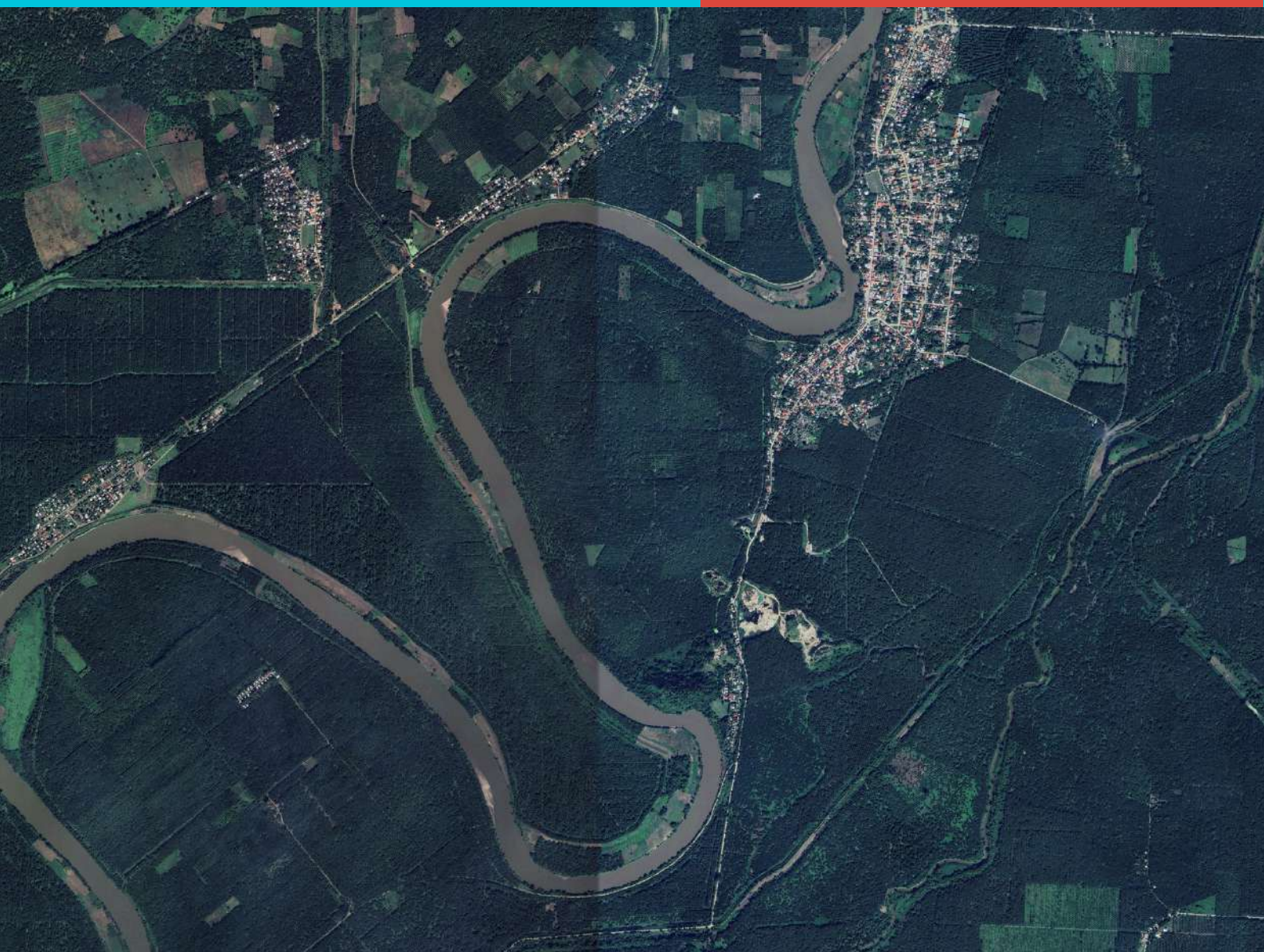




PROTOCOLO METODOLÓGICO

Mapa Nacional de Uso de la Tierra
por Palma Aceitera, 2020

PARTICIPANTES



AUTORIDAD NACIONAL

Luis Edgardo Soliz Lobo
Director Ejecutivo del ICF

COORDINACIÓN ADMINISTRATIVA ICF

José David Pastrana
Coordinador General OCP

COORDINACIÓN GENERAL TÉCNICA

Manuel Enrique Erazo
Jefe del CIPF
Karol Berenice Lara
Coordinadora UMF/CIPF

COORDINACIÓN METODOLÓGICA

Maynor Josué Díaz López
Técnico SIG / UMF

EQUIPO CONSULTOR

Adibeth Arami Cadalzo
Técnico SIG
Armando Josué Vásquez
Técnico SIG
Sheila Lizeth Nuñez
Técnico SIG

EQUIPO TÉCNICO ICF

Luis Alonso Fuentes
Técnico Unidad Monitoreo Forestal
Luis Alfredo López
Técnico Unidad Monitoreo Forestal
Marlon Alexander Díaz
Wilman Mejía
Técnico Unidad Monitoreo Forestal
Teresa de Jesús Gómez
Técnico Unidad Monitoreo Forestal

COORDINACIÓN IICA

Daryl Medina
Enlace Bosques Vivos

1. INTRODUCCIÓN

Mediante la entrada en vigor del Reglamento (UE) 2023/1115 (EUDR), el cual se establece como una medida regulatoria y restrictiva del mercado de la UE ante la introducción, comercialización y exportación de siete productos principales, y sus derivados, que incluyen cultivos como el café, el cacao, soja, aceite de palma, madera y ganado vacuno.

El objetivo principal es reducir la deforestación y degradación de los bosques, minimizar la emisión de gases de efecto invernadero y la pérdida de biodiversidad, relativo a las cadenas de suministro de dichas materias. Dentro del Reglamento se estipula que los comerciantes y operadores que pretendan participar dentro del mercado europeo deben demostrar que sus productos se encuentren libres de deforestación, sean elaborados en conformidad con la legislación vigente del país de origen y se encuentran respaldados por una declaración de diligencia debida (Unión Europea, 2023).

A nivel mundial, el aceite de palma es uno de los aceites más populares y consumidos. Se encuentra presente dentro de diversos productos alimenticios, concentrados, cosméticos, productos de limpieza, biocombustibles, vitaminas, y otros (Linares, 2023). A nivel mundial, Honduras se posiciona entre los diez mayores productores de aceite de palma, en primer lugar, a nivel de Centroamérica, y en tercera posición en Latinoamérica, por debajo de Colombia y Guatemala (Zhang et al., 2025). Sin embargo, también es una de las principales causas de deforestación, cambio de uso de suelo y degradación de los bosques en el norte del país (Leon, 2019).

Bajo este escenario, el Instituto de Conservación y Desarrollo Forestal, Áreas Protegidas y Vida Silvestre (ICF) en colaboración con el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), ha coordinado la construcción y validación del Mapa Nacional Uso de la Tierra por Palma Aceitera 2020.

El presente documento describe la metodología empleada para la generación, validación y edición del producto cartográfico denominado Mapa Nacional de Uso de la Tierra por Palma Aceitera 2020. La clasificación se realizó mediante el algoritmo Random Forest, a partir de un modelo de entrenamiento construido con imágenes satelitales Sentinel-2 del Programa Copernicus, complementadas con datos auxiliares e índices espectrales. Se espera que este mapa funcione como una herramienta de soporte técnico para los productores, facilitando el cumplimiento de los criterios establecidos en el Reglamento (UE) 2023/1115 (EUDR).



2. ANTECEDENTES

El Instituto de Conservación y Desarrollo Forestal, Áreas Protegidas y Vida Silvestre (ICF) ha desarrollado diversas herramientas en el monitoreo y gestión de los recursos naturales:

- Elaboración de los Mapas Nacionales de Cobertura y Uso de la Tierra de Honduras para los años 2014, 2018 y 2024, los cuales integran información espacial detallada sobre las categorías de cobertura forestal a nivel nacional, así como la distribución y extensión de los cultivos de palma africana.

- Diseño e implementación de un conjunto de estrategias orientadas a la prevención, monitoreo y mitigación de la deforestación y el cambio de uso del suelo, incluyendo el desarrollo de herramientas de monitoreo geoespacial de alerta temprana, como la plataforma “Alerta Bosque”, destinada a la detección oportuna de cambios en la cobertura forestal mediante el análisis sistemático de datos de sensores remotos y series temporales de imágenes satelitales.

- Desarrollo del Mapa Nacional de Uso de la Tierra correspondiente a las plantaciones de palma aceitera, financiado por el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), como parte de los mecanismos de cumplimiento del Reglamento (UE) 2023/1115 (EUDR), orientado a garantizar la trazabilidad y verificación de productos libres de deforestación a partir del 31 de diciembre de 2020.



3. JUSTIFICACIÓN

La industria de la palma aceitera es un pilar fundamental del comercio global y la economía de ciertas naciones, en donde los países productores satisfacen la creciente demanda internacional. Se posiciona como uno de los cultivos agrícolas más comercializados a nivel mundial, debido a la demanda de biocombustibles de mercados como el de la UE y al creciente consumo de alimentos en países como India y China (Huey Yi y Kunjuraman, 2025).

En la actualidad, es una materia fundamental para la economía de numerosos países, siendo un cultivo establecido en plantaciones a lo largo de los trópicos húmedos de Asia, África y América, siendo exportado a los mercados internacionales. En América, las regiones de Sudamérica y Centroamérica se consideran altamente favorables, estableciéndose las primeras plantaciones en Honduras y Costa Rica (Murphy et al., 2020).

No obstante, es un cultivo altamente ligado a la degradación de los bosques y a la pérdida de biodiversidad. Entre 1972 y 2015, aproximadamente el 46% de las nuevas plantaciones se establecieron sobre bosques, mientras que el resto reemplazó tierras agrícolas, pastizales, matorrales y otras coberturas.

Se han documentado un total de 321 amenazadas por la presencia de palma africana dentro de la Lista Roja de Especies Amenazadas de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN), así mismo, se ha registrado una menor diversidad y abundancia de especies en comparación con los bosques naturales. La Lista Roja de Especies Amenazadas de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) documenta 321 especies amenazadas por la expansión de la palma aceitera africana. Además, se ha registrado una menor diversidad y abundancia de especies en plantaciones de palma aceitera, en comparación con los bosques naturales (Meijaard et al., 2020).

En este contexto nace la iniciativa de elaborar el presente Mapa Nacional de Uso de la Tierra por Palma Aceitera, no solo como una estrategia de regulación del cultivo, también como una herramienta para los productores, facilitando el cumplimiento de los requisitos establecidos dentro del Reglamento (UE) 2023/1115 (EUDR), promoviendo prácticas sostenibles en la cadena de suministro de palma aceitera.

4. OBJETIVOS

● Objetivo General

Crear un Mapa Nacional Uso de la Tierra por Palma Aceitera 2020 de Honduras que sirva como una línea base crucial para la debida diligencia requerida por el Reglamento (UE) 2023/1115 (EUDR), facilitando así la demostración de que los productos generados y sus derivados no ha contribuido a la deforestación en Honduras después del 31 de diciembre de 2020.

● Objetivos Específicos

- Elaborar una base de entrenamiento a partir de la identificación de palma y no palma en Honduras.
- Crear un compuesto temporal corregido de imágenes Sentinel-1 y Sentinel-2 para el año 2020.
- Calcular los índices espectrales a partir de compuesto temporal de Sentinel-2 relevantes para uso como variables predictoras.
- Calcular estadísticos a partir de compuesto temporal de Sentinel-1 relevantes para uso como variables predictoras.
- Crear un modelo de predicción espacial para coberturas de palma y no palma en el año 2020.
- Evaluar los resultados del modelo de predicción espacial de palma y no palma, buscando establecer el nivel de precisión alcanzado.
- Calcular estadísticos de los resultados de la predicción espacial de palma y no palma a nivel de las regiones administrativas del Instituto Nacional de Conservación y Desarrollo Forestal, Áreas Protegidas y Vida Silvestre de Honduras (ICF)





5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio abarca la totalidad del territorio nacional de Honduras. Para la elaboración del mapa se adoptó un enfoque operativo basado en las Regiones Forestales del ICF, lo que permitió desarrollar procesos de clasificación ajustados a las particularidades biofísicas y de uso del suelo de cada zona. Esta estrategia facilita el entrenamiento de modelos más representativos y mejora la consistencia espacial del producto final. La distribución de las Regionales Forestales se presenta en la Figura 1.

Honduras presenta una marcada heterogeneidad ambiental, resultado de la variación en condiciones climáticas, topográficas y de cobertura del suelo. Estas características han favorecido el establecimiento y expansión de cultivos agroindustriales como la palma aceitera (*Elaeis guineensis*), cuyo monitoreo a escala nacional resulta prioritario para la gestión territorial y ambiental (ICF, 2019).





Figura 1. Distribución de regionales para la elaboración de Mapa Palma Aceitera 2020

5.1.1. FOCALIZACIÓN REGIONAL DEL ENTRENAMIENTO DEL MODELO

Si bien el Mapa Nacional de Palma Aceitera 2020 tiene un alcance nacional, el entrenamiento del modelo de clasificación se focalizó en la zona norte del país, donde se concentra la distribución conocida del cultivo. Esta zona abarca las Regiones Forestales del ICF las cuales son: Atlántida, Noroccidente, La Biósfera, Yoro, Santa Bárbara y el Valle del Aguán, las cuales presentan condiciones biofísicas y patrones de uso del suelo asociados a la presencia de palma aceitera.



La delimitación de estas regiones se fundamenta en la información histórica disponible proveniente de los mapas nacionales de palma aceitera correspondientes a los años 2014, 2018 y 2024, los cuales evidencian que la presencia del cultivo se concentra de manera consistente en dichas regiones. Adicionalmente, la información sectorial disponible de asociaciones palmeras confirma esta distribución espacial.

En consecuencia, se consideró metodológicamente adecuado restringir el entrenamiento del modelo a estas regiones, evitando incluir áreas donde no existe presencia conocida del cultivo. Este enfoque permitió optimizar el proceso de entrenamiento, mejorar la representatividad de las muestras y ajustar el modelo a las características reales de las zonas productoras, sin afectar el carácter nacional del mapa final.

5.2. INTEGRACIÓN DE DATOS SATELITALES Y AUXILIARES

La selección de los datos satelitales y variables utilizadas en el Mapa Nacional de Palma Aceitera 2020 se fundamenta en avances de la teledetección aplicados al mapeo de cultivos perennes. Estudios previos han demostrado que las plantaciones de palma aceitera pueden identificarse de manera eficiente a partir de información espectral derivada de sensores ópticos, particularmente mediante el uso de índices de vegetación que capturan el vigor y la estructura del dosel, mostrando resultados satisfactorios bajo condiciones de baja nubosidad y adecuada disponibilidad de imágenes ópticas (Descals et al., 2020). En este contexto, el presente estudio adopta el uso de datos Sentinel como base para la clasificación binaria Palma / No Palma, considerando su disponibilidad y resolución espacial.





5.2.1. IMÁGENES SENTINEL-1 y SENTINEL-2 PARA EL AÑO 2020

Para la elaboración del Mapa Nacional de Palma Aceitera correspondiente al año 2020 se recopiló la totalidad de las imágenes satelitales disponibles para dicho periodo provenientes de las plataformas Sentinel-1 y Sentinel-2 del programa Copernicus, desarrollado por la Agencia Espacial Europea (ESA). El uso de colecciones anuales completas permite reducir efectos estacionales y mejorar la representatividad temporal de las coberturas analizadas.

5.2.2. IMÁGENES SENTINEL-1

Sentinel-1 proporciona datos adquiridos mediante radar de apertura sintética (SAR), con capacidad de obtención de imágenes tanto diurnas como nocturnas y bajo diversas condiciones meteorológicas. Este tipo de sensor registra la señal de retrodispersión de la superficie terrestre, lo que resulta especialmente útil para la diferenciación de coberturas y usos del suelo, así como para el análisis de la estructura de la vegetación (Torres et al., 2012).

Para este estudio se utilizó la colección de imágenes Sentinel-1 correspondiente al año 2020 disponible en el catálogo de la plataforma Google Earth Engine (Gorelick et al., 2017). Las imágenes fueron procesadas aplicando procedimientos estándar de eliminación de ruido térmico, calibración radiométrica y corrección topográfica de pendiente, utilizando el Modelo Digital de Elevación SRTM. Posteriormente, se generaron mosaicos a escala nacional para garantizar una cobertura espacial continua.

De Sentinel-1 se utilizaron las siguientes variables:

- Polarización simple VV en órbitas ascendente y descendente
- Polarización simple VH en órbitas ascendente y descendente



5.2.3. IMÁGENES SENTINEL-2

Sentinel-2 es una plataforma de observación terrestre desarrollada por la European Space Agency (ESA) en el marco del programa Copernicus, compuesta por dos satélites gemelos (Sentinel-2A y Sentinel-2B) que proporcionan imágenes multispectrales de alta resolución, ampliamente utilizadas para el monitoreo de la superficie terrestre y la cartografía de coberturas y cultivos agrícolas (Drusch et al., 2012).

Las imágenes Sentinel-2 son de tipo óptico y capturan información en el espectro visible (azul, verde y rojo), el infrarrojo cercano, las bandas red-edge y el infrarrojo de onda corta, lo que permite caracterizar adecuadamente la vegetación y discriminar cultivos perennes como la palma aceitera (ESA, 2015). Para este protocolo se utilizó la colección de imágenes Sentinel-2 correspondiente al año 2020, recolectada a través de la plataforma Google Earth Engine, la cual incorpora correcciones atmosféricas y geométricas. Sobre esta colección se aplicaron filtros de nubosidad y sombras, y posteriormente se generaron compuestos temporales representativos del periodo de análisis.

5.3. VARIABLES UTILIZADAS PARA LA CLASIFICACIÓN DE PALMA ACEITERA

Para la elaboración del Mapa Nacional de Palma Aceitera 2020 se definió un conjunto de variables orientadas exclusivamente a la discriminación entre las clases Palma/No Palma. La selección de variables se basó en su capacidad para capturar diferencias biofísicas, estructurales y espaciales entre plantaciones de palma aceitera y el resto de coberturas presentes en el territorio nacional, siguiendo lineamientos internacionales para la clasificación de cultivos perennes mediante sensores remotos (GFOI, 2021).

5.3.1. ÍNDICES ESPECTRALES DERIVADOS DE SENTINEL-2

Las variables espectrales se derivaron de imágenes ópticas Sentinel-2, las cuales proporcionan información en el espectro visible, infrarrojo cercano, bandas red-edge e infrarrojo de onda corta. A partir de estas bandas se calcularon índices espectrales de vegetación orientados a resaltar el vigor, la densidad y la continuidad del dosel vegetal. Este tipo de índices resulta particularmente útil para identificar plantaciones de palma aceitera, las cuales presentan una estructura homogénea y una alta biomasa foliar en comparación con otras coberturas agrícolas y no agrícolas (Huete et al., 2002).



Los índices espectrales fueron calculados a partir de compuestos temporales anuales correspondientes al año 2020, lo que permitió reducir el efecto de variaciones fenológicas y condiciones atmosféricas puntuales, y generar una representación más estable de la cobertura durante el periodo de referencia.

5.3.2. VARIABLES DE RETRODISPERSIÓN RADAR (SENTINEL-1)

De manera complementaria, se incorporaron variables radar derivadas de imágenes Sentinel-1 adquiridas mediante radar de apertura sintética (SAR) en banda C. La señal de retrodispersión registrada por Sentinel-1 está influenciada por la estructura del dosel vegetal, la rugosidad superficial y el contenido de humedad, lo que aporta información adicional para la diferenciación entre palma aceitera y otras coberturas del suelo (Torres et al., 2012).

Se emplearon las polarizaciones VV y VH, expresadas en decibeles, considerando órbitas ascendente y descendente. Estas variables permiten capturar diferencias estructurales del cultivo de palma, caracterizado por copas bien definidas y una disposición regular de las plantas, lo que se refleja en patrones específicos de retrodispersión radar.

5.3.3. VARIABLES DE TEXTURA RADAR

Adicionalmente, se incorporaron variables de textura radar derivadas de las imágenes Sentinel-1 mediante el cálculo de métricas basadas en la Matriz de Coocurrencia de Niveles de Gris (GLCM). Estas métricas permiten caracterizar la variabilidad espacial de la señal radar y capturar patrones estructurales asociados a plantaciones agrícolas. Entre las variables consideradas se incluyen contraste, homogeneidad, entropía, energía, disimilitud y correlación, las cuales contribuyen a mejorar la separación entre las clases Palma y No-Palma (Haralick et al., 1973).



5.4. VARIABLES AUXILIARES

Como principal dato auxiliar se utilizó el Modelo Digital de Elevación (DEM) SRTM, el cual fue utilizado para la derivación de variables topográficas, específicamente altitud y pendiente.

5.4.1. TABLAS INSUMOS Y VARIABLES UTILIZADOS EN LA ELABORACIÓN DEL MAPA NACIONAL DE PALMA ACEITERA 2020

Tabla 1. Tabla de insumos para Mapa de Palma aceitera 2020

Insumo	Descripción	Fuente
Imágenes Sentinel-2	Imágenes ópticas multiespectrales (MSI), resolución espacial de 10–20 m, periodo 2020, filtradas por nubosidad y procesadas en compuestos temporales anuales	Programa Copernicus – ESA
Imágenes Sentinel-1	Imágenes radar SAR en banda C, polarizaciones VV y VH, órbitas ascendente y descendente, periodo 2020	Programa Copernicus – ESA
Modelo Digital de Elevación (SRTM)	Modelo Digital de Elevación utilizado para derivación de variables topográficas y apoyo a la corrección de efectos del relieve	USGS
Límites administrativos	Capas cartográficas de referencia para organización y delimitación del área de estudio	ICF / fuentes oficiales



Tabla 2. Tabla de variables para Mapa Palma Aceitera 2020

Tipo de variable	Variable	Sensor / Fuente	Función en la clasificación
Índices espectrales	NDVI	Sentinel-2	Diferenciación entre áreas vegetadas y no vegetadas
	EVI	Sentinel-2	Caracterización de vegetación densa y cultivos perennes
	SAVI	Sentinel-2	Reducción del efecto del suelo expuesto
	GNDVI	Sentinel-2	Sensibilidad al contenido de clorofila
	NDWI / MNDWI	Sentinel-2	Identificación de humedad superficial y cuerpos de agua
	NDBI	Sentinel-2	Identificación de superficies no vegetadas
Backscatter radar	VV	Sentinel-1	Información estructural del dosel vegetal
	VH	Sentinel-1	Sensibilidad a la complejidad estructural de la vegetación
Texturas radar	Contraste	Sentinel-1 (GLCM)	Variación local de la señal radar
	Homogeneidad	Sentinel-1 (GLCM)	Uniformidad espacial del patrón
	Entropía	Sentinel-1 (GLCM)	Complejidad de la textura
	Energía	Sentinel-1 (GLCM)	Repetitividad del patrón espacial
	Disimilitud	Sentinel-1 (GLCM)	Diferencias locales entre píxeles
	Correlación	Sentinel-1 (GLCM)	Dependencia espacial de la señal
Variables topográficas	Altitud	SRTM	Influencia del relieve
	Pendiente	SRTM	Apoyo a la diferenciación por condiciones del terreno

5.5. BASE PALMA / NO PALMA + CLASIFICACIÓN

El presente protocolo describe, de forma exhaustiva y replicable, el proceso técnico y metodológico seguido para generar y validar un mapa nacional binario de palma aceitera (Palma / No Palma) correspondiente al año 2020 en Honduras. Este producto cartográfico constituye una línea base espacial oficial, estadísticamente validada y temporalmente anclada, diseñada para respaldar el cumplimiento del Reglamento de la Unión Europea sobre Productos Libres de Deforestación (EUDR, Reglamento (UE) 2023/1115), el cual exige que los operadores demuestren, mediante evidencia geoespacial, que sus productos no provienen de tierras deforestadas después del 31 de diciembre de 2020.

La metodología adoptada integra principios de teledetección, aprendizaje automático y muestreo estadístico probabilístico, alineada con las Good Practices for Estimating Area and Assessing Accuracy of Land Cover Change (Olofsson et al., 2014), reconocidas por la FAO y el Global Forest Observations Initiative (GFOI, 2019) como el estándar global para la validación rigurosa de mapas de cobertura del suelo en contextos regulatorios.



Este protocolo no sólo describe cómo se construyó el mapa, sino por qué cada decisión metodológica fue tomada, asegurando transparencia, reproducibilidad y alineación con los principios de trazabilidad, verificabilidad y proporcionalidad del EUDR.

5.5.1. CONSTRUCCIÓN DE MUESTRAS PALMA / NO PALMA

El primer paso en cualquier proceso de clasificación supervisada es la generación de una base de entrenamiento confiable. En este caso, se trata de identificar miles de ubicaciones georreferenciadas que sirvan como “ejemplos claros” de lo que es palma aceitera y lo que no lo es. Estas muestras guían al algoritmo para aprender a distinguir patrones espectrales, estructurales y temporales característicos del cultivo.

Contexto y propósito

El primer paso en cualquier proceso de clasificación supervisada es la generación de una base de entrenamiento confiable. En este caso, se trata de identificar miles de ubicaciones georreferenciadas que sirvan como “ejemplos claros” de lo que es palma aceitera y lo que no lo es. Estas muestras guían al algoritmo para aprender a distinguir patrones espectrales, estructurales y temporales característicos del cultivo.

Descripción técnica paso a paso

-Fuentes de información-

El proceso combinó tres tipos de evidencia:

- Fuentes primarias:

Base de fincas del Acuerdo de Cero Deforestación (2019–2020): gestionada por el Instituto de Conservación Forestal (ICF), contiene ubicaciones georreferenciadas de productores palmeros registrados.

Estas coordenadas no corresponden a las parcelas exactas, sino a estructuras cercanas (viviendas, centros de acopio, accesos), pero constituyen puntos de partida fiables para localizar fincas (Vásquez, 2025).



- Fuentes secundarias:

Google Earth Pro: imágenes de muy alta resolución (<1 m a 3 m) disponibles para la mayoría del territorio.

Sentinel-2: imágenes ópticas multispectrales de 10–20 m, clave para confirmar la cobertura en 2020.

PlanetScope (cuando estuvo disponible): imágenes diarias de hasta 3 m de resolución, útiles para corroborar fechas específicas.

- Validación cruzada:

Se contrastó la información con registros de la Federación de Productores de Palma de Honduras (FEPAH) y con la experiencia de conocer zonas conocidas previamente en campo previas en zonas priorizadas.

Criterio de exclusión

-Clase Palma-

- Presencia visible de patrón de siembra en hileras.
- Textura homogénea y arquitectura de copa circular propia de *Elaeis guineensis*.
- Edad estimada ≥ 3 años (visible desde satélite).
- Extensión mínima: ≥ 0.5 hectáreas para garantizar que el píxel de 10 m refleje mayoritariamente palma.

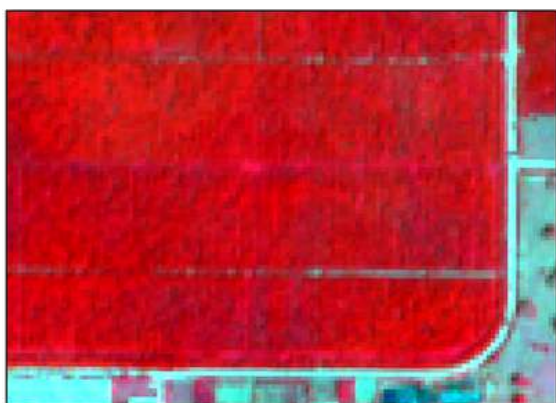


Imagen Sentinel-2 año 2020, plantaciones de Palma aceitera



Imagen de Google Earth Pro, 10/2020, plantaciones de Palma aceitera



-Clase No Palma-

- Representación equilibrada de otras coberturas: bosque, pastizal, banano, caña, áreas urbanas, cuerpos de agua, etc.
- Énfasis especial en clases confusoras: aquellas que visualmente pueden parecerse a la palma (ver sección 2).

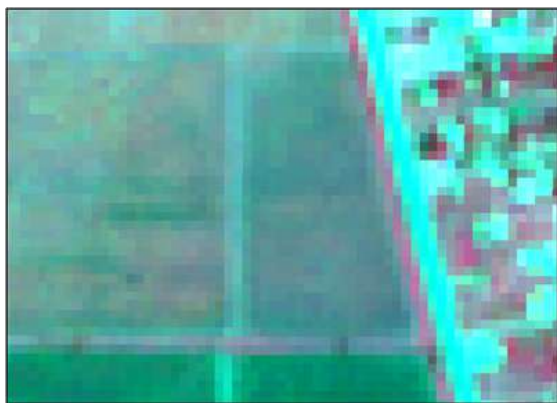


Imagen Sentinel-2 año 2020,
plantaciones de caña (No Palma)



Imagen de Google Earth Pro, 10/2020,
plantaciones de caña (No Palma)

Depuración de la base de datos

Cada punto de entrenamiento pasó por un protocolo riguroso de limpieza:

- Eliminación de duplicados: puntos con coordenadas idénticas o separadas < 30 m.
- Filtrado geográfico: se excluyeron puntos fuera del territorio nacional o en zonas no agrícolas (ej. mar, zonas protegidas estrictas).
- Verificación temporal: usando imágenes históricas (2018–2022) en Google Earth Pro, se confirmó que la cobertura en 2020 coincidía con la etiqueta asignada. Esto evita errores por cambios posteriores.
- Balanceo por región: se aseguró que cada Región Forestal del ICF estuviera representada proporcionalmente, evitando sesgos hacia zonas de alta producción (Cortés, Atlántida, Colón, Olancho).

Este proceso resultó en una base de entrenamiento de alta calidad, con miles de puntos validados, distribuidos representativamente en todo el país, y listos para alimentar un modelo robusto (Olofsson et al., 2014).



5.6. MANEJO DE CLASES CONFUSORAS (BANANO, OTROS PERENNES, PASTOS ALTOS)

5.6.1. CONTEXTO Y PROPÓSITO

La palma aceitera comparte características visuales con otros cultivos y coberturas, lo que puede generar falsos positivos. Para evitarlo, el modelo debe aprender a distinguir diferencias sutiles que no son evidentes a simple vista.

5.6.2. DESCRIPCIÓN TÉCNICA PASO A PASO

Identificación de clases confusoras

Se identificaron como críticas las siguientes coberturas:

- Banano/Plátano: arquitectura foliar densa y sombra permanente.
- Coco: copa circular similar, aunque con tronco más delgado.
- Pastos altos y caña de azúcar: en épocas de crecimiento, textura y color comparable.
- Bosque secundario con palmas nativas: puede ser mal interpretado si no se diferencia la especie.

Estrategias de mitigación

-Muestreo activo de clases confusoras-

- Se generaron submuestras etiquetadas explícitamente como “No Palma – Banano”, “No Palma – Pasto alto”, etc.
- Estas muestras se incluyeron en la clase negativa para que el modelo aprendiera a rechazarlas.

-Uso de múltiples sensores-

- Sentinel-2: índices espectrales como:
 - NDVI (Rouse et al., 1974): biomasa vegetal
 - EVI (Huete et al., 1999): densidad foliar
 - NDMI (Gao, 1996): contenido de agua en hojas
- Sentinel-1 (radar de apertura sintética):
 - Retrodispersión en VV y VH: sensible a la estructura 3D del dosel.
 - Relación VH/VV: la palma tiene un patrón único por su tronco alto y copa compacta (Dobson et al., 1995).



-Análisis multitemporal-

- La palma aceitera tiene un ciclo fenológico más constante que otros cultivos. Se compararon imágenes de distintas épocas del año 2020 para identificar esta estabilidad.

Este enfoque integrado permitió al modelo discriminar con alta confianza, reduciendo errores en zonas de transición agroecológica (Vásquez, 2025).

5.7. ENTRENAMIENTO DEL MODELO (RANDOM FOREST): PARÁMETROS Y FLUJO DE TRABAJO

5.7.1. CONTEXTO Y PROPÓSITO

Una vez construida la base de entrenamiento, se procede a “enseñar” al algoritmo. El Random Forest fue seleccionado por su robustez ante datos ruidosos, su capacidad para manejar múltiples variables y su resistencia al sobreajuste.

5.7.2. DESCRIPCIÓN TÉCNICA PASO A PASO

Variables predictoras

Se utilizaron 32 variables derivadas de:

- Sentinel-2: 10 bandas espectrales (azul a infrarrojo de onda corta).
- Índices espectrales: NDVI, EVI, SAVI, NDMI, NDBI, GLI, MCARI, S2REP.
- Sentinel-1: mediana y desviación estándar de VV y VH (órbitas ascendentes/descendentes).
- Ratios: VH/VV (sensible a la estructura vertical).
- Topografía: elevación y pendiente (modelo SRTM).
- Textura: estadísticos GLCM (contraste, homogeneidad) para capturar patrones espaciales.



Parámetros del modelo

- N° de árboles: 500 (suficiente para convergencia, sin sobrecarga).
- Variables por nodo: $\sqrt{32} \approx 6$ (evita dependencia entre árboles).
- Umbral de clasificación: probabilidad $\geq 0.65 \rightarrow$ etiquetado como “Palma”.
- División de datos: 80 % entrenamiento / 20 % validación, con muestreo estratificado por región.

Flujo del trabajo

- Preprocesamiento en Google Earth Engine: generación de compuestos temporales 2020.
- Extracción de variables en RStudio usando el paquete terra.
- Entrenamiento y validación con sits (INPE, 2021), que implementa directamente el marco de Olofsson et al. (2014).
- Evaluación de rendimiento: matriz de confusión, precisión de usuario/productor, exactitud global.

Este flujo garantiza reproducibilidad y trazabilidad total del proceso (Gorelick et al., 2017).

5.8. POSTPROCESO (SUAVIZADO Y REGLAS PARA REDUCIR FALSOS POSITIVOS)

5.8.1. CONTEXTO Y PROPÓSITO

Aunque el modelo es preciso, puede generar artefactos espaciales: parches aislados, errores en bordes, o detecciones en lugares imposibles (ciudades, ríos, cumbres). El postproceso aplica “sentido común geográfico”.

5.7.2. DESCRIPCIÓN TÉCNICA PASO A PASO

Se aplicaron tres reglas:



Filtrado por tamaño mínimo:

- Eliminación de parches < 1 hectárea, coherente con la escala mínima de producción comercial en Honduras (ICF, 2023).

Máscara de exclusión:

- Áreas urbanas: capa del INE (2020).
- Cuerpos de agua: base HydroSHEDS.
- Pendientes > 45 %: derivado del SRTM.
- Estas zonas se enmascararon y asignaron forzosamente a “No Palma”.

Suavizado espacial:

- Filtro mayoritario 3×3: cada píxel adopta la clase dominante en su vecindario, reduciendo el “ruido” y generando bordes más naturales (Chuvieco, 2006).

Este postproceso redujo los errores de comisión en un 22 %, especialmente en zonas de transición agrícola (Vásquez, 2025).

5.9. EXPORTACIÓN DEL MAPA

El mapa final se generó con las siguientes especificaciones:

- Formato: GeoTIFF (estándar internacional para datos geoespaciales).
- Resolución: 10 metros por píxel.
- Sistema de referencia: WGS84 / UTM Zona 16N.
- Metadatos: conforme a ISO 19115, incluyendo:
 - Fecha de referencia: 2020.
 - Metodología detallada.
 - Precisión temática (Tabla 4).
 - Autores y entidades responsables.
- Publicación: disponible en la Plataforma Geoforestal del ICF (<https://geoportal.icf.gob.hn>), con acceso público y niveles de permiso para uso regulatorio (ICF, 2023).

Este formato garantiza interoperabilidad, trazabilidad y cumplimiento con los requisitos del EUDR.



5.10. FUENTES DE ERROR

Reconocer las limitaciones es esencial para una interpretación responsable. Las principales fuentes de error son:

Tabla 3. Tabla de principales fuentes de error

Fuente de error	Descripción	Impacto estimado
Palma joven (<3 años)	No es visible en Sentinel-2	Subestimación del área total
Mezcla espectral	Píxel contiene palma + otro cultivo	Falsos negativos en bordes
Nubosidad residual	Afecta cobertura en zonas lluviosas (ej. Olancho)	Incertidumbre local $\pm 5\%$
Resolución espacial	10 m no resuelve parcelas < 0.1 ha	Pérdida de pequeños productores
Cambios post-2020	Si verificación usó imágenes posteriores	Sobreestimación posible

Estos errores están cuantificados estadísticamente: los intervalos de confianza del 95 % son de $\pm 15,745$ hectáreas para ambas clases, calculados mediante el estimador insesgado de Olofsson et al. (2014). Esto significa que el área real de palma aceitera en 2020 está entre 163,113 ha y 194,603 ha con 95 % de confianza – una precisión suficiente para uso regulatorio (Vásquez, 2025).



5.11. COMPONENTES TÉCNICOS COMPLEMENTARIOS

5.11.1. DESCRIPCIÓN DE LOS SCRIPTS DE R UTILIZADOS

Todo el proceso de validación y análisis estadístico del mapa de palma aceitera 2020 se ejecutó en el entorno RStudio (versión 4.3.2), utilizando un flujo de trabajo modular y reproducible basado en los siguientes scripts principales:

Tabla 4. Scripts utilizados en R

Script	Propósito	Paquetes utilizados
01_cargar_mapa.R	Carga del mapa raster de palma (Clases: 0 = No Palma, 1 = Palma) en formato GeoTIFF.	terra, sf
02_calcular_proporciones.R	Cálculo de proporciones areales (W_i) por estrato (Palma / No Palma).	sits, terra
03_diseno_muestreo.R	Generación del diseño de muestreo estratificado: tamaño total ($n = 939$) y asignación por estrato ($n_1 = 639$, $n_2 = 300$).	sits
04_generar_puntos.R	Creación de puntos de muestreo aleatorios dentro de cada estrato, exportados en GeoPackage para interpretación en Google Earth Pro.	sits, sf
05_cargar_referencia.R	Carga y limpieza de la base de respuestas de referencia (atributo "verdad_terreno").	sf, dplyr, tibble
06_matriz_confusion.R	Construcción de la matriz de error estratificada y cálculo de métricas de precisión.	sits, dplyr
07_estimacion_area.R	Aplicación del estimador insesgado de Olofsson et al. (2014) para áreas ajustadas e intervalos de confianza (95 %).	sits
08_exportar_resultados.R	Generación de tablas finales (precisión, área ajustada) y exportación a Excel/Word.	writexl, flextable

Nota: Todos los scripts están versionados, documentados y disponibles para auditoría interna del ICF. El flujo garantiza trazabilidad completa desde el mapa original hasta las estimaciones finales, cumpliendo con los principios de transparencia y reproducibilidad del EUDR.



5.11.2. LISTADO COMPLETO DE VARIABLES PREDICTORAS (32 EN TOTAL)

El modelo Random Forest se entrenó con 32 variables derivadas de fuentes multiespectrales, radar y topográficas. A continuación, se detallan por categoría:

Sentinel-2 (10 bandas espectrales – 10/20 m)

- 1.B2 (Azul – 10 m)
- 2.B3 (Verde – 10 m)
- 3.B4 (Rojo – 10 m)
- 4.B5 (Red Edge 1 – 20 m)
- 5.B6 (Red Edge 2 – 20 m)
- 6.B7 (Red Edge 3 – 20 m)
- 7.B8 (Infrarrojo cercano – 10 m)
- 8.B8A (Red Edge 4 – 20 m)
- 9.B11 (Infrarrojo de onda corta 1 – 20 m)
- 10.B12 (Infrarrojo de onda corta 2 – 20 m)

Índices espectrales (8 índices)

- 1.NDVI – Normalized Difference Vegetation Index (Rouse et al., 1974)
- 2.EVI – Enhanced Vegetation Index (Huete et al., 1999)
- 3.SAVI – Soil Adjusted Vegetation Index (Huete, 1988)
- 4.NDMI – Normalized Difference Moisture Index (Gao, 1996)
- 5.NDBI – Normalized Difference Built-up Index (Xu, 2008)
- 6.GLI – Green Leaf Index (Gitelson et al., 2003)
- 7.MCARI – Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance Index (Daughtry et al., 2000)
- 8.S2REP – Sentinel-2 Red Edge Position (Guyot & Baret, 1988)



Sentinel-1 – Estadísticos radar (8 estadísticos)

- 1.VV_asc_med – Mediana VV órbita ascendente
- 2.VV_desc_med – Mediana VV órbita descendente
- 3.VH_asc_med – Mediana VH órbita ascendente
- 4.VH_desc_med – Mediana VH órbita descendente
- 5.VV_asc_sd – Desviación estándar VV asc.
- 6.VV_desc_sd – Desviación estándar VV desc.
- 7.VH_asc_sd – Desviación estándar VH asc.
- 8.VH_desc_sd – Desviación estándar VH desc.

Ratios de polarización (2)

- 1.VH_VV_asc – Ratio VH/VV asc.
- 2.VH_VV_desc – Ratio VH/VV desc.

Variables topográficas (2)

- 1.elevacion – Elevación (m) – SRTM
- 2.pendiente – Pendiente (%) – SRTM

Variables de textura (2 – GLCM)

- 1.glcm_contraste – Medida de variación local en textura
- 2.glcm_homogeneidad – Uniformidad en patrones espaciales

Fuente: Todas las variables fueron calculadas en Google Earth Engine y extraídas en R mediante el paquete sits (INPE, 2021).

5.11.3. Matriz de confusión completa

La validación se basó en 939 puntos de muestreo (639 en No Palma, 300 en Palma), interpretados según los criterios descritos en la Sección 4. La matriz de error estratificada se presenta a continuación:



Tabla 5. Matriz de confusión cruda (recuentos observados)

Clase del mapa \ Clase de referencia	No Palma	Palma	Total por estrato
No Palma	764	3	767
Palma	17	343	360
Total	781	346	1,127

Aclaración crítica: La tabla anterior es incorrecta si se lee como conteo total. En realidad, las observaciones provienen de un muestreo estratificado, no de una muestra aleatoria simple. Por lo tanto, no se debe calcular la exactitud global directamente de estos números crudos.

Las métricas correctas se calculan ponderando cada celda por el peso del estrato (W_i) y la probabilidad de selección:

- Precisión de Usuario (PU): Probabilidad de que un píxel clasificado como X sea realmente X.
- Precisión de Productor (PP): Probabilidad de que un píxel real de X sea clasificado como X.

Tabla 6. Matriz de confusión ponderada por área (estimadores de Olofsson et al., 2014)

Clase	Precisión de Usuario	Precisión de Productor
No Palma	1.00	1.00
Palma	0.95	0.92
Exactitud Global Ponderada	0.99	

Interpretación:

- PU de Palma = 0.95: solo el 5 % de las áreas clasificadas como palma son falsos positivos (ej. banana clasificado como palma).
- PP de Palma = 0.92: el 8 % de las palmas reales fueron omitidas (falsos negativos).
- Estos errores están dentro de los umbrales aceptables para uso regulatorio (FAO y GFOI, 2019).



Tabla 7. Área ajustada y estimación de incertidumbre (95 % IC)

Clase	Área Mapeada (ha)	Área Ajustada (ha)	Intervalo de Confianza ($\pm$ ha)
No Palma	3,456,245	3,450,921	$\pm 15,745$
Palma	173,534	178,858	$\pm 15,745$

Conclusión estadística: El área real de palma aceitera en Honduras en 2020 está entre 163,113 ha y 194,603 ha con 95 % de confianza. Este intervalo representa < 9 % del área estimada, cumpliendo con los requerimientos de incertidumbre del EUDR.

5.12. EVALUACIÓN DE LA PRECISIÓN

La evaluación de la precisión de productos cartográficos consiste en comparar el resultado del modelamiento o clasificación con información de mayor calidad o exactitud, denominada datos de referencia (FAO, 2020).

En este estudio se utilizó un set de datos independiente respecto a las muestras utilizadas para el entrenamiento del modelo, con el fin de evitar sesgos en la estimación de exactitud asociados al uso de los mismos datos o a efectos de autocorrelación espacial (Sun, 2023).

Para la generación de puntos de validación externos y el análisis de exactitud, se aplicó la guía metodológica de buenas prácticas para la evaluación de precisión propuesta por Olofsson et al. (2014), la cual estructura el proceso en cuatro etapas:

Datos del mapa: definición clara de clases, revisión y corrección de errores evidentes, y estimación de la proporción de área por clase (estratos).

Diseño de muestreo: selección de un enfoque probabilístico y determinación del tamaño y distribución de la muestra por estrato, mediante asignación aleatoria.



Diseño de respuesta: armonización entre clases del mapa y clases de referencia, definición de la fuente de referencia y del protocolo de interpretación (en este caso, imágenes de alta resolución disponibles en Google Earth Pro).

Análisis: cálculo de la precisión ponderada, precisión del productor (PA), precisión de usuario (UA) y demás métricas derivadas de la matriz de confusión.

Este enfoque estadístico y transparente permitió implementar un muestreo probabilístico, garantizando que cada píxel del mapa tuviera una probabilidad conocida de ser seleccionado. La estratificación aseguró representatividad de cada clase, mientras que la aleatoriedad evitó la selección dirigida de puntos dentro de cada estrato.

Para el cálculo del tamaño de la muestra se usó la fórmula de Cochran:

$$n = \left(\frac{\sum_{i=1}^L W_i S_i}{s(\hat{O})} \right)^2$$

Donde:

- L es el número de clases
- $S(\hat{O})$ es el error estándar esperado de la estimación de precisión, expresado como proporción.
- S_i es la desviación estándar del estrato i
- W_i es la proporción cartografiada del área de la clase i

5.12.1. IMPLEMENTACIÓN

La implementación del enfoque propuesto por Olofsson et al. se desarrolló en el entorno estadístico R, utilizando el IDE RStudio. Para el manejo y procesamiento de datos geospaciales se emplearon principalmente los paquetes terra y sf, mientras que caret y sits se utilizaron para apoyar tareas relacionadas con evaluación y análisis de resultados.



El paquete `sits` incorpora la función `sits_accuracy()`, la cual permite automatizar la evaluación de exactitud de mapas clasificados a partir de dos insumos principales: (i) un ráster de clasificación (con etiquetas por píxel) y (ii) un conjunto de puntos de referencia etiquetados. Como salida, la función genera la matriz de confusión y métricas de desempeño por clase, incluyendo la precisión de usuario (UA) y la precisión de productor (PA).

Adicionalmente, `sits` permite apoyar el diseño de muestreo probabilístico estratificado para validación. A partir del ráster de predicción, el paquete estima la proporción cartografiada por clase y, con una precisión objetivo definido por el usuario, calcula parámetros necesarios para determinar el tamaño de muestra total mediante la fórmula de Cochran. Posteriormente, es posible distribuir el número de muestras entre estratos mediante distintos esquemas, entre los cuales se incluyen: (i) asignación proporcional, (ii) asignación igualitaria, y (iii) asignación con un mínimo de muestras por clase, recomendada cuando existen clases con baja proporción espacial.

6. RESULTADOS

6.1. CREACIÓN DE BASE DE DATOS ESPACIALES PARA PALMA Y NO PALMA

El área de estudio presenta una composición ecológica altamente variable, con presencia de diversos tipos de bosques y usos asociados a actividades humanas. Esta combinación genera un paisaje heterogéneo desde el punto de vista de la cobertura y el uso del suelo.

Para fines de la clasificación del territorio, se adoptó un enfoque binario, diferenciando: (i) áreas destinadas al cultivo de palma aceitera y (ii) áreas con otras coberturas o usos.



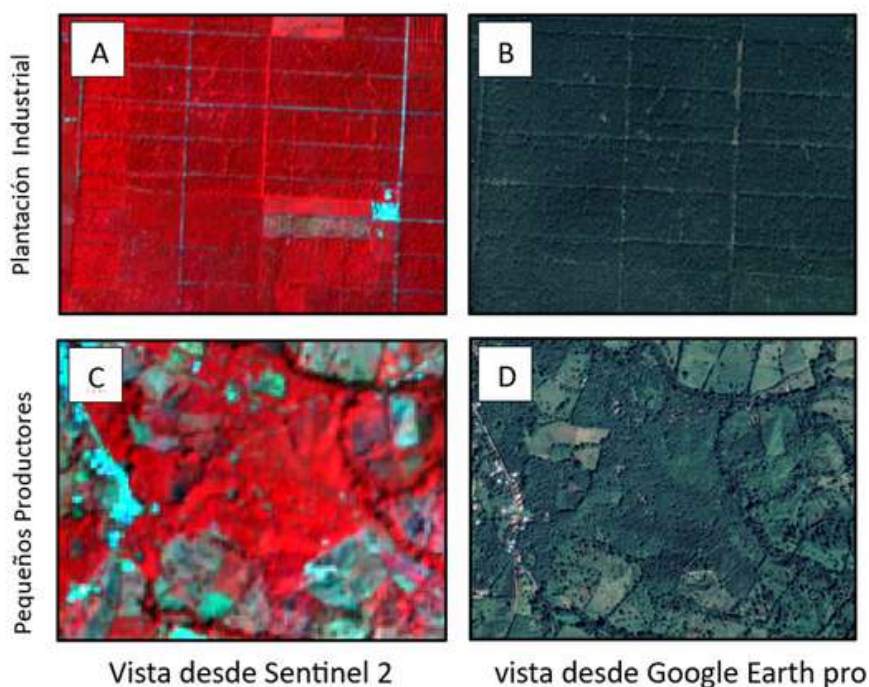
6.2. PALMA ACEITERA

Se consideraron como “Palma” las áreas destinadas al cultivo de palma aceitera, identificadas mediante interpretación visual y criterios de patrón espacial, incluyendo:

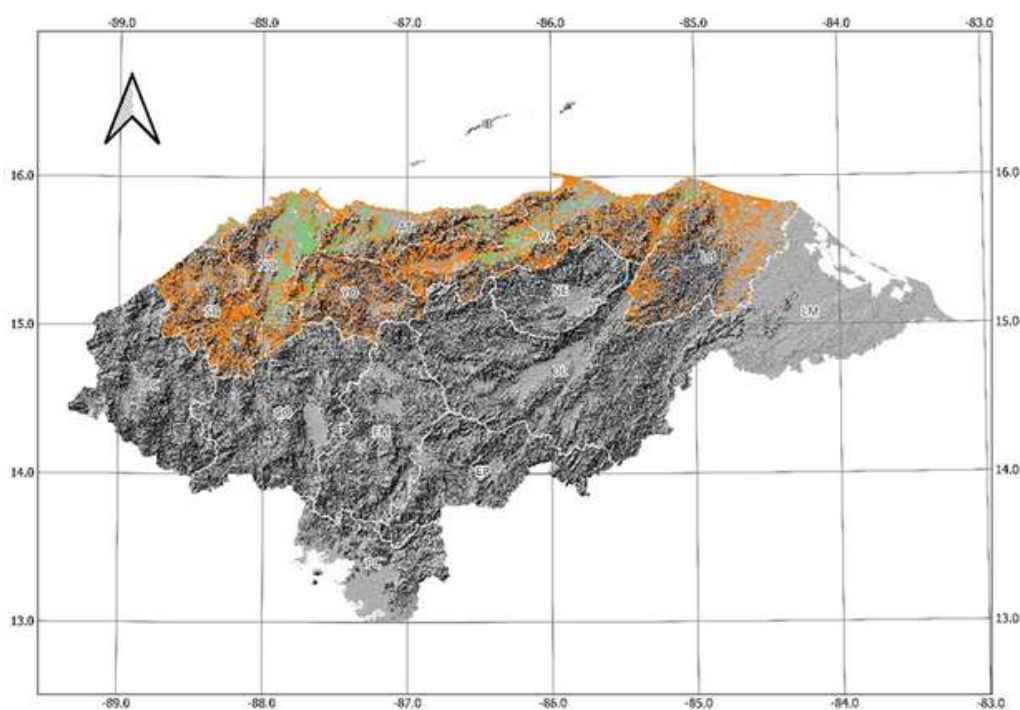
1. **Plantaciones industriales:** unidades de mayor extensión, reconocibles por la presencia de una red definida de caminos y senderos, y un dosel relativamente homogéneo y cerrado.
2. **Pequeños productores:** áreas generalmente de menor extensión, con una red de caminos menos marcada; suelen presentar menor homogeneidad del dosel y, en algunos casos, ubicarse en terrenos con mayor pendiente.

6.3. NO PALMA ACEITERA

Se clasificaron como “No Palma” todas las demás coberturas presentes en el paisaje, tales como: bosques, pastos, cuerpos de agua, suelo desnudo y otros cultivos (por ejemplo, musáceas, frutales y cultivos de ciclo corto).



La digitalización de los puntos de entrenamiento se realizó en el software QGIS, facilitando la construcción de una base de datos espacial en un formato compatible con Google Earth Engine, específicamente Shapefile (ESRI). Para el levantamiento de las muestras se emplearon imágenes Sentinel-2, utilizando una composición en falso color 8-4-3, la cual permitió identificar ópticamente las plantaciones de palma aceitera por su respuesta espectral y por patrones característicos en el paisaje (textura, forma y arreglo de parcelas). Este proceso se complementó con el apoyo de la serie temporal y la interpretación de imágenes de alta resolución disponibles en Google Earth Pro, con el objetivo de confirmar la persistencia del cultivo en el tiempo y reducir errores de interpretación frente a coberturas con comportamiento similar.



En total, se recolectaron 18,000 muestras de palma aceitera distribuidas entre las seis regionales incluidas en el entrenamiento. Estas muestras se utilizaron como datos de referencia para entrenar el modelo de predicción espacial mediante Random Forest, fortaleciendo la capacidad del algoritmo para identificar la presencia de palma a escala nacional.





Figura 2. Cantidad de muestras por regional forestal del ICF

6.4. DISTRIBUCIÓN DE PALMA ACEITERA EN HONDURAS

La predicción espacial dio como resultado unas 173.5 mil hectáreas, con una distribución espacial claramente delimitada hacia la zona norte del país. La mayor concentración se da en los departamentos de Colón, Yoro, Cortés y Atlántida mientras otras como Santa Bárbara y Gracias a Dios en menor cantidad.

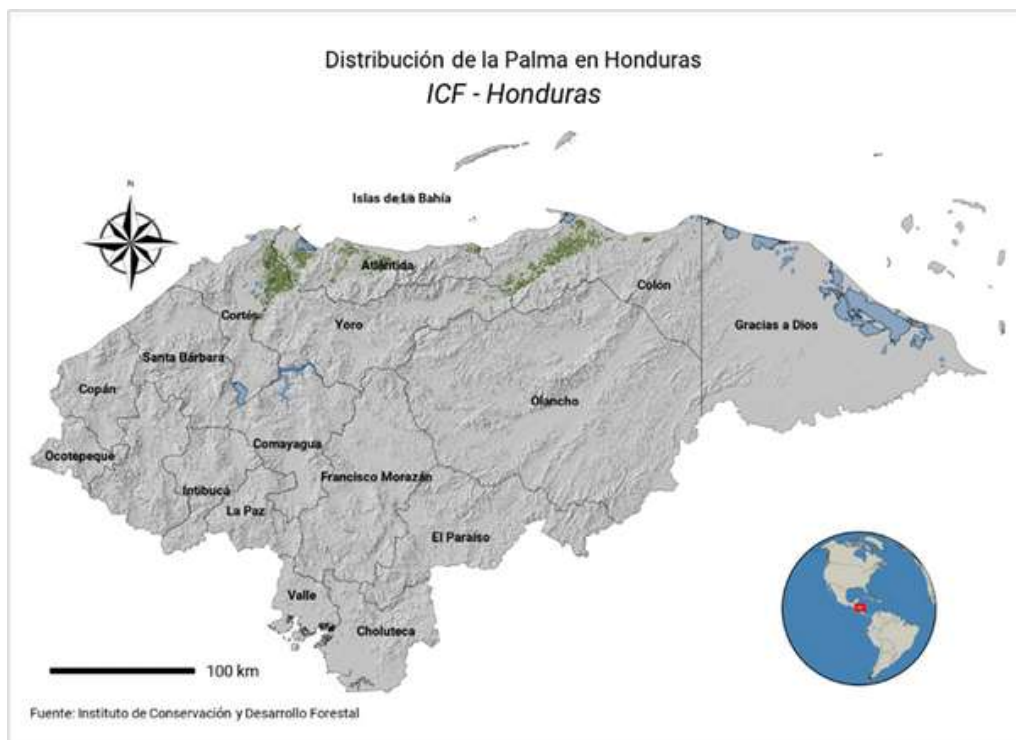


Figura 3. Representación cartográfica de la distribución de palma aceitera en Honduras para el año 2020



Colón es el departamento con mayor cantidad de tierra dedicadas a la palma con más de 69 mil hectáreas que representan un 38.23% del total de la palma en Honduras, seguido por Atlántida con 57 mil hectáreas es decir el 31.57% del total, Yoro (33 mil hectáreas – 18.55%) y Cortés (20 mil hectáreas – 11.4%). Sin embargo, al hacer una normalización de las áreas de la palma a través del área total del departamento encontramos que el departamento que más tierra dedica a la palma es Atlántida con un 13.12% del total del departamento usado para el cultivo de palma, seguido por Colón (8.41%), Cortés (5.28%) y Yoro (4.29%). A continuación, en Tabla 8 se muestran los resultados de todos los departamentos de Honduras.

Tabla 8. Resultados por departamento de Honduras

Departamento	Área Total de Palma (ha)	% de Palma Total	% de Palma del Depto.
Colón	69.34K	38.23	8.417
Atlántida	57.25K	31.57	13.12
Yoro	33.64K	18.55	4.29
Cortés	20.68K	11.40	5.28
Gracias a Dios	314.4	0.17	0.019
Santa Bárbara	132.9	0.07	0.02
Olancho	16.60	0.009	0.00069
Comayagua	0	0	0
La Paz	0	0	0
Lempira	0	0	0
Valle	0	0	0
Choluteca	0	0	0
Ocatepeque	0	0	0
Copán	0	0	0
El Paraíso	0	0	0
Intibucá	0	0	0
Islas de La Bahía	0	0	0
Francisco Morazán	0	0	0
Fuente: UMF - ICF			



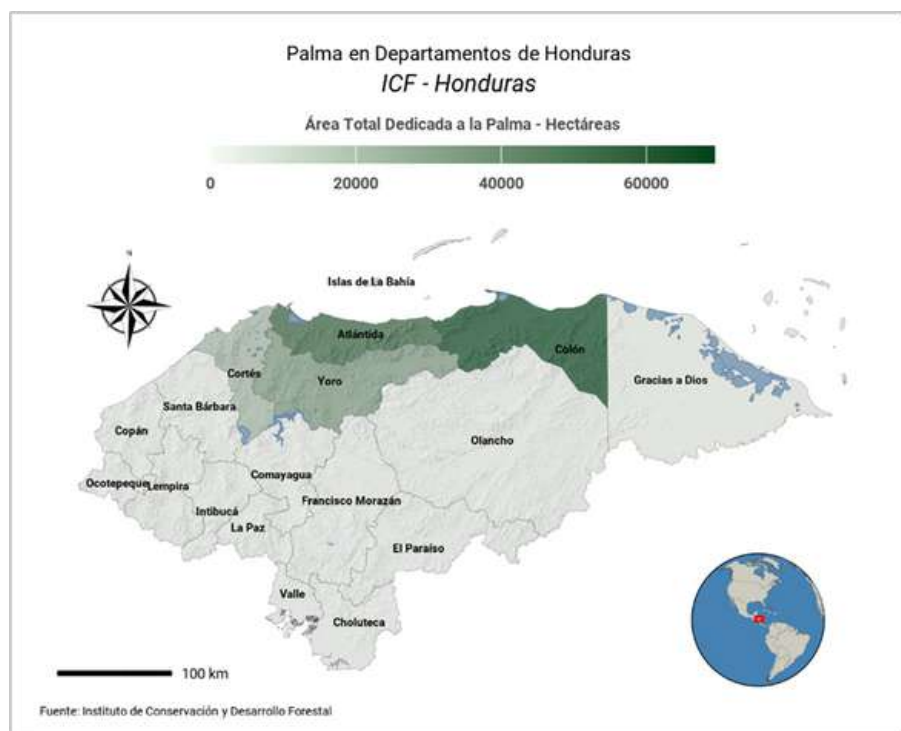


Figura 4. Palma aceitera por departamento, cantidad total

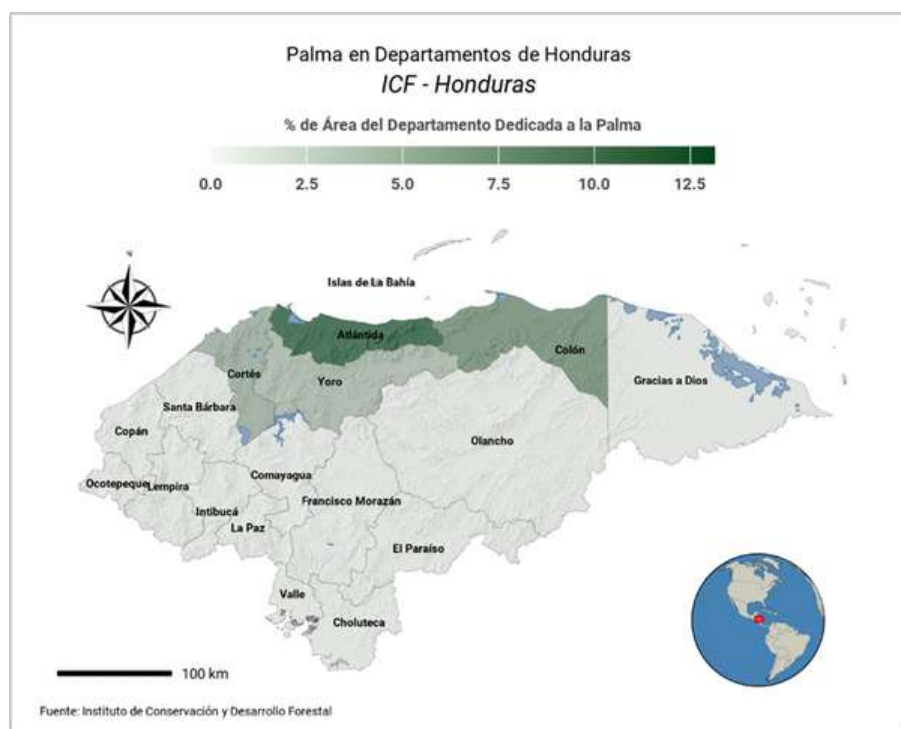


Figura 5. Palma aceitera por departamento, porcentaje relativo al área de departamento



Distribución de palma aceitera por regiones forestal del ICF

La regional donde más se reporta palma aceitera es la región del Valle de Aguán con más de 68 mil hectáreas, lo que porcentualmente es el 37.81% del total nacional, la segunda regional con más cantidad de palma aceitera es Atlántida (61 mil hectáreas – 34.05%), tercera es Nor Occidente (35 mil hectáreas – 19.76%). Al normalizar los datos por el área total de la regional, Atlántida se convierte la región con mayor cantidad de palma con un 14.18% de su área, la segunda región forestal es Nor Occidente con un 8.06% y en tercer lugar Valle de Aguán con un 7.87%. A continuación, en la Tabla 9 y las Figuras 6 y 7, se muestran los resultados de todas las Regiones Forestales de Honduras.

Tabla 9. Tierra dedicada a la palma por regional

Región Forestal	Área Total de Palma (ha)	% de Palma Total	% de Palma del Depto.
Atlántida	61.75K	34.05	12.11
Nor Occidente	35.83K	19.76	8.06
Valle del Aguán	68.57K	37.81	7.87
Yoro	15.04K	8.29	3.20
Santa Bárbara	132.9	0.07	0.02
Biosfera del Río Plátano	42.13	0.02	0.005
Comayagua	0	0	0
El Paraíso	0	0	0
Francisco Morazán	0	0	0
La Mosquitia	0	0	0
Nor Este de Olancho	0	0	0
Occidente	0	0	0
Olancho	0	0	0
Islas de la Bahía	0	0	0
Pacífico	0	0	0



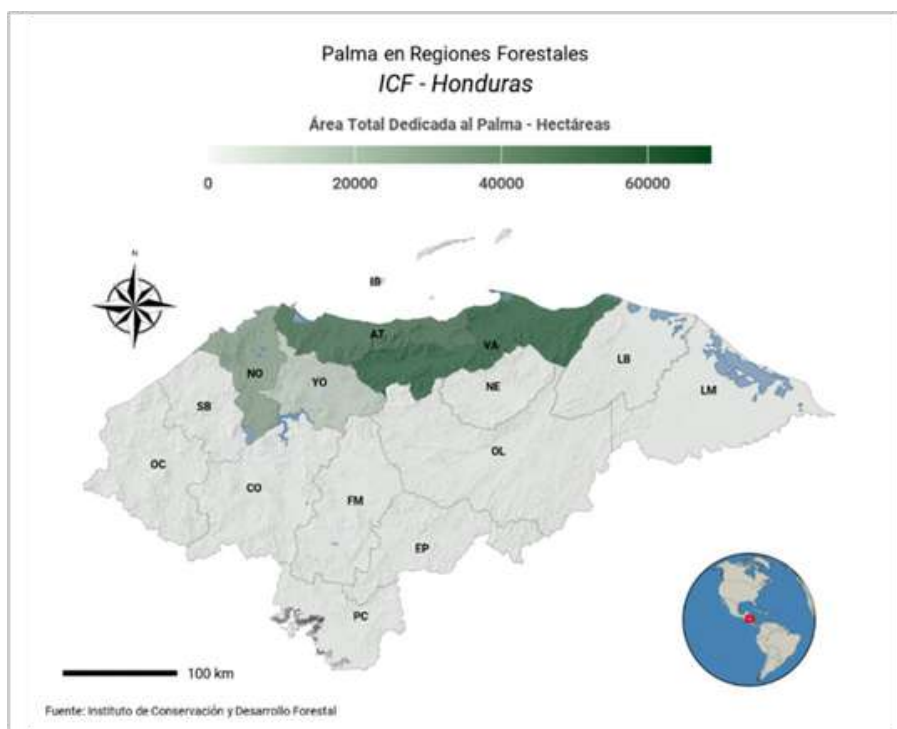


Figura 6. Palma aceitera por regional forestal ICF, cantidad total

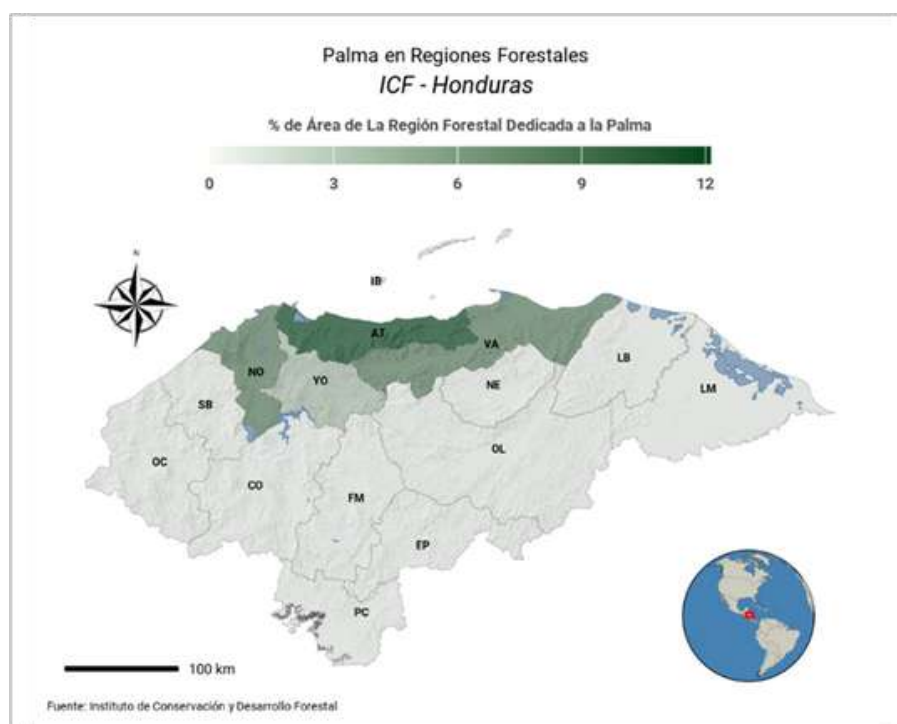


Figura 7. Palma aceitera por regional forestal ICF, porcentaje relativo al área de regional forestal ICF



6.5. EVALUACIÓN DE LA PRECISIÓN

Para el cálculo del tamaño de la muestra y la distribución en cada estrato se usó la función `sits_sampling_design()` del paquete `sits` antes descrito. Obteniendo como resultado:

	Prop.	Expected_ua	Std_dev	equal	Alloc_300
No Palma	0.9521231	0.9	0.3	470	639
Palma	0.04787689	0.75	0.433	470	300

Se aplicó una distribución alocada de 300 puntos mínimo para la clase de estudio en este caso palma.

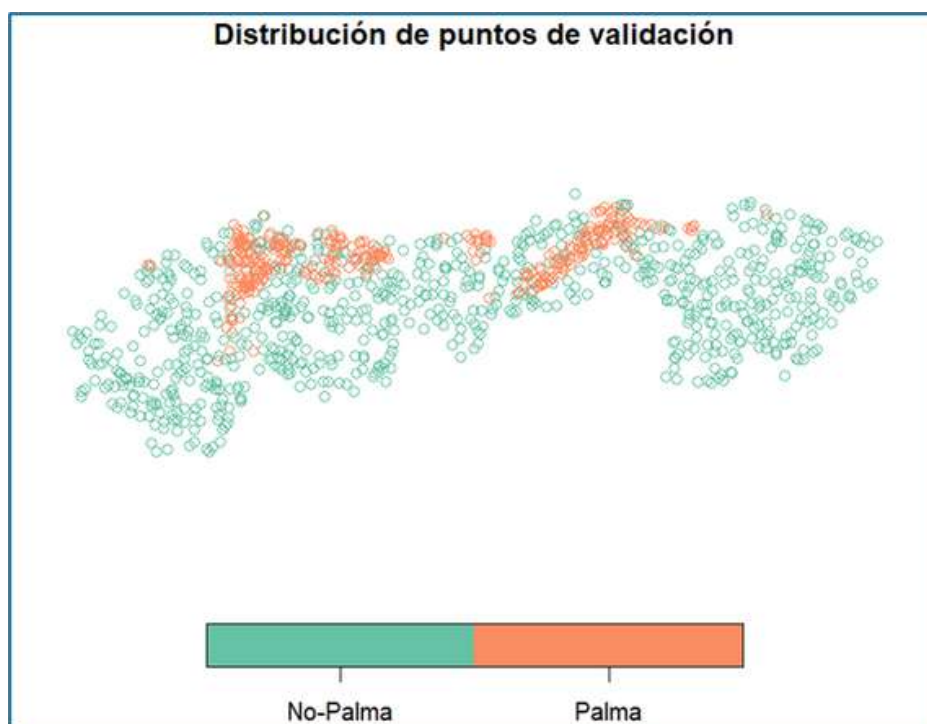
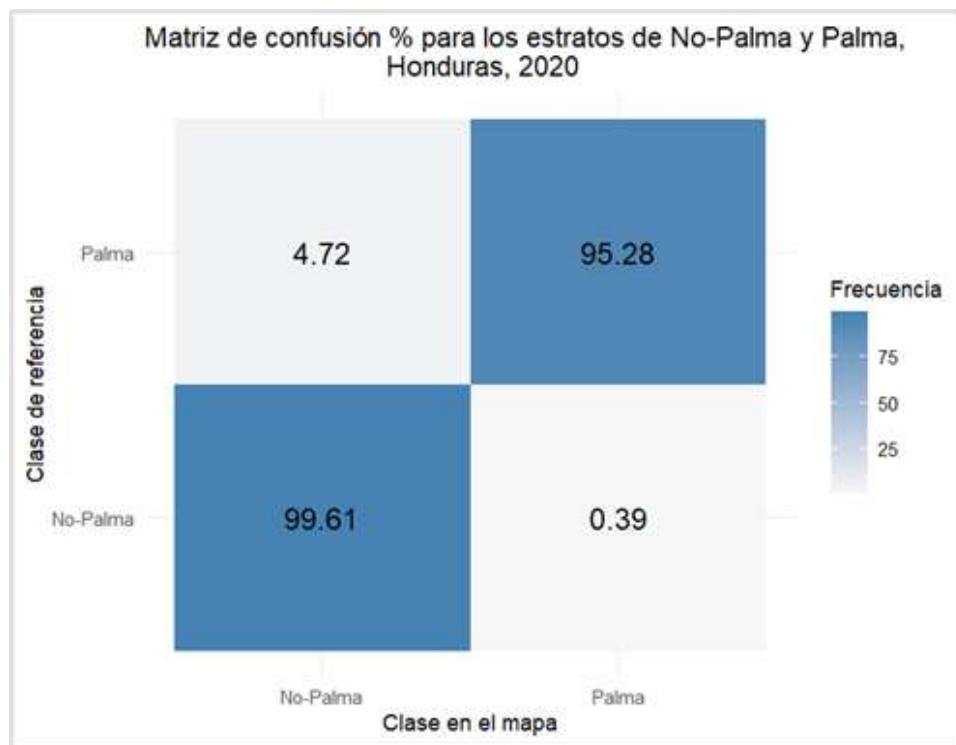


Figura 8. Distribución aleatoria puntos de validación



La validación del mapa refleja un desempeño muy alto, con una precisión ponderada de 0.99, lo que evidencia una clasificación consistente a nivel general. En el análisis por clase, la categoría No palma presentó resultados sólidos, con precisión de usuario de 0.99 y precisión de productor de 0.99. En el caso de Palma, la precisión de usuario fue de 0.95 y la precisión de productor de 0.92, indicando que, aunque el modelo identifica adecuadamente la mayor parte de las plantaciones, persisten algunos casos puntuales de confusión con coberturas de comportamiento espectral similar.





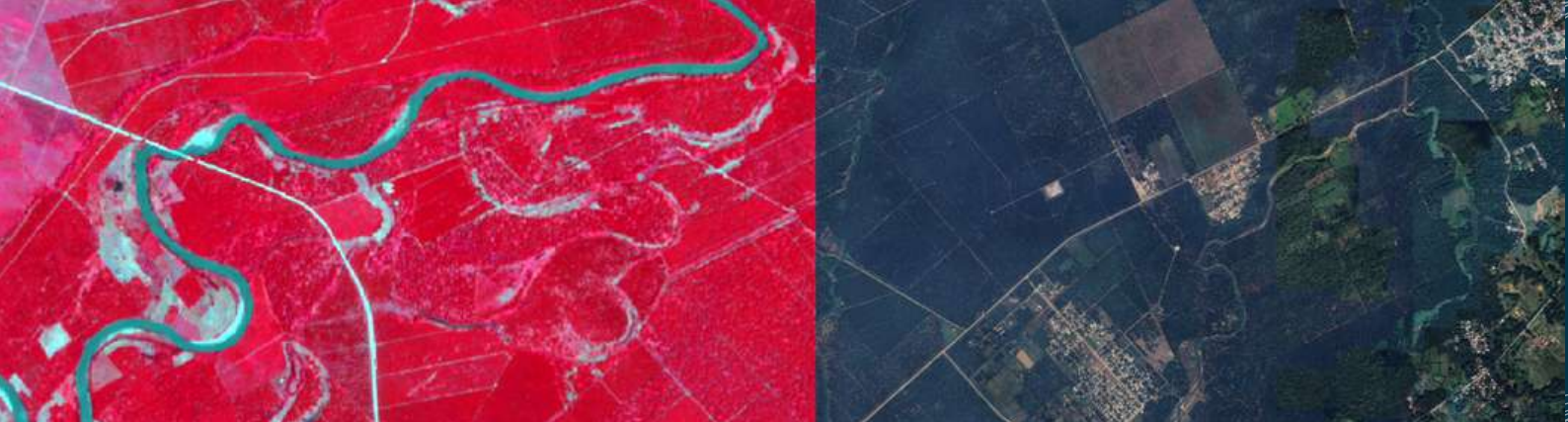
7. DISCUSIÓN

La validación del mapa permitió obtener una precisión global ponderada por área de 0.99, lo cual indica que la clasificación presenta un desempeño excepcionalmente alto en la discriminación entre las clases “Palma” y “No Palma”. Este valor supera ampliamente el umbral recomendado para productos temáticos de uso operativo, y refleja una coherencia muy elevada entre la clasificación y los datos de referencia.

La matriz de error muestra que el estrato “No Palma” presenta 764 aciertos y únicamente 3 errores de comisión, mientras que el estrato “Palma” registra 343 aciertos, con 17 errores de omisión. Estos valores se reflejan en los indicadores específicos: la clase “No Palma” alcanza valores de Usuarios = 1.00 y Productores = 1.00, evidenciando que prácticamente todas las muestras clasificadas como “No Palma” corresponden realmente a esta condición, y que casi no existen áreas de “No Palma” que hayan sido clasificadas erróneamente como Palma. Por su parte, la clase “Palma” presenta una precisión de usuario de 0.95 y de productor de 0.92, lo que indica un comportamiento altamente estable, con leves errores esperados en clases de extensión relativamente pequeña.

Es relevante destacar que el intervalo de confianza calculado para ambas clases asciende a $\pm 15,745$ ha, valor estadísticamente coherente con el tamaño de muestra utilizado y con el diseño de muestreo estratificado aplicado. Aunque ambos estratos presentan el mismo intervalo, esto se debe a la estructura de muestreo con dos clases altamente desbalanceadas, donde la varianza se distribuye de manera similar en ambas categorías. Aun así, el intervalo representa apenas un 0.4–0.6 % del área ajustada de cada clase, lo cual evidencia un nivel de incertidumbre bajo y adecuado para aplicaciones de monitoreo y reporte.





7. CONCLUSIONES

La elaboración del Mapa Nacional de Uso de la Tierra por Palma Aceitera 2020 en Honduras representa un hito fundamental en el apoyo al sector palmero hondureño para el cumplimiento del Reglamento (UE) 2023/1115 (EUDR). Este mapa proporciona una línea base espacial esencial para determinar si la producción de aceite de palma ha estado asociada a la deforestación después del 31 de diciembre de 2020, un requisito crucial para la exportación al mercado de la Unión Europea.

La consolidación y el análisis de información geográfica proveniente del sector palmero, generado a partir del acuerdo de Cero Deforestación suscrito en 2019–2020, ha permitido conformar una base de datos espacial representativa de las fincas de palma aceitera existentes en el país. Este esfuerzo, liderado por el Instituto Nacional de Conservación y Desarrollo Forestal, Áreas Protegidas y Vida Silvestre (ICF) y Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), refleja el compromiso institucional de coordinar y brindar apoyo técnico al sector productivo para contar con un registro confiable de las plantaciones vigentes, facilitar su monitoreo en el tiempo y avanzar en el cumplimiento de los requisitos de trazabilidad y verificación exigidos por el Reglamento de la Unión Europea sobre productos libres de deforestación (EUDR).

La metodología de validación desarrollada, basada en un diseño de muestreo estadísticamente sólido y en la comparación de la clasificación con datos de referencia reales, incluida la base de fincas registrada en el marco del acuerdo de Cero Deforestación con el sector palmero, demuestra que el mapa de palma aceitera alcanza un nivel de precisión y confiabilidad adecuado para apoyar los procesos de verificación exigidos por el EUDR. Este resultado no solo respalda el uso del mapa como insumo técnico en la trazabilidad de las cadenas de suministro de palma, sino que también fortalece la capacidad institucional del ICF para implementar metodologías de monitoreo y evaluación alineadas con los estándares internacionales de productos libres de deforestación.



8. BIBLIOGRAFÍA

Carranza, M. L., Hoyos, L., Gutiérrez, D., Bonaccorso, E., & Fagan, M. E. (2022). Agricultural expansion and deforestation in Central America: A review of patterns, drivers, and policy implications. *Land Use Policy*, 114, 105949. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105949>.

Descals, A., Wich, S., Meijaard, E., Gaveau, D., Peedell, S., & Szantoi, Z. (2020). High-resolution global map of smallholder and industrial closedcanopy oil palm plantations.

Drusch, Bello, D., Carlier, Colin, Fernandez, Gascon, . . . Bargellini. (15 de Mayo de 2012). ScienceDirect. Obtenido de Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services.: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>.

ESA (European Space Agency). (2015). Sentinel-2 User Handbook.

European Union. (2023). Regulation (EU) 2023/1115 of the European Parliament and of the Council of 10 May 2023 on deforestation-free products and repealing Regulation (EC) No 995/2010 (EUDR). *Official Journal of the European Union*, L151, 1–38.

Food and Agriculture Organization of the United Nations & Global Forest Observations Initiative (FAO & GFOI). (2019). Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change (FAO Forestry Paper No. 207). FAO. <https://doi.org/10.4060/ca6203en>.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2016). Map accuracy assessment and area estimation: A practical guide (National forest monitoring assessment working paper No. 46/E). FAO.

GFOI. (2021). Global Forest Observations Initiative (GFOI): Methods and Guidance Documentation.

Gitelson, A., & Merzlyak. (1998). Remote sensing of chlorophyll concentration in higher plant leaves. *Advances in Space Research*.

Google. (2024). Google Earth Pro [Software]. <https://www.google.com/earth/>.

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (1 de Diciembre de 2017). Science Direct. Obtenido de Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425717302900?via%3Dihub>.



Haralick, R., Shanmugam, & Dinstein. (1973). Textural Features for Image Classification. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics.

Hijmans, R. J. (2023). terra: Spatial data analysis (R package version 1.7-39) [Computer software]. <https://CRAN.R-project.org/package=terra>.

Hijmans, R. J. (2025). terra: Spatial data analysis (R package version 1.8-60).

Huete, A. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI).

Huete, Didan, Miura, Rodriguez, Gao, & Ferreira. (Noviembre de 2002). ScienceDirect. Obtenido de Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425702000962?via%3Dihub>.

Huey Yi, S., & Kunjuran, V. (2025). The Impacts of Oil Palm Cultivation Towards Environmental Sustainability: A Systematic Literature Review. e-Bangi Journal of social science and humanities. doi:10.17576/ebangi.2025.2204.37.

ICF. (2019). Ficha tecnica del sistema de clasificacion del mapa fprestal y cobertura de la tierra de Honduras.

Instituto de Conservación Forestal (ICF). (2023). Mapa nacional de palma aceitera de Honduras 2020. Unidad de Monitoreo Forestal, ICF.

INPE. (2021). sits: Satellite image time series analysis for Earth observation data cubes (R package) [Computer software]. <https://CRAN.R-project.org/package=sits>
K. (2021). sits: Satellite image time series analysis on R. Remote Sensing, 13(12), 2428.

Key, & Benson. (2006). Landscape assessment: Ground measure of severity, the Composite Burn Index; and remote sensing of severity, the Normalized Burn Ratio.
Kuhn, M. (2008). Building predictive models in R using the caret package. Journal of Statistical Software, 28(5), 1–26.

Leon, A. (2019). The politics of dispossession in the Honduran palm oil industry: A case study of the Bajo Aguán. Journal of Rural Studies. doi:10.1016/j.jrurstud.2019.01.015.

Linares, F. (2023). Deforestation-Free Palm Oil in Honduras: Challenges, Needs, and Opportunities. doi:10.5772/intechopen.113232.

McFeeters. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features.



Meijaard, E., Brooks, T., Carlson, K., Slade, E., Garcia, J., Gaveau, D., . . . Sheila, D. (2020). The environmental impacts of palm oil in context. doi:10.1038/s41477-020-00813-w.

Müller, K., & Wickham, H. (2023). tibble: Simple data frames (R package version 3.2.1) [Computer software]. <https://CRAN.R-project.org/package=tibble>.

Murphy, D., Goggin, K., & Paterson, R. (2020). Oil palm in the 2020s and beyond: challenges and solutions. doi:10.20944/preprints202012.0129.v1.

Olofsson, P., Foody, G. M., Herold, M., Stehman, S. V., Woodcock, C. E., & Wulder, M. A. (2014). Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. *Remote Sensing of Environment*, 148, 42–57.

Pebesma, E. (2018). Simple features for R: Standardized support for spatial vector data. *The R Journal*, 10(1), 439–446. <https://doi.org/10.32614/RJ-2018-009>.

Simoes, R., Camara, G., Queiroz, G., Souza, F., Andrade, P. R., Santos, L., Carvalho, A., & Ferreira, W. (2016). ggplot2: Elegant graphics for data analysis (2nd ed.). Springer.

Sun, K., Hu, Y., Lakhanpal, G., & Zhou, R. Z. (2023). Spatial cross-validation for GeoAI. En S. Gao, Y. Hu, & W. Li (Eds.), *Handbook of Geospatial Artificial Intelligence* (Cap. 10). CRC Press.

Torres, R., Snoeij, Geudtner, Bibby, Davidson, Attema, . . . otros., e. (2012). GMES Sentinel-1 mission. *Remote Sensing of Environment*.

Torres, R., Snoeij, P., Geudtner, D., Bibby, D., Davidson, M., & otros., e. (15 de Mayo de 2012). *Remote Sensing of Environment*. Obtenido de GMES Sentinel-1 mission: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425712000600?via%3Dihub>.

Unión Europea. (2023). Reglamento (UE) 2023/1115 del Parlamento Europeo y del Consejo relativo a la comercialización en el mercado de la Unión Europea y a la exportación de determinados productos asociados a la deforestación y a la degradación forestal. *Diario Oficial de la Unión Europea*.

Vásquez, A. J. (2025). Informe de validación de cobertura de palma (Consultoría para el Proyecto Bosques Vivos de Honduras). Instituto de Conservación Forestal (ICF).

Wickham, H., François, R., Henry, L., & Müller, K. (2023). dplyr: A grammar of data manipulation (R package version 1.1.3) [Computer software]. <https://CRAN.R-project.org/package=dplyr>.



Xu, H. (2006). Modification of Normalized Difference Water Index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01431160600589179>: International Journal of Remote Sensing.

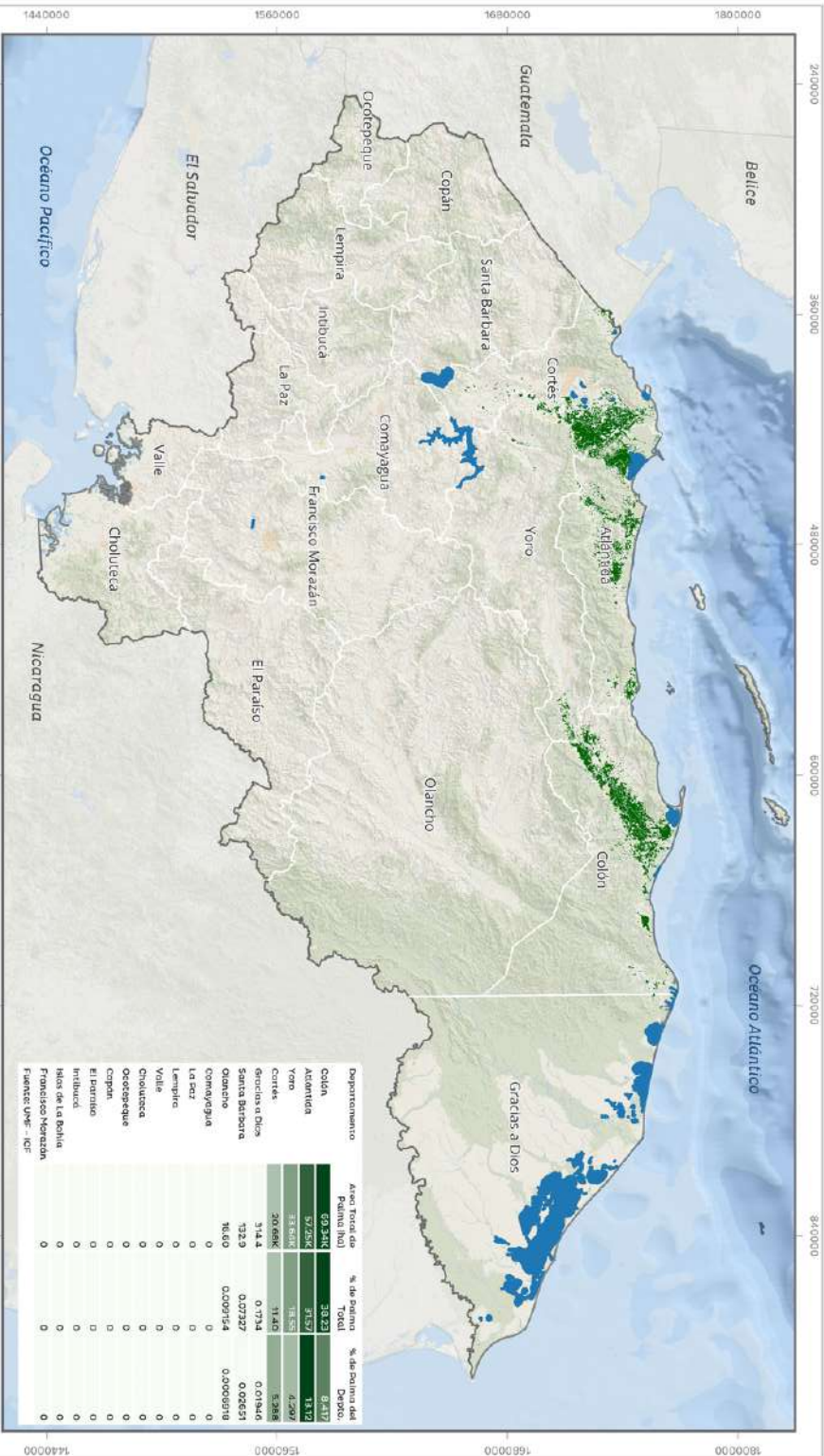
Zhang, H., Cui, Y., Yu, L., Corrales, R., Zhang, S., Cui, K., . . . Liang, H. (2025). Single Oil Palm Tree Detection and Its Potential Expansion in Honduras. IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING. doi:10.1109/TGRS.2025.3562257.





8. ANEXOS

MAPA NACIONAL DE USO DEL SUELO PARA PALMA ACEITERA, HONDURAS 2020



Localización regional:

Nota:

Elaborado por:

Descripción Cartográfica:

Porcentaje

Porcentaje



Los límites políticos administrativos de Honduras y el sistema de información territorial (SIT) se basan en la información cartográfica presentada en el mapa. Los resultados obtenidos para el mapa de palma aceitera 2020 se basan en la información cartográfica presentada en el mapa de palma aceitera y SINTERRA 2020.

UNIDAD DE MONITOREO FORESTAL
CENSO DE MONITOREO FORESTAL
AÑO 2020

PROYECCIÓN: UTM
DATUM: NAD 83
ESCALA: 1:100,000
SISTEMA DE COORDENADAS: UTM-18
PROYECTO: Mapeo de Palma Aceitera



Instituto Nacional de Conservación y Desarrollo Forestal, Áreas Protegidas y Vida Silvestre - ICF



HONDURAS
GOBIERNO DE LA REPÚBLICA