS DE LOS ÍNDICES ESPECTRALES A NIVEL DE COBERTURAS POR CADA TEMPORADA

Para analizar los cambios de los índices entre las temporadas seca y de lluvias (periodo 2016-2022) se procedió a seguir con los diferentes pasos descritos en la metodología de la sección de “Indicadores ambientales” de la propuesta de Protocolo. A continuación, se presentan los resultados obtenidos.

RÁSTER GENERADOS CON LOS VALORES DE LA MEDIA (PROMEDIO)

Para cada índice espectral, a partir de la sumatoria de los cuatro archivos de la temporada seca (diciembre-febrero del 2016 al 2022) y de la temporada de lluvias (septiembre- noviembre del 2016 al 2022), se obtuvieron nuevos archivos ráster que representan la media para cada índice (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Dado que en los ráster resultantes hubo vacíos de información por el alto porcentaje de nubes en algunas zonas del CCZ, se empleó la herramienta de “relleno” para completar los datos de los píxeles vacíos, y así tener la información completa antes de proceder con el cálculo de estadísticos.

Índice	Media temporada seca	Media temporada de lluvias	Ráster completo temporada seca	Ráster completo temporada de lluvias
NDVI				
SAVI				
LAI				

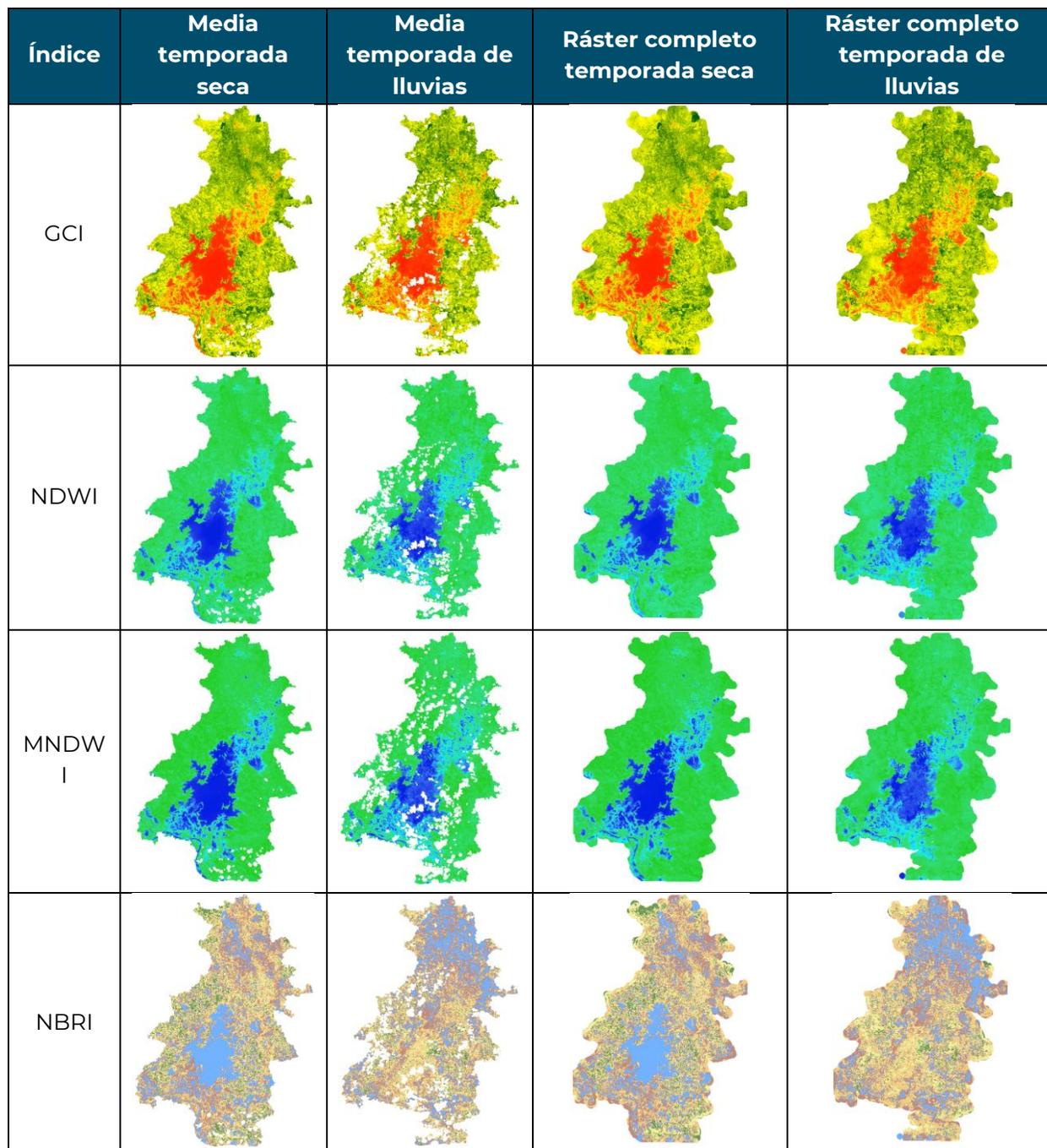


Figura 18. Resultados de la media calculada para cada índice espectral y ráster completos por temporada. Fuente: elaboración propia (2024).

CÁLCULO DE ESTADÍSTICOS ZONALES POR ÍNDICE ESPECTRAL PARA COBERTURAS TERRESTRES NATURALES Y SEMINATURALES

Con este fin, se seleccionaron los polígonos que representan las 19 coberturas terrestres naturales y seminaturales del CCZ de las clases 3

(bosques y áreas seminaturales), 4 (áreas húmedas) y 5 (superficies de agua) de la leyenda de Corine Land Cover (CLC), a partir de la capa de coberturas de la tierra generada por el IDEAM a escala 1:100 000 para el periodo 2018 (Tabla 5).

Tabla 5. Clases de coberturas terrestres seleccionadas para el análisis de los índices espectrales.

Clase	Leyenda CLC	IPCC
1	3.1.1.2.1. Bosque denso bajo de tierra firme	Tierras forestales
2	3.1.1.2.2. Bosque denso bajo inundable	
3	3.1.2.2.2. Bosque abierto bajo inundable	
4	3.1.3.2. Bosque fragmentado con vegetación secundaria	
5	3.1.4. Bosque de galería y ripario	
6	3.1.5. Plantación forestal	
7	3.1.5.2. Plantación de latifoliadas	
8	3.2.1.1.2.1. Herbazal denso inundable no arbolado	Herbazales
9	3.2.1.1.2.2. Herbazal denso inundable arbolado	
10	3.2.2.1. Arbustal denso	Otra vegetación leñosa
11	3.2.2.2. Arbustal abierto	
12	3.2.3.1. Vegetación secundaria alta	
13	3.2.3.2. Vegetación secundaria baja	Otras tierras
14	3.3.1. Zonas arenosas naturales	
15	3.3.3. Tierras desnudas y degradadas	
16	3.3.4. Zonas quemadas	
17	4.1.1. Zonas pantanosas	Humedales
18	4.1.3. Vegetación acuática sobre cuerpos de agua	
19	5.1.1. Ríos	Otras tierras
20	5.1.2. Lagunas, lagos y ciénagas naturales	

Fuente: elaboración propia (2024).

A partir de la capa geográfica exportada se procedió al cálculo de estadísticos zonales, proceso con el que se obtuvieron 14 tablas, una por cada temporada (seca y de lluvias) por cada índice espectral, las cuales se graficaron para la interpretación de resultados.

El análisis del NDVI (Figura 19) destaca que para las dos temporadas las áreas de arbustal abierto (clase 11) y vegetación secundaria (clase 13) presentan los valores más altos (0,71 hasta 0,74). No obstante, esta aparente salud vegetal se atribuye a zonas inundadas, que generan

tonalidades verdosas por agua estancada y presencia de vegetación acuática. En contraste, las coberturas de vegetación acuática sobre cuerpos de agua (clase 18) y zonas pantanosas (clase 17) exhiben los valores más bajos (-0,21 y -0,24 respectivamente), señalando la ausencia de vegetación.

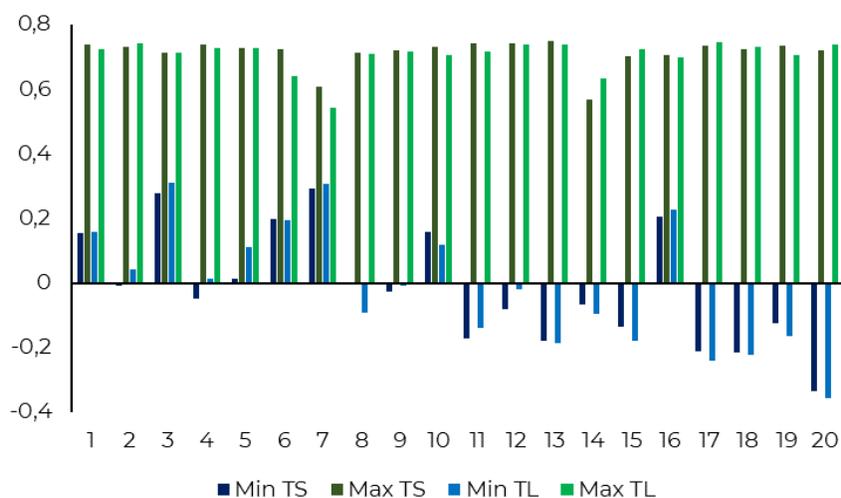


Figura 19. Estadísticos zonales calculados a partir de la media del NDVI (2016, 2018, 2020 y 2022) para la temporada seca (TS) y la temporada de lluvias (TL). Fuente: elaboración propia (2024).

Los resultados del SAVI (Figura 20) revelaron que en el periodo seco los valores más altos corresponden a los ríos (19), con 0,55, y en el periodo de lluvias corresponden a las ciénagas (29), con 0,58, debido a la presencia de vegetación acuática en las zonas ribereñas. Seguido a estos están las zonas arenosas naturales (14), con 0,55, y la vegetación secundaria baja (13), con 0,57. Los valores mínimos se registraron para las ciénagas (20), con -0,10 en el periodo seco y -0,12 en el periodo de lluvias. Esto indica que los humedales tienen valores altos para la vegetación acuática o de ribera y valores bajos para el espejo de agua.

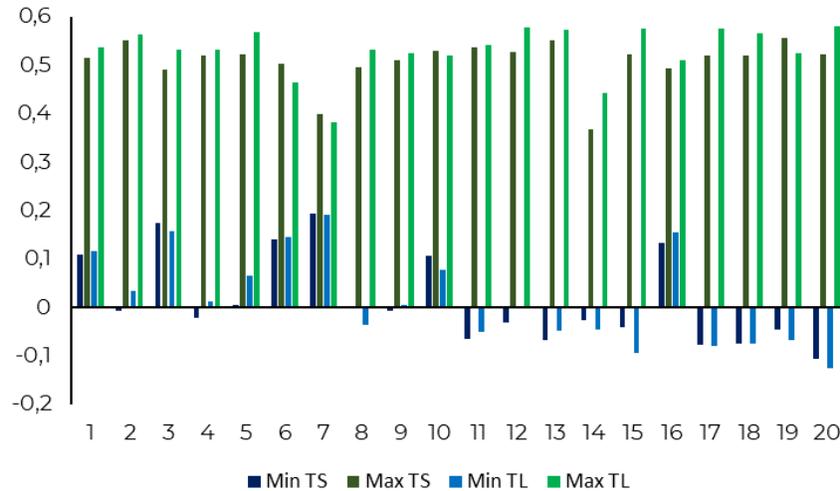


Figura 20. Estadísticos zonales calculados a partir de la media del SAVI (2016, 2018, 2020 y 2022) para la temporada seca (TS) y la temporada de lluvias (TL). Fuente: elaboración propia (2024).

El análisis del LAI (Figura 21) revela un incremento diferencial en los valores máximos entre los dos periodos, lo cual se atribuye al aumento de humedad y de precipitaciones en las temporadas de lluvias, que proporcionan mayor recurso hídrico a la vegetación y aumentan las tasas de crecimiento vegetal y, como consecuencia, el área foliar. Tanto los ríos (19) como las ciénagas (20) presentan valores más altos, con 2,89 para el periodo seco y 3,02 para el periodo de lluvias, lo que ocurre por la presencia de vegetación acuática y ribereña.

En cuanto a las coberturas forestales y seminaturales, se observa que los bosques densos bajos inundables (2) muestran valores significativos de LAI, con 2,86 para el periodo seco y 3,01 para el periodo de lluvias. Los valores mínimos se presentaron para las ciénagas (20), con -0,69 para el periodo seco y -0,79 para el periodo de lluvias.

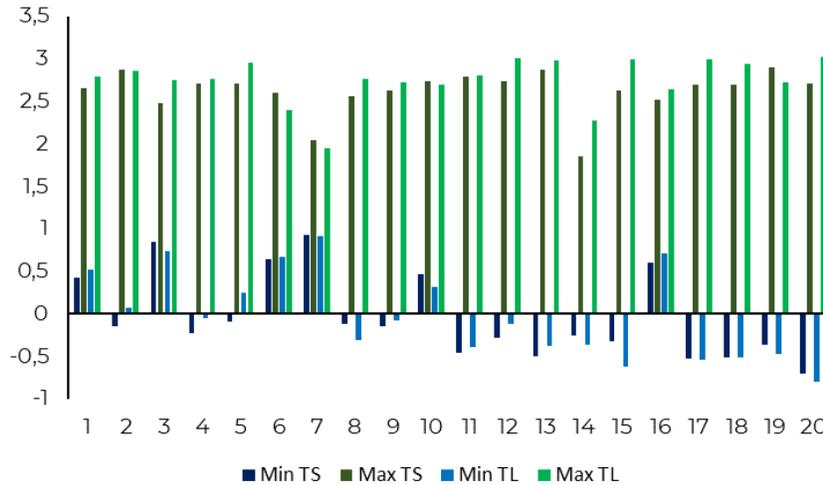


Figura 21. Estadísticos zonales calculados a partir de la media del LAI (2016, 2018, 2020 y 2022) para la temporada seca (TS) y la temporada de lluvias (TL). Fuente: elaboración propia (2024).

Los resultados del GCI (Figura 22) muestran variaciones entre los dos periodos de manera similar a los índices de vegetación previamente analizados, donde se destacan valores altos de clorofila durante el periodo seco para la vegetación secundaria baja (13), con 3,33; y 3,41 y 3,48 para la vegetación secundaria baja (13) y zonas pantanosas (17), respectivamente, en el periodo de lluvias. Por el contrario, los valores más bajos fueron para las ciénagas (20), en donde se registró -0,57 para el periodo seco y -0,59 para el periodo de lluvias.

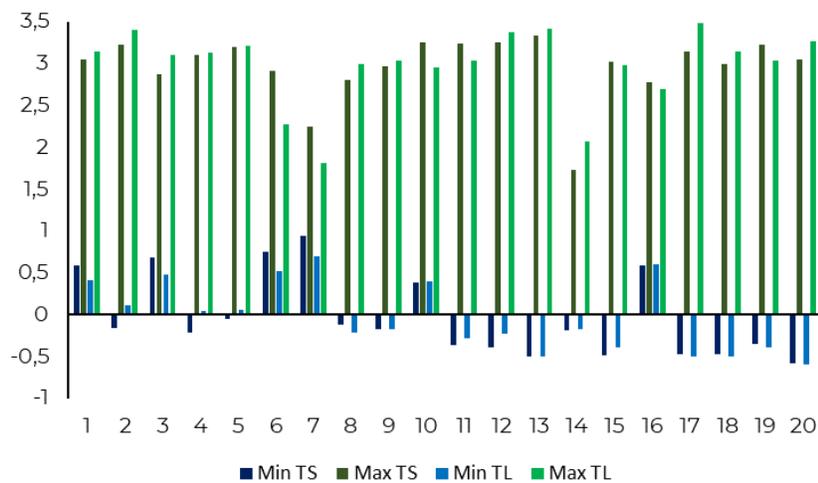


Figura 22. Estadísticos zonales calculados a partir de la media del GCI (2016, 2018, 2020 y 2022) para la temporada seca (TS) y la temporada de lluvias (TL). Fuente: elaboración propia (2024).

Los valores del NDWI (Figura 23) revelan que son positivos cuando hay presencia de cuerpos de agua, como se evidencia en las ciénagas (20), que registraron 0,45 y 0,40 para los dos periodos respectivamente. Por otro lado, las áreas con alta presencia de vegetación terrestre y/o acuática, como los arbustales abiertos (11) y las zonas pantanosas (17), mostraron los valores más bajos, con -0,61 para ambos periodos.

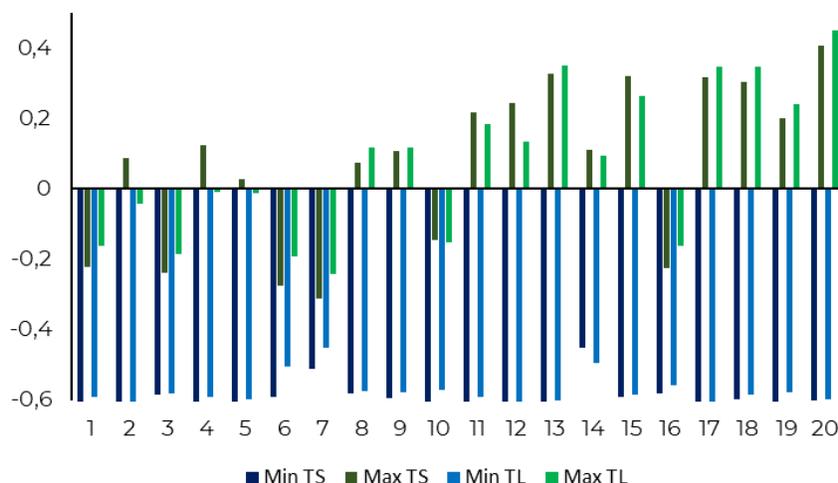


Figura 23. Estadísticos zonales calculados a partir de la media del NDWI (2016, 2018, 2020 y 2022) para la temporada seca (TS) y la temporada de lluvias (TL). Fuente: elaboración propia (2024).

En cuanto a los resultados del MNDWI (Figura 24), los valores máximos correspondieron a las ciénagas en el periodo seco, con 0,85; y 0,67 para las coberturas de ríos y ciénagas en ambos casos, durante el periodo de lluvias. Por el contrario, las áreas clasificadas como tierras desnudas o degradadas (15) presentaron los valores más bajos, con un registro de -0,59 para el periodo seco y -0,52 para el periodo de lluvias.

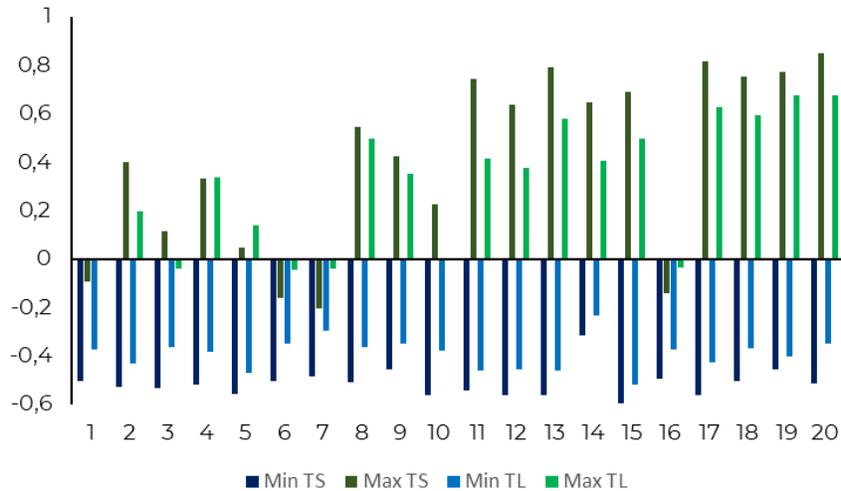


Figura 24. Estadísticos zonales calculados a partir de la media del MNDWI (2016, 2018, 2020 y 2022) para la temporada seca (TS) y la temporada de lluvias (TS). Fuente: elaboración propia (2024).

El NBRI (Figura 25) revela que los valores altos están asociados principalmente con el espejo de agua del humedal, mientras que los valores intermedios, entre 0,3 y 0,5, representan áreas quemadas o vegetación secundaria que ha pasado por procesos de regeneración. Sin embargo, para un análisis preciso de este índice es fundamental contar con datos de campo de las zonas quemadas, además de revisar los polígonos presentes en la capa de coberturas, específicamente en la clase 3.3.4 de zonas quemadas.

Los valores máximos del NBRI se observaron en las coberturas de vegetación secundaria baja (13), con 0,74 para el periodo seco, y en las zonas pantanosas (17), con 0,73 para el periodo de lluvias. Por otro lado, los valores más bajos se registraron en los ríos (19), con -0,20 para el periodo seco y -0,13 para el periodo de lluvias.

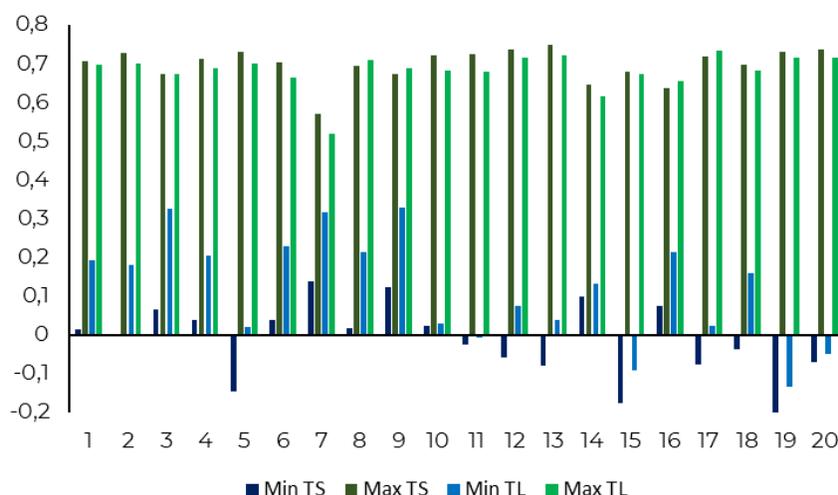


Figura 25. Estadísticos zonales calculados a partir de la media del NBRI (2016, 2018, 2020 y 2022) para la temporada seca (TS) y la temporada de lluvias (TL). Fuente: elaboración propia (2024).

CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE VARIACIÓN (CV)

Utilizando los valores de media y desviación estándar obtenidos previamente para cada índice en ambas temporadas, se calculó el coeficiente de variación (CV), según la ecuación descrita en la metodología para las coberturas naturales seleccionadas (CLC) de la propuesta de Protocolo. A partir de los resultados se analizaron los cambios en los valores de los índices espectrales entre las temporadas seca y de lluvias, mediante el uso de datos de la media de 2016 a 2022 (Tabla 6).

Tabla 6. Valores calculados del Coeficiente de Variación (CV) para los siete índices espectrales por cada temporada, temporada seca (TS) y temporada de lluvias (TL). Color rojo: valores más altos, color verde: valores más bajos.

Clase CLC	NDVI		SAVI		LAI		GCI		NDWI		MNDWI		NBRI	
	CV TS	CV TL												
1	7,8	15,1	9,7	16,1	10,4	17,0	12,9	22,5	-7,1	-14,7	-13,7	-20,8	12,8	13,3
2	9,4	12,5	14,1	14,1	15,2	14,7	17,4	20,7	-8,9	-12,4	-14,5	-22,2	14,4	10,6
3	8,6	9,9	10,2	11,7	10,8	12,4	13,3	16,8	-7,0	-10,2	-11,2	-18,7	14,4	8,5
4	7,9	11,1	10,6	13,0	11,2	13,7	14,5	19,2	-8,5	-12,0	-14,9	-21,8	12,1	9,2
5	15,4	16,1	16,5	17,4	17,7	18,5	19,9	23,6	-12,1	-15,1	-15,7	-21,6	25,6	16,2
6	13,4	17,4	14,3	18,2	15,6	19,6	17,5	24,1	-9,7	-16,0	-14,1	-25,2	25,6	16,0
7	10,5	7,0	9,3	9,6	10,0	10,4	10,8	11,5	-6,6	-8,1	-14,0	-22,6	20,0	5,1
8	11,6	14,4	12,8	17,3	13,9	18,4	15,9	22,0	-11,0	-17,4	-25,8	-37,8	18,2	10,4
9	14,4	13,8	16,6	17,8	18,3	18,9	21,3	23,9	-15,3	-18,3	-41,7	-34,1	19,2	9,1
10	11,7	21,2	14,8	21,4	16,0	22,9	18,3	28,8	-10,7	-19,1	-20,0	-22,0	16,1	18,1

Clase CLC	NDVI		SAVI		LAI		GCI		NDWI		MNDWI		NBRI	
	CV TS	CV TL	CV TS	CV TL	CV TS	CV TL	CV TS	CV TL	CV TS	CV TL	CV TS	CV TL	CV TS	CV TL
11	15,8	17,4	17,9	19,2	19,1	20,4	21,7	25,3	-14,0	-16,9	-31,5	-23,7	20,4	16,7
12	12,5	17,1	14,1	17,7	15,1	18,8	18,4	24,4	-10,8	-17,4	-18,6	-28,8	18,9	14,7
13	14,8	16,6	16,2	17,7	17,5	18,8	20,1	24,3	-12,4	-16,6	-20,0	-25,4	23,1	14,7
14	52,8	51,6	51,6	52,7	59,4	59,5	58,4	61,5	-54,9	-56,1	526,8	-	25,9	21,8
15	29,6	27,5	28,6	29,0	31,4	31,4	29,2	34,3	-18,8	-23,3	-18,7	-28,3	61,3	30,3
16	14,7	11,5	15,8	14,2	16,9	15,2	18,2	21,3	-10,4	-11,4	-12,9	-21,2	25,1	11,4
17	28,5	31,6	29,7	35,0	32,6	37,7	34,3	42,1	-31,8	-41,5	-142,3	-121,2	25,5	13,8
18	30,3	31,9	32,1	34,9	34,9	37,5	37,4	42,9	-34,8	-40,8	-155,1	-140,2	22,8	13,1
19	246,5	174,6	212,3	147,5	350,4	194,0	298,9	196,2	-	568,0	-297,3	74,6	103,2	21,9
20	-446,1	-23432,0	1673,2	321,5	-658,0	823,5	-820,8	2686,7	174,9	197,4	46,0	62,5	23,5	16,1

Fuente: elaboración propia (2024).

Los mayores cambios del CV para índices de vegetación se presentan en las superficies de agua, mientras que los menores cambios ocurren en las coberturas de vegetación densa, tanto para la temporada seca como para la de lluvias; esto se debe a los cambios ambientales y a los factores antrópicos que generan variabilidad en los valores de reflectancia, como la sedimentación, la colmatación y la contaminación.

En los índices espectrales de agua se evidencian mayores cambios en las áreas húmedas y superficies de agua, con variaciones significativas en los niveles de agua entre temporadas. Por otro lado, las variaciones en los valores de los índices de agua se presentan principalmente por las fluctuaciones en los niveles de agua: expansión de las áreas húmedas en la temporada de lluvias y reducción de estas en la temporada seca.

En cuanto al NBRI se observa un comportamiento diferente: los mayores cambios están asociados con las tierras desnudas y degradadas, mientras que los menores cambios se encuentran en las áreas con vegetación densa, tanto en la temporada seca como en la de lluvias.

RECOMENDACIONES

Recomendaciones para generar un inventario cartográfico

Debido a que la información geográfica relacionada con el agua y la biodiversidad puede estar dispersa entre diferentes entidades

gubernamentales, organizaciones no gubernamentales y actores locales, la falta de estandarización en la recopilación y el almacenamiento de datos dificulta la integración y el análisis a nivel local. Por lo anterior, se recomienda establecer protocolos de intercambio de datos, lo que promueve la estandarización de formatos y metadatos, y la implementación de plataformas de datos geoespaciales centralizadas que faciliten el acceso y la colaboración entre entidades.

Dada la escala cartográfica de los insumos disponibles, que es de poco detalle, se recomienda utilizar tecnologías avanzadas de recopilación de datos, como imágenes satelitales de media o alta resolución, para mejorar la precisión. Esto debe complementarse con la participación de expertos locales en el proceso, así como con la programación de jornadas de verificación en campo.

Se recomienda establecer convenios interinstitucionales para la adquisición de insumos de tipo ráster y para conseguir cartografía temática a escalas detalladas, ya que en su mayoría esta no está dispuesta en las plataformas de consulta y de acceso abierto.

Por otro lado, en cuanto a la participación de la comunidad, se recomienda integrar métodos participativos en la recopilación de datos para la identificación y el mapeo de los recursos naturales y los servicios ecosistémicos.

Recomendaciones para el análisis de variables hidrometeorológicas

Para el análisis de variables básicas se recomienda contar con series históricas de datos, de un periodo de entre 20 y 30 años, que permitan identificar una tendencia temporal representativa para establecer las temporadas estacionales y su variabilidad.

En cuanto a las variables calculadas para complementar los análisis a nivel hidrológico, se recomienda contar con los insumos requeridos y generar las capas geográficas necesarias para ejecutar los diferentes procesos propuestos en la metodología. Por ejemplo, al momento de realizar la búsqueda de imágenes de satélite para el cálculo del NDVI, estas deben contar con las siguientes condiciones: (i) tener una resolución de 10 m o menor, (ii) estar disponibles para los meses de análisis, (iii) tener un

porcentaje de nubes menor al 10 %, y (iv) cubrir por completo el área de interés. La disponibilidad de imágenes depende del área geográfica seleccionada, la temporalidad definida para la búsqueda de insumos y el satélite elegido para tal fin.

Los periodos hidrometeorológicos quedan establecidos por el modelo de balance hídrico, que debe obtenerse para cada temporada, según los regímenes modales o bimodales que se presenten en el área de estudio. A partir de esto se pueden evidenciar diferencias en cada mapa a escala de pixel para identificar la variabilidad a escala espacial, y así detectar los sitios más secos y los más húmedos.

Recomendaciones para el análisis de extensión del humedal

Se destaca la importancia de utilizar imágenes de radar debido a la limitada efectividad de las imágenes ópticas por el alto porcentaje de nubosidad, principalmente en temporada de lluvias. Los datos de radar, al ser capturados por microondas, permiten la obtención de imágenes en diversas condiciones climáticas y horarias, identifican estructuras vegetales y facilitan el análisis de inundaciones y ecosistemas acuáticos.

En la implementación de la metodología de la propuesta de Protocolo se recomienda el uso de GEE con algunas consideraciones clave. Se enfatiza la necesidad de realizar pruebas de códigos para determinar la eficiencia de conjuntos de datos y algoritmos. Aunque GEE ofrece acceso libre y ejecución rápida de procesos, tiene inconvenientes, como la resolución espacial limitada de las imágenes gratuitas. A pesar de ello, se destaca la ventaja de usar insumos adquiridos previamente por el usuario.

Los resultados del análisis de cambios en la extensión del humedal para épocas seca y de lluvias en el CCZ no revelan variaciones significativas, atribuidas al alto grado de transformación del ecosistema debido a actividades antrópicas y cambios abruptos en el uso del suelo. Se sugiere la aplicación de la metodología en otras áreas para obtener resultados más representativos, y se propone complementar datos espaciales con el cálculo de datos de actividad para un análisis más integral.

Recomendaciones para el cálculo de índices espectrales

Es esencial contar con mejores insumos en términos de resolución espacial y espectral de las imágenes ópticas, así como con cubrimiento total de las ventanas de monitoreo debido a la alta probabilidad de presencia de nubes, especialmente en la temporada de lluvias.

Se sugiere considerar el uso de imágenes Sentinel-2 como insumo principal, dada su gratuidad y sus características, apropiadas para la escala de trabajo. Sin embargo, la metodología no está limitada a este tipo de imágenes y puede implementarse con otras, siempre que con ellas se puedan calcular los índices espectrales descritos.

Se recomienda realizar validación y verificación de los resultados mediante salidas a campo, lo que busca confirmar los valores obtenidos y tomar puntos de confirmación, especialmente para el NBRI. Esto tiene el objetivo de establecer un sistema de monitoreo de incendios.

Se destaca la importancia de analizar datos hidrológicos y meteorológicos para las ventanas piloto que se prioricen en el Magdalena Medio y Bajo, ya que los procesos biofísicos del ecosistema están influenciados por las temporadas secas y de lluvias.

Se recomienda aplicar métodos de validación y verificación una vez se realice el procesamiento digital de imágenes para el análisis de los índices en humedales, con el fin de garantizar la precisión de los resultados y mejorar la confiabilidad de los análisis realizados.

BIBLIOGRAFÍA

Allen, R., Pereira, L., Raes, D. y Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements*. Food and Agriculture Organization. <https://www.fao.org/3/X0490E/x0490e00.htm>

Gitelson, A. A., Viña, A., Arkebauer, T. J., Rundquist, D. C., Keydan, G. y Leavitt, B. (2003). Remote estimation of leaf area index and green leaf biomass in maize canopies. *Geophysical Research Letters*, 30(5), 52-54. <https://doi.org/10.1029/2002gl016450>

Ji, L., Zhang, L., Wylie, B. K. y Rover, J. (2011). On the terminology of the spectral vegetation index $(NIR - SWIR)/(NIR + SWIR)$. *International Journal of Remote Sensing*, 32(21), 6901-6909. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.510811>

McFeeters, S. K. (2013). Using the normalized difference water index (ndwi) within a geographic information system to detect swimming pools for mosquito abatement: A practical approach. *Remote Sensing*, 5(7), 3544-3561. <https://doi.org/10.3390/rs5073544>