

**CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL  
DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA**

**DIVISIÓN DE EDUCACIÓN**

**PROGRAMA DE POSGRADO**

**Índices de vegetación y servicios ecosistémicos de cuatro tipologías de sombra asociadas al cultivo de café en el corredor biológico Cacique Lempira de Honduras**

**Tesis sometida a consideración de la División de Educación y el Programa de Posgrado como requisito para optar al grado de**

***MAGISTER SCIENTIAE***

**en Agroforestería y Agricultura Sostenible**

**Juan Luis Hernández Mencía**

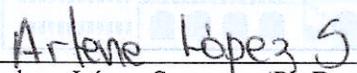
**Turrialba, Costa Rica**

**Año 2022**

Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma por la División de Educación y la Escuela de Posgrado del CATIE y aprobada por el Comité Consejero del estudiante, como requisito parcial para optar por el grado de

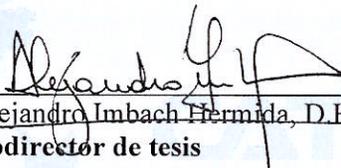
**MAGISTER SCIENTIAE EN AGROFORESTERÍA  
Y AGRICULTURA SOSTENIBLE**

**FIRMANTES:**



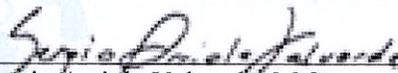
---

Arlene López Sampson, Ph.D.  
**Codirectora de tesis**



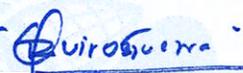
---

Alejandro Imbach Hermida, D.H.C.  
**Codirector de tesis**



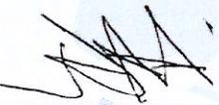
---

Sergio Arriola Valverde, M.Sc.  
**Miembro Comité Consejero**



---

Roberto Quiroz Guerra, Ph.D.  
**Decano, Escuela de Posgrado**



---

Juan Luis Hernández Mencía  
**Candidato**

## **DEDICATORIA**

A mi madre, una ama de casa que hizo todo para que la vida nos sonriera; una mujer tan servicial que lo puede dar todo y ella quedarse sin nada.

A mi padre, un agricultor, productor de café y granos básicos; el hombre que me enseñó lo más importante de la vida: a trabajar, a pagar mis deudas y siempre tener una solución en cualquier dificultad.

A mi hermana, la primera magíster de la familia y a mi hermano, el técnico en café.

A mi pequeña Valery Antonella, porque cumplir esta meta personal significó sacrificar tiempo de calidad con ella. Algún día sabrá que papá siempre la pensó, en cada noche que se iba a dormir.

Y, por último, me lo dedico a mí, por nunca rendirme, por intentarlo una y otra vez, por ese deseo de siempre querer ser una mejor persona y profesional, por tener sueños y cumplir mis metas.

## AGRADECIMIENTOS

A Dios, por los buenos y malos ratos. Porque al final comprendí que todo, absolutamente todo, tiene una razón de ser.

Al Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), mi nueva *alma mater*, por hacerme sentir feliz y conocer a personas increíbles en este mundo académico tan hermoso. A los catedráticos, personal administrativo y de apoyo. Los mejores momentos de la vida estudiantil estarán siempre aquí, en este campus, con esta gente.

Al Servicio Alemán de Intercambio Académico (DAAD) y al Proyecto CONECTA+, por todo el apoyo financiero y logístico brindado. Sin su ayuda, la vida de estudiante no hubiera sido tan fácil.

A mis directores de tesis, la Ph. D. Arlene López-Sampson, por sus valiosos aportes en la investigación y el apoyo incondicional; al profesor Alejandro Imbach, por ser un excelente catedrático y guía y al M. Sc. Sergio Arriola, por aceptar el reto de apoyarme y ser parte de este proceso. Gracias por que los tres me hicieron más estudioso, más lector y con mejores tintes de análisis en el campo de la investigación.

Al Instituto Hondureño del Café (IHCAFE), por ser esa institución líder del país. A la gerencia técnica por el apoyo y los permisos otorgados; al equipo de extensión cafetalera que tiene influencia en el área del proyecto CONECTA+ y al Programa de Agroforestería, especialmente, a Keyla, Sonia y Karlita, quienes siempre estuvieron ahí para lo que les pedía en todo este proceso.

Un agradecimiento muy especial a mi colega forestal y ahora colega agroforestal, Nolvía Gabriela Jiménez; me sobran las palabras, usted tiene mucho en todo mi crecimiento profesional y personal, gracias por hacer que el camino sea más fácil, por confiar en mis capacidades, por ser mi amiga y mentora.

A mis amigos y nueva familia CATIANA, compañeros de Maestría, de fútbol y de convivencias. Aprendí mucho de cada uno. Esta etapa fue hermosa por todo lo vivido con ustedes.

A Nohelia, Victoria y Cherly, gracias por soportar mis estados de ánimo y el apoyo en este proceso; a Johnny, Benja, Denis, Flor, Vane y Ana, tengo más fotos jugando con ustedes que trabajando.

A Iris, porque fueron muchos los mensajes que aliviaron mis noches. Gracias por siempre estar.

Y, por último, un agradecimiento muy especial a todos los productores de café de Honduras, por su liderazgo, por superar cada obstáculo que la vida les pone; gracias por ser el eje central de la economía nacional y pertenecer al sector productivo más pujante e importante del país. Me sobran las palabras de admiración con cada uno de ustedes.

***PDT.** Para todas las personas en general, cada taza de café que se tomen y que sea Café de Honduras; sepan que esa taza trae consigo mucha esperanza para una familia que vive de la producción de este importante rubro, disfrútenlo mucho.*

A TODOS, MUCHAS GRACIAS.

## CONTENIDO

DEDICATORIA .....	III
AGRADECIMIENTOS .....	IV
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS .....	VIII
LISTA DE ACRÓNIMOS, ABREVIATURAS Y UNIDADES.....	IX
Artículo. Índices de vegetación y servicios ecosistémicos de cuatro tipologías de sombra asociadas al cultivo de café en el Corredor Biológico Cacique Lempira de Honduras .....	1
Resumen.....	1
Abstract .....	2
1           Introducción .....	3
2           Metodología .....	5
2.1       Área de estudio.....	5
2.2       Procedimiento metodológico .....	6
2.2.1   Análisis y procesamiento de imágenes satelitales.....	6
2.2.2   Índices de vegetación para análisis de la cobertura de los usos de suelo seleccionados ....	7
2.2.3   Identificación de los servicios ecosistémicos mas importantes brindados por los árboles en cuatro tipologías de sombra asociadas al cultivo de café.....	10
2.3       Análisis estadístico.....	14
3           Resultados .....	14
3.1       Cobertura y uso del suelo del CBCL.....	14
3.2       Índices de vegetación - IV.....	15
3.2.1   Índices de verdor y salud de la vegetación en el corredor biológico Cacique Lempira: NDVI y SAVI .....	15
3.2.2   Índices de humedad en el corredor biológico Cacique Lempira: NDMI y MSI .....	17
3.3       Asociación entre las categorías ponderadas de los índices de vegetación y los usos de suelo del corredor biológico Cacique Lempira .....	18
3.4       Aspectos sociales, culturales y técnicos de los productores de café en el corredor biológico Cacique Lempira .....	19
3.4.1   Aspecto cultural de los productores de café del corredor biológico Cacique Lempira ....	19
3.5       Servicios ecosistémicos de cuatro tipologías de sombra asociadas a los sistemas agroforestales con café según la perspectiva de los productores de café y los técnicos de extensión que los atienden en el corredor biológico Cacique Lempira .....	20
3.5.1   Servicios ecosistémicos de las áreas cafetaleras visto desde la percepción de los productores de café del corredor biológico Cacique Lempira .....	20

3.5.2	Servicios ecosistémicos provistos por los SAF-café desde la percepción de los técnicos de extensión que apoyan los productores de café en el corredor biológico Cacique Lempira	21
3.6	Asociación de los servicios ecosistémicos categorizados y las cuatro tipologías de sombra asociadas a los cafetales .....	22
3.7	Valorización de los SE asociados a las cuatro tipologías de SAF-C .....	25
4	Discusión.....	26
4.1	Índices de vegetación.....	26
4.2	Aspectos sociales y técnicos de los productores de café en el corredor biológico Cacique Lempira .....	28
4.3	Servicios ecosistémicos de los cafetales en el corredor biológico Cacique Lempira .....	29
4.3.1	Regulación del microclima en las tipologías de SAF-C del corredor biológico Cacique Lempira .....	30
4.3.2	Servicios ecosistémicos menos conocidos en el corredor biológico Cacique Lempira según la perspectiva de los productores de café: <i>hábitat de especies de flora y fauna y mejora en la calidad del grano de los cafetales</i> .....	30
4.3.3	Regulación de plagas y enfermedades en las tipologías de SAF-C en el corredor biológico Cacique Lempira .....	30
4.4	Prácticas de manejo a realizar en los árboles para conservar los SE en el SAF-C .....	31
5	Conclusiones y recomendaciones .....	31
6	Bibliografía .....	33

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Mapa de ubicación del Corredor Biológico Cacique Lempira).....	5
<b>Figura 2</b> Mapa conceptual para la valoración y priorización de los servicios ecosistémicos brindados por los árboles asociados al café en el corredor biológico Cacique Lempira.....	12
<b>Figura 3</b> Mapa de cobertura y uso de suelos del corredor biológico Cacique Lempira en Honduras. ..	15
<b>Figura 4</b> Índices de verdor en el corredor biológico Cacique Lempira: NDVI y SAVI.....	16
<b>Figura 5</b> Índices de humedad en el corredor biológico Cacique Lempira: NDMI y MSI .....	17
<b>Figura 6</b> Gráfico bi-plot de correlación entre los niveles de índices de vegetación y los usos de suelo del corredor biológico Cacique Lempira. ....	18
<b>Figura 7</b> Gráfico de asociación entre los servicios ecosistémicos y las cuatro tipologías de SAF-C en el corredor biológico Cacique Lempira desde la perspectiva de los productores de café. ....	24
<b>Figura 8</b> Valorización de los servicios ecosistémicos para cada una de las cuatro tipologías de SAF-C en el corredor biológico Cacique Lempira. ....	26

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Imágenes satelitales Sentinel-2 A/B utilizadas en el procesamiento .....	7
<b>Tabla 2</b> Índices de vegetación utilizados para el análisis de los principales usos de suelo encontrados en el corredor biológico Cacique Lempira .....	8
<b>Tabla 3</b> Descripción e intervalos de clasificación de NDVI y SAVI.....	9
<b>Tabla 4</b> Descripción e intervalos de clasificación de NDMI y MSI .....	10
<b>Tabla 5</b> Tipologías de sombra asociadas a los sistemas agroforestales con café en Honduras.....	11
<b>Tabla 6</b> Identificación de los servicios ecosistémicos mas importantes presentados a los productores de café en el corredor biológico Cacique Lempira.....	13
<b>Tabla 7</b> Usos de suelo y niveles ponderados (%) de los índices de verdor y salud vegetal en el corredor biológico Cacique Lempira.....	16
<b>Tabla 8</b> Usos de suelos y niveles ponderados (%) de los índices de humedad (NDMI, MSI) en el corredor biológico Cacique Lempira .....	17
<b>Tabla 9</b> Distancias Euclidia entre los usos de suelo según las categorías ponderadas de los IV .....	19
<b>Tabla 10</b> Beneficios de los árboles asociados al café y la ubicación de la finca en el corredor biológico Cacique Lempira.....	20
<b>Tabla 11</b> Categorización de los servicios ecosistémicos provistos por los cafetales realizada por los productores de café del corredor biológico Cacique Lempira .....	21
<b>Tabla 12</b> Prácticas de manejo de los árboles de sombra en los cafetales del corredor biológico Cacique Lempira .....	21
<b>Tabla 13</b> Categorización de los servicios ecosistémicos brindados por los SAF-C visto desde la perspectiva de los técnicos de extensión.....	22
<b>Tabla 14</b> Categorización de los 11 servicios ecosistémicos asociados a las cuatro tipologías de sombra de los SAF-C en el corredor biológico Cacique Lempira.....	23

## **LISTA DE ACRÓNIMOS, ABREVIATURAS Y UNIDADES**

**CATIE:** Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza

**CB:** corredor biológico

**CONECTA+:** Proyecto paisajes productivos que generen beneficios sociales, ambientales y económicos en el corredor biológico árido húmedo del suroccidente de Honduras

**DAP:** diámetro a la altura del pecho

**GEF:** Fondo para el Medio Ambiente Mundial

**Ha:** hectárea

**ICF:** Instituto de Conservación y Desarrollo Forestal, Áreas Protegidas y Vida Silvestre

**IHCAFE:** Instituto Hondureño del Café

**IV:** índices de vegetación

**MiAmbiente+:** Secretaría de Recursos Naturales y Ambiente

**OIT:** Organización Internacional de Café

**PAR:** radiación fotosintéticamente activa

**PNUD:** Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo

**PROMECAFE:** Programa Cooperativo Regional para el Desarrollo Tecnológico y Modernización de la Caficultura

**PIB:** producto interno bruto

**SAF:** sistemas agroforestales

**SE:** servicios ecosistémicos

**SICA:** Sistema de la Integración Centroamericana

**SIG:** Sistemas de Información Geográfica

# Artículo. Índices de vegetación y servicios ecosistémicos de cuatro tipologías de sombra asociadas al cultivo de café en el corredor biológico Cacique Lempira de Honduras

Juan Luis Hernández-Mencía<sup>1</sup>, Arlene López-Sampson<sup>2</sup>, Alejandro C. Imbach<sup>2</sup>, Sergio Arriola-Valverde<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Instituto Hondureño del Café (IHCAFE), Honduras

<sup>2</sup> Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Costa Rica

<sup>3</sup> Tecnológico de Costa Rica (TEC)

## Resumen

El café es el cultivo con árboles más importante del mundo. Además, alrededor de 25 millones de pequeños agricultores dependen de los ingresos generados por esta actividad, y en su mayoría tienen sus parcelas bajo un sistema agroforestal (SAF). En Honduras, el café representa el 5% de los ingresos totales del país y más de 120 mil familias se dedican a este rubro. A pesar de ello, existen muchas limitantes que afectan la estabilidad de los productores de café a nivel nacional. Partiendo de esto, se hizo un estudio en el corredor biológico Cacique Lempira (CBCL) en el occidente de Honduras, con el objetivo de calcular índices de vegetación (IV) y categorizar los servicios ecosistémicos (SE) más importantes para los agricultores. Se tomó una muestra de 228 productores de café y 40 técnicos de extensión que se encargan de realizar actividades de campo con los productores del área de estudio y mediante una cadena de referencia y por conveniencia, se visitaron sus parcelas de café. Para realizar el análisis del paisaje y cálculo de los IV, se usaron imágenes Sentinel 2A y 2B del programa Copernicus, así como el mapa de cobertura forestal y uso de la tierra del 2018 para Honduras. Los IV que se utilizaron en este estudio fueron el *Índice de vegetación de diferencia normalizada* (NDVI), *Índice de vegetación ajustado al suelo* (SAVI), *Índice de humedad de diferencia normalizada* (NDMI) y el *Índice de Estrés por humedad* (MSI). Los usos de suelos tomados como referencia fueron *Bosque Latifoliado* (B-L), *Bosque de Conífera* (B-C), *Bosque Mixto* (B-M), *Cafetales* (SAF-C), además, *Pastos* y *Cultivo* (P-C). El modelo con los análisis muestra una asociación significativa entre los niveles de IV utilizados y los usos de suelo ( $X^2 = 369.4$ ;  $p\text{-valor} = 0.0001$ ). Según este análisis, el B-L y B-M son los dos usos de suelo que tienen mayor similitud y que reflejan los niveles más altos de IV. El SAF-C tuvo su mayor asociación con el uso de suelos de B-C y los usos de suelos que presentaron los niveles más bajos de asociación fueron el de P-C y el SAF-C. Para categorizar los SE más importantes, se seleccionaron productores que tuvieran una de las siguientes tipologías de sombra asociadas al café: *Café + pino* – C-P, *Café + inga* – C-I, *Café + maderable + especie de uso múltiples* – C-Ma-EUM y *Café + especie de uso múltiple + Frutales* – C-EUM-F. Se encontró que los productores de café asocian muy bien el tipo de SE con el tipo de SAF-C en su cafetal ( $X^2 = 136.13$ ;  $p\text{-valor} = 0,0045$ ). Según este estudio, la *provisión de madera y leña* es el SE que perciben con mayor importancia de los SAF-C, seguido por la *provisión de frutas para consumo y venta* y la *regulación del microclima y sombra*. Las respuestas de los técnicos fueron similares, con la diferencia de que no había una asociación significativa entre los tipos de SAF-C y los SE ( $X^2 = 99,72$ ;  $p\text{-valor} = 0,0775$ ) y colocaron la *regulación del microclima y sombra* en el segundo lugar; por su parte, *mejora de la calidad y cantidad de agua* como tercero. La práctica más importante por realizar con los árboles de sombra en los SAF-C para conservar los SE es la *poda*, seguido por la *reforestación*. Se encontró que existe un porcentaje muy grande de productores y técnicos que no tienen clara una segunda práctica de manejo asociada a los árboles en los SAF-C.

**Palabras claves:** agroforestería, imágenes Sentinel, sensores remotos, sistemas de información geográfica.

## Abstract

Coffee is one of the most important tree crops in the world. There are around 25 million small farmers who depend on this cash crop, and most of them produce under an agroforestry system – AFS. In Honduras, coffee represents 5% of the country's total income and there are more than 120 thousand families dedicated to this activity. Despite this, there are many limitations that threaten the stability of coffee farmers. A study was carried out in the Cacique Lempira biological corridor - CBCL in western Honduras, with the objective of calculating vegetation indices - VI and categorizing the most important ecosystem services - ES for farmers. A sample of 228 coffee farmers and 40 extension technicians who are in charge of advising farmers of the study area were interviewed through a reference chain. Sentinel 2A and 2B images from the Copernicus Program and the 2018 forest cover and land use map for Honduras were used to perform the landscape analysis and VI calculation. The VIs used in this study were the *Normalized Difference Vegetation Index* – NDVI, *Soil Adjusted Vegetation Index* – SAVI, *Normalized Difference Moisture Index* – NDMI and the *Moisture Stress Index* – MSI. The land uses taken as reference were *Broadleaf Forest* – B-L, *Coniferous Forest* – B-C, *Mixed Forest* – B-M, *Coffee Plantations* – AFS-C and *Pasture and Crop* – P-C. There was a significant association between the levels of IV used and the land uses ( $X^2 = 369.4$ ;  $p\text{-value} = 0.0001$ ). According to this analysis, B-L and B-M are the two land uses that have the greatest similarity and that reflect the highest levels of VI. The SAF-C had its greatest association with the land use of B-C. The land uses that presented the lowest levels of association were P-C and SAF-C. To categorize the most important ES, producers were selected that had one of the following shade types associated with coffee: *Coffee + pine* – C-P, *Coffee + Inga* – C-I, *Coffee + timber + multiple-purpose species* – C-Ma-EUM and *Coffee + species of multiple-purpose + Fruit trees* – C-EUM-F. It was found that coffee growers associated the type of SE with the SAF-C typology ( $X^2 = 136.13$ ;  $p\text{-value} = 0.0045$ ). According to this study, the *provision of wood and firewood* is the SE that they perceive with greater importance of the SAF-C, followed by the *provision of fruit for consumption and sale* and the *regulation of the microclimate and shade*. The answers of the technicians were similar, with the difference that there was no significant association between the types of SAF-C and the SE ( $X^2 = 99.72$ ;  $p\text{-value} = 0.0775$ ) and they placed the *regulation of the microclimate and shade* in second place of importance and *improvement of the quality and quantity of water* as third. The most important practice to carry out with shade trees in SAF-C to conserve ES were *pruning*, followed by *reforestation*. It was found that there is a very large percentage of producers and technicians who do not have a second clear management practice for the trees associated to the SAF-C.

**Key words:** Agroforestry, geographic information systems, remote sensing, sentinel images.

## 1 Introducción

El café es una especie leñosa C3 (Damatta *et al.*, 2018) y una bebida no alcohólica muy popular (Chemura *et al.*, 2018b). Es el cultivo perenne más importante del mundo con una cobertura aproximada de 11 millones de hectáreas distribuidas en 25 millones de agricultores en 70 países, donde el 48% de estos manejan sus fincas bajo un dosel de sombra en sistema agroforestal (SAF) (Morales *et al.*, 2022; Gidey *et al.*, 2020; ICO, 2020; Mosomtai *et al.*, 2020; Villarreyna *et al.*, 2020; Somarriba y López-Sampson, 2018; Martins *et al.*, 2016; Waller *et al.*, 2007). El cultivo del café juega un papel económico, social, cultural y ambiental de trascendencia en América Latina y da forma a los paisajes rurales y los medios de vida en toda la región (Harvey *et al.*, 2021). Por su parte, Centroamérica y República Dominicana producen conjuntamente el 11% del café exportado a nivel mundial, generando 5 millones de empleos cada año (Freire de Oliveir *et al.*, 2021; SICA, 2020; PROMECAFE, 2019). En Honduras, el 95% del café se encuentra en territorio boscoso y el 92% bajo sombra de diversos árboles generando múltiples servicios ecosistémicos (SE) que ayudan a mantener un ambiente estable y diverso de flora y fauna (FORUMCAFE, 2019).

Los agricultores locales son conscientes de los riesgos agronómicos y socioeconómicos asociados a los monocultivos con perennes a pleno sol, por lo que están aumentando la densidad y diversidad de árboles en un esfuerzo por proporcionar sombra, materia orgánica y diversificar el rendimiento de los cultivos (Cerdán *et al.*, 2012; Siebert, 2002). En el nuevo enfoque de la gestión de los agroecosistemas, las actividades que generan emisión de carbono, poco a poco, están siendo compensadas por la función de secuestro de carbono, siendo los árboles un factor clave en esta nueva dinámica de paisajes productivos (Bakhshande *et al.*, 2022). Los corredores biológicos (CB) reconocen la importancia de trabajar objetivos de producción y conservación de forma conjunta que permitan maximizar los beneficios de ambos, impulsando oportunidades económicas y sociales para las poblaciones rurales que dependen del capital natural para sus medios de vidas; contrario al enfoque de conservación absoluta que ha propiciado el aislamiento de las áreas protegidas, convirtiéndolas en áreas vulnerables a procesos de deforestación, colonización y conflictos (Johnson *et al.*, 2015).

La reducción de la productividad debido a la degradación de la tierra exacerba el déficit alimentario, a pesar del relativo éxito de los sistemas agrícolas intensivos que se promueven en muchas regiones del mundo (Notaro *et al.*, 2022; Mbow *et al.*, 2014). Los árboles de sombra pueden mejorar la productividad primaria neta de estos sistemas directa o indirectamente, permitiendo una adquisición de recursos más eficiente, gracias a los efectos complementarios y de facilitación (Sarmiento-Soler *et al.*, 2019; Jha *et al.*, 2014; Taugourdeau *et al.*, 2014). A pesar de ello, el nivel de aceptación de los agricultores con respecto a los SE aún es demasiado bajo y los esfuerzos deben estar enfocados en cambiar estas percepciones (Ndiritu *et al.*, 2022).

Desde el punto de vista biológico, las áreas cafetaleras coinciden con las regiones más ricas y diversas en flora y fauna (Figueroa *et al.*, 2012). Estos paisajes culturales que se observan en los CB pueden brindar un amplio número de SE (p.ej., captura de carbono) (Toledo y Moguel, 2012; Soto-Pinto *et al.*, 2010), mejoran las condiciones del microclima del sistema (Beer *et al.*, 1997), conectan fragmentos de bosque dentro del mosaico del paisaje (Jha *et al.*, 2014), conservan suelos (Bedoya-Gómez *et al.*, 2021) y ayudan en la estabilización de taludes (Chemura *et al.*, 2018a). Son espacios propicios para la conservación de plantas epífitas (De Leijster *et al.*, 2021; Richards *et al.*, 2020), así como la producción de madera como servicio de aprovisionamiento que ha sido subutilizado por los agricultores rurales (De Leijster *et al.*, 2021). En las últimas décadas, diferentes investigadores han evaluado el valor de los cafetales tradicionales como parte del paisaje y el impacto que tienen los cambios del método de cultivo sobre la biodiversidad asociada a ellos (Murcia, 2001).

La gestión de los ecosistemas en garantizar el abastecimiento de diversos SE se ha transformado así en un reto clave para la ecología aplicada (Pinoargote, 2022; De Bello *et al.*, 2021). De esta manera, los cafetales han sido observados por los agricultores como una actividad sostenible, que favorece la conservación de la biodiversidad en áreas protegidas (Hakim *et al.*, 2022; Zeng *et al.*, 2022). A nivel general, los países están buscando metodologías holísticas que ayuden a entender la dinámica de los paisajes; este mecanismo, por ser a gran escala, tiene la desventaja de presentar datos más exploratorios que precisos, pero que entregan información valiosa para la toma de decisiones (Areeba-Binte-Imran *et al.*, 2021; Pico-Mendoza *et al.*, 2020; Taugourdeau *et al.*, 2014). Es así como la incorporación de diferentes sensores, controladores y dispositivos electrónicos a las actividades agrícolas ha optimizado la producción en los campos de cultivo de los países en desarrollo (De la Casa *et al.*, 2018).

El sensoramiento remoto multiespectral (RS) es una metodología confiable y factible para el monitoreo de la vegetación y caracterización del paisaje que puede ayudar a los agricultores y líderes nacionales en la toma de decisiones a nivel local y regional (Kowalski *et al.*, 2020; Bedin *et al.*, 2019). La mayoría de los estudios relacionados con el uso de imágenes satelitales utiliza índices de vegetación (IV) para evaluar la respuesta espectral (Nogueira-Martins *et al.*, 2021), el estado de salud de la vegetación por medio de las mediciones de la reflectancia reflejadas (Abdi *et al.*, 2021; Moyao-Calleja *et al.*, 2021; Wittke *et al.*, 2019) y, en múltiples investigaciones, para evaluar la composición de los paisajes (Jia *et al.*, 2017). En Vietnam, Paudyal *et al.* (2020) midieron espacialmente los SE de plantaciones con datos a partir de imágenes de satélite de resolución media, como Sentinel y Landsat, utilizando un análisis de imágenes basado en objetos que se combinó con un método de interpretación visual.

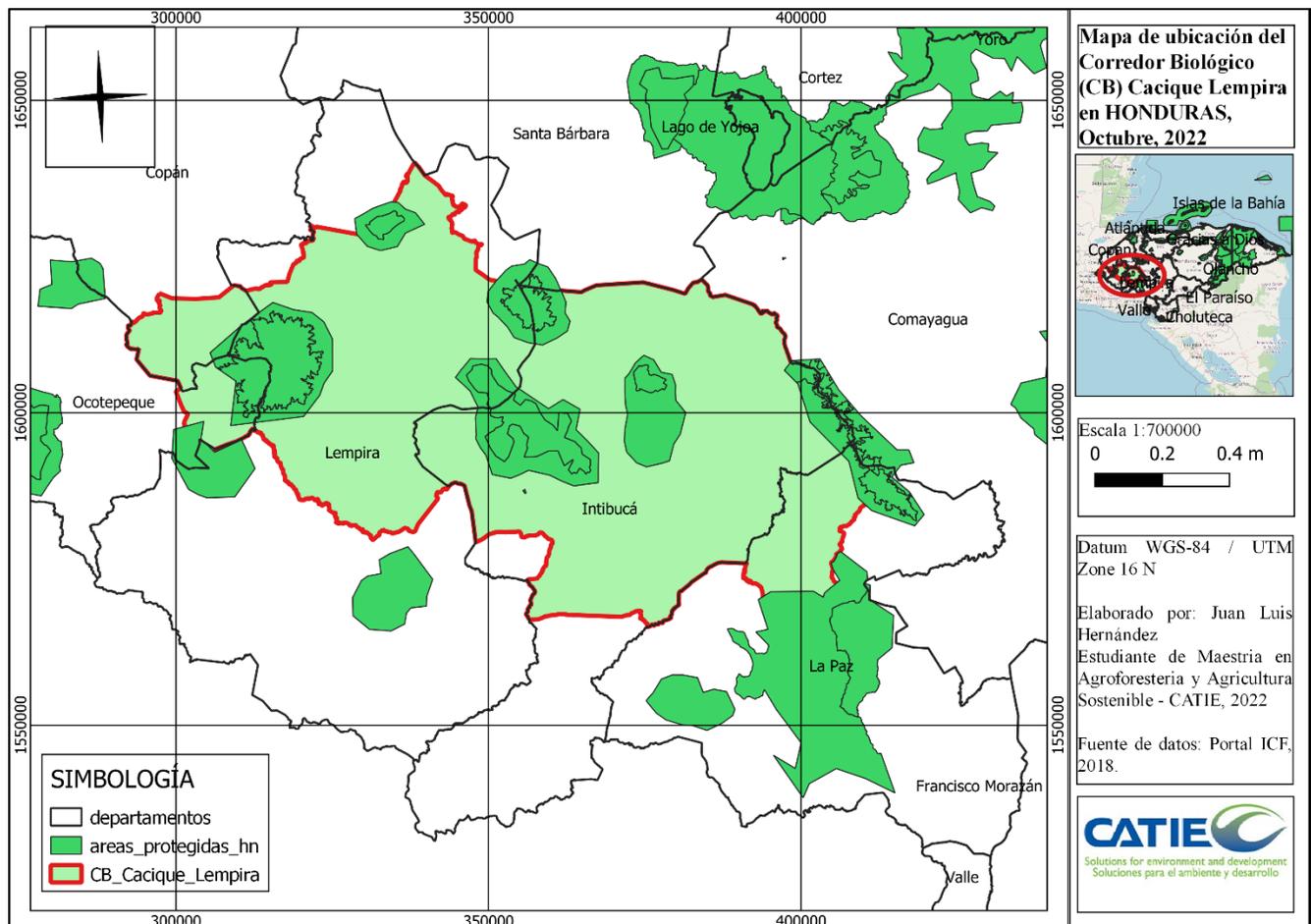
Las técnicas de RS son un enfoque razonable para demostrar la relación entre los parámetros físicos del cultivo y los IV (Freire de Oliveir *et al.*, 2021). Los mapas de cobertura terrestre precisos y oportunos juegan un papel fundamental en una variedad de sectores en el mundo en desarrollo, incluida la seguridad alimentaria, la planificación del uso de la tierra, el modelado hidrológico y la planificación de la gestión de recursos naturales (Saah *et al.*, 2019). Actualmente, los sistemas de información geográfica (SIG) combinados con el uso de imágenes satelitales son herramientas indispensables para la detección, evaluación y seguimiento espacial y temporal de problemas relacionados con el medio ambiente, facilitando la toma de decisiones y la reorientación, cuando sea necesario, de las políticas de uso y ocupación del suelo (Ha *et al.*, 2019; Aquino y Oliveira 2012). Estas evaluaciones en muchos casos se apoyan en la información obtenida a partir de los IV, que son medidas cuantitativas, basadas en valores digitales útiles para estimar la biomasa o vigor vegetal (Nguyen Trong *et al.*, 2020; Torres *et al.*, 2014). Los SAF son típicamente sistemas compuestos por múltiples capas, heterogéneas, complejas e interactivas; a menudo se generaliza como tierras de cultivo (café intercalado), matorrales (pleno sol) o tierras forestales (agroforestales) en muchos países tropicales, lo que hace que su seguimiento y modelado sean bastante desafiantes (Mosomtai *et al.*, 2020; Taugourdeau *et al.*, 2014).

Los SAF tropicales ofrecen una alternativa a la agricultura tradicional, al brindar una opción sostenible para la producción y, al mismo tiempo, respaldar la biodiversidad y los SE (Harvey *et al.*, 2021; Prado *et al.*, 2021). Por lo cual, el objetivo de este estudio fue, primero, calcular cuatro IV y la relación con los usos del suelo reportados en el mapa de cobertura forestal y uso de la tierra en Honduras del 2018, mediante el uso de RS y, segundo, hacer una categorización de los SE más importantes, proporcionados por cuatro tipologías de sombra asociados al SAF-C, vistos desde la perspectiva de los productores de café y los profesionales que tienen su influencia en brindar asistencia técnica en el corredor biológico Cacique Lempira en Honduras (CBCL).

## 2 Metodología

### 2.1 Área de estudio

El corredor biológico Cacique Lempira (CBCL) (**Figura 1**) está ubicado en la zona de transición del parteaguas del Atlántico y del Pacífico en el Occidente de Honduras, con una época seca bien marcada que va desde noviembre a mayo. Tiene una extensión territorial de 465,028.47 hectáreas, comprende cinco áreas protegidas nacionales: Parque Nacional Montaña de Celaque, Refugio de Vida Silvestre Montaña de Puca, Reserva Biológica Volcán Pacayita, Refugio de Vida Silvestre Montaña de Santa Bárbara y Reserva Biológica de Opalaca. Estas áreas protegidas se interconectan con diferentes tipos de bosque, presentando condiciones diversas de temperatura, precipitación, humedad y elevación. El territorio es irregular y las elevaciones oscilan entre los 600 y los 2,849 msnm, siendo el Parque Nacional Montaña de Celaque el que tiene el punto más alto de Honduras (UICN, 2020).



**Figura 1** Mapa de ubicación del corredor biológico Cacique Lempira en Honduras

Fuente: ICF; IHCAFE, 2018.

Este CB es una iniciativa nacional que pretende la legalización de los CB para Honduras. A la fecha, no se tienen claros los límites finales de la zona que abarca, ya que el proceso está a nivel de proyecto piloto. En este proceso, las comunidades que conviven en estas áreas juegan un papel importante para definir las políticas acerca del manejo sostenible y las actividades permitidas en estos espacios que son importantes para la conservación de las áreas protegidas.

## 2.2 Procedimiento metodológico

### 2.2.1 Análisis y procesamiento de imágenes satelitales

El uso de RS se ha explorado en los últimos años utilizando imágenes satelitales para una variedad de aplicaciones en el cultivo del café (Nogueira-Martins *et al.*, 2021). En este estudio, se hizo un análisis descriptivo y de asociación entre los usos de suelo y seis categorías de IV. Dicho análisis comprende el uso de imágenes satelitales y el Mapa Forestal y Cobertura de la Tierra en la República de Honduras 2018. Al respecto, el Instituto de Conservación Forestal (ICF) a través de la Unidad de Monitoreo Forestal y con el apoyo financiero y técnico del Programa ONU-REDD<sup>1</sup> de la FAO<sup>2</sup>, así como el proyecto REDD+<sup>3</sup> de MiAmbiente+<sup>4</sup>, elaboró el *Mapa Forestal y Cobertura de la Tierra en la República de Honduras 2018*, diseñado como una herramienta esencial para la planificación y toma de decisiones en el desarrollo económico y el ordenamiento del sector forestal en el país con imágenes Landsat (ICF, 2018). Para la elaboración del mapa de cobertura forestal y uso de suelo de Honduras, se utilizaron 37 tipos de cobertura divididos en categorías y subcategorías siguiendo el sistema de clasificación Corin Land Cover (CLC). Este sistema de clasificación permite distinguir entre superficies artificiales, superficies agrarias, zonas forestales y boscosas, humedales y masas de agua (ICF, 2018). Luego de hacer los cortes en el área del CBCL, el resultado se redujo a 21 categorías. De las 21 categorías que se encontraron en el CBCL, se seleccionaron y consolidaron las cinco más importantes para este estudio.

Se utilizaron las imágenes de satélite Sentinel-2 para calcular los IV en el área de estudio. Sentinel es un sensor con datos de resolución espacial y temporal recurrente, refinados de uso libre y fácil acceso (Areeba-Binte-Imran *et al.*, 2021). Tanto las imágenes Sentinel-2 (S2) (resolución alta a media) como Landsat 8 (L8) (conjunto de datos de resolución media) están disponibles gratuitamente en la Agencia Espacial Europea (ESA) y el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), respectivamente (Mosomtai *et al.*, 2020; USGS, 2020; ESA, 2018).

Sentinel-2 es una misión de observación de la tierra y parte del programa Copernicus de la ESA. Incluye dos satélites: Sentinel-2A (lanzado el 23 de junio de 2015) y Sentinel-2B (lanzado el 7 de marzo de 2017), con una carga útil del instrumento multispectral (MSI). Las ventajas de sentinel es que ofrece 13 combinaciones de bandas espectrales desde visible, seguido de infrarrojo cercano (NIR, por sus siglas en inglés), hasta infrarrojo de onda corta (SWIR, por sus siglas en inglés) y están disponibles con una resolución mejorada de hasta 10 y 20 m; además de contar con una más amplia de 60 m respectivamente (Jelének y Kopačková-Strnadová 2021; Kaplan y Rozenstein 2021; Torabzadeh *et al.*, 2019; Navarro *et al.*, 2019; Wittke *et al.*, 2019; Pandit *et al.*, 2018; Serrano *et al.*, 2018). Por su parte, Sentinel 2A/B proporciona una mejora significativa en la cobertura espectral, la resolución espacial y la frecuencia temporal (revisión de 5 días con dos satélites operativos) con respecto a la generación actual de sensores Landsat (Navarro *et al.*, 2019; Drusch *et al.*, 2012).

Las imágenes del nivel 2A/B y proyección UTM/WGS 84, 16-N se descargaron del sitio de ESA Copernicus (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>, consultado el 10 de julio de 2022). Además,

---

<sup>1</sup> Programa de colaboración de las Naciones Unidas para la reducción de emisiones de la deforestación y la degradación de bosques en los países en desarrollo (REDD+)

<sup>2</sup> Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

<sup>3</sup> Reducción de Emisiones derivadas de la Deforestación y la Degradación de los bosques

<sup>4</sup> Secretaría en los Despachos de Recursos Naturales y Ambiente de Honduras

para completar el mosaico del área total del CB, se hizo necesario la descarga de cuatro imágenes satelitales (**Tabla 1**) y se tomaron las seis bandas con resolución espacial de 20 metros.

Considerando que el mapa forestal de Honduras con el cual se hicieron los cruces de información fue elaborado en el 2018, tres de las imágenes que se descargaron son del 12 de abril del 2019 (98.3% del área total) y una del 10 de abril del 2019 (1.7% del área total).

**Tabla 1** Imágenes satelitales Sentinel-2 A/B utilizadas en el procesamiento

Fecha	Identificador	Misión	Instrumento	Nivel de procesamiento	Porcentaje nubes	Porcentaje en CB
12/4/2019	S2A_MSIL2A_20190412T160901_N0211_R140_T16PCB_20190412T203432	Sentinel-2-A	MSI	Nivel-2A	1.07	70.4
12/4/2019	S2A_MSIL2A_20190412T160901_N0211_R140_T16PDA_20190412T203432	Sentinel-2-A	MSI	Nivel-2A	15.6	27.5
12/4/2019	S2A_MSIL2A_20190412T160901_N0211_R140_T16PCA_20190412T203432	Sentinel-2-A	MSI	Nivel-2A	13.6	0.4
10/4/2019	S2B_MSIL2A_20190410T161839_N0211_R040_T16PBB_20190410T220228	Sentinel-2-B	MSI	Nivel-2A	30.8	1.7

Fuente: ESA, 2018.

El periodo de abril es época seca en Honduras, lo que brinda un panorama amplio del nivel de estrés de la vegetación y la humedad disponible en el dosel arbóreo. Se logró encontrar imágenes con apenas el 1.07% de interferencia por nubes en un 70.4% del territorio del CBCL. Al respecto, Jelének y Kopačková-Strnadová (2021) se refieren al clima del lugar como un factor clave en el éxito del uso de las imágenes aéreas y satelitales.

Antes, Sentinel brindaba las imágenes únicamente con nivel de procesamiento L1, lo que obligaba a tener que hacer correcciones radiométricas y atmosféricas mediante Sen2cor de la caja de herramientas de SNAP y el *plugin* SCP del programa QGIS (Wittke *et al.*, 2019). Actualmente, el satélite presenta las imágenes con un procesamiento L2 a nivel BOA (fondo de la atmósfera) y estas se descargan corregidas para realizar los cálculos en la vegetación existente sin necesidad de hacer un preprocesamiento.

### 2.2.2 Índices de vegetación para análisis de la cobertura de los usos de suelo seleccionados

En este estudio, se calcularon dos IV para definir la escala de verdor del CB y dos IV para conocer la concentración de humedad en la cobertura del dosel arbóreo y de cultivos (**Tabla 2**). Los IV son valores numéricos calculados a partir de la reflectancia de las bandas espectrales, cuya función es medir distintas variables (por ejemplo, clorofila, biomasa, producción fotosintética, etc.) (Solís *et al.*, 2021). Los cinco usos de suelos con los cuales se trabajó fueron el *Bosque de Conífera* (B-C), *Bosque Latifoliado* (B-L), *Bosque mixto* (B-M), *Pastos y Cultivo* (P-C) y *Cafetales* (SAF-C). Se tomó como

punto de partida que los usos de suelos, denominados bosques, tendrían los niveles más altos de importancia en la generación de SE y que el uso de suelos P-C, tendrían los valores más bajos.

**Tabla 2** Índices de vegetación utilizados para el análisis de los principales usos de suelo encontrados en el corredor biológico Cacique Lempira

Índice de Vegetación	Ecuación usando Sentinel-2	Bibliografía
Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, por sus siglas en ingles)	$(B8 - B4) / (B8 + B4)$	Kaplan y Rozenstein, 2021; Navarro <i>et al.</i> , 2019; Zhang <i>et al.</i> , 2018; Tomar <i>et al.</i> , 2013;
Índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI, por sus siglas en ingles)	$((B8 - B4) / (B8 + B4 + 0,5)) \times 1.5$	Kaplan y Rozenstein, 2021; Navarro <i>et al.</i> , 2019; Wittke <i>et al.</i> , 2019; Huete, 1988; Torres <i>et al.</i> , 2014
Índice de humedad de diferencia normalizada (NDMI, por sus siglas en ingles)	$(B08 - B11) / (B08 + B11)$	EOS, 2021; (Gao, 1996); Campaña-Olaya <i>et al.</i> , 2021
Índice de estrés por humedad (MSI, por sus siglas en ingles)	$B8 / B11$	Wittke <i>et al.</i> , 2019

Fuente: bibliografía citada.

Para Moyao-Calleja *et al.* (2021), el índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) trata de corregir el efecto del suelo en los estudios de vegetación añadiendo el factor L (que significa línea del suelo), a la misma formación del NDVI (índice de vegetación de diferencia normalizada), permitiendo tener un mejor análisis sobre los valores reflejados en la etapa de desarrollo inicial de la vegetación. En este sentido, SAVI se desarrolló como una modificación del NDVI para corregir la influencia del brillo del suelo cuando la cobertura vegetal es baja (menor o igual a 40%) y la superficie del suelo está expuesta (Coltri *et al.*, 2013). Entre tanto, Do Nascimento *et al.* (2018) mencionan que el NDVI es un indicador de la vegetación en un área específica de interés de la superficie terrestre. Es el indicador de crecimiento de la vegetación más utilizado, sin embargo, puede estar saturado cuando la cobertura de vegetación es muy alta y comúnmente es usado para evaluar las diferencias de vegetación de clorofila y biomasa (Jia *et al.*, 2017; Ortiz *et al.*, 2011). En el caso de NDMI (Índice de humedad de diferencia normalizada) y MSI (Índice de estrés por humedad), son IV que basan sus características en la composición de la vegetación que tiene la masa forestal. NDMI se usa para monitorear los cambios en el contenido de agua de las hojas y puede detectar el estrés hídrico en una fase temprana de los cultivos (EOS, 2021, Gao, 1996). En el caso del IV MSI, los usos incluyen análisis de estrés del dosel (Wittke *et al.*, 2019).

### 2.2.2.1 Índices de vegetación NDVI y SAVI

Para este estudio, se realizó una clasificación de seis niveles para los valores de IV que van del -1 al +1 (**Tabla 3**). Para el NDVI, los valores se ajustaron a los propuestos por Do Nascimento *et al.* (2018) y para SAVI a los descritos por Torres *et al.* (2014).

**Tabla 3** Descripción e intervalos de clasificación del NDVI y SAVI

Categoría	Intervalo del valor del IV	Descripción NDVI	Descripción SAVI
1	-1:0	Suelo desnudo/agua	Infraestructura o nubes
2	0.000001:0.2	Muy bajo vegetación	Suelo descubierto o poca vegetación
3	0.200001:0.4	Bajo vegetación	Cobertura del dosel media-alta
4	0.400001:0.6	Moderadamente baja vegetación	Cobertura del dosel alta
5	0.600001:0.8	Moderadamente alta vegetación	Cobertura del dosel muy alta
6	0.800001:1	Alta vegetación	Cobertura total del dosel

El cálculo de NDVI se basa en medir la radiación reflejada por el dosel de la planta en dos longitudes de onda: rojo (RED: 627–703 nm) e infrarrojo cercano (NIR: 697–987 nm) dejando la imagen con banda única y valores que van desde -1 al +1. Los valores de NDVI indican la cantidad de contenido de clorofila presente en la vegetación. Un valor más alto de NDVI indica una vegetación densa y saludable y un valor más bajo indica una vegetación escasa y suelo desnudo (Shafizadeh-moghadam *et al.*, 2022; Abdi *et al.*, 2021; Rani *et al.*, 2018; Do Nascimento *et al.*, 2018; Serrano *et al.*, 2018; Méndez-Barroso *et al.*, 2009).

En el caso de SAVI, es un índice de vegetación que intenta minimizar las influencias del brillo del suelo utilizando un factor de corrección  $L=0.5$  (Huete, 1988). Esto con frecuencia se utiliza en regiones áridas donde la cubierta vegetal es baja y genera valores que van de -1 y +1 (Kaplan y Rozenstein 2021).

Teniendo los cinco tipos de usos de suelos ya definidos en el CBCL y con los IV de verdor clasificados en seis niveles, se prosiguió a cruzar la información. Con la herramienta de *Geoprocessing* del programa *ArcMap* 10.8, se extrajo la cantidad de píxeles por uso de suelos en los distintos niveles clasificados de los dos IV antes mencionados y se ponderaron para sacar el porcentaje de uso de suelo que se asociaba a cada uno de los seis niveles.

### 2.2.2.2 Índices de humedad NDMI y MSI

El NDMI permite cuantificar el agua y estrés o grado de saturación que posee la cobertura vegetal (Alvarado *et al.*, 2019). Este IV representa el contenido de agua en las copas de los árboles. La absorción por el agua líquida de la vegetación alrededor de 858 nm (canal NIR, en la meseta de alta reflectancia del dosel vegetal) es insignificante, mientras que alrededor de 2130 nm es muy alta. Si el contenido de agua disminuye, entonces, en los canales SWIR la reflectancia aumenta significativamente, por lo tanto, el valor NDMI disminuye mostrando vegetación seca bajo estrés por sequía (Gulácsi y Kovács 2015). Los valores de NDMI son normalizados y van de -1 a +1 (Campaña-Olaya *et al.*, 2021). En el caso de MSI, la literatura no explica los usos que se le pueden dar ni la descripción correcta de los datos obtenidos en el análisis espacial. Para este estudio, se contempló por ser un índice complementario del NDMI y por encontrar similitud en los valores calculados.

Se presentó una clasificación en rangos de -1 a +1, con seis intervalos de clasificación (**Tabla 4**). La descripción para NDMI fue tomada y adaptada de la ya hecha por EOS (2021) y para MSI, se hace la propuesta de clasificación tomando parámetros relacionados al NDMI, así como a los índices de verdor y salud de la vegetación. Con los IV de humedad clasificados en seis niveles y los cinco usos de suelos seleccionados, se prosiguió a cruzar la información. Con la herramienta de *Geoprocessing* del programa *ArcMap* 10.8, se extrajo por uso de suelos la cantidad de pixeles en los distintos niveles clasificados de los dos IV trabajados y se ponderaron para sacar el porcentaje de uso de suelo que se asociaba a uno de los seis niveles.

**Tabla 4** Descripción e intervalos de clasificación de NDMI y MSI

Categoría	Intervalo del valor del IV	Descripción del NDMI	Descripción del MSI
1	-1:0	Cobertura del dosel casi inexistente-No hay indicios de humedad	Muy bajo contenido de humedad
2	0.000001:0.2	Cobertura del dosel media-baja y estrés hídrico alto	Bajo contenido de humedad
3	0.200001:0.4	Cobertura del dosel media-alta y estrés hídrico bajo	Moderadamente bajo contenido de humedad
4	0.400001:0.6	Cobertura del dosel alta, sin estrés hídrico	Moderadamente alto contenido de humedad
5	0.600001:0.8	Cobertura del dosel muy alta, sin estrés hídrico	Alto contenido de humedad
6	0.800001:1	Cobertura total del dosel, sin estrés hídrico/anegamiento	Muy alto contenido de humedad

Fuente: EOS, 2021

### 2.2.3 Identificación de los servicios ecosistémicos más importantes brindados por los árboles en cuatro tipologías de sombra asociadas al cultivo de café

Los servicios ecosistémicos (SE) son esos beneficios que percibe el ser humano provenientes de los procesos de los ecosistemas, donde la biodiversidad arbórea tiene un impacto directo en la calidad y cantidad de estos beneficios (De Leijster *et al.*, 2021; Souza *et al.* 2012). Diferentes autores han demostrado que los SAF son una forma de agricultura que, dependiendo del manejo, promueve la conservación de la biodiversidad por la plantación y retención de árboles nativos y no nativos (Gagliardi *et al.*, 2021). La expansión de los SAF en las diferentes regiones tropicales del planeta ha sugerido un nuevo paradigma para la conservación, incluye a los paisajes agrícolas como un componente esencial en las estrategias de manejo y conservación de la biodiversidad (p.ej., sistemas multiestratos con perennes: cafetales y cacaotales) (Vasallo-Rodríguez *et al.*, 2020).

Este estudio está basado en conocer la perspectiva de los productores de café y los técnicos de extensión acerca de los SE de cuatro tipos de sombra asociadas al SAF-C en el CBCL. Allinne *et al.* (2016) clasificaron cinco tipos de SAF con café derivado de la ya hecha por Toledo y Moguel (2012): (1) Árboles leguminosos y otras plantas, (2) plátanos y otras plantas, (3) únicamente árboles frutales o forestales, (4) solo árboles leguminosos y (5) sin sombra o monocultivo. Para este estudio, se seleccionaron cuatro tipologías basadas en los árboles que se encuentran en asocio al café y en función de la importancia para los productores de las zonas de estudio (**Tabla 5**).

Este estudio se enfocó en buscar diferencias significativas entre la percepción de los productores de café de los SE de una forma amplia y los técnicos de extensión. Paudyal *et al.* (2015) cuantificaron SE de forma participativa con expertos y habitantes de las comunidades mediante entrevistas semiestructuradas, censos, grupos focales y herramientas SIG en bosques manejados de Nepal; encontraron fuertes diferencias entre el valor percibido de los SE por la gente local, los expertos, clases sociales y géneros. Paudyal *et al.* (2020) mencionan que la provisión de SE está fuertemente influenciada mediante la silvicultura y el manejo brindado a las áreas de trabajo/cultivo.

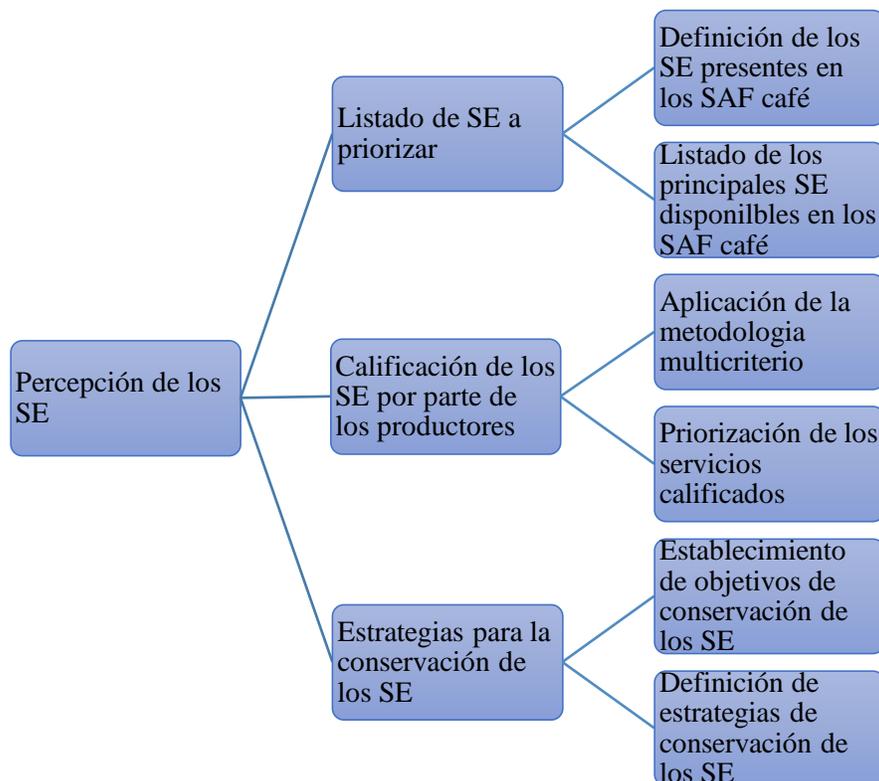
**Tabla 5** Tipologías de sombra asociadas a los sistemas agroforestales con café en Honduras

SAF	Tipología	Código SAF	Dosel de sombra principal	Dosel de sombra secundaria	Observación
1	Café + pino	C-P	Especies de árboles del género <i>Pinus</i>	No hay	El dosel de sombra está dominado únicamente por especies de árboles del género <i>Pinus</i> con una densidad de 50-100 árboles ha <sup>-1</sup> .
2	Café + inga	C-I	Especies de árboles del género <i>Inga</i> . Especie más utilizada para el café y el cacao en Mesoamérica (Cannavo <i>et al.</i> , 2011).	No hay	El dosel de sombra está dominado únicamente por especies de árboles del género <i>Inga</i> con una densidad de 50-100 árboles ha <sup>-1</sup> .
3	Café + maderable + especie de uso múltiples	C-Ma-EUM	Especies de árboles maderables	Especies de uso múltiple (fijadoras de nitrógeno)	El dosel de sombra está dominado por especies de árboles maderables con una densidad de 50-100 árboles ha <sup>-1</sup> y especies de uso múltiple con una densidad de 25-50 árboles ha <sup>-1</sup> .
4	Café + especie de uso múltiple + Frutales	C-EUM-F	Especies de árboles de uso múltiple (fijadores de nitrógeno, etc.)	Especies de árboles con fines de producción de frutas: musáceas, cítricos, etc.	El dosel de sombra está dominado por especies de árboles de uso múltiple con una densidad de 50-100 árboles ha <sup>-1</sup> y especies frutales con una densidad de 25-50 árboles ha <sup>-1</sup> .

Los productores de café y los técnicos de extensión fueron investigados mediante la técnica de la encuesta y se hicieron cinco grupos focales con productores que estaban en algún tipo de asociación u

organización de productores de café y escuelas de aprendizaje (ECA<sup>5</sup>). Con la encuesta se logró recolectar información acerca de las variables sociales, aspectos culturales del cultivo de café, prácticas de manejo de los árboles asociados a la finca, así como la identificación, categorización y valoración de los SE presentados.

Arango *et al.* (2020) en Colombia midieron los SE aplicando una metodología de clasificación y jerarquización (**Figura 2**), acerca de los bienes y servicios obtenidos de los árboles en sus fincas de *café*. Los SE fueron identificados por FAO (2018), basados en una herramienta para la gestión de los suelos que, posteriormente, Arango *et al.* (2020) adaptaron para utilizarlo en talleres con 15 productores de café en Colombia. Esta misma metodología fue también adaptada para este estudio llevado a cabo con productores y técnicos del CBCL en el occidente de Honduras.



**Figura 2** Mapa conceptual para la valoración y priorización de los servicios ecosistémicos brindados por los árboles asociados al café en el corredor biológico Cacique Lempira

Fuente: Arango *et al.*, (2020).

Para este estudio, se encuestó a 228 productores de café distribuidos en todo el CBCL y se hicieron cinco grupos focales con un número promedio de 10 personas por cada grupo focal. En total, la información recolectada representa a 278 productores de café, quienes brindaron información cultural, social, aspectos de manejo de sus parcelas y la valoración e identificación de los SE más importantes en cuatro tipologías de sombra asociadas al café investigadas. Además de productores, se aplicó la encuesta a 40 técnicos de extensión que hacen su labor de capacitadores en el CBCL. Con esto, el estudio tuvo una injerencia de 318 individuos intervenidos, distribuidos entre productores de café y técnicos.

<sup>5</sup> Escuelas de campo agroforestal

La estrategia de recolección de datos en campo fue mediante una cadena de referencias y por conveniencia basado en los individuos que habían sido encuestados previamente. Los grupos focales se realizaron con productores asociados a empresas cafetaleras y aquellos organizados en ECA. La metodología de grupos focales es una entrevista grupal de personas con características similares que provoca autoexplicaciones de los participantes de interés (Hamui-Sutton y Varela-Ruiz 2013).

Para conocer aspectos generales de los árboles que están asociados al cultivo de café y la ubicación de las fincas en el CBCL, se hicieron consultas a los productores valoradas del 1 al 5 (donde 1=nada y 5=muchísimo). Además, para categorizar los SE, los encuestados seleccionaban los tres SE más importantes y los valoraban del 1 al 3 (siendo 1 *más importante*, 2 *medianamente importante* y 3 *menos importante*).

Se hizo la selección de los 11 SE más importantes brindados por los árboles asociados al cultivo de café y se presentaron a los individuos encuestados para que hicieran la valoración y categorización de estos beneficios tomando como referencia la tipología de sombra presente en su parcela de café (**Tabla 6**). En los grupos focales, los productores eligieron los beneficios y los prejuicios más importantes de las cuatro tipologías de sombra desde su conocimiento y la experiencia como productores de café.

**Tabla 6** Identificación de los servicios ecosistémicos más importantes presentados a los productores de café en el corredor biológico Cacique Lempira

<b>Categoría de los Servicios Ecosistémicos</b>	<b>Función Evaluada</b>
1. Servicios ecosistémicos de provisión: Bienes tangibles o materiales que provienen de los ecosistemas con un beneficio directo a las personas.	1. Frutas para consumo y venta 2. Producción de madera
2. Servicios ecosistémicos de Regulación: procesos complejos mediante los cuales se regulan las condiciones del ambiente en que los seres humanos realizan sus actividades.	1. Mejora las condiciones laborales 2. Control de plagas y enfermedades 3. Mejora la fertilidad del suelo 4. Vigoridad de la planta de café 5. Calidad y cantidad de agua 6. Calidad del grano 7. Microclima y sombra 8. Control de eventos extremos
3. Servicios ecosistémicos de Soporte: procesos ecológicos básicos que mantienen y aseguran el mantenimiento adecuado de los ecosistemas permitiendo los flujos de servicios de provisión, de regulación y culturales.	1. Hábitat de especies de flora y fauna
4. Servicios ecosistémicos Culturales: Beneficios no materiales que las personas obtienen a través del enriquecimiento espiritual, la recreación y la apreciación de la belleza.	SE no evaluados para este estudio

*Fuente: adaptado de Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura FAO-Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible – MADS, (Arango et al., 2020; Sharma et al., 2019; FAO, 2018).*

Para conocer el estado actual de los SE, se pidió a todos los productores de café encuestados que hicieran una valorización de los beneficios percibidos según la tipología de SAF-C con la que contaban en su sistema productivo. Se presentaron tres opciones de respuesta según el estado actual del SE. La primera opción fue *mejorarse*, la cual significa que el SAF-C como tal debería aumentar la generación del SE presentado; la segunda opción fue *bien en la condición actual*, que significa que el SE está brindando los beneficios necesarios para la familia y como tercera opción fue *reducirse o perderse*, lo que significa que el SE no tiene importancia para el bienestar de la familia y que lo mejor es que se pierda.

### 2.3 Análisis estadístico

En la primera parte del estudio, para realizar el análisis del paisaje en el CB Cacique Lempira, se modelaron cuatro IV ponderando los niveles de píxeles en categorías de clasificación según bibliografía consultada. Luego de tener los valores ponderados por cada categoría de los IV, se hizo la separación de los valores por los cinco tipos de usos de suelos seleccionados.

Para buscar asociación entre los usos de suelo y los IV, se utilizaron tablas de contingencia y a partir del estadístico *ChiCuadrado* y su correspondiente *p-valor*, se identificó la significancia de la asociación (p-valor *menor a 0.05*). Luego, para visualizar la asociación significativa, se realizó un análisis de correspondencias simple y se obtuvo el gráfico *bi-plot*. Además, para complementar la información observada en el gráfico *bi-plot*, se estimó la distancia *Euclidia* con el objetivo de encontrar los usos de suelos con mayor similitud. Las distancias se transformaron a porcentaje relativizando con respecto a la mayor distancia, es decir, los porcentajes cercanos a 100 reflejan la distancia más larga y los cercanos a cero la más corta.

Debido al desbalance entre el número de informantes encuestados (228 productores y 40 técnicos), los análisis se realizaron por separado (productores y técnicos). Con los datos separados, se llevó a cabo un análisis mediante el uso de tablas de contingencia y a partir del estadístico *ChiCuadrado* y su correspondiente *p-valor*, se identificó la significancia de la asociación (p-valor *menor a 0.05*) de los SE y los SAF-C estudiados. Esto se hizo tanto para productores, así como para técnicos. Luego de buscar las asociaciones entre los SE y las tipologías de SAF-C, se hizo la división de las tres categorías de importancia evaluadas de los SE (*más importante, medianamente importante y menos importante*) y la valoración de cada uno de ellos (*mejorarse, bien en la condición actual, reducirse o perderse*), separadas por cada tipología de SAF-C. Estos procesos fueron llevados a cabo con el uso del *software* estadístico *InfoStat* (Di Rienzo *et al.* 2020).

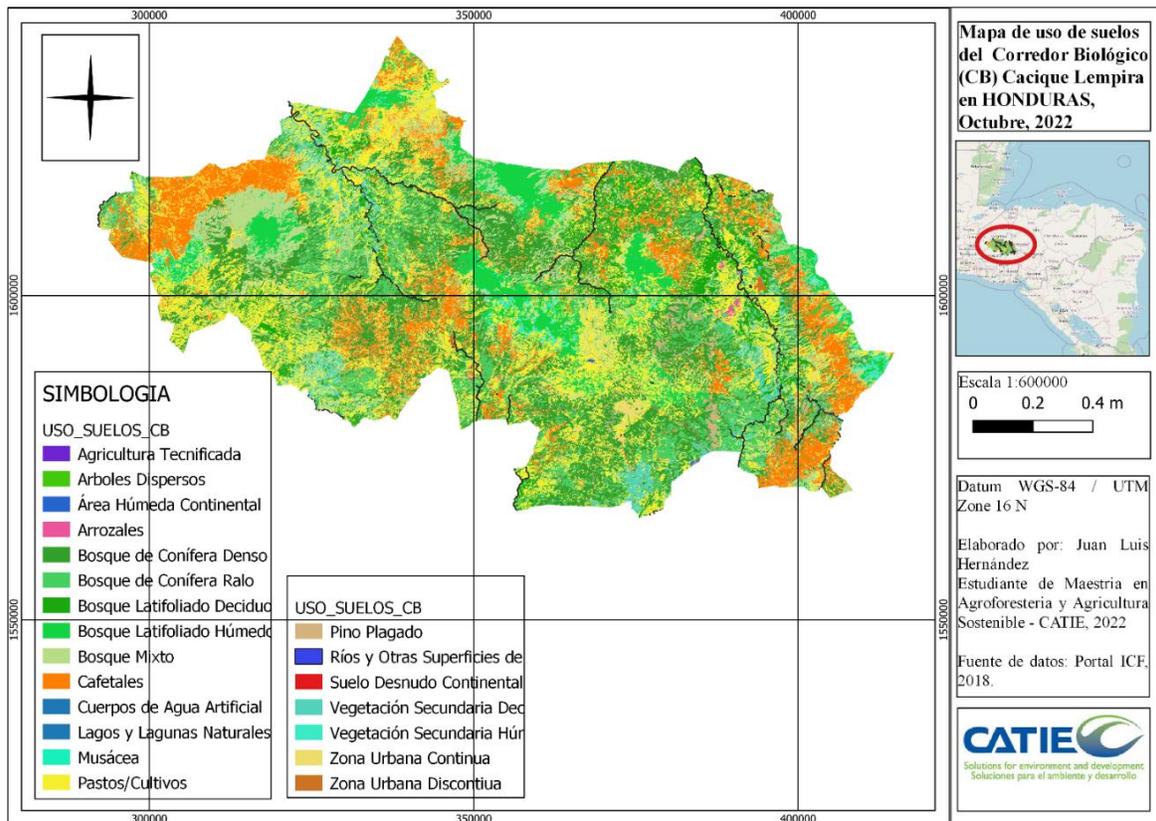
El análisis de la encuesta en los aspectos sociales, culturales y de manejo se llevó a cabo mediante estadística descriptiva a partir de medias y porcentajes. Para visualizar la asociación significativa de los SE categorizados y valorados por los productores de café, se elaboraron gráficos especiales de barras horizontales y verticales para representar escalas de tipo *Likert*, utilizando el lenguaje de programación *RStudio* (R-Core-team, 2022) y la librería de *ggpp2* (Wickham, 2016).

## 3 Resultados

### 3.1 Cobertura y uso del suelo del CBCL

El *Bosque Latifoliado* (B-L) (combinación de B-L deciduo y B-L húmedo) representa el 17.34%, el *Bosque de Conífera* (B-C) (combinación de B-C ralo y B-C denso) representa el 33%, el *Bosque Mixto* (B-M) representa el 6.81%, los *Pastos y Cultivos* (P-C) (combinación de P-C, agricultura tecnificada y

arrozales) representa el 22.36% y los *Cafetales* (SAF-C) representa el 13.58 %, haciendo un total de 93.03% de cobertura de las 465,028.47 hectáreas que tiene todo el CBCL (**Figura 3**).



**Figura 3** Mapa de cobertura y uso de suelos del corredor biológico Cacique Lempira en Honduras.

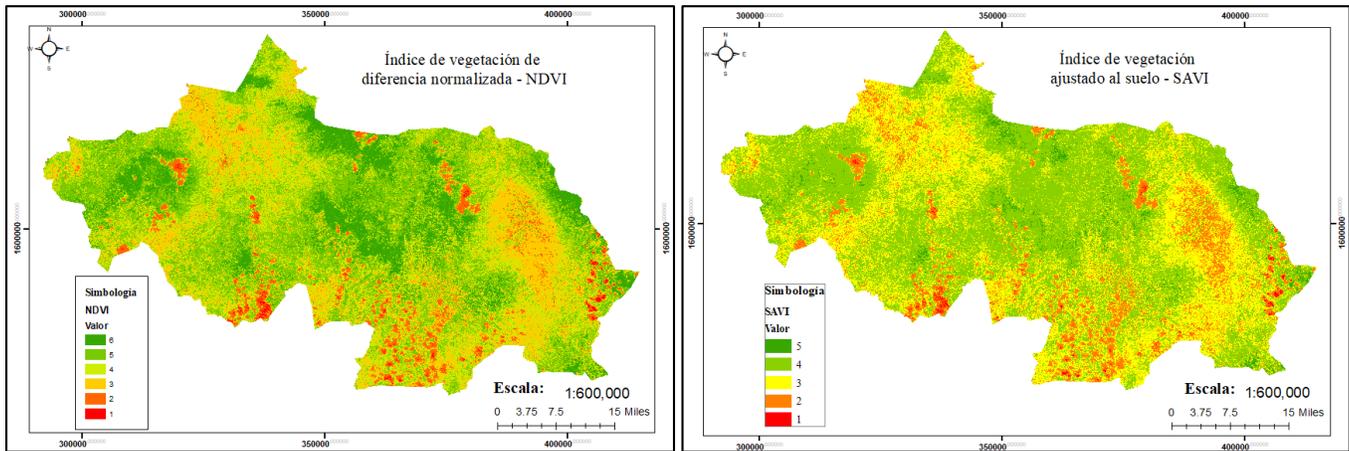
Fuente: elaboración propia (2022), (ICF; IHCAFE, 2018).

### 3.2 Índices de vegetación (IV)

#### 3.2.1 Índices de verdor y salud de la vegetación en el corredor biológico Cacique Lempira: NDVI y SAVI

Los índices de verdor fueron utilizados de forma complementaria para medir la salud vegetal y las asociaciones entre los cinco usos de suelos seleccionados dentro del CBCL (**Figura 4**). Como ya se ha mencionado anteriormente, el SAVI hace un ajuste de la reflectancia causada por el suelo, reduciendo los valores en comparación a NDVI, el cual se satura cuando exista demasiada cobertura vegetal. Por lo cual, NDVI tiene seis niveles de clasificación y SAVI solo logró completar cinco con las condiciones de cobertura existentes y en esa época del año en el CBCL.

Para el NDVI, las categorías con los valores ponderados más altos en el CB son las categorías 5 (*Moderadamente alta vegetación*) con un 33.79% del área y la categoría 4 (*Moderadamente baja vegetación*) con un 28.3%. Las categorías 1 (*Suelo desnudo/agua*) y 6 (*Alta vegetación*) tuvieron valores ponderados de 0.45% y 12.62%, respectivamente. En el caso del NDVI, las categorías con los valores ponderados más altos en el CB son las categorías 4 (*Cobertura del dosel alta*) con un 48.56% y la categoría 3 (*Cobertura del dosel media-alta*) con un 37.25%. Las categorías 1 (*Infraestructura y/o nubes*) y 5 (*Cobertura total del dosel*) tuvieron valores de 0.45% y 0% respectivamente.



**Figura 4** Índices de verdor en el corredor biológico Cacique Lempira: NDVI y SAVI

Descripción de los valores (intervalos): -1:0=1; 0.000001:0.2=2; 0.200001:0.4=3; 0.400001:0.6=4; 0.600001:0.8=5; 0.800001:1=6.

Los niveles más altos de NDVI los tiene el B-M y B-L con un 75% y 63%, respectivamente, del área de cobertura entre las categorías 5 y 6, definidas como *Moderadamente alta* y *Alta vegetación*. Seguido de estos están el SAF-C y el B-C con un 84% y 74%, en las categorías 4 y 5 de la clasificación, siendo *Baja* y *moderadamente baja vegetación*. Mientras que, como era de esperarse, P-C tiene un 83% en las categorías 3 y 4, correspondiendo a *Baja* y *moderadamente baja vegetación*.

**Tabla 7** Usos de suelo y niveles ponderados (%) de los índices de verdor y salud vegetal en el corredor biológico Cacique Lempira

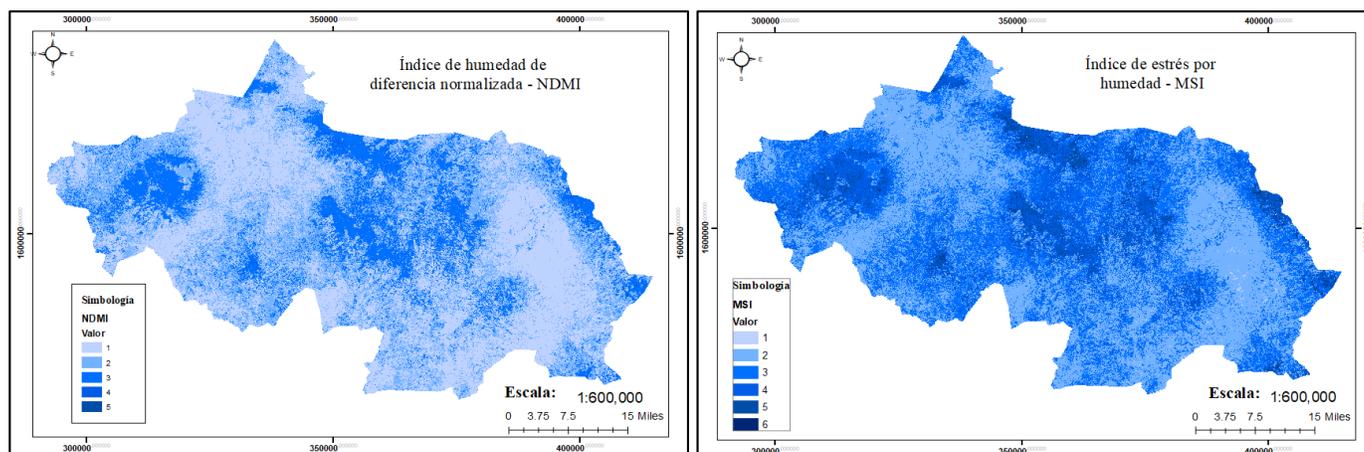
Categoría	B-L (%)		B-C (%)		B-M (%)		SAF-C (%)		P-C (%)	
	NDVI	SAVI	NDVI	SAVI	NDVI	SAVI	NDVI	SAVI	NDVI	SAVI
1	0.22	0.22	0.47	0.47	0.49	0.49	0.69	0.69	0.38	0.38
2	3.56	6.56	4.96	7.48	4.76	6.16	3.48	4.58	7.90	24.08
3	13.92	27.50	11.60	35.50	5.10	15.51	4.23	20.62	43.62	58.79
4	19.66	59.06	32.15	55.24	14.96	71.12	23.42	73.17	34.86	16.69
5	29.73	6.67	41.48	1.31	41.57	6.72	60.39	0.94	12.64	0.06
6	32.92	0.00	9.35	0.00	33.12	0.00	7.80	0.00	0.60	0.00
<b>TOTAL</b>	<b>100.00</b>	<b>10.00</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>						

Descripción: B-L: bosque latifoliado; B-C: bosque de conífera; B-M: bosque mixto; SAF-C: cafetales; P-C: pastos y cultivo. Celdas color verde representan el 1<sup>ero</sup> lugar; celdas color amarillo el 2<sup>do</sup> lugar. NDVI 1: Suelo desnudo/agua; 2: Muy bajo vegetación; 3: Bajo vegetación; 4: Moderadamente baja vegetación; 5: Moderadamente alta vegetación; 6: Alta vegetación; SAVI 1: Infraestructura o nubes; 2: Suelo descubierto o poca vegetación; 3: Cobertura del dosel media-alta; 4: Cobertura del dosel alta; 5: Cobertura del dosel muy alta; 6: Cobertura total del dosel.

SAVI hizo un ajuste fuerte en los valores para todos los usos de suelo, especialmente en B-L y B-M. SAF-C tuvo el valor más alto del índice SAVI con un 94 % de su cobertura en las categorías 3 y 4 de la clasificación, denominado *Cobertura del dosel media-alta* y *Cobertura del dosel alta*, seguido por B-C con un 91%, B-M y B-L con 87% cada uno, siempre en las categorías 3 y 4 de la clasificación, denominado *Cobertura del dosel media-alta* y *Cobertura del dosel alta*. Nuevamente, el uso de suelos de P-C se quedó en el nivel más bajo, con un 84% en las categorías 2 y 3, que son *suelo descubierto y/o poca vegetación* y *cobertura del dosel media-alta*.

### 3.2.2 Índices de humedad en el corredor biológico Cacique Lempira: NDMI y MSI

Para el NDMI, las categorías con los valores ponderados más altos en el CB son las categorías 1 (*Cobertura del dosel casi inexistente-No hay indicios de humedad*), con un 45.11% y la categoría 2 (*Cobertura del dosel media-baja y estrés hídrico alto*), con un 34.06%. Para el índice MSI, las categorías con los valores ponderados más altos en el CB son las categorías 2 (*Bajo contenido de humedad*), con un 44.70% y la categoría 3 (*Moderadamente bajo contenido de humedad*), con un 34.15% (**Figura 5**).



**Figura 5** Índices de humedad en el corredor biológico Cacique Lempira: NDMI y MSI

Descripción de valores (intervalos):  $-1:0=1$ ;  $0.000001:0.2=2$ ;  $0.200001:0.4=3$ ;  $0.400001:0.6=4$ ;  $0.600001:0.8=5$ ;  $0.800001:1=6$ .

Los niveles más altos de NDMI los tiene el B-M con un 81% de ponderación en las categorías 2 y 3, *cobertura del dosel media-baja y estrés hídrico alto y cobertura del dosel media-alta y estrés hídrico bajo*, respectivamente. En el caso del B-L, un 41.18% de la cobertura entra en la categoría 3 y un 31% en la categoría 1, que corresponden a *cobertura del dosel media-alta y estrés hídrico bajo y cobertura del dosel casi inexistente-No hay indicios de humedad*, respectivamente. El SAF-C tiene un nivel dos muy marcado (61%) y los P-C presentan un nivel uno bastante significativo (78.76%). En el caso del B-C, los valores están en un 80% entre los niveles 1 y 2 (**Tabla 8**).

Para el MSI, los valores más altos los tuvo el B-M con un 69.92% en los niveles 3 y 4, *moderadamente bajo contenido de humedad y moderadamente alto contenido de humedad*, respectivamente. El SAF-C se encontró en el nivel 3 con un 61% y los P-C en el nivel 2 con un 77.86%, siendo *moderadamente bajo contenido de humedad y bajo contenido de humedad*, respectivamente. Los usos de suelo de B-L y B-C no tuvieron valores tan claros, ya que se distribuyeron entre los valores 2, 3 y 3. Estos datos se presentan a continuación (**Tabla 8**).

**Tabla 8** Usos de suelos y niveles ponderados (%) de los índices de humedad (NDMI, MSI) en el corredor biológico Cacique Lempira

Categoría	B-L(%)		B-C(%)		B-M(%)		SAF-C(%)		P-C(%)	
	NDMI	MSI	NDMI	MSI	NDMI	MSI	NDMI	MSI	NDMI	MSI
1	30.59	0.18	39.54	0.18	16.36	0.07	22.38	0.04	78.76	0.89
2	26.00	30.42	40.55	30.42	33.51	16.30	60.76	22.34	19.43	77.86
3	41.18	26.15	19.46	26.15	47.93	33.69	16.56	60.85	1.78	19.46
4	2.23	28.86	0.46	28.86	2.19	36.23	0.30	15.04	0.03	1.62
5	0.00	13.62	0.00	13.62	0.00	12.95	0.00	1.62	0.00	0.15

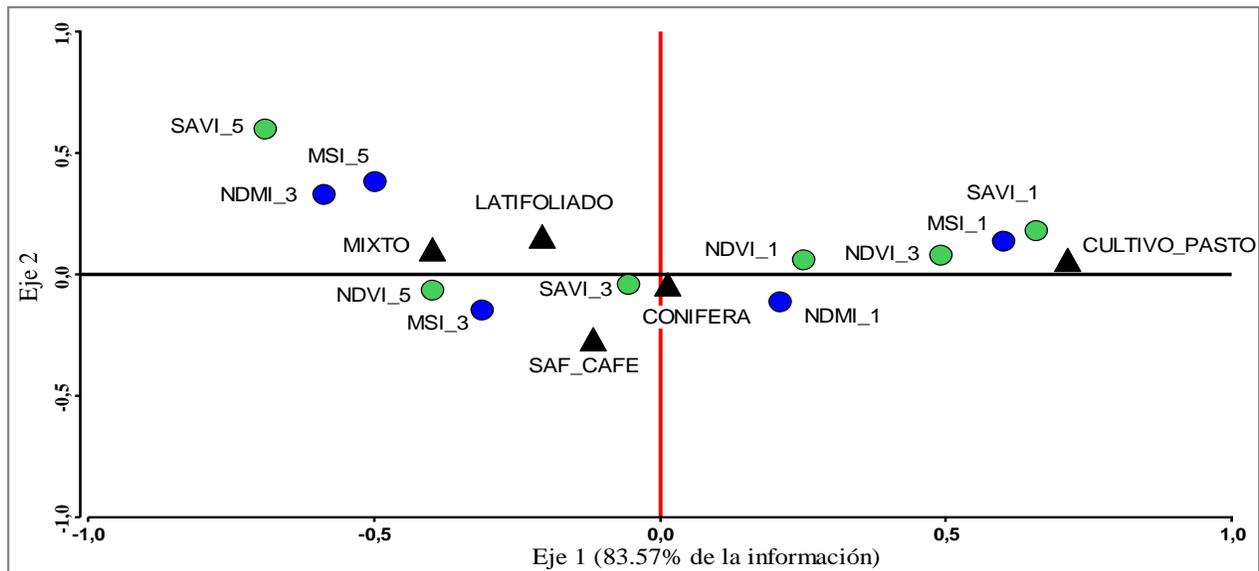
6	0.00	0.77	0.00	0.77	0.00	0.77	0.00	0.11	0.00	0.01
<b>TOTAL</b>	<b>100.00</b>	<b>10.00</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>						

Descripción: B-L: bosque latifoliado; B-C: bosque de conífera; B-M: bosque mixto; SAF-C: cafetales; P-C: pastos y cultivo. Celdas color verde representan el 1<sup>er</sup> lugar; celdas color amarillo el 2<sup>do</sup> lugar. NDMI 1: Cobertura del dosel casi inexistente-No hay indicios de humedad; 2: Cobertura del dosel media-baja y estrés hídrico alto; 3: Cobertura del dosel media-alta y estrés hídrico bajo; 4: Cobertura del dosel alta, sin estrés hídrico; 5: Cobertura del dosel muy alta, sin estrés hídrico; 6: Cobertura total del dosel, sin estrés hídrico/anegamiento; MSI 1: Muy bajo contenido de humedad; 2: Bajo contenido de humedad; 3: Moderadamente bajo contenido de humedad; 4: Moderadamente alto contenido de humedad; 5: Alto contenido de humedad; 6: Muy alto contenido de humedad.

### 3.3 Asociación entre las categorías ponderadas de los índices de vegetación y los usos de suelo del corredor biológico Cacique Lempira

De acuerdo con el análisis con tablas de contingencia, se identificó que existe una asociación significativa entre los cinco usos de suelo y las tres categorías ponderadas de los cuatro IV en el CBCL ( $X^2=369.4$ ;  $p$ -valor = 0.0001). Cabe recalcar que esta asociación es válida en el tiempo y espacio que fueron calculados los IV y con el mapa de usos de suelo utilizado para esa fecha.

La **Figura 6** explica un 96.64% de los datos asociados y el Eje 1 explica la mayor cantidad de información con un 83.57%. El gráfico muestra una correlación positiva de los niveles altos de IV con los usos de suelo que tienen una cobertura arbórea. Por ejemplo, los niveles más alto de SAVI, NDMI, NDVI y MSI están cerca de B-L y B-M. En tanto los niveles más bajos están cercanos a P-C.



**Figura 6** Gráfico bi-plot de correlación entre los niveles de índices de vegetación y los usos de suelo del corredor biológico Cacique Lempira.

Descripción: Triángulos negros = usos de suelo (Bosque latifoliado, bosque de conífera, bosque mixto, cafetales y pastos y cultivo). Círculos verdes = NDVI y SAVI (1= cobertura arbórea baja; 2=cobertura arbórea media; 3=cobertura arbórea alta). Círculos azules NDMI y MSI (1=sin indicios de humedad; 2=contenido de humedad medio; 3=contenido de humedad alto).

Los niveles más altos de asociación con base en las categorías de índices de vegetación están entre los tres usos de suelo de bosque. Se identifica una relación directa entre el uso de suelos de B-L y B-M con una cercanía del 20% y estos dos se relacionan con B-C con una cercanía del 47%. El SAF-C y el P-C

son los dos usos de suelo con las diferencias más grandes; las distancias entre estos dos son de 100%. El tipo de bosque que más se acerca a al SAF-C y a P-C es el B-C, con una cercanía del 50% y 64% respectivamente.

**Tabla 9** Distancias Euclidia entre los usos de suelo según las categorías ponderadas de los IV

Cruces comparativos de usos de suelo		Distancia de Euclides	Porcentaje de distancia
B-L	B-M	0.55	20%
B-C	B-L	1.29	47%
B-C	B-M	1.3	47%
B-C	SAF-C	1.38	50%
B-C	P-C	1.76	64%
P-C	B-L	2.23	81%
B-M	SAF-C	2.32	84%
B-L	SAF-C	2.54	92%
P-C	B-M	2.63	95%
P-C	SAF-C	2.76	100%

*Descripción: B-L=bosque latifoliado; B-C=bosque de conífera; B-M=bosque mixto; SAF-C=cafetales; P-C= pastos y cultivos. La distancia en el plano del gráfico bi-plot se explica en porcentajes que van de 0 a 100%. Valores cercanos a 100 tendrán las distancias más largas entre los usos de suelo y valores cercanos a cero tendrán distancias más cortas entre los usos de suelo.*

### 3.4 Aspectos sociales, culturales y técnicos de los productores de café en el corredor biológico Cacique Lempira

El 78% de los individuos visitados fueron hombres (92% agricultores) y un 22% mujeres (55% agricultoras y 33% amas de casa). Están distribuidos en los departamentos de Comayagua (23 %), Copán (14%), Intibucá (8%), La Paz (20%), Lempira (12%), Ocotepeque (8%) y Santa Bárbara (14%).

El 35% de los productores de café investigados tienen más de 50 años, un 53% están entre 31 y 50 y el restante 14% son menores de 30 años. De estos, un 40% mencionan que se han dedicado al rubro del café por más de 15 años, un 40% están entre los 6 y 15 años y el restante 12% tienen menos de 5 años de experiencia de trabajar con café. En cuanto a escolaridad, un 65% cuenta con un nivel educativo entre primaria completa e incompleta, un 24% tienen educación media completa e incompleta y apenas un 12% mencionó que habían logrado ingresar a la universidad.

#### 3.4.1 Aspecto cultural de los productores de café del corredor biológico Cacique Lempira

De los cuatro SAF-C estudiados, un 34% se clasifica bajo la tipología de C-Ma-EUM, un 32% C-EUM-F, 22% C-I y el 11% C-P. Se ha observado que en el CBCL los productores de café utilizan muchas especies con fines de uso múltiple y frutales para el consumo del hogar y la venta. Al consultar cuáles han sido los actores claves para el uso de árboles asociados al café, el 37% mencionó que ha sido por influencias de otros productores de café, un 37% por causas de instituciones públicas y el ente rector y un 26% por motivación de organizaciones cafetaleras y otros proyectos.

Entre las estrategias más importantes utilizadas por las instituciones que trabajan con los productores de café, un 67% mencionó que las capacitaciones son una de las estrategias más importantes para motivar el uso de árboles en fincas cafetaleras. Otros factores que motivan el uso de árboles en finca son el tema cultural con un 52% y objetivos económicos con un 21%. Mientras que los factores que provocarían un cambio en el uso de árboles en finca o el cambio de cafetales a otros usos están ligados

con riesgo climático (52% de los entrevistados) y un 47% en los altos costos de sus parcelas de café y la baja en la producción.

### 3.5 Servicios ecosistémicos de cuatro tipologías de sombra asociadas a los sistemas agroforestales con café según la perspectiva de los productores de café y los técnicos de extensión que los atienden en el corredor biológico Cacique Lempira

Los productores(as) visitados indican no saber *nada* de la cercanía de sus fincas a las AP (55.7% de los encuestados) y a los CB (70.2% de los encuestados). Esta situación refleja la necesidad de campañas de divulgación entre los pobladores para que reconozcan las zonas de manejo especial en su territorio/comunidad. No obstante, la mayoría de los productores (91.2%) coinciden en la importancia de los árboles para sus fincas de café. Con respecto al tema productivo, un 88.2% de los encuestados indicó que los árboles tienen *mucha* y *muchísima* importancia para la producción de café y un 86% para el bienestar de la finca y su familia (Tabla 10).

**Tabla 10** Beneficios de los árboles asociados al café y la ubicación de la finca en el corredor biológico Cacique Lempira

Preguntas sobre la finca y los árboles en asocio	Nada	Muy poco	Poco	Mucho	Muchísimo	Total
1. Beneficios de los árboles para la producción	5.3%	0.4%	6.1%	39.5%	48.7%	100%
2. Aporte de los árboles para el bienestar de la finca/familia	6.1%	0.9%	6.6%	34.2%	52.2%	100%
3. Importancia de los árboles para la finca de café	2.6%	0.4%	5.7%	39.9%	51.3%	100%
4. Sabe del AP donde se ubica la finca de café	55.7%	1.8%	21.9%	14.5%	6.1%	100%
5. Sabe del CB donde se ubica la finca de café	70.2%	0.9%	16.7%	8.8%	3.5%	100%

*Descripción: celdas de color verde representan el valor más importante; celdas en color amarillo representan el segundo valor más importante*

#### 3.5.1 Servicios ecosistémicos de las áreas cafetaleras visto desde la percepción de los productores de café del corredor biológico Cacique Lempira

De los 228 productores encuestados, un 62% no conocían el término de SE, aunque algunos de estos ya lo habían escuchado, y apenas un 38% mencionaban que lo conocían un poco (Tabla 11).

Del total de productores encuestados, 77 (34%) indicaron que el SE que tiene el primer lugar en importancia es el de *provisión de leña y madera*, seguido por la *regulación de microclima/sombra* (58 menciones, 25%). El SE que tienen el segundo lugar en importancia según los productores visitados fue el de *aprovisionamiento de frutas para consumo y venta* (43 menciones, 19%), seguido por *mejoramiento de la fertilidad del suelo* (33 menciones, 14%). Y, por último, el SE que obtuvo el tercer lugar en importancia por los productores de café visitados fue el de *regulación del microclima y sombra* (37 menciones, 16%) y la *provisión de leña y madera* (35 menciones, 15%).

En un panorama general, el SE de *provisión de leña y madera* fue el que tuvo la mayor cantidad de menciones (139 menciones, 20%), seguido por la *Regulación del microclima y sombra* (127, menciones, 18%) y la *provisión de frutas para consumo y venta* (82 menciones, 12%), de un total de 684 menciones registradas.

**Tabla 11** Categorización de los servicios ecosistémicos provistos por los cafetales realizada por los productores de café del corredor biológico Cacique Lempira

Servicios Ecosistémicos presentados a los productores de café	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Total de menciones
Provisión de madera/leña	77	27	35	139
Regulación del microclima/sombra	58	32	37	127
Frutas para consumo/venta	19	43	20	82
Mejora la fertilidad del suelo	17	33	21	71
Mejora la calidad/cantidad de agua	21	14	27	62
Mejora la calidad del grano	19	23	14	56
Hábitat para especies de fauna	5	14	21	40
Vigorosidad de la planta de café	5	12	23	40
Control de eventos extremos	3	18	14	35
Control de plagas y enfermedades	2	9	7	18
Mejores condiciones laboral	2	3	9	14
<b>Total de productores</b>	<b>228</b>	<b>228</b>	<b>228</b>	<b>684</b>

Descripción: celdas de color verde representan el servicio más mencionado; celdas en color amarillo representan el segundo servicio más mencionado y celdas de color fucsia representan el tercer servicio más mencionado.

Para los productores de café, la práctica más importante por realizar en los árboles de sombra para seguir manteniendo los beneficios, en primera instancia, fueron las *podas* (59.2%) y la *reforestación* (13.6%). En cuanto a una segunda práctica importante, los productores mencionaron la *reforestación* (23.7%), pero hubo un número significativo de productores que no tuvo respuesta cuando se le consultó sobre la segunda práctica (39%) (Tabla 12).

**Tabla 12** Prácticas de manejo de los árboles de sombra en los cafetales del corredor biológico Cacique Lempira

Prácticas de manejo de los árboles en el SAF-C	Conteo práctica 1	Porcentaje	Conteo práctica 2	Porcentaje
Control de malezas	0	0.0	5	2.2
Control de plagas	5	2.2	5	2.2
Fertilización	10	4.4	30	13.2
Podas	135	59.2	36	15.8
Raleo	0	0.0	7	3.1
Reforestación	31	13.6	54	23.7
Sin respuesta	47	20.6	91	39.9
<b>Total</b>	<b>228</b>	<b>100</b>	<b>228</b>	<b>100</b>

Descripción: celdas de color verde representan la primera práctica más utilizada; celdas en color amarillo representan la segunda práctica más utilizada.

### 3.5.2 Servicios ecosistémicos provistos por los SAF-café desde la percepción de los técnicos de extensión que apoyan los productores de café en el corredor biológico Cacique Lempira

El 75% de los técnicos indicaron que ya conocían el concepto de SE y un 25% que no lo conocían, aunque sí lo habían escuchado. Según los datos de la Tabla 13, 15 técnicos (38%) mencionaron que la *provisión de leña y madera* es el SE número uno en importancia de los SAF-C, seguido de la *regulación del microclima/sombra* con 7 menciones (18%).

El SE número dos en importancia fue la *mejora en la calidad/cantidad de agua* (6 menciones, 15%) y en el nivel tres de importancia estuvo la *regulación del microclima/sombra* con 9 menciones (23%); por otra parte, el SE de *hábitat para especies de fauna* con 7 menciones (18%).

En un panorama general, el SE con mayor número de menciones por los técnicos de extensión fue el de *provisión de leña y madera* (21 menciones, 17.5%) y el de *regulación del microclima/sombra* (19 menciones, 16%) de un total de 120 menciones.

**Tabla 13** Categorización de los servicios ecosistémicos brindados por los SAF-C visto desde la perspectiva de los técnicos de extensión

SE presentados a los técnicos de extensión	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Total de menciones
Provisión de madera/leña	15	3	3	21
Regulación del microclima/sombra	7	3	9	19
Mejora la calidad/cantidad de agua	5	6	4	15
Frutas para consumo/venta	3	5	3	11
Mejora la calidad del grano	3	4	3	10
Control de plagas y enfermedades	4	5	0	9
Vigorosidad de la planta de café	3	2	4	9
Hábitat para especies de fauna	0	1	7	8
Control de eventos extremos	0	4	2	6
Mejora la fertilidad del suelo	0	4	2	6
Mejores condiciones laboral	0	3	3	6
<b>Total de productores</b>	<b>40</b>	<b>40</b>	<b>40</b>	<b>120</b>

*Descripción: celdas de color verde representan el servicio más mencionado; celdas en color amarillo representan el segundo servicio más mencionado.*

El 85% de los técnicos mencionó que la primera práctica de manejo a los árboles de sombra para conservar los SE debería ser el *raleo* y como segunda práctica la *reforestación* con un 27%. En esta segunda práctica, hubo un 30% de técnicos que no tuvieron respuesta.

### 3.6 Asociación de los servicios ecosistémicos categorizados y las cuatro tipologías de sombra asociadas a los cafetales

De acuerdo con el análisis de asociación entre los SE categorizados y las cuatro tipologías de sombra, para los técnicos de extensión no existe asociación significativa entre los 11 SE y las cuatro tipologías de SAF-C ( $X^2=99,72$ ;  $p$ -valor = **0,0775**). Mientras que, para los productores de café, sí existe asociación significativa entre los 11 SE y las cuatro tipologías de SAF-C utilizadas para este estudio ( $X^2=136.13$ ;  $p$ -valor = **0,0045**).

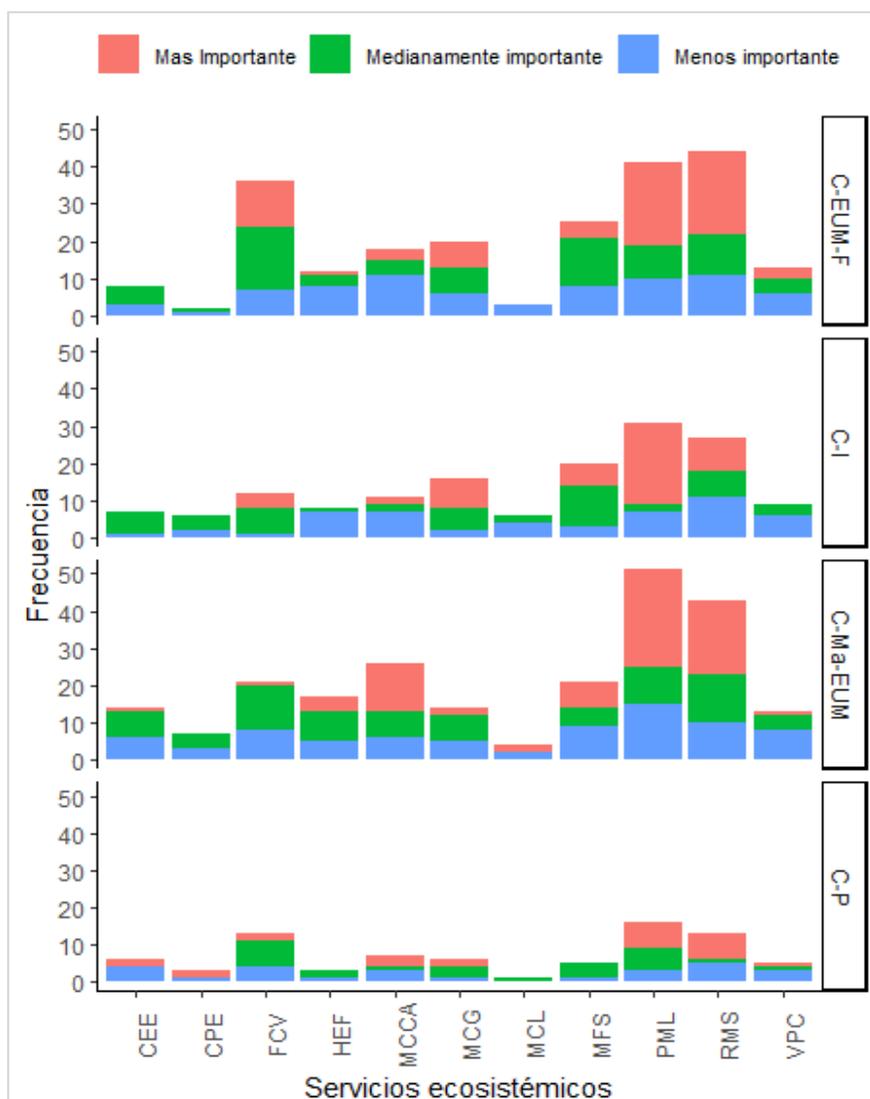
El SE priorizado como número uno por los productores de café en las cuatro tipologías de SAF-C fue la *provisión de madera y leña*. El segundo SE priorizado como importante varió por tipología, para la tipología de C-EUM-F fue *frutas para consumo y venta*, para C-I fue *mejora de la fertilidad del suelo*, para C-Ma-EUM fue *regulación del microclima y sombra* y para C-P fue el de *provisión de madera y leña*. En el tercer lugar de importancia de SE priorizados según tipología fueron: para la tipología de C-EUM-F *calidad y cantidad de agua y regulación del microclima y sombra* con mismo número de menciones. Para C-I y C-P fue el de *regulación del microclima y sombra* y para C-Ma-EUM fue el de *provisión de madera y leña*. Esta información se presenta en la **Tabla 14**.

**Tabla 14** Categorización de los 11 servicios ecosistémicos asociados a las cuatro tipologías de sombra de los SAF-C en el corredor biológico Cacique Lempira

Servicios ecosistémicos	Categorización	C-EUM-F	C-I	C-Ma-EUM	C-P
Calidad del grano	1	7	8	2	2
Calidad y cantidad de agua	1	3	2	13	3
Control de eventos extremos	1	0	0	1	2
Control de plagas y enfermedades	1	0	0	0	2
Frutas para consumo y venta	1	12	4	1	2
Hábitat para fauna	1	1	0	4	0
Provisión de madera y leña	1	22	22	26	7
Mejora de la fertilidad	1	4	6	7	0
Mejora de las condiciones laboral	1	0	0	2	0
Regulación del microclima y sombra	1	22	9	20	7
Vigorosidad de la planta de café	1	3	0	1	1
Calidad del grano	2	7	6	7	3
Calidad y cantidad de agua	2	4	2	7	1
Control de eventos extremos	2	5	6	7	0
Control de plagas y enfermedades	2	1	4	4	0
Frutas para consumo y venta	2	17	7	12	6
Hábitat para fauna	2	3	1	8	2
Provisión de madera y leña	2	9	2	10	7
Mejora de la fertilidad	2	13	11	5	4
Mejora de las condiciones laboral	2	0	2	0	1
Regulación del microclima y sombra	2	11	7	13	1
Vigorosidad de la planta de café	2	4	3	4	1
Calidad del grano	3	6	2	5	1
Calidad y cantidad de agua	3	11	7	6	3
Control de eventos extremos	3	3	1	6	4
Control de plagas y enfermedades	3	1	2	3	1
Frutas para consumo y venta	3	7	1	8	4
Hábitat para fauna	3	8	7	5	1
Provisión de madera y leña	3	10	7	15	3
Mejora de la fertilidad	3	8	3	9	1
Mejora de las condiciones laboral	3	3	4	2	0
Regulación del microclima y sombra	3	11	11	10	5
Vigorosidad de la planta de café	3	6	6	8	3
<b>Total</b>		<b>222</b>	<b>153</b>	<b>231</b>	<b>78</b>
<b>Conteo de SAF</b>		<b>74</b>	<b>51</b>	<b>77</b>	<b>26</b>

*Descripción: C-EUM-F=Café + especies de uso múltiple + maderables; C-I= café + especies del género inga; C-Ma-EUM= café + especies de árboles maderables + especies de uso múltiple; C-P= café + especies del género Pinus. Celdas de color verde representan el primer servicio más importante en los niveles; celdas en color amarillo representan el segundo servicio más importante en los niveles.*

Existen SE que en la categorización no llegaron a tener prioridad o nivel uno de importancia para los productores de café según la tipología del SAF-C. Por ejemplo, para C-EUM-F, los SE menos importantes fueron *control de eventos extremos*, *control de plagas y enfermedades* y *mejora de la condición laboral*. Para C-I, los SE menos importantes son *control de eventos extremos*, *control de plagas y enfermedades*, *hábitat para especies de flora y fauna*, *mejora de la condición laboral* y *Vigorosidad de la planta de café*. Para C-Ma-EUM, el SE menos importantes fue el de *control de plagas y enfermedades* y para C-P, los SE menos importantes fueron *hábitat para especies de flora y fauna*, *mejora de la condición laboral* y el de *mejoramiento de la fertilidad del suelo* (**Figura 7**).



**Figura 7** Gráfico de asociación entre los servicios ecosistémicos y las cuatro tipologías de SAF-C en el corredor biológico Cacique Lempira desde la perspectiva de los productores de café.

**Descripción:** **CEE**=Control de eventos extremos; **CPE**=Control de plagas y enfermedades; **FCV**=Frutas para consumo y venta; **HEF**= Hábitat para especies de fauna; **MCCA**= Mejoramiento en la calidad y cantidad de agua; **MCG**= Mejoramiento en la calidad del grano; **MCL**= Mejora condiciones laborales; **MFS**= Mejora la fertilidad del suelo; **PML**= Provisión de madera y leña; **RMS**= Regulación del microclima/sombra; **VPC**= Vigorosidad de la planta de café. **C-EUM-F**=Café + especies de uso múltiple + frutales; **C-I**= café + especies del género inga; **C-Ma-EUM**= café + especies de árboles maderables + especies de uso múltiple; **C-P**= café + especies del género Pinus.

El SAF-C que tiene mayor distribución en la categorización de los SE es el de C-EUM-F; donde *provisión de madera y leña, regulación del microclima y sombra y frutas para consumo y venta* aparecen con valores altos. Para los otros tres SAF-C, la *provisión de madera y leña* y la *regulación del microclima y sombra* son los dos SE mayormente categorizados como más importantes.

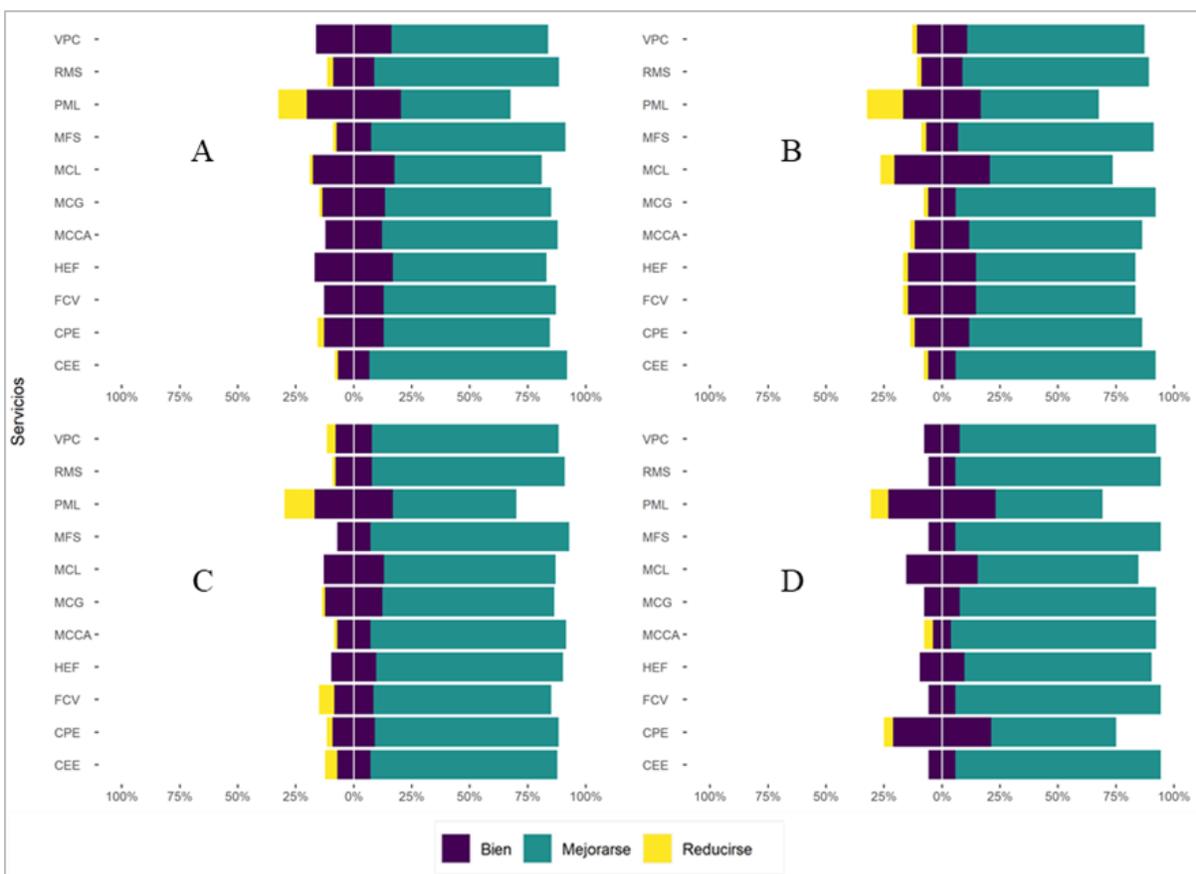
### 3.7 Valorización de los SE asociados a las cuatro tipologías de SAF-C

La valoración de los SE vista por los productores de café se explica en la **Figura 8**. Para la tipología de C-EUM-F, existe un promedio del 71% de los productores de café que perciben que los beneficios obtenidos por este tipo de SAF-C deben *mejorarse*. Los SE con el porcentaje más alto en la valoración de *mejorarse* son el de *control de eventos extremos* y el de *mejora de la fertilidad del suelo* (85% y 83% respectivamente). Existe también un promedio de 26% de productores que mencionan que los SE proporcionados por el SAF-C están *bien en la condición actual*. Los más importantes fueron la *provisión de madera y leña* y la *mejora de la condición laboral* (41% y 35%). Además, existe un 3% que están de acuerdo en que los servicios de esta tipología de SAF-C puedan *reducirse o perderse*. El SE que obtuvo el porcentaje más alto en la valoración de *reducirse o perderse* es el de *provisión de madera y leña* (12%).

Para la tipología de C-I, existe un promedio de 73% de los productores de café que perciben que los beneficios obtenidos por este tipo de SAF-C deben *mejorarse*. Los SE con el porcentaje más alto en la valoración de *mejorarse* son el de *mejora de la calidad del grano* y el de *control de eventos extremos* (86% y 86% respectivamente). Existe también un promedio de 23% de productores que mencionan que los SE proporcionados por el SAF-C están *bien en la condición actual*. Los más importantes fueron *frutas para consumo y venta* y *el de hábitat para especies de fauna* (29% y 29 respectivamente). Y existe un 4 % que están de acuerdo en que los servicios de esta tipología de SAF-C puedan *reducirse o perderse*. El SE que obtuvo el porcentaje más alto en la valoración de *reducirse o perderse* es el de *provisión de madera y leña* (15%).

Para la tipología de C-Ma-EUM, existe un promedio de 77% de los productores de café que perciben que los beneficios obtenidos por este tipo de SAF-C deben *mejorarse*. Los SE con el porcentaje más alto en la valoración de *mejorarse* son el de *mejora de la calidad y cantidad de agua* y el de *mejora de la fertilidad del suelo* (84% y 85% respectivamente). Existe también un promedio de 19% de productores que mencionan que los SE proporcionados por el SAF-C están *bien en la condición actual*. Los más importantes fueron *mejoramiento de la calidad del grano* y el de *provisión de madera y leña* (24% y 33% respectivamente). Además, existe un 4% que están de acuerdo con que los servicios de esta tipología de SAF-C puedan *reducir o perderse*. El SE que obtuvo el porcentaje más alto en la valoración de *reducirse o perderse* es el de *provisión de madera y leña* (12%).

Para la tipología de C-P, existe un promedio de 78% de los productores de café que perciben que los beneficios obtenidos por este tipo de SAF-C deben *mejorarse*. Los SE con el porcentaje más alto en la valoración de *mejorarse* son el de *mejora de la calidad y cantidad de agua, control de eventos extremos, mejora de la fertilidad del suelo, regulación del microclima y sombra* y el de *provisión de frutas para consumo y venta* (88%, 88%, 88%, 88% y 88% respectivamente). Existe también un promedio de 20% de productores que mencionan que los SE proporcionados por el SAF-C están *bien en la condición actual*. Los más importantes fueron el de *control de plagas y enfermedades* y el de *provisión de madera y leña* (42% y 44% respectivamente). Además, existe un 5% que están de acuerdo con que los servicios de esta tipología de SAF-C puedan *reducir o perderse*. Finalmente, el SE que obtuvo el porcentaje más alto en la valoración de *reducirse o perderse* es el de *provisión de madera y leña* (8%).



**Figura 8** Valorización de los servicios ecosistémicos para cada una de las cuatro tipologías de SAF-C en el corredor biológico Cacique Lempira.

*Descripción:* **CEE**=Control de eventos extremos; **CPE**=Control de plagas y enfermedades; **FCV**=Frutas para consumo y venta; **HEF**= Hábitat para especies de fauna; **MCCA**= Mejoramiento en la calidad y cantidad de agua; **MCG**= Mejoramiento en la calidad del grano; **MCL**= Mejora condiciones laborales; **MFS**= Mejora la fertilidad del suelo; **PML**= Provisión de madera y leña; **RMS**= Regulación del microclima/sombra; **VPC**= Vigoridad de la planta de café. **A**=Café + especies de uso múltiple + frutales; **B**= café + especies del género inga; **C**= café + especies de árboles maderables + especies de uso múltiple; **D**= café + especies del género Pinus.

## 4 Discusión

### 4.1 Índices de vegetación

Se usaron índices de vegetación para conocer la asociación a nivel exploratorio que existe entre cinco usos de suelo clasificados en el CBCL, utilizando imágenes satelitales Sentinel del 2 de abril del 2019 y el Mapa Forestal y Cobertura de la Tierra en la República de Honduras 2018. El producto Sentinel-2 es una serie nueva de datos de satélite, con un bajo costo económico que puede usarse para mapeo a gran escala en combinación con el inventario forestal nacional de los países (Shafizadeh-moghadam *et al.*, 2022; Areeba-Binte-Imran *et al.*, 2021; Mngadi *et al.*, 2021; Mosomtai *et al.*, 2020; Saah *et al.*, 2019; Pandit *et al.*, 2018; Jia *et al.*, 2017; Majasalmi y Rautiainen 2016; Méndez-Barroso *et al.*, 2009). Los IV son fórmulas matemáticas basadas en varias combinaciones de bandas dentro del espectro electromagnético (Freire de Oliveir *et al.*, 2021) que están vinculadas a propiedades de salud de la vegetación (Santos *et al.*, 2014; Zarate-Valdez *et al.*, 2012; Ortiz *et al.*, 2011; Li *et al.*, 2010) y

probablemente se vean afectados por las características fenológicas (etapa de floración y/o fructificación) y el manejo del café (a pleno sol o bajo un SAF) (Taugourdeau *et al.*, 2014; Coltri *et al.*, 2013). Las imágenes multispectrales son una alternativa para estimar el contenido de clorofila de forma remota y no invasiva mediante IV, aunque ninguno de estos lo haya confrontado a nivel de laboratorio y no exista uno que sea el mejor para estimar a nivel del cultivo de café.

En este estudio, se utilizaron dos IV de verdor (NDVI y SAVI) y dos IV de humedad (NDMI y MSI), los cuales fueron divididos en seis categorías ponderadas a una escala que va desde -1 a +1, tal como lo hicieron Solís *et al.*, 2021, Wittke *et al.*, 2019 y Frampton *et al.* 2013. Los IV NDVI y SAVI han sido implementados en algunos estudios cuando se tienen niveles de vegetación con densidades medias y bajas (Navarro *et al.*, 2019). NDVI es uno de los índices más utilizados para diferenciar las áreas con vegetación de las áreas sin vegetación y la salud de estas (Tassopoulos *et al.*, 2021; Rani *et al.*, 2018), además, es el índice de cultivo más utilizado para la definición de zonas de gestión (Serrano *et al.*, 2018).

Los análisis dicen que los usos de suelo clasificados como bosques (B-M y B-L) tienen los porcentajes en las categorías más altas en NDVI y el uso de suelos P-C los más bajos (75%, 63% y 13% de los píxeles, respectivamente, en categorías 5 y 6). En los análisis de vegetación, NDVI es el IV más importante y el más utilizado a nivel mundial (Freire de Oliveir *et al.*, 2021; Caruso *et al.*, 2017), pero tiene la limitante de que se satura con un dosel denso y de múltiples capas (Santos *et al.*, 2014; Ortiz *et al.*, 2011). El dosel de vegetación seca e insalubre tiene un valor NDVI más bajo porque la reflectancia en el canal rojo visible aumenta, al mismo tiempo que disminuye en el canal NIR. Si el contenido de clorofila es alto, significa que la planta es fotosintéticamente muy activa, lo que representa una alta absorción en el rojo visible y una alta reflectancia en los canales NIR (Gulácsi y Kovács 2015).

En fincas de trigo, Mazur *et al.* (2022) encontraron que, a mayor pH y contenido de fósforo, menor NDVI. Por su parte, Chen *et al.* (2019) mencionan que los bosques de coníferas y latifoliados tienen estructuras de rodales relativamente estables, si no se producen perturbaciones graves y que valores mayores a 0,5 (categoría 4, 5, y 6 de este estudio) indican bosques de hoja ancha, de hoja de aguja y bosques de bambú. En climas semiáridos y húmedos, el NDVI puede ser utilizado para mapear el contenido de humedad del suelo en grandes áreas (Santos *et al.*, 2014).

Para SAVI, el SAF-C y el B-C obtuvieron los mayores porcentajes de cobertura en las categorías más altas y nuevamente P-C fue el más bajo (94%, 91% y 75% de los píxeles respectivamente en categorías 3 y 4). En los SAF-C, la cantidad de suelo expuesto es consecuencia del espaciamiento entre planta. Cabe destacar que otros autores mencionan que, para ese caso (usos de suelo con SAF-C), SAVI ha sido ampliamente utilizado con el fin de evitar las distorsiones causadas por la respuesta espectral del suelo expuesto en el IV (Coltri *et al.*, 2013).

Para el índice NDMI, los valores ponderados más altos de humedad se encontraron en B-M y B-L y el más bajo fue para P-C (48%, 41% y 1.78% de píxeles, respectivamente en la categoría 3). Para MSI, los valores ponderados más altos los tiene B-M con 36% y el valor más bajo B-L con 1.62% de píxeles en la categoría 4. Gulácsi y Kovács (2015) demostraron que los IV de agua son capaces de cuantificar las sequías porque existe una fuerte conexión entre la clorofila y el contenido de humedad del dosel de la vegetación. Los IV derivados de datos satelitales se pueden utilizar indirectamente para obtener información sobre la humedad en la zona de raíces del suelo en áreas cultivadas, considerando que el perfil de humedad del suelo en muchas regiones del mundo es el principal factor que controla el vigor de la planta (Santos *et al.*, 2014). De manera similar, Areeba-Binte-Imran *et al.* (2021) seleccionaron el

NDMI para estimar biomasa, ya que lo consideraron como el mejor índice espectral en el modelo de regresión de predictor único y en el modelo de regresión lineal por pasos.

#### **4.2 Aspectos sociales y técnicos de los productores de café en el corredor biológico Cacique Lempira**

En Honduras, la producción de café está dominada en su mayoría por los hombres. De una muestra de 228 productores de café encuestados, el 78% fueron hombres y un 22% mujeres con un 92% y 55% dedicados a las labores de la agricultura. El 88% de los productores son mayores de los 30 años y un 40% tienen más de 15 años de experiencia en el rubro de café. En educación, el 65% tienen primaria completa e incompleta. Datos similares fueron reportados por Baliton *et al.* (2020), en un estudio sobre SE en SAF en Filipinas encontraron que la agricultura de cultivos anuales estaba dominada por hombres (66% de los encuestados), en el rango de edad entre 41 a 50 años (29%) y la mayoría solo llegó o terminó la escuela primaria. En otro estudio similar, Nguyen *et al.* (2020) en Vietnam midieron el conocimiento local de 118 hogares (64 hombres y 54 mujeres). Todos los agricultores entrevistados tenían entre 25 y 50 años con una edad media de 39 años. Finalmente, el tamaño medio de las fincas era de 1,5 ha.

En áreas marginales (condiciones cálidas y secas), el cultivo exitoso de café sin sombra ha demostrado ser inviable (Damatta *et al.*, 2018). Para este estudio, se seleccionaron cuatro tipos de arreglos agroforestales (Café con especies de uso múltiple, frutales o maderables), y se encuentra que, en un 89% de las fincas, había al menos una especie de árbol con fines de uso múltiple (leguminosas) y en un 45% había al menos una especie de árbol con fines maderables. Las combinaciones potenciales entre plantas de café y plantas perennes leñosas brindan una amplia gama de arreglos espaciales y tipologías de sombra (Saj *et al.*, 2021; Ovalle-Rivera *et al.*, 2020; Chain-Guadarrama *et al.*, 2019; Santos *et al.*, 2019; Meylan *et al.*, 2013).

En Honduras, las especies de sombra más comunes pertenecen a leguminosas (por ejemplo, *Inga sp.*, *Gliricidia sepium* y *Erythrina sp.*), que poseen un rápido crecimiento y generan otros bienes y servicios como leña, postes, cercos vivos, etc., (FHIA, 2004; Álvarez, 2018) y algunas con fines económicos por la venta de madera como *Cedrela odorata* y *Swietenia Macrhophylla* (Jiménez-Nehring, 2012). Las especies de árboles de leguminosas puede ser una compensación entre una diversificación natural (Landis, 2017) y una gestión independiente del aporte de nutrientes al suelo (Notaro *et al.*, 2022; Villarreyna *et al.*, 2020; Tscharrntke *et al.*, 2011). La mejora del suelo a través de la fijación de nitrógeno atmosférico (Ratnadass *et al.*, 2021; Durand-Bessart *et al.*, 2020; Smith *et al.*, 2018; Mbow *et al.*, 2014) y reducción de la erosión eólica e hídrica (Soto-Pinto y Jiménez-Ferrer 2018) son algunos objetivos del uso de cultivos con leguminosas.

En este estudio, la mayoría de los encuestados mencionan que el uso de árboles en la finca está influenciado por otros productores de café (37%) e instituciones públicas y privadas (37%). Estos datos sugieren generar mayores incentivos gubernamentales para motivar a los agricultores en la adopción de prácticas para conservar los SE de los árboles en su sistema (Latini *et al.*, 2020; Rigal *et al.*, 2018; Soto-Pinto y Jiménez-Ferrer 2018; Alam *et al.*, 2014). Los productores consideran que la capacitación ha sido la estrategia más importante para la selección del tipo de SAF-C (67%) y que el uso de árboles en finca era más un tema cultural (52%), que un factor económico (21%). Para Jezeer *et al.* (2019), las capacitaciones proporcionadas por organizaciones de agricultores o gobiernos locales podrían proporcionar información necesaria para los agricultores a la hora de la elección de especies de árboles de sombra en sus fincas. Por su parte, en el sur de China, Rigal *et al.* (2018) encontraron que las mujeres eran más propensas que los hombres a percibir las especies no promovidas por el gobierno

como más beneficiosas para mejorar el ciclo de nutrientes; mientras que los hombres, en cambio, eran más propensos a percibir los árboles promovidos por el gobierno como elementos para traer mayores ingresos económicos para la familia.

Se consultó a los productores sobre los factores que podrían provocar un cambio en el tipo de sombra o sus cafetales a otros usos de suelo, para lo cual, los factores climáticos (52%) y el costo de manejo del cafetal (47%) fueron los aspectos más importantes que podrían influir en esa decisión. La conversión de sistemas con sombra a sistemas sin sombra es una práctica común para aumentar el rendimiento de los cultivos a corto plazo (Tschardt *et al.*, 2011) y es una decisión individual que toman los caficultores en sus fincas (García *et al.*, 2020; Van Der Wolf *et al.*, 2016). En estas circunstancias, muchos agricultores están abandonando su café o convirtiéndolo a otros usos de la tierra en un intento por restaurar la productividad agrícola y la economía de sus hogares (Harvey *et al.*, 2021).

### 4.3 Servicios ecosistémicos de los cafetales en el corredor biológico Cacique Lempira

La producción a menudo se genera a expensas de la pérdida en los SE y la biodiversidad (Jezeer *et al.*, 2019), pero en SAF-C este no podría ser el caso. Al incorporar cultivos alimentarios y árboles de usos múltiples en sus parcelas de café, los agricultores aseguran estrategias alternativas de subsistencia frente a las fluctuaciones del mercado (Ratnadass *et al.*, 2021; Lamond *et al.*, 2016; Rapidel *et al.*, 2015). Cerda *et al.* (2019) y Meyer *et al.* (2015) comentan que un aumento en la oferta de productos para consumo interno del hogar ayudaría a crear un equilibrio entre el beneficio familiar, la reserva de carbono y la biodiversidad vegetal. En Nicaragua, Lamond *et al.* (2016) encontraron que los agricultores plantaban o retenían árboles en sus fincas si los SE eran a corto y mediano plazo, tales como provisión de fruta, leña, madera y forraje para el ganado. Por su parte, Gram *et al.* (2018) observaron que la preferencia por SE cambiaba con la altitud. Mientras que, en altitudes elevadas, se prefirió la mejora de la fertilidad del suelo a la regulación del microclima, la importancia relativa de microclima y producción aumentó hacia altitudes más bajas.

En este estudio, se categorizaron y valoraron 11 SE de acuerdo con las necesidades agrícolas y de sustento de los productores de café. Un estudio similar hicieron Nguyen *et al.* (2020) en Vietnam (11 SE analizados) y Bukomeko *et al.* (2019) en Uganda (12 SE analizados en SAF). De los productores encuestados, un 62% no conocían el término de SE, aunque ya lo habían escuchado. Cerda *et al.*, (2017), Peh *et al.*, 2016 y Meyer *et al.*, (2015) comentan que existe un conocimiento limitado de los productores acerca de las compensaciones y sinergias en la provisión de SE en sus parcelas de trabajo.

Para este estudio, el SE categorizado en el nivel uno, como *más importante*, fue la *provisión de madera y leña* (34%), la *provisión de frutas para consumo y venta* fue categorizado en el nivel dos, *medianamente importante* (19%) y en el nivel tres, como *menos importante*, la *regulación del microclima y sombra* (16%). En una muestra de 263 encuestados en el sur del Monte Kilimanjaro, Wagner *et al.* (2019) encontraron que más del 75% de los encuestados seleccionó la *provisión de alimentos* como el SE más importante para su hogar y el *suministro de leña* y la *provisión de forraje* como el segundo y tercero, respectivamente. Por su parte, Rice (2008) calculó que, del valor total generado por la agrosilvicultura del café, los agricultores de Perú y Guatemala cosechaban hasta un 35% y 52%, respectivamente, del valor total obtenido de los productos distintos del café. Siempre en Perú, Ehrenbergerová *et al.* (2019) demostraron que las parcelas sombreadas por plantas exóticas de eucalipto tenían el mayor valor total por ingresos agrícolas (96%), seguidos por la plantación de pino (94%) y venta de leña de inga (41%), de la producción total. De manera similar, Latini *et al.* (2020) encontraron una fuerte evidencia de que los hábitats naturales influyen en la productividad del café, por

ejemplo, determinaron que la productividad del café aumenta alrededor del 32% con el acceso de los polinizadores a las flores y en un 15% cuando se está en contacto con los remanentes de bosque.

#### **4.3.1 Regulación del microclima en las tipologías de SAF-C del corredor biológico Cacique Lempira**

La *regulación del microclima y sombra* fue el segundo SE más mencionado por los productores de café en este estudio, lo que significa que la elección del tipo de SAF está muy influenciada por mantener mayor bienestar del cultivo de café. Lamond *et al.* (2016) encontraron un microclima más extremo en SAF de poca sombra a lo largo de un gradiente altitudinal. Por su parte, Rigal *et al.* (2020) en un estudio en Yunnan, China, encontraron que, después de cuatro años de plantar *Cinnamomum camphora*, *Bishofia javanica* y *Jacaranda mimosifolia*, amortiguaron los eventos climáticos extremos, disminuyendo el estrés del café por las altas temperaturas en la estación lluviosa (-3 a -6 °C) y por las olas de frío en la estación seca (+0.5 a + 1°C).

Igualmente, Sarmiento-Soler *et al.*, (2022) en Minas Gerais, Brasil, encontraron que el café bajo sol presentó las temperaturas máximas diarias más altas (5.4 °C más alto que en el sistema agroforestal) cuando se promedia entre todos los meses. Así mismo, Siles *et al.* (2010) estudiaron la sombra de *Inga* asociada al café, y encontró que, en el día, la temperatura media máxima de la hoja del café sombreada se redujo hasta en 5°C en relación con la temperatura de la hoja de café a pleno sol y durante la noche fue 0.5 °C más alta en el SAF-C con *Inga* que la temperatura del aire, lo que demuestra un efecto amortiguador bidireccional de los árboles de sombra.

#### **4.3.2 Servicios ecosistémicos menos conocidos en el corredor biológico Cacique Lempira según la perspectiva de los productores de café: *hábitat de especies de flora y fauna y mejora en la calidad del grano de los cafetales***

Los productores de café en este estudio no perciben tan importante el SE de *hábitat* en sus fincas. Este SE obtuvo apenas un 5% de menciones de los 11 SE presentados. A pesar de ello, muchos estudios realizados en América y Asia tienen datos alentadores de cómo los SAF-C sirven de refugio para muchas especies de flora y fauna. Los cafetales conservan al menos un 40% de las especies de la vegetación natural, son hábitat de especies de flora, fauna, hongos, musgos y otros microorganismos poco estudiados (Soto-Pinto y Jiménez-Ferrer 2018). En fincas de café de México, Sinu *et al.* (2021) encontraron, aproximadamente, tres veces más colonias y especies de hormigas arbóreas que en los bosques. Campera *et al.*, (2021) y De Leijster *et al.* (2021) dicen que los SAF pueden albergar niveles de biodiversidad similares a los bosques continuos y ofrecer importantes SE para la vida silvestre.

El SE de *mejora la calidad del grano* también tuvo pocas menciones, apenas un 8% de los productores hablaron de que los árboles de sombra generaban beneficios para la calidad del grano en sus parcelas. A pesar de ello, Damatta *et al.* (2018) relacionan daños graves en granos de café expuesto a pleno sol, en comparación con aquellos bajo sombra. Finalmente, Villarreyra *et al.* (2020) reportaron un desarrollo más lento del grano bajo sombra en comparación con café a pleno sol y De Leijster *et al.*, (2021), Smith *et al.*, (2018) mencionaron que una maduración más tardía bajo sombra favorece a que los frutos de café sean más uniformes y con mayor tamaño.

#### **4.3.3 Regulación de plagas y enfermedades en las tipologías de SAF-C en el corredor biológico Cacique Lempira**

El SE de *control de plagas y enfermedades* fue el segundo menos mencionado por los productores de café para este estudio. A pesar de que muchos estudios han encontrado relaciones cercanas entre la

cobertura arbórea y la afectación de las plagas y enfermedades en las fincas, solo apareció en un 3% entre los SE seleccionados. La regulación de plagas y enfermedades es un importante SE a nivel mundial (Cerda *et al.*, 2020). El efecto del árbol de sombra sobre la roya del café es un ejemplo de los efectos conflictivos que ciertas condiciones ambientales pueden generar en términos del manejo de plagas o enfermedades (Durand-Bessart *et al.*, 2020).

Por un lado, la sombra ayuda a reducir la receptividad de las hojas al patógeno, al evitar la exposición de las hojas a la radiación, pero, al mismo tiempo, la sombra puede proporcionar las condiciones microclimáticas adecuadas para el desarrollo del patógeno (con un aumento del 21,5% en la incidencia y un aumento del 22,4% en la severidad) (Ratnadass *et al.*, 2021). Para Cerda *et al.* (2017), los SAF-C altamente diversificados son mejores para reducir la incidencia de la roya del café en altitudes más altas; mientras que, en altitudes más bajas, son más adecuados los SAF-C menos diversificados. Los agricultores relacionan la sombra con una disminución en la temperatura de las parcelas (Rahn *et al.*, 2018; Smith *et al.*, 2018) y un aumento de la humedad, lo que aumenta el riesgo de enfermedades fúngicas, pero también disminuye el ataque de plagas del café (específicamente trips y minadores de hojas) (Sinu *et al.*, 2021; Lamond *et al.*, 2016).

#### **4.4 Prácticas de manejo por realizar en los árboles para conservar los SE en el SAF-C**

Se consultó a los productores acerca de dos prácticas de manejo para mantener los beneficios de los árboles en la finca de café y para la familia. La práctica número uno fue la *poda* (59%) y segundo la *reforestación* (24%). Hubo un 39% de productores que no lograron contestar cuando se les pidió una segunda práctica. Además, Tschardtke *et al.* (2011) mencionan que se sabe poco sobre el manejo de árboles de bosques nativos; por lo tanto, se necesita urgentemente información más detallada sobre la sensibilidad a la poda para estas especies utilizadas en los SAF.

Cerda *et al.* (2020) hace énfasis en que, cuando hay una cubierta de sombra excesiva, se debe alentar el manejo de estos árboles mediante podas. Por su parte, Tsewoue *et al.* (2019) mencionaba que, además de la poda, la fertilización y el control de malezas, son buenas prácticas de manejo a los árboles en los SAF. Finalmente, Vezy *et al.* (2020) también mencionan que hacer podas o dejar crecimiento libre en los árboles de frutas pareció tener poco impacto en la producción de frutos y los contenidos de carbono (C) y nitrógeno (N) del suelo; por el contrario, al combinarla con raleos, se producía material para la construcción (Cerda *et al.*, 2017; Rice, 2008).

## **5 Conclusiones y recomendaciones**

Las imágenes de satélite se han utilizado ampliamente en las últimas décadas para recopilar información espacial, espectral y temporal en extensiones muy grandes utilizando técnicas de teledetección pasivas o activas. En este estudio, se utilizó esta metodología analizando cinco tipos de uso de suelos correspondientes al 93% de toda el área en estudio, mediante índices de vegetación categorizados en seis niveles que fueron ponderados según la cantidad de píxeles que generaron por la reflectancia de la cobertura capturada en imágenes del satélite Sentinel 2A/B.

Los resultados muestran que los usos de suelo de *bosque mixto* y *bosque latifoliado* presentaron los niveles más altos relacionados a los índices de verdor (*NDVI* y *SAVI*) y de humedad (*NDMI* y *MSI*). Estos índices generaron asociaciones y revelan que el uso de suelo clasificado como *cafetales* tiene una relación cercana con el uso de suelo clasificado como *bosque de conífera* y una asociación muy separada con el uso de suelos clasificado como *pastos* y *cultivo*. Además de esto, los usos de suelo que comparten las características más cercanas son los clasificados como *bosques latifoliados* y *bosques mixtos*. Considerando que este estudio se hizo a nivel exploratorio con imágenes tomadas por satélite

en el año 2019 y el mapa de cobertura forestal y de usos reportado en el 2018 en Honduras, se recomienda continuar con las investigaciones tomando puntos de control en campo y haciendo comparaciones con nuevas firmas espectrales de imágenes actualizadas y con mayor resolución espacial (menor a 20 metros), para validar los datos expuestos en esta investigación.

En términos generales, los productores de café ubicados en el CBCL en el occidente de Honduras tienen una amplia trayectoria en el cultivo de café; se encuentran en una edad madura, pero todavía en edad económicamente activa, lo que asegura la producción del país de los años venideros. Plantar árboles en finca es algo cultural y apoyado por los mismos productores de la región. En ese sentido, existe una necesidad generalizada de que los gobiernos e instituciones del café puedan crear incentivos para realizar actividades de reforestación en sus fincas y aumentar los presupuestos para temas de capacitación y extensión, ya que, según los productores, es el método más plausible con el cual han mejorado sus prácticas en finca.

En este estudio, se ha encontrado que los productores de café no tienen mucho conocimiento acerca del concepto de SE que pueden ser generados en sus parcelas productivas; sin embargo, existe una asociación significativa entre los tipos de árboles que utilizan para sombra del cultivo y los beneficios que perciben de ellos. De una lista de 11 SE que fueron presentados a los productores de café, la *provisión de madera y leña* es el SE más importante, ya que fue el más mencionado y categorizado en el nivel 1 de importancia. El segundo SE mayormente mencionado fue el de *regulación del microclima y sombra*, que fue considerado en la categoría número 3 de la clasificación y el tercer SE más mencionado fue la *provisión de frutas para consumo y venta*, SE que fue colocado en la categoría número dos. Las diferencias entre estas respuestas y las realizadas por los técnicos de extensión radica en que los técnicos no tuvieron una asociación significativa entre el tipo de árbol utilizado para sombra en las fincas y los SE que se esperan de estos, además, que los técnicos colocaron el SE de *mejorar la cantidad y calidad de agua*, distinto al de *provisión de frutas para consumo y venta* seleccionado por los productores de café.

## 6 Bibliografía

- Abdi, A.M; Carri, R; Sidemo-holm, W; Cai, Z; Boke-ol, N; Smith, H.G; Eklundh, L; Ekroos, J. 2021. Biodiversity decline with increasing crop productivity in agricultural fields revealed by satellite remote sensing. 130(December 2020). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108098>.
- Alam, M; Olivier, A; Paquette, A; Dupras, J; Revéret, J.P; Messier, C. 2014. A general framework for the quantification and valuation of ecosystem services of tree-based intercropping systems. *Agroforestry Systems* 88(4):679-691. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10457-014-9681-x>.
- Allinne, C; Savary, S; Avelino, J. 2016. Delicate balance between pest and disease injuries, yield performance, and other ecosystem services in the complex coffee-based systems of Costa Rica (en línea). *Agriculture, Ecosystems and Environment* 222:1-12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.02.001>.
- Alvarado, C; Leandro, A; Sarango, D. 2019. Comparación de Índices de Vegetación con imágenes Landsat usando la computación en la nube: zona Pampa de Majes-Siguas, Arequipa Perú (Periodo: Jun 1984 a Nov 2018). 22, 1.
- Álvarez, Miguel Ángel. 2018. Análisis de la Cadena de Valor del Café en Honduras. 1ª edición. Tegucigalpa, Honduras: Heifer Internacional, 40 páginas.
- Aquino, C.M.S; Oliveira, J.G.B. 2012. Estudo Da Dinâmica Do Índice De Vegetação Por Diferença Normalizada (Ndvi) No Nucleo De São Raimundo Nonato-PI (en línea). *GEOUSP - Espaço e Tempo*, São Paulo, No 31, pp. 157 - 168, 2012. ESTUDO 31:157-168. Disponible en <https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0ahUKEwiH5v-q8-nMAhVEJR4KHb-NBk8QFggmMAE&url=http://www.revistas.usp.br/geousp/article/download/74261/77904&sg=AFQjCNGiIWA4DEaw2S9L4MO-TFrCbcm3cw&bvm=bv.122676328,d.dm>.
- Arango, Á.M; Dossman, M.Á; Muñoz, J; Bueno, L; Arias, J.J; Camargo, J.C; Maya, J.M. 2020. Services ecosystems: perceptions from the coffee producers in Belén de Umbría, Risaralda, Colombia (en línea). *Revista de Investigacion Agraria y Ambiental* 11(2):2-10. Disponible en [https://www.researchgate.net/publication/343298306\\_Los\\_servicios\\_ecosistemas\\_desde\\_la\\_percepcion\\_de\\_los\\_productores\\_de\\_cafe\\_de\\_Belen\\_de\\_Umbria\\_Risaralda\\_Colombia](https://www.researchgate.net/publication/343298306_Los_servicios_ecosistemas_desde_la_percepcion_de_los_productores_de_cafe_de_Belen_de_Umbria_Risaralda_Colombia).
- Areeba-Binte-Imran; Ahmed, S; Ahmed, W; Zia-Ur-Rehman, M; Iqbal, A; Ahmad, N; Ullah, I. 2021. Integration of Sentinel-2 derived spectral indices and in-situ forest inventory to predict forest biomass. *Pakistan Journal of Scientific and Industrial Research Series A: Physical Sciences* 64(2):119-130. DOI: <https://doi.org/10.52763/PJSIR.PHYS.SCI.64.2.2021.119.130>.
- Bakhshande, S.L; Kazemi, H; Soltani, A; Kamkar, B. 2022. Estimation of carbon accumulation potential in soybean fields using remote sensing vegetation indices (Case study: Gorgan County). *Journal of Plant Production*. DOI: <https://doi.org/10.22069/JOPP.2022.18657.2752>.
- Baliton, R.S; Landicho, L.D; Cabahug, R.E.D; Paelmo, R.F; Laruan, K.A; Rodríguez, R.S; Visco, R.G; Castillo, A.K.A. 2020. Ecological services of agroforestry systems in selected upland farming communities in the Philippines. *Biodiversitas* 21(2):707-717. DOI: <https://doi.org/10.13057/biodiv/d210237>.
- Bedin, D.M; De Carvalho, M.A; Ampélio, E; Marçal, R.G; Cortez, M.L.J; Mattioli, M.C. 2019. Sensoriamento remoto multiespectral na identificação e mapeamento das variáveis bióticas e

- abióticas do cafeeiro. *SciELO Analytics* 66:142-153. DOI: <https://doi.org/doi.org/10.1590/0034-737x201966020009>.
- Bedoya-Gómez, BD; Dossman-Gil, MA; Marín-Fernández, J. 2021. Valoración ecológica de los servicios ecosistémicos prestados por el suelo en fincas cafeteras en Belén de Umbría, Colombia. *Revista de Ciencias Ambientales* 55(1):160-185. DOI: <https://doi.org/10.15359/rca.55-1.8>.
- Beer, J; Muschler, R; Kass, D; Somarriba, E. 1997. Shade management in coffee and cacao plantations. *Agroforestry Systems* 38(1-3):139-164. DOI: <https://doi.org/10.1023/a:1005956528316>.
- Bukomeko, H; Jassogne, L; Tumwebaze, S.B; Eilu, G; Vaast, P. 2019. Integrating local knowledge with tree diversity analyses to optimize on-farm tree species composition for ecosystem service delivery in coffee agroforestry systems of Uganda (en línea). *Agroforestry Systems* 93(2):755-770. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0172-8>.
- Campaña-Olaya, J; Tafur, EG; 1. 2021. Análisis multitemporal del NDDI, comparación con el NDWI para determinar la sequía en la Reserva Nacional de Tumbes, Perú, 1986 - 2019. *Manglar* 18(4):389-395. DOI: <http://dx.doi.org/10.17268/manglar.2021.050>.
- Campera, M; Hedger, K; Birot, H; Manson, S; Balestri, M; Budiadi, B; Imron, M.A; Nijman, V; Nekaris, K.A.I. 2021. Does the presence of shade trees and distance to the forest affect detection rates of terrestrial vertebrates in coffee home gardens? *Sustainability (Switzerland)* 13(15). DOI: <https://doi.org/10.3390/su13158540>.
- Caruso, G; Tozzini, L; Rallo, G; Primicerio, J; Moriondo, M; Palai, G; Gucci, R. 2017. Estimating biophysical and geometrical parameters of grapevine canopies ('Sangiovese') by an unmanned aerial vehicle (UAV) and VIS-NIR cameras. *Vitis -Geilweilerhof* 56:63-70. DOI: <https://doi.org/10.5073/vitis.2017.56.63-70>.
- Cerda, R; Avelino, J; Harvey, C.A; Gary, C; Tixier, P; Allinne, C. 2020. Coffee agroforestry systems capable of reducing disease-induced yield and economic losses while providing multiple ecosystem services. *Crop Protection* 134(October 2019). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105149>.
- Cerda, R; Orozco-Aguilar, L; Sepúlveda, N; Ordoñez, J; Carreño-Rocabado, G; Amores, F; Caicedo, W; Oblitas, S; Somarriba, E. 2019. Tropical agroforestry and ecosystem services: trade-off analysis for better design strategies (en línea). 1 ed. Mosquera-Losada, MR; Prabhu, R (eds.). s.l., Burleigh Dodds Science Publishing. 467-509 p. DOI: <https://doi.org/10.19103/as.2018.0041.24>.
- Cerda, R; Allinne, C; Gary, C; Tixier, P; Harvey, C.A; Krolczyk, L; Mathiot, C; Clément, E; Aubertot, J.N; Avelino, J. 2017. Effects of shade, altitude and management on multiple ecosystem services in coffee agroecosystems (en línea). *European Journal of Agronomy* 82:308-319. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.09.019>.
- Cerdán, C.R; Rebolledo, M.C; Soto, G; Rapidel, B; Sinclair, F.L. 2012. Local knowledge of impacts of tree cover on ecosystem services in smallholder coffee production systems. *Agricultural Systems* 110:119-130. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2012.03.014>.
- Chain-Guadarrama, A; Martínez-Salinas, A; Aristizábal, N; Ricketts, T.H. 2019. Ecosystem services by birds and bees to coffee in a changing climate: A review of coffee berry borer control and

- pollination (en línea). *Agriculture, Ecosystems and Environment* 280(December 2018):53-67. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.04.011>.
- Chen, Y; Li, L; Lu, D; Li, D. 2019. Exploring Bamboo Forest Aboveground Biomass Estimation Using Sentinel-2 Data. *Remote Sensing* 11(7):1-22. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs11010007>.
- Chemura, A; Mutanga, O; Odindi, J. 2018a. MODELLING LEAF CHLOROPHYLL CONTENT IN COFFEE (*Coffea arabica*) PLANTATIONS USING SENTINEL 2 MSI DATA. :8228-8231. DOI: <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2018.8518848>.
- Chemura, A; Mutanga, O; Odindi, J; Kutuywayo, D. 2018b. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing Mapping spatial variability of foliar nitrogen in coffee (*Coffea arabica* L.) plantations with multispectral Sentinel-2 MSI data (en línea). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 138:1-11. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.02.004>.
- Coltri, P.P; Zullo, J; Ribeiro, R.G; Romani, L.A.S; Silveira, H.P. 2013. Coffee Crop' s Biomass and Carbon Stock Estimation with Usage of High Resolution Satellites Images. *Remote Sensing* 6(3):1786-1795.
- Damatta, F.M; Avila, R.T; Cardoso, A.A; Martins, S.C.V; Ramalho, J.C. 2018. Physiological and Agronomic Performance of the Coffee Crop in the Context of Climate Change and Global Warming: A Review. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 66(21):5264-5274. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b04537>.
- De Bello, F; Carmona, C.P; Dias, A.T.C; Götzenberger, L; Moretti, M; Berg, M.P. 2021. Effects of Traits on Ecosystem Processes and Services. *Handbook of Trait-Based Ecology* (May 2021):177-193. DOI: <https://doi.org/10.1017/9781108628426.010>.
- De la Casa, A; Ovando, G; Bressanini, L; Martínez, J; Díaz, G; Miranda, C. 2018. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing Soybean crop coverage estimation from NDVI images with different spatial resolution to evaluate yield variability in a plot (en línea). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* (September 2017):1-17. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.10.018>.
- De Leijster, V; Santos, M.J; Wassen, M.W; Camargo-García, J.C; Llorca Fernández, I; Verkuil, L; Scheper, A; Steenhuis, M; Verweij, P.A. 2021. Ecosystem services trajectories in coffee agroforestry in Colombia over 40 years (en línea). *Ecosystem Services* 48(January):101246. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2021.101246>.
- Di Rienzo J.A; Casanoves F; Balzarini M.G; González L; Tablada M; Robledo C.W. InfoStat versión 2020. Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- Do Nascimento, D.A; Da Rocha, O.C.N; Alves, M.M; Dos Santos, A.T; De Andrade, E.M. 2018. Use of remote sensing to identify areas at risk of degradation in the semi-arid region. *Ciência Agrônômica* 49(3):420-429. DOI: <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20180047>.
- Drusch, M; Del Bello, U; Carlier, S; Colin, O; Fernandez, V; Gascon, F; Hoersch, B; Isola, C; Laberinti, P; Martimort, P; Meygret, A; Spoto, F; Sy, O; Marchese, F; Bargellini, P. 2012. Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. *Remote Sensing of Environment* 120:25-36. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>.

- Durand-Bessart, C; Tixier, P; Quinteros, A; Andreotti, F; Rapidel, B; Tauvel, C; Allinne, C. 2020. Analysis of interactions amongst shade trees, coffee foliar diseases and coffee yield in multistrata agroforestry systems. *Crop Protection* 133(August 2019). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105137>.
- Ehrenbergerová, L; Šeptunová, Z; Habrová, H; Tuesta, R.H.P; Matula, R. 2019. Shade tree timber as a source of income diversification in agroforestry coffee plantations, peru. *Bois et Forets des Tropiques* 342:93-103. DOI: <https://doi.org/10.19182/bft2019.342.a31812>.
- EOS (Earth Observen System). 2021. NDMI (Índice De Humedad De Diferencia Normalizada). (en línea); 09-ag. Disponible en: <https://eos.com/es/make-an-analysis/ndmi/>.
- ESA (Agencia Espacial Europea). (2018). Sentinel Data Access Overview-Sentinel Online. <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/sentinel-data-access>.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura). 2018. Guía de buenas prácticas para la Gestión y uso sostenible de los suelos en áreas rurales (en línea). s.l., s.e. 144 p. Disponible en <http://www.fao.org/3/i8864es/I8864ES.pdf>.
- FHIA (Fundación Hondureña de Investigación Agrícola). 2004. Producción de café con sombra de maderables. La Lima, Honduras.
- Figueroa, E; Pérez, F; Godínez, L. 2012. La producción y el consumo del café (en línea). s.l., s.e. 180 p. Disponible en [www.ecorfan.org/spain](http://www.ecorfan.org/spain).
- FORUMCAFE. 2019. Forum cultural del café: café de Honduras (en línea). Disponible en <https://www.revistaforumcafe.com/cafe-de-honduras>.
- Frampton, W.J; Dash, J; Watmough, G; Milton, E.J. 2013. Evaluating the capabilities of Sentinel-2 for quantitative estimation of biophysical variables in vegetation (en línea). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 82:83-92. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.04.007>.
- Freire de Oliveir, M; Felipe dos Santos, A; Haruna, E.K; de Souza Rolim, G; Pereira da Silva, R. 2021. Determination of application volume for coffee plantations using artificial neural networks and remote sensing. *Computers and Electronics in Agriculture* 184(March):1-7. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106096>. Gitelson, A.A & Merzlyak, M.N; 1997. Remote estimation of chlorophyll content in higher plant leaves. *Int. J. Remote Sens.* 18, 2691–2697. <https://doi.org/10.1080/014311697217558>.
- Gagliardi, S; Avelino, J; Virgínio Filho, E de M; Isaac, M.E. 2021. Shade tree traits and microclimate modifications: Implications for pathogen management in biodiverse coffee agroforests. *Biotropica* 53(5):1356-1367. DOI: <https://doi.org/10.1111/btp.12984>.
- García, C.A; Vendé, J; Konerira, N; Kalla, J; Nay, M; Dray, A; Delay, M; Waeber, P.O; Stoudmann, N; Bose, A; Le Page, C; Raghuram, Y; Bagchi, R; Ghazoul, J; Kushalappa, C.G; Vaast, P. 2020. Coffee, farmers, and trees-shifting rights accelerates changing landscapes. *Forests* 11(4):1-19. DOI: <https://doi.org/10.3390/F11040480>.
- Gram, G; Vaast, P; van der Wolf, J; Jassogne, L. 2018. Local tree knowledge can fast-track agroforestry recommendations for coffee smallholders along a climate gradient in Mount Elgon, Uganda. *Agroforestry Systems* 92(6):1625-1638. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0111-8>.

- Gulácsi, A; Kovács, F. 2015. Drought Monitoring with Spectral Indices Calculated from Modis Satellite Images in Hungary. *Journal of Environmental Geography* 8(3-4):11-20. DOI: <https://doi.org/10.1515/jengeo-2015-0008>.
- Gao, B-C. 1996. NDWI A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water from Space. *ELSERVIER* 266(April):41-76. DOI: [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3).
- Gidey, T; Oliveira, T.S; Crous-Duran, J; Palma, J.H.N. 2020. Using the yield-SAFE model to assess the impacts of climate change on yield of coffee (*Coffea arabica* L.) under agroforestry and monoculture systems. *Agroforestry Systems* 94(1):57-70. DOI: <https://doi.org/10.1007/S10457-019-00369-5>.
- Ha, T.V; Amichev, B.Y; Belcher, K.W; Bentham, M.J; Kulshreshtha, S.N; Laroque, C.P; Van Rees, K.C.J. 2019. Shelterbelt Agroforestry Systems Inventory and Removal Analyzed by Object-based Classification of Satellite Data in Saskatchewan, Canada (en línea). *Canadian Journal of Remote Sensing* 45(2):246-263. DOI: <https://doi.org/10.1080/07038992.2018.1540297>.
- Hakim, L; Rahardi, B; Guntoro, D.A; Mukhoyyaroh, N.I. 2022. Coffee Landscape of Banyuwangi Geopark: Ecology, Conservation, and Sustainable Tourism Development. *Journal of Tropical Life Science* 12(1):107-116. DOI: <https://doi.org/10.11594/jtls.12.01.11>.
- Hamui-Sutton, A; Varela-Ruiz, M. 2013. La técnica de grupos focales (en línea). *Investigación en Educación Médica* 2(5):55-60. DOI: [https://doi.org/10.1016/s2007-5057\(13\)72683-8](https://doi.org/10.1016/s2007-5057(13)72683-8).
- Harvey, C.A; Pritts, A.A; Zwetsloot, M.J; Jansen, K; Pulleman, M.M; Armbrecht, I; Avelino, J; Barrera, J.F; Bunn, C; García, J.H; Isaza, C; Munoz-Ucros, J; Pérez-Alemán, C.J; Rahn, E; Robiglio, V; Somarriba, E; Valencia, V. 2021. Transformation of coffee-growing landscapes across Latin America. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 41(5). DOI: <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00712-0>.
- HUETE, AR. 1988. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT* 25(3):295-309. DOI: [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X).
- ICF (Instituto de Conservación y Desarrollo Forestal, Áreas Protegidas y Vida Silvestre). 2022. Sistema de Información para la Gestión y Monitoreo Forestal (SIGMOF): mapa de cobertura forestal y uso de la tierra 2018 (online). 10-sept. Disponible en: [https://sigmof.icf.gob.hn/?page\\_id=7253](https://sigmof.icf.gob.hn/?page_id=7253).
- ICO (International Coffee Organization. 2020. Historical Data on the Global Coffee Trade; International Coffee Organization (ICO): London, UK.
- Jelének, J; Kopačková-Strnadová, V. 2021. Synergic use of Sentinel-1 and Sentinel-2 data for automatic detection of earthquake-triggered landscape changes: A case study of the 2016 Kaikoura earthquake (Mw 7.8), New Zealand. *Remote Sensing of Environment* 265(July). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112634>.
- Jezeer, R.E; Santos, M.J; Verweij, P.A; Boot, R.G.A; Clough, Y. 2019. Benefits for multiple ecosystem services in Peruvian coffee agroforestry systems without reducing yield (en línea). *Ecosystem Services* 40(September):101033. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2019.101033>.

- Jha, S; Bacon, C.M; Philpott, S.M; Méndez, V.E; Läderach, P. 2014. Shade Coffee: Update on a Disappearing Refuge for Biodiversity. *BioScience* XX(X):1-13. DOI: <https://doi.org/10.1093/biosci/biu038>.
- Jia, K; Li, Y; Liang, S; Wei, X; Yao, Y. 2017. Combining estimation of green vegetation fraction in an arid region from Landsat 7 ETM+ data. *Remote Sensing* 9(11):1-15. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs9111121>.
- Jiménez-Nehring, N.G. 2012. Producción de madera y almacenamiento de carbono en cafetales con cedro (*Cedrela odorata*) y caoba (*Swietenia macrophylla*) en Honduras. MSc. Thesis, CATIE, Turrialba, Costa Rica. 122 p.
- Johnson, N; Chang, E; Johnson, N. 2015. En búsqueda de un enfoque común para el Corredor Biológico Mesoamericano. World Resources Institute. Disponible en: [https://www.researchgate.net/profile/Nels-Johnson/publication/241146867\\_En\\_búsqueda\\_de\\_un\\_enfoque\\_comun\\_para\\_el\\_Corredor\\_Biologico\\_Mesoamericano/links/562507b908ae4d9e5c4b9a76/En-búsqueda-de-un-enfoque-comun-para-el-Corredor-Biologico-Mesoamericano.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Nels-Johnson/publication/241146867_En_búsqueda_de_un_enfoque_comun_para_el_Corredor_Biologico_Mesoamericano/links/562507b908ae4d9e5c4b9a76/En-búsqueda-de-un-enfoque-comun-para-el-Corredor-Biologico-Mesoamericano.pdf)
- Kaplan, G; Rozenstein, O. 2021. Spaceborne Estimation of Leaf Area Index in Cotton, Tomato, and Wheat Using Sentinel-2. *Land* 2021. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/land10050505>.
- Kowalski, K; Senf, C; Hostert, P; Pflugmacher, D. 2020. Characterizing spring phenology of temperate broadleaf forests using Landsat and Sentinel-2 time series. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 92(June). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102172>.
- Landis, D.A. 2017. Designing agricultural landscapes for biodiversity-based ecosystem services (en línea). *Basic and Applied Ecology* 18:1-12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.baae.2016.07.005>.
- Lamond, G; Sandbrook, L; Gassner, A; Sinclair, F.L. 2016. LOCAL KNOWLEDGE of TREE ATTRIBUTES UNDERPINS SPECIES SELECTION on COFFEE FARMS. *Experimental Agriculture* 55(S1):35-49. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0014479716000168>.
- Latini, A.O; Silva, D.P; Souza, F.M.L; Ferreira, M.C; Moura, M.S de; Suarez, N.F. 2020. Reconciling coffee productivity and natural vegetation conservation in an agroecosystem landscape in Brazil. *Journal for Nature Conservation* 57(September). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2020.125902>.
- Li, G; Wan, S; Zhou, J; Yang, Z; Qin, P. 2010. Leaf chlorophyll fluorescence, hyperspectral reflectance, pigments content, malondialdehyde and proline accumulation responses of castor bean (*Ricinus communis* L.) seedlings to salt stress levels. *Industrial Crops and Products* 31:13-19. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2009.07.015>.
- Navarro, A; Catalao, J; Calvao, J. 2019. Assessing the Use of Sentinel-2 Time Series Data for Monitoring Cork Oak Decline in Portugal. *Remote sensing Article*. DOI: <https://doi.org/doi:10.3390/rs11212515>.
- Ndiritu, J.M; Kinama, J.M; Muthama, J.N. 2022. Assessment of ecosystem services knowledge, attitudes, and practices of coffee farmers using legume cover crops. *Ecosphere* 13(4):1-16. DOI: <https://doi.org/10.1002/ecs2.4046>.

- Nguyen, M.P; Vaast, P; Pagella, T; Sinclair, F. 2020. Local knowledge about ecosystem services provided by trees in coffee agroforestry practices in northwest Vietnam. *Land* 9(12):1-27. DOI: <https://doi.org/10.3390/land9120486>.
- Nguyen-Trong, H; Nguyen, T.D; Kappas, M. 2020. Land Cover and Forest Type Classification by Values of Vegetation Indices and Forest Structure of Tropical Lowland Forests in Central Vietnam. *International Journal of Forestry Research* 2020. DOI: <https://doi.org/10.1155/2020/8896310>.
- Nogueira-Martins, R; de Carvalho Pinto, F.d.A; Marçal de Queiroz, D; Magalhães Valente, D.S; Fim Rosas, J.T. 2021. A Novel Vegetation Index for Coffee Ripeness Monitoring Using Aerial Imagery. *Remote Sens.* 13, 263. <https://doi.org/10.3390/rs13020263>.
- Notaro, M; Gary, C; Le Coq, J.F; Metay, A; Rapidel, B. 2022. How to increase the joint provision of ecosystem services by agricultural systems? Evidence from coffee-based agroforestry systems. *Agricultural Systems* 196(November 2021). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103332>.
- Majasalmi, T; Rautiainen, M. 2016. The potential of Sentinel-2 data for estimating biophysical variables in a boreal forest: a simulation study. *Remote Sensing Letters* 7(February):427-436. DOI: <https://doi.org/10.1080/2150704X.2016.1149251>.
- Martins, M.Q; Rodrigues, W.P; Fortunato, A.S; Leitão, A.E; Rodrigues, A.P; Pais, I.P; Martins, L.D; Silva, M.J; Reboredo, F.H; Partelli, F.L; Campostrini, E; Tomaz, M.A; Scotti-Campos, P; Ribeiro-Barros, A.I; Lidon, F.J.C; Damatta, F.M; Ramalho, J.C. 2016. Protective response mechanisms to heat stress in interaction with high [CO<sub>2</sub>] conditions in coffee spp. *Frontiers in Plant Science* 7(June). DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00947>.
- Mazur, P; Gozdowski, D; Wnuk, A. 2022. Relationships between Soil Electrical Conductivity and Sentinel-2-Derived NDVI with pH and Content of Selected Nutrients. *Agronomy Article* 12. DOI: <https://doi.org/doi.org/10.3390/agronomy12020354>.
- Mbow, C; Smith, P; Skole, D; Duguma, L; Bustamante, M. 2014. Achieving mitigation and adaptation to climate change through sustainable agroforestry practices in africa (en línea). *Current Opinion in Environmental Sustainability* 6(1):8-14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.09.002>.
- Méndez-Barroso, L.A; Vivoni, E.R; Watts, C.J; Rodríguez, J.C. 2009. Seasonal and interannual relations between precipitation, surface soil moisture and vegetation dynamics in the North American monsoon region (en línea). *Journal of Hydrology* 377(1-2):59-70. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.009>.
- Meyer, S.T; Koch, C; Weisser, W.W. 2015. Towards a standardized Rapid Ecosystem Function Assessment (REFA) (en línea). *Trends in Ecology and Evolution* 30(7):390-397. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tree.2015.04.006>.
- Meylan, L; Merot, A; Gary, C; Rapidel, B. 2013. Combining a typology and a conceptual model of cropping system to explore the diversity of relationships between ecosystem services: The case of erosion control in coffee-based agroforestry systems in Costa Rica (en línea). *Agricultural Systems* 118:52-64. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2013.02.002>.
- Mngadi, M; Odindi, J; Mutanga, O. 2021. The Utility of Sentinel-2 Spectral Data in Quantifying Above-Ground Carbon Stock in an Urban Reforested Landscape. *Remote Sensing* 13:4281. DOI: <https://doi.org/doi.org/10.3390/rs13214281>

- Murcia, C. (2001). Cambios en el método de cultivo del café y sus efectos sobre la biodiversidad. En, R., Primack, R. Rozzi, P. Feinsinger, R. Dirzo, & F. Massardo. *Fundamentos de Conservación Biológica. Perspectivas latinoamericanas.* (pp. 532-533) Fondo de Cultura Económica.
- Morales, L.V.; Robiglio, V; Baca, M; Bunn, C; Reyes, M. 2022. Planning for Adaptation: A System Approach to Understand the Value Chain's Role in Supporting Smallholder Coffee Farmers' Adaptive Capacity in Peru. *Frontiers in Climate* 4(April):1-23. DOI: <https://doi.org/10.3389/fclim.2022.788369>.
- Mosomtai, G; Odindi, J; Abdel-Rahman, EM; Babin, R; Fabrice, P; Mutanga, O; Tonnang, HEZ; David, G; Landmann, T. 2020. Landscape fragmentation in coffee agroecological subzones in central Kenya: a multiscale remote sensing approach. *Journal of Applied Remote Sensing* 14(04). DOI: <https://doi.org/10.1117/1.jrs.14.044513>.
- Moyao-Calleja, G; Ramos-Bernal, R; Vázquez-Jiménez, R; Guinto-Herrera, E; Nájera-Ramos, A. 2021. Cálculo de Índices de Vegetación NDVI y SAVI a Partir de Imágenes Multiespectrales Obtenidas con un Dron (en línea). *Academia Journals* 13(4). Disponible en <https://www.researchgate.net/publication/351837842%0ACálculo>.
- Ortiz, B.V; Thomson, S.J; Huang, Y; Reddy, K.N; Ding, W. 2011. Determination of differences in crop injury from aerial application of glyphosate using vegetation indices (en línea). *Computers and Electronics in Agriculture* 77(2):204-213. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.05.004>.
- Ovalle-Rivera, O; Van Oijen, M; Läderach, P; Rounsard, O; de Melo Virginio Filho, E; Barrios, M; Rapidel, B. 2020. Assessing the accuracy and robustness of a process-based model for coffee agroforestry systems in Central America. *Agroforestry Systems* 94(5):2033-2051. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10457-020-00521-6>.
- Pandit, S; Tsuyuki, S; Dube, T. 2018. Estimating above-ground biomass in sub-tropical buffer zone community forests, Nepal, using Sentinel 2 data. *Remote Sensing* 10(4). DOI: <https://doi.org/10.3390/rs10040601>.
- Paudyal, K; Baral, H; Burkhard, B; Bhandari, S.P; Keenan, R.J. 2015. Participatory assessment and mapping of ecosystem services in a data-poor region: Case study of community-managed forests in central Nepal (en línea). *Ecosystem Services* 13:81-92. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2015.01.007>.
- Paudyal, K; Samsudin, Y.B; Baral, H; Okarda, B; Phuong, V.T; Paudel, S; Keenan, R.J. 2020. Spatial assessment of ecosystem services from planted forests in central Vietnam. *Forests* 11(8):1-19. DOI: <https://doi.org/10.3390/f11080822>.
- Peh, K.S.H; Thapa, I; Basnyat, M; Balmford, A; Bhattarai, G.P; Bradbury, R.B; Brown, C; Butchart, S.H.M; Dhakal, M; Gurung, H; Hughes, F.M.R; Mulligan, M; Pandeya, B; Stattersfield, A.J; Thomas, D.H.L; Walpole, M; Merriman, J.C. 2016. Synergies between biodiversity conservation and ecosystem service provision: Lessons on integrated ecosystem service valuation from a Himalayan protected area, Nepal. *Ecosystem Services* 22:359-369. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2016.05.003>.
- Pico-Mendoza, J; Pinoargote, M; Carrasco, B; Limongi-Andrade, R. 2020. Ecosystem services in certified and non-certified coffee agroforestry systems in Costa Rica (en línea). *Agroecology and Sustainable Food Systems* 44(7):902-918. DOI: <https://doi.org/10.1080/21683565.2020.1713962>.

- Pinoargote, M. 2022. Tópicos selectos de investigación en conservación de recursos naturales en América Latina. 1 ed. Ruíz, MGS-MHE; Ocaranza, MGC (eds.). s.l., s.e. 197 p.
- Prado, S.G; Collazo, J.A; Marand, M.H; Irwin, R.E. 2021. The influence of floral resources and microclimate on pollinator visitation in an agro-ecosystem. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 307. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107196>.
- PROMECAFE (Programa Cooperativo Regional para el Desarrollo Tecnológico y Modernización de la Caficultura). 2019. Panorama técnico-científico: región PROMECAFE. Boletín No. 161 octubre-diciembre 2019. (161). Consultado 25 Ag. 2021. Disponible en: <https://promecafe.net/wp-content/uploads/2020/09/Boletin-161.pdf>
- R-Core-Team (2022). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL: <https://www.R-project.org/>.
- Rahn, E; Vaast, P; Läderach, P; van Asten, P; Jassogne, L; Ghazoul, J. 2018. Exploring adaptation strategies of coffee production to climate change using a process-based model (en línea). *Ecological Modelling* 371(July 2017):76-89. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2018.01.009>.
- Rani, M; Kumar, P; Chandra-Pandey, P; Prashant, K; Srivastava, B.S; Vandana-Tomar, C and Prasad-Mandal, V. 2018. Multi-Temporal NDVI and Surface Temperature Analysis for Urban Heat Island inbuilt surrounding of Sub-humid Region: A Case Study of two Geographical Regions, *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2018.03.007>
- Rapidel, B; Ripoché, A; Allinne, C; Metay, A; Deheuvels, O; Lamanda, N; Blazy, J.M; Valdés-Gómez, H; Gary, C. 2015. Analysis of ecosystem services trade-offs to design agroecosystems with perennial crops. *Agronomy for Sustainable Development* 35(4):1373-1390. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0317-y>.
- Ratnadass, A; Avelino, J; Fernandes, P; Letourmy, P; Babin, R; Deberdt, P; Deguine, J.P; Grechi, I; Naudin, K; Rhino, B; DeClerck, F; Kadi Kadi, H.A; Mahob, R; Rabary, B; Rafaraso, L.S; Lescourret, F; Van Den Berg, J. 2021. Synergies and tradeoffs in natural regulation of crop pests and diseases under plant species diversification. *Crop Protection* 146(November 2020). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2021.105658>.
- Rice, R.A. 2008. Agricultural intensification within agroforestry: The case of coffee and wood products. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 128(4):212-218. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2008.06.007>.
- Richards, J.H; Torrez-Luna, I.M; Waller, D.M. 2020. Tree longevity drives conservation value of shade coffee farms for vascular epiphytes (en línea). *Agriculture, Ecosystems and Environment* 301(May):107025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107025>.
- Rigal, C; Xu, J; Hu, G; Qiu, M; Vaast, P. 2020. Coffee production during the transition period from monoculture to agroforestry systems in near optimal growing conditions, in Yunnan Province (en línea). *Agricultural Systems* 177(September 2019):102696. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102696>.
- Rigal, C; Vaast, P; Xu, J. 2018. Using farmers' local knowledge of tree provision of ecosystem services to strengthen the emergence of coffee-agroforestry landscapes in southwest China. *PLoS ONE* 13(9):1-18. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0204046>.

- Saah, D; Tenneson, K; Matin, M; Uddin, K; Cutter, P; Poortinga, A; Nguyen, Q.H; Patterson, M; Johnson, G; Markert, K; Flores, A; Anderson, E; Weigel, A; Ellenberg, W.L; Bhargava, R; Aekakkararungroj, A; Bhandari, B; Khanal, N; Housman, I.W; Potapov, P; Tyukavina, A; Maus, P; Ganz, D; Clinton, N; Chishtie, F. 2019 Land Cover Mapping in Data Scarce Environments: Challenges and Opportunities. *Front. Environ. Sci.* 7:150. Doi: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00150>.
- Saj, S; Nijmeijer, A; Nieboukaho, J.D.E; Lauri, P.E; Harmand, J.M. 2021. Litterfall seasonal dynamics and leaf-litter turnover in cocoa agroforests established on past forest lands or savannah (en línea). *Agroforestry Systems* 95(4):583-597. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10457-021-00602-0>.
- Santos, P.Z.F; Crouzeilles, R; Sansevero, J.B.B. 2019. Can agroforestry systems enhance biodiversity and ecosystem service provision in agricultural landscapes? A meta-analysis for the Brazilian Atlantic Forest. *Forest Ecology and Management* 433:140-145. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.10.064>.
- Santos, W.J.R; Silva, B.M; Oliveira, G.C; Volpato, M.M.L; Lima, J.M; Curi, N; Marques, J.J. 2014. Soil moisture in the root zone and its relation to plant vigor assessed by remote sensing at management scale (en línea). *Geoderma* 221-222:91-95. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.01.006>.
- Sarmiento-Soler, A; Rötter, R.P; Hoffmann, M.P; Jassogne, L; van Asten, P; Graefe, S; Vaast, P. 2022. Disentangling effects of altitude and shade cover on coffee fruit dynamics and vegetative growth in smallholder coffee systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 326(October 2020). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107786>.
- Sarmiento-Soler, A; Vaast, P; Hoffmann, M.P; Rötter, R.P; Jassogne, L; van Asten, P.J.A; Graefe, S. 2019. Water use of *Coffea arabica* in open versus shaded systems under smallholder's farm conditions in Eastern Uganda. *Agricultural and Forest Meteorology* 266-267(December 2018):231-242. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.12.006>.
- Serrano, J; Shahidian, S; Marques da Silva, J. 2018. Monitoring Seasonal Pasture Quality Degradation in the Mediterranean Montado Ecosystem: Proximal versus Remote Sensing. *water* 10(1422):20. DOI: <https://doi.org/10.3390/w10101422>.
- Shafizadeh-moghadam, H; Minaei, F; Talebi-khiyavi, H; Xu, T; Homaei, M. 2022. Synergetic use of multi-temporal Sentinel-1, Sentinel-2, NDVI, and topographic factors for estimating soil organic carbon (en línea). *Catena* 212(May):106077. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106077>.
- Sharma, R; Rimal, B; Baral, H; Nehren, U; Paudyal, K. 2019. Impact of Land Cover Change on Ecosystem Services in a Tropical Forested Landscape. *Resources* :1-13. DOI: <https://doi.org/10.3390/resources8010018>.
- Siebert, S.F. 2002. From shade- to sun-grown perennial crops in Sulawesi, Indonesia: implications for biodiversity conservation and soil fertility (en línea). *Biodiversity and Conservation*. Disponible en [https://www.researchgate.net/publication/343298306\\_Los\\_servicios\\_ecosistemas\\_desde\\_la\\_percepcion\\_de\\_los\\_productores\\_de\\_cafe\\_de\\_Belen\\_de\\_Umbria\\_Risaralda\\_Colombia](https://www.researchgate.net/publication/343298306_Los_servicios_ecosistemas_desde_la_percepcion_de_los_productores_de_cafe_de_Belen_de_Umbria_Risaralda_Colombia).

- SICA (Sistema de la Integración Centroamericana). 2020. Situación del café en Centroamérica (en línea, sitio web). Consultado 25 jun. 2020. Disponible en <https://www.sica.int/Iniciativas/cafe>.
- Siles, P; Harmand, J.M; Vaast, P. 2010. Effects of *Inga densiflora* on the microclimate of coffee (*Coffea arabica* L.) and overall biomass under optimal growing conditions in Costa Rica. *Agroforestry Systems* 78(3):269-286. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10457-009-9241-y>.
- Sinu, P.A; Viswan, G; Fahira, P.P; Rajesh, T.P; Manoj, K; Hariraveendra, M; Jose, T. 2021. Shade tree diversity may not drive prey-predator interaction in coffee agroforests of the Western Ghats biodiversity hotspot, India (en línea). *Biological Control* 160(October 2020):104674. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2021.104674>.
- Solis, A.F; Revelo luna, D.A; Campo Ceballos, D.A; Gaviria López, C.A. 2021. Correlación del contenido de clorofila foliar de la especie *Coffea arabica* con índices espectrales en imágenes. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial* 19(2):51-68. DOI: <https://doi.org/10.18684/bsaa.v19.n2.2021.1536>.
- Smith, D.E; Gassner, A; Agaba, G; Nansamba, R; Sinclair, F. 2018. The utility of farmer ranking of tree attributes for selecting companion trees in coffee production systems (en línea). *Agroforestry Systems* 93(4):1469-1483. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0257-z>.
- Somarriba, E; López-Sampson, A. 2018. Coffee and Cocoa Agroforestry Systems: Pathways to Deforestation, Reforestation, and Tree Cover Change (en línea). *International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank* (December):51. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29700.78724>.
- Soto-Pinto, L; Anzueto, M; Mendoza, J; Ferrer, G. J; de Jong, B. (2010). Carbon sequestration through agroforestry in indigenous communities of Chiapas, México. *Agroforest. Syst.*, 78, 39–51.
- Soto-Pinto, L; Jiménez-Ferrer, G. 2018. Socio-environmental contradictions in carbon mitigation processes in agroforestry systems. *Madera y Bosques* 24(Special Issue). DOI: <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2401887>.
- Souza, H.N de; de Goede, R.G.M; Brussaard, L; Cardoso, I.M; Duarte, E.M.G; Fernandes, R.B.A; Gomes, L.C; Pulleman, M.M. 2012. Protective shade, tree diversity and soil properties in coffee agroforestry systems in the Atlantic Rainforest biome (en línea). *Agriculture, Ecosystems and Environment* 146(1):179-196. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.11.007>.
- Tassopoulos, D; Kalivas, D; Giovos, R; Lougkos, N; Priovolou, A. 2021. Sentinel-2 imagery monitoring vine growth related to topography in a protected designation of origin region. *Agriculture (Switzerland)* 11(8). DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture11080785>.
- Taugourdeau, S; Avelino, J; Jones, J.R; Ramírez, L.G; Jara, M; Charbonnier, F; Gómez-delgado, F; Harmand, J; Rapidel, B. 2014. Leaf area index as an indicator of ecosystem services and management practices: An application for coffee agroforestry (en línea). «*Agriculture, Ecosystems and Environment*». DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.03.042>.
- Toledo, V.M; Moguel, P. 2012. Coffee and Sustainability: The Multiple Values of Traditional Shaded Coffee. s.l., s.e., vol.36. p. 353-377 DOI: <https://doi.org/10.1080/10440046.2011.583719>.
- Tomar, V; Kumar, P; Rani, M; Gupta, G and Singh, J. 2013. A satellite-based biodiversity dynamics capability in tropical forest. *Electron. J. Geotech. Eng.*, 18:1171-1180.

- Torres, E; Linares, G; Tenorio, MG; Peña, R; Castelán, R; Rodríguez, A. 2014. Índices de vegetación y Uso de Suelo en la Región Terrestre Prioritaria 105: Cuetzalan, México (en línea). Revista Iberoamericana de Ciencias (2334-2501):12. Disponible en <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwib6s7FnuTYAhUOyGMKHTdHDAUQFggguMAE&url=http%3A%2F%2Fwww.reibci.org%2Fpublicados%2F2014%2Fagosto%2F3300108.pdf&usg=AOvVaw1qHbLTgmsrMGQZ9PJC24tB>.
- Torabzadeh, H; Moradi, M; Fatehi, P. 2019. ESTIMATING ABOVEGROUND BIOMASS IN ZAGROS FOREST, IRAN, USING SENTINEL-2 DATA. XLII-4/W18(October):12-14. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W18-1059-2019>.
- Tscharntke, T; Clough, Y; Bhagwat, S.A; Buchori, D; Faust, H; Hertel, D; Hölscher, D; Jührbandt, J; Kessler, M; Perfecto, I; Scherber, C; Schroth, G; Veldkamp, E; Wanger, T.C. 2011. Multifunctional shade-tree management in tropical agroforestry landscapes - A review. *Journal of Applied Ecology* 48(3):619-629. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2010.01939.x>.
- Tsewoue, M.R; Avana-Tientcheu, M.L; Tchoundjeu, Z. 2019. Étude ethnobotanique et contribution de *Canarium schweinfurthii* (Engl) (Burseraceae) aux services écosystémiques des agroforêts à base de caféiers dans le Département de Bamboutos (Ouest, Cameroun). *Journal of Applied Biosciences* 135(1):13808-13820. DOI: <https://doi.org/10.4314/jab.v135i1.7>.
- UICN (Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza). 2020. Ficha técnica del Corredor Biológico de la Biósfera “Cacique Lempira, Señor de las Montañas”. (Online) Extraído 10-sept 2022. Disponible en <https://www.iucn.org/es>.
- Van Der Wolf, J; Jassogne, L; Gram, G; Vaast, P. 2016. TURNING LOCAL KNOWLEDGE on AGROFORESTRY into AN ONLINE DECISION-SUPPORT TOOL for TREE SELECTION in SMALLHOLDERS’ FARMS. *Experimental Agriculture* 55(S1):50-66. DOI: <https://doi.org/10.1017/S001447971600017X>.
- Vasallo-Rodríguez, L; Montes-Espín, R; Escarré-Esteve, A; Bonet-Jornet, A; & Fernández-Santana, I. (2020). Los cafetales de sombra y la conservación de la diversidad biológica. El contexto cubano. *Revista Científica Agroecosistemas*, 8(3), 122-126.
- Vezy, R; le Maire, G; Christina, M; Georgiou, S; Imbach, P; Hidalgo, H.G; Alfaro, E.J; Blitz-Frayret, C; Charbonnier, F; Lehner, P; Loustau, D; Rounsard, O. 2020. DynACof: A process-based model to study growth, yield and ecosystem services of coffee agroforestry systems. *Environmental Modelling and Software* 124(December 2019). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.104609>.
- Villarreyna, R; Avelino, J; Cerda, R. 2020. Ecosystem-based adaptation: Effect of shade trees on ecosystem services in coffee plantations. *Agronomy Mesoamerican* 31(2):499-516. DOI: <https://doi.org/10.15517/am.v31i2.37591>.
- Wagner, S; Rigal, C; Liebig, T; Mremi, R; Hemp, A; Jones, M; Price, E; Preziosi, R. 2019. Ecosystem services and importance of common tree species in coffee-agroforestry systems: Local knowledge of small-scale farmers at Mt. Kilimanjaro, Tanzania. *Forests* 10(11). DOI: <https://doi.org/10.3390/f10110963>.
- Waller, J.M; Bigger, M; Hillocks, R.J. (2007) Producción mundial de café. Plagas, enfermedades del

café y su manejo. CABI, Wallingford, págs. 17–33.

Wickham, H. (2016). *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York.

Wittke, S; Yu, X; Karjalainen, M; Hyypä, J; Puttonen, E. 2019. Comparison of two-dimensional multitemporal Sentinel-2 data with three-dimensional remote sensing data sources for forest inventory parameter estimation over a boreal forest (en línea). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 76(December):167-178. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.11.009>.

Zarate-Valdez, J.L; Whiting, M.L; Lampinen, B.D; Metcalf, S; Ustin, S.L; Brown, P.H. 2012. Prediction of leaf area index in almonds by vegetation indexes (en línea). *COMPUTERS AND ELECTRONICS IN AGRICULTURE* 85:24-32. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.03.009>.

Zhang, H.K; Roy, D.P; Yan, L; Li, Z; Huang, H; Vermote, E; Skakun, S; Roger, J. 2018. Remote Sensing of Environment Characterization of Sentinel-2A and Landsat-8 top of atmosphere, surface, and nadir BRDF adjusted reflectance and NDVI differences (en línea). *Remote Sensing of Environment* 215(April):482-494. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.04.031>.

Zeng, Y; Koh, L.P; Wilcove, D.S. 2022. Gains in biodiversity conservation and ecosystem services from the expansion of the planet's protected areas. *Science Advances* 8(22):1-10. DOI: <https://doi.org/10.1126/sciadv.abl9885>.