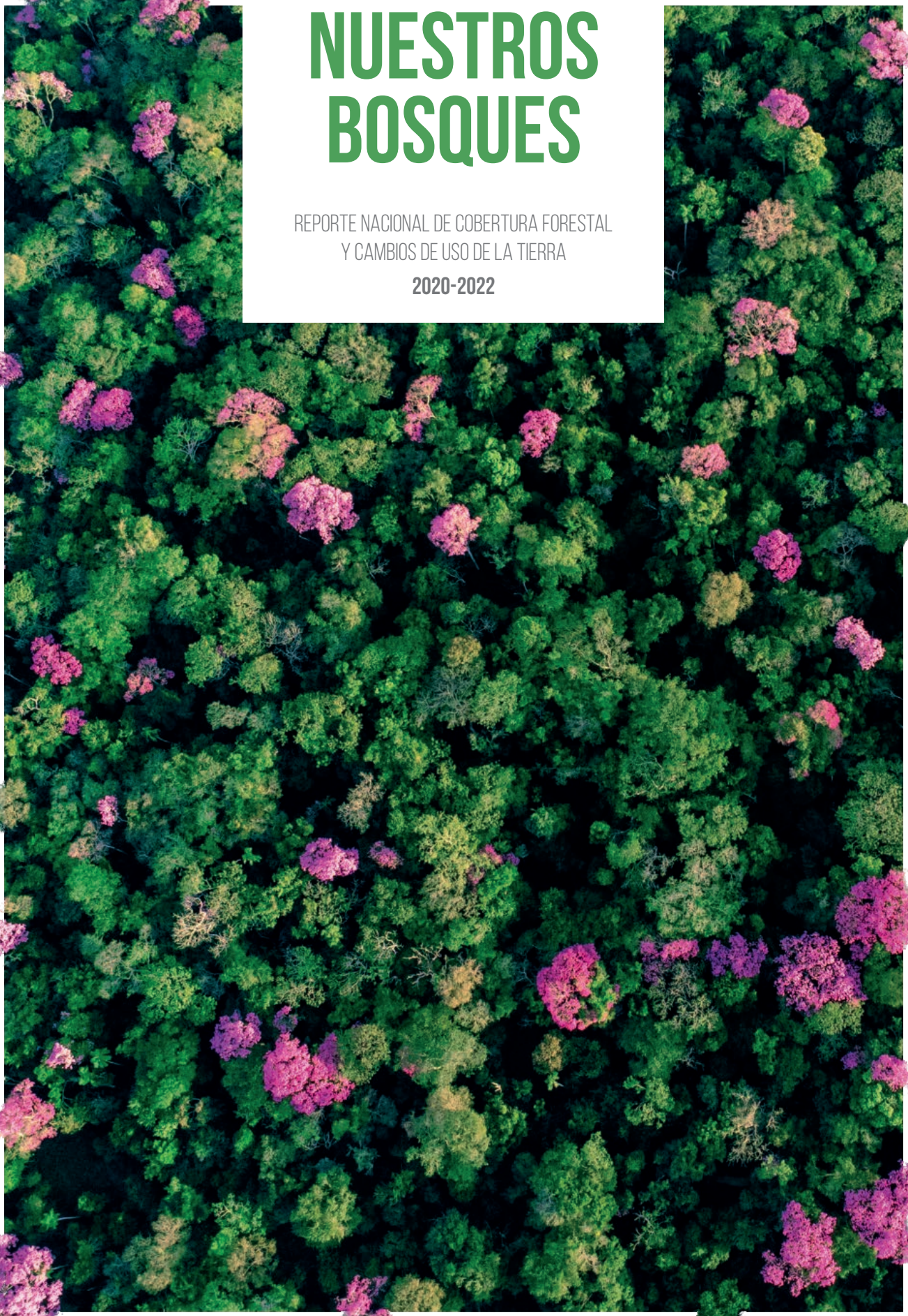
NUESTROS BOSQUES

REPORTE NACIONAL DE COBERTURA FORESTAL
Y CAMBIOS DE USO DE LA TIERRA

2020-2022



KA'AGUY ÑANGAREKORÃ
Tetã remimoĩ
Instituto
FORESTAL NACIONAL

TETÃ REKUÁI
GOBIERNO NACIONAL

Paraguay de la gente

FICHA TÉCNICA

Autor: Instituto Forestal Nacional

Cita recomendada: Instituto Forestal Nacional (INFONA). 2023. Reporte Nacional de Cobertura forestal y cambios de uso de la tierra 2020-2022. 62 p.

Fotografías: INFONA, Tetsu Espósito, PNUD, Proyecto "Paraguay + Verde" y Proyecto "Bosques para el Crecimiento Sostenible".

Mapa base topográfico: Esri, HERE, Garmin, Intermap, increment P Corp., GEBCO, USGS, FAO, NPS, NRCAN, GeoBase, IGN, Kadaster NL, Ordnance Survey, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), (c) OpenStreetMap contributors, and The GIS User Community.

Escala de los mapas principales: 1:5.000.000
Sistema de referencia de coordenadas: WGS 1984 UTM Zona 21 S
Proyección: Universal Transversal de Mercator
Datum: WGS 1984
Falso Este: 500.000,0
Falso Norte: 10.000.000,0
Meridiano Central: -57,0
Factor de Escala: 0,9996
Latitud de Origen: 0,0
Linear Unit: Meter: (1,0)

Agradecimientos
Facultad de Ciencias Agrarias – Universidad Nacional de Asunción
Proyecto Paraguay + Verde

CONTENIDO

Glosario 7

Introducción 9

Contexto normativo forestal 11

Metodología para el monitoreo de la cobertura forestal y cambios de uso de la tierra 12

- **Elaboración de mapas – periodo 2020-2022** 12
  - *Generación de mosaicos* 12
  - *Selección colección de imágenes y fechas* 12
  - *Selección de cobertura de nubes* 13
  - *Aplicación de máscaras de nubes y sombras* 14
  - *Inclusión de lista negra o blacklist* 14
  - *Aplicación de estadísticas* 14
  - *Cálculo del índice NDFI* 14
  - *Generación de mosaicos multitemporal* 14
- **Clasificación** 16
  - *Selección de muestras de entrenamiento* 16
  - *Clasificación supervisada* 16
- **Descarga** 16
- **Segmentación** 17
- **Reclasificación** 18
- **Cálculo de mayoría** 18
- **Análisis visual y depuración de resultados** 18
- **Consideraciones para la identificación y cuantificación de cultivos de uso ilícito (CUI)** 19

Resultados del monitoreo 20

- **Cobertura forestal y cambios de uso de la tierra** 24
  - *Cobertura forestal y cambios de uso de la tierra por estratos forestales* 24
  - *Cobertura forestal y cambios de uso de la tierra en la Región Oriental* 26
  - *Cobertura forestal y cambios de uso de la tierra en la Región Occidental* 36
  - *Cultivos de Uso Ilícito (CUI)* 46
- **Resumen histórico de los cambios de uso del bosque nativo periodo 2005-2022** 49
  - *Región Oriental* 50
  - *Región Occidental* 50

Acciones ante la deforestación 51

- **Alertas Tempranas de Deforestación** 51
- **Nuevo régimen de infracciones y sanciones forestales** 51

Conclusión 52

ANEXO 53

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Rango de fechas empleados para los mapas de cobertura forestal y cambios de uso de la tierra 12

Cuadro 2. Porcentaje de nubes empleado para mosaicos 13

Cuadro 3. Información espectral contenida en los mosaicos multitemporales 14

Cuadro 4. Clases tenidas en cuenta para el mapa de cobertura forestal y cambios de uso de la tierra 16

Cuadro 5. Cobertura forestal 2022 20

Cuadro 6. Distribución de la cobertura forestal por regiones 20

Cuadro 7. Distribución del cambio de uso de la cobertura forestal y cosecha de las plantaciones forestales por periodo. 22

Cuadro 8. Superficie de cobertura forestal 2022 según estratos forestales 24

Cuadro 9. Superficie de cambios de uso del bosque nativo según estratos forestales 24

Cuadro 10. Cobertura forestal en la región Oriental 26

Cuadro 11. Distribución del cambio de uso de la cobertura forestal y plantaciones forestales por periodos en la Región Oriental. 28

Cuadro 12. Distribución de la cobertura forestal 2022 por departamentos de la región Oriental 30

Cuadro 13. Distribución de los cambios de uso de la cobertura forestal y cosecha de plantaciones por departamentos de la región Oriental 31

Cuadro 14. Clasificación de cambios de uso de la tierra según tamaño en la Región Oriental 33

Cuadro 15. Tipificación de cambios en la cobertura forestal en la Región Oriental 34

Cuadro 16. Cobertura forestal en la región Occidental 36

Cuadro 17. Distribución del cambio de uso de la cobertura forestal y plantaciones forestales por periodos en la región Occidental 38

Cuadro 18. Distribución de la cobertura forestal 2022 por departamento – Región Occidental 40

Cuadro 19. Distribución de la cobertura forestal 2022 por distrito – Región Occidental 40

Cuadro 20. Cambios de uso de la tierra y cosecha de plantaciones por departamento – Región Occidental 41

Cuadro 21. Distribución de cambios de uso de la tierra y cosecha de plantaciones por distritos – Región Occidental 43

Cuadro 22. Cambios de uso de la tierra dentro de Planes de Uso de la Tierra (PUT) en la Región Occidental 44

Cuadro 23. Distribución de los cambios de uso de la tierra por cultivos de uso ilícito (CUI) según departamentos y periodos de monitoreo. 46

Cuadro 24. Distribución de cambios de uso de la tierra por cultivos de uso ilícito en ASP 48

Cuadro 25. Cambios de uso del bosque nativo en Paraguay registrados según periodos de monitoreo 49

Cuadro 26. Cambios de uso de bosques nativos en la Región Oriental registrados según periodos de monitoreo 50

Cuadro 27. Cambios de uso de la tierra en la Región Occidental registrados según periodos de monitoreo 50

Cuadro 28. Estratos considerados en el muestreo 53

Cuadro 29. Parámetros empleados para el cálculo de muestras mapa 2020-2021 54

Cuadro 30. Parámetros empleados para el cálculo de muestras mapa 2021-2022 54

Cuadro 31. Número de muestras para evaluación mapa 2020-2021 55

Cuadro 32. Número de muestras para evaluación mapa 2021-2022 55

Cuadro 33. Valoración del Índice de Kappa 57

Cuadro 34. Matriz de confusión a partir del conteo de segmentos mapa 2020-2021 57

Cuadro 35. Resultados de exactitud del usuario y productor, según matriz de conteo de segmentos mapa 2020-2021 57

Cuadro 36. Matriz de confusión a partir del área de segmentos mapa 2020-2021 58

Cuadro 37. Resultados de exactitud del usuario y productor, según matriz de área de segmentos mapa 2020-2021 58

Cuadro 38. Matriz de confusión a partir del conteo de segmentos mapa 2021-2022 58

Cuadro 39. Resultados de exactitud del usuario y productor, según matriz de conteo de segmentos 59

Cuadro 40. Matriz de confusión a partir del área de segmentos mapa 2021-2022 59

Cuadro 41. Resultados de exactitud del usuario y productor, según matriz de área de segmentos mapa 2021-2022 59

Cuadro 42. Estimación de áreas sin sesgo mapa 2021-2022 60

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mosaicos anuales generados para los años 2020-2021-2022 15

Figura 2. Resultados de segmentación de imágenes 17

Figura 3. Resultado del cálculo de mayoría por segmentos 18

Figura 4. Parámetros empleados para identificar cultivos de uso ilegal 19

Figura 5. Distribución de la cobertura forestal a nivel nacional 21

Figura 6. Mapa de distribución de la cobertura forestal 2022 23

Figura 7. Mapa de cobertura forestal 2022 por estratos forestales 25

Figura 8. Mapa de cobertura forestal 2022 y cambios de uso 27

Figura 9. Mapa de cobertura forestal 2022 por estratos forestales 29

Figura 10. Distribución de la cobertura forestal en la región Oriental 30

Figura 11. Mapa de cobertura forestal 2022 y cambios de uso de la tierra por periodos – Región Oriental 32

Figura 12. Distribución de la cobertura forestal 2022 por departamentos – Región Oriental 33

Figura 13. Concentración de cambios de uso por departamentos de la región Oriental 37

Figura 14. Clasificación de cambios de uso de la tierra según tamaño en la región Oriental 39

Figura 15. Distribución de la cobertura forestal en la región Occidental 41

Figura 16. Mapa de cobertura forestal 2022 y cambios de uso de la tierra 2020-2022 – Región Occidental 42

Figura 17. Distribución de la cobertura forestal 2022 por distritos – Región Occidental 43

Figura 18. Concentración de cambios de uso por departamentos de la región Occidental 45

Figura 19. Distribución del cambio de uso del bosque nativo por periodos y por distritos – Región Occidental 47

Figura 20. Cambios de uso de la tierra dentro de Planes de Uso de la Tierra (1994-2022) 49

Figura 21. Distribución de cambios de uso del bosque nativo 2020-2022 por cultivos de uso ilícito 56

GLOSARIO

Bosque nativo o natural: es el ecosistema natural con diversidad biológica, intervenido o no, regenerado y/o restaurado por sucesión natural o técnicas forestales de enriquecimiento con especies nativas, que produce bienes, provee servicios ambientales y sociales, cuya superficie mínima es de 1 hectárea (1 ha), con una altura de los árboles igual o mayor a tres metros (3 m) en la Región Occidental e igual o mayor a cinco metros (5 m) en la Región Oriental y que alcance una cobertura mínima de copas en su estado natural al menos del diez por ciento (10%) de la superficie referenciada en la Región Occidental y treinta por ciento (30%) en la Región Oriental.

Cobertura forestal (CF): a los fines de este reporte, es la masa forestal conformada por bosques nativos, palmares y plantaciones forestales.

Evaluación de exactitud temática (EET): es un procedimiento que permite determinar y reportar el grado de confiabilidad de un producto cartográfico, en términos de porcentaje de exactitud o nivel de incertidumbre. Específicamente, es el proceso de estimar medidas de precisión de un producto cartográfico, mediante la comparación de las etiquetas de un mapa con los datos de referencia en las muestras (en este caso las imágenes satelitales).

Monitoreo forestal: es un proceso integral que incluye las alertas tempranas por deforestación y de incendios; así como también la recopilación, análisis y divulgación de los datos relacionados con la cobertura forestal, y la producción de información y conocimiento a intervalos regulares, que permitan la evaluación de los cambios en el curso del tiempo.

Palmar: Vegetación combinada de pastos, bambúes y otros con una altura igual o mayor a tres metros (3 m) en la Región Occidental e igual o mayor a cinco metros (5 m) en la Región Oriental; con una cubierta de dosel de 5 a 10 por ciento en una superficie mínima de 1 ha.

Plantaciones forestales: en términos forestales, las plantaciones se refieren a los rodales forestales establecidos mediante plantación durante el proceso de forestación o reforestación.

Sistema Nacional de Monitoreo Forestal (SNMF): es el sistema de la autoridad de aplicación, que provee información en forma periódica, medible, verificable, generada por tres componentes: El Sistema Satelital de Monitoreo Terrestre (SSMT), ii) el Inventario Forestal Nacional (IFN) y iii) el Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INGEI) del sector uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura (UTCUTS).

Sistema Satelital de Monitoreo Terrestre (SSMT): Hace referencia a la aplicación de herramientas de los sensores remotos o sistemas de teledetección para el Monitoreo Forestal y la generación de los Mapas de Cobertura Forestal Nacional (y otros productos cartográficos), de esta forma obtener información de la dinámica de esta cobertura.

Fotografía: Proyecto Paraguay + Verde

INTRODUCCIÓN

El Sistema Nacional de Monitoreo Forestal (SNMF) tiene por objeto proveer información nacional oficial del estado de la cobertura forestal que posee el territorio de la República del Paraguay, en forma periódica, medible, verificable y comparable con otros sistemas de información geográfica, así como proveer parámetros e información que permitan dimensionar la magnitud del contenido de carbono almacenado de la masa forestal nacional y la tipificación cualitativa y cuantitativa de especies forestales que integran la masa forestal.

A fin de alcanzar el objetivo del SNMF en cuanto a generación de información periódica y confiable, en los últimos años, el INFONA ha implementado continuas mejoras relacionadas al monitoreo basado en sensores remotos y sistemas de información geográfica, logrando obtener información más detallada y precisa sobre la cobertura forestal y los cambios de uso de la tierra.

En el año 2022, fue lanzado el Reporte Nacional de Cobertura Forestal y Cambios de Uso de la Tierra 2017-2020, el cual actualizó la información disponible sobre superficies de bosque nativo hasta ese momento. Este reporte no solo aportó información sobre la cantidad de bosques, sino también realizó un análisis sobre las causas de la deforestación en el Paraguay, buscando conocer los vínculos entre el cambio de uso de la tierra y el desarrollo socioeconómico del país.

En este documento se presentará toda la información relativa al monitoreo de la cobertura forestal y cambios de uso de la tierra para el periodo 2020-2022, realizado por el Instituto Forestal Nacional, de manera a actualizar la información del estado y la dinámica de la cobertura forestal nacional, contribuir a la toma de decisiones informadas y aportar a la construcción de políticas públicas del sector.

Además de actualizar la información sobre bosques nativos, se ampliará la visión a otras coberturas forestales y usos de la tierra, presentando información más detallada sobre la dinámica de la cobertura y sus usos. Se llevará a cabo un análisis de la cobertura forestal y los cambios de uso de la tierra a nivel nacional, seguido de información detallada por estratos forestales y regiones del país, además de un resumen de los cambios históricos desde la vigencia de la ley de deforestación cero en la región Oriental, y un análisis de las circunstancias nacionales ligadas a los cambios de uso de la tierra.

Fotografía: Proyecto Paraguay + Verde

CONTEXTO NORMATIVO FORESTAL

El marco normativo forestal en Paraguay se encuentra regulado por diversas leyes, decretos y disposiciones que buscan promover la gestión sostenible de los recursos forestales del país. Algunas de las normativas más relevantes son las siguientes:

- **Ley 422/73 "Forestal".** Establece las disposiciones generales para la protección, conservación, manejo y aprovechamiento sostenible de los recursos forestales en Paraguay.
- **Ley 294/93 "De Evaluación de Impacto Ambiental".** Establece la evaluación de impacto ambiental como requisito previo a la aprobación de Planes de uso de la tierra, Plantaciones Forestales y/o reforestaciones.
- **Ley 716/96 "Sanciona delitos contra el medio ambiente".** Establece medidas administrativas y penales a los que procedan a la explotación forestal de bosques declarados especiales o protectores.
- **Ley 3464/08 "Que crea el Instituto Forestal Nacional".** Crea el INFONA y le confiere el objetivo de administrar, promover y desarrollar sosteniblemente los recursos forestales del país.
- **Ley 4241/10 "Restablecimiento de Bosques Protectores de Cauces Hídricos dentro del territorio nacional".** Establece que los bosques protectores deberán ser conservados permanentemente en su estado natural, y que aquellas propiedades que no los hayan conservado, deberán restablecerse con especies nativas.

La Ley 422/73, en su artículo 42, establece que todas las propiedades rurales de más de veinte hectáreas en zonas forestales deberán mantener el 25% de su área de bosques naturales, y en caso de no tener este porcentaje mínimo, el propietario deberá reforestar una superficie equivalente al 5% de la superficie del predio. Esta normativa aplica para ambas regiones del país.

Existen algunas variaciones del marco normativo de una región a otra, por ejemplo, para la región Oriental del país, rige la Ley 6676/20, conocida como *Ley de Deforestación Cero*, disposición que prohíbe la transformación o conversión de superficies con cobertura de bosques a superficies destinadas al aprovechamiento agropecuario o a asentamientos humanos; así también prohíbe las actividades como la producción, transporte y comercialización de madera, leña, carbón y cualquier subproducto forestal originado del desmonte no autorizado por un plazo de 10 años, y autoriza al INFONA a reglamentar el Sistema Nacional de Monitoreo Forestal. Esta prohibición fue prorrogada sucesivamente mediante diferentes leyes, y se encuentra vigente con algunas diferencias desde diciembre del año 2004.

Por otra parte, en la región Occidental o Chaco, el marco legal vigente permite la conversión de bosques a otros usos de la tierra a través de Planes de Uso de la Tierra, los cuales son otorgados por el INFONA teniendo en cuenta los criterios técnicos establecidos en sus reglamentaciones.

Además, en ambas regiones del país está permitido el aprovechamiento sostenible de los bosques a través de planes de aprovechamiento forestal, mediante los cuales es posible la extracción selectiva de cierto volumen de madera sin que signifique una conversión en el uso de la tierra.

METODOLOGÍA PARA EL MONITOREO DE LA COBERTURA FORESTAL Y CAMBIOS DE USO DE LA TIERRA

Elaboración de mapas – Periodo 2020-2022

Se realizaron dos mapas de cobertura forestal y cambios de uso de la tierra para los períodos 2020-2021 y 2021-2022, siguiendo la metodología del Sistema Satelital de Monitoreo Terrestre (PNC ONU-REDD+2016[1]). Esta metodología consta de los siguientes pasos: (1) creación de mosaicos libres de nube y clasificación supervisada en la plataforma geoespacial Google Earth Engine; (2) segmentación de imágenes multitemporales; (3) cálculo de estadísticas zonales utilizando el criterio de mayoría; (4) reclasificación de categorías del mapa; (5) depuración de resultados mediante fotointerpretación; y (6) Evaluación de Exactitud Temática (EET).

La Evaluación de Exactitud Temática (EET) es un proceso independiente que se realiza una vez finalizado el mapa. Consiste en una evaluación objetiva de la calidad del mapa y la estimación de su incertidumbre. La EET de ambos mapas fue realizada por el Laboratorio de Geomática de la Dirección de Posgrado de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Asunción (Anexo 1).

Generación de mosaicos

Para la generación de los mosaicos, se utilizaron imágenes satelitales Landsat 8 y 9 de las colecciones SR (Reflectancia de Superficie) en sus niveles Tier 1 y Tier 2, así como TOA (Reflectancia calibrada al tope de la atmósfera), disponibles en la plataforma web GEE. Los mosaicos de imágenes satelitales se generaron por región del país, considerando parámetros de fechas y porcentaje de nubes.

La generación de los mosaicos se implementó mediante un script que incluye los siguientes pasos:

Selección colección de imágenes y fechas

Se emplearon varias colecciones de imágenes de Landsat con el objetivo de mejorar la disponibilidad y calidad de las imágenes satelitales dentro de cada periodo de análisis. Se utilizaron las siguientes:

> Colección SR_Tier 1: "LANDSAT/LC08/C02/T1_L2" y "LANDSAT/LC09/C02/T1_L2"
> Colección SR_Tier 2: "LANDSAT/LC08/C02/T2_L2" y "LANDSAT/LC09/C02/T2_L2"
> Colección TOA: "LANDSAT/LC08/C02/T1_TOA" y "LANDSAT/LC09/C02/T1_TOA"

Estas colecciones proporcionaron una variedad de datos satelitales con diferentes niveles de procesamiento, como la Reflectancia de Superficie (SR) que elimina los efectos atmosféricos y proporciona valores de reflectancia de superficie corregidos, mientras que la Reflectancia

PERIODO	AÑO	RANGO DE FECHA
2020-2021	2020	01/08/2020 al 01/01/2021
	2021	01/06/2021 al 01/01/2022
2021-2022	2022	01/09/2022 al 01/01/2023

Cuadro 1. Rango de fechas empleados para los mapas de cobertura forestal y cambios de uso de la tierra

[1] https://nube.infona.gov.py/index.php/s/X3cwCHHY3rj2pjT#pdfviewer

calibrada al Tope de la Atmósfera (TOA), refleja la radiación medida en la parte superior de la atmósfera. En el Cuadro 1 se detalla el rango de fechas empleado para cada mapa.

Selección de cobertura de nubes

Para la construcción de los mosaicos anuales, se aplicó un prefiltro basado en el porcentaje de cobertura de nubes para cada imagen satelital dentro del rango de fechas establecido. La distribución utilizada se detalla en el Cuadro 2.

REGIÓN	% DE COBERTURA DE NUBES		
	AÑO 2020	AÑO 2021	AÑO 2022
Oriental	30%	30%	10%
Occidental	20%	30%	10%

Cuadro 2. Porcentaje de nubes empleado para mosaicos

Fotografía: Proyecto Paraguay + Verde

Aplicación de máscaras de nubes y sombras

Con el fin de obtener un mosaico más limpio y representativo de la superficie terrestre, se realizó un análisis de las propiedades de las imágenes de Landsat y se aplicaron funciones que permitieron enmascarar las nubes, eliminar las sombras y los puntos brillantes.

Inclusión de lista negra o blacklist

En esta lista se incluyeron imágenes satelitales que presentan errores significativos y que se encuentran dentro del rango de fechas utilizado. Estos errores afectan la composición del mosaico y pueden incluir problemas como el bandeado incorrecto, una alta presencia de cobertura de nubes y sombras, así como la presencia de valores nulos, entre otros.

Aplicación de estadísticas

Se utilizaron funciones para generar estadísticas a partir de todas las imágenes seleccionadas y los valores de los píxeles.

El método de composición del mosaico empleado fue el mosaico medoide. Un mosaico medoide es similar a una mediana (valor central del conjunto de píxeles del periodo ordenados ascendente o descendentemente), ya que representa el punto con la distancia mínima sumada a todos los demás puntos en un conjunto de datos. Sin embargo, a diferencia de la mediana, considera múltiples dimensiones en su selección, que corresponden a las diferentes bandas de las imágenes (Flood, 2013[2]). En otras palabras, este tipo de mosaico representa los valores de un conjunto de datos que son más cercanos a los valores de la mediana.

Cálculo del índice NDFI

Se incluyó una función que calcula el índice NDFI (Índice de Fracción de Diferencia Normalizada).

Este índice permite obtener información sobre posibles disturbios en la cobertura boscosa y detectar cambios en el uso de la tierra. Se calcula a partir de la transformación de los datos de las imágenes satelitales en fracciones espectrales de elementos, lo que implica descomponer los espectros de reflectancia en componentes específicos.

La utilización del NDFI para el monitoreo es beneficioso porque proporciona una representación más detallada de la composición espectral de la cobertura vegetal. Esto permite identificar y analizar cambios sutiles en los patrones de reflectancia, que podrían estar asociados con disturbios o alteraciones en la cobertura boscosa.

Generación de mosaicos multitemporal

Los mosaicos anuales fueron unidos para generar un único mosaico multitemporal con información espectral de cada año de análisis, el cual es utilizado como dato de entrada para la clasificación. Además, a este mosaico se agregó la información del NDFI con las estadísticas calculadas como se detalla en el Cuadro 3.

En la Figura 1 se observan los mosaicos generados para el periodo de análisis de la cobertura forestal y los cambios de uso de la tierra.

INFORMACIÓN ESPECTRAL Y ESPECIFICACIONES DE CADA MOSAICO						
MOSAICOS	Bandas del visible	*BLUE*	*GREEN*	*RED*		
	Banda del Infrarrojo cercano	*NIR*				
	Bandas del Infrarrojo de ondas cortas	*SWIR 1*	*SWIR 2*			
	Índices espectrales	*NDFI*				
	Estadísticas	*Min (Mínimo)*	*Max (Máximo)*	*Amp (Amplitud)*	*First (Primero)*	*Last (Último)*

Cuadro 3. Información espectral contenida en los mosaicos multitemporales

[2] Flood, N. Seasonal composite Landsat TM/ETM+ images using the medoid (a multi-dimensional median). Remote Sens. 2013, 5, 6481–6500.

Mosaicos anuales – Región Occidental Visualización *nir_swir1_red* (falso color)		
2020	2020	2020
Mosaicos anuales – Región Oriental Visualización *nir_swir1_red* (falso color)		
2020	2020	2020

Figura 1. Mosaicos anuales generados para los años 2020-2021-2022

Clasificación

Selección de muestras de entrenamiento

En este paso, se interpretan las características observadas en las imágenes para identificar los diferentes tipos de cobertura y usos de la tierra. Se consideran una variedad de criterios que incluyen tonalidad, brillo, color, textura, forma, tamaño, patrón espacial, localización, fenología y condiciones estacionales (García-Meléndez, 2007[3]).

En el Cuadro 4, se detallan las categorías o clases consideradas para la selección de muestras de entrenamiento del mapa de cobertura forestal y cambios de uso de la tierra del periodo 2020-2021 y 2021-2022.

Clasificación supervisada

Se utilizó un modelo de clasificación supervisada con el algoritmo *Random Forests* para monitorear la cobertura forestal y los cambios en el uso de la tierra. La clasificación supervisada se llevó a cabo en la plataforma GEE, utilizando toda la información del mosaico multitemporal generado previamente para cada año de análisis. Se recolectaron muestras de entrenamiento, las cuales se almacenaron como una única clase final y se utilizaron para entrenar al clasificador "*smileRandomForest*", que es una versión mejorada del algoritmo "*RandomForest*". Este algoritmo combina predictores de árboles, donde cada árbol del bosque depende de los valores de un vector aleatorio muestreado de forma independiente y con la misma distribución para todos los árboles. El clasificador se configuró con 50 árboles.

Descarga

Se descargan los resultados de la clasificación y los mosaicos multibanda de la plataforma GEE, teniendo en cuenta límites de cada región y subregión del mapa de cobertura forestal y cambios en la cobertura forestal del país.

Estos resultados se descargan con el propósito de llevar a cabo actividades de post-clasificación, que consisten principalmente en la asignación de la unidad mínima y recategorización del mapa, mediante la fotointerpretación y depuración de los resultados.

CATEGORÍAS DE USOS DE LA TIERRA Y CAMBIOS DE USO DE LA TIERRA	
CLASE	**DESCRIPCIÓN**
1 Bosque estable	Bosque nativo que se mantiene intacto durante todo el periodo 2020-2021 y 2021-2022. También se incluyen los bosques afectados por quema, observado en el periodo de análisis
2 Otras coberturas y usos de la tierra	Coberturas y usos de la tierra no forestales como tierras de cultivo, campos naturales, cuerpos de agua, asentamientos, entre otros
3 Cambios de uso de la tierra	Bosque nativo en el que se detectan cambios a otros usos de la tierra. Ejemplo: Tierras forestales que cambiaron a Cultivos de uso ilícito, durante 2020-2021 y/o 2021-2022
4 Palmar	Tipo de vegetación comprendida principalmente por sabana palmar, distribuidos en toda la planicie inundable de la cuenca del Río Paraguay, con diferentes densidades y grados de perturbación
5 Plantaciones forestales	Cobertura forestal que fue originalmente plantada o sembrada, principalmente de origen exótico

Cuadro 4. Clases tenidas en cuenta para el mapa de cobertura forestal y cambios de uso de la tierra

[3] García-Meléndez, E. 2007. Análisis visual de imágenes: Módulo VII: Sistemas de Información Geográfica y Teledetección. Universidad de León. 15 p.

Segmentación

Se realizó la segmentación[4] para los mosaicos multitemporales utilizando el Orfeo Toolbox. Se aplicó el "LSMS (Large Scale Mean-Shift Segmentation)", que está basado en el algoritmo Mean-Shift, equivalente a un desplazamiento hacia la media de forma iterativa con el fin de generar clúster o grupos.

En este paso se define la unidad mínima de mapeo, puesto que la clasificación está basada en píxeles (30 x 30 m). Los parámetros empleados para este proceso se detallan a continuación:

> Radio espacial: 5,
> Rango espectral: 120,
> Tamaño mínimo de región (segmento): 12 píxeles, equivalente a aproximadamente 1 hectárea.

Cada segmento generado contiene píxeles agrupados de acuerdo a estadísticas de imagen y similaridad espectral. Este proceso fue realizado a partir de los mosaicos multitemporales que cubren el país.

El archivo de salida fue guardado en formato raster (.TIFF) y convertido a *shapefile* utilizando las herramientas de conversión de programas de Sistemas de Información Geográfica de escritorio.

El producto final de la segmentación corresponde a un *shapefile* que contiene polígonos o segmentos, y cada uno de estos polígonos posee una superficie, según la cantidad de píxeles con el cual fue formado (Figura 2).

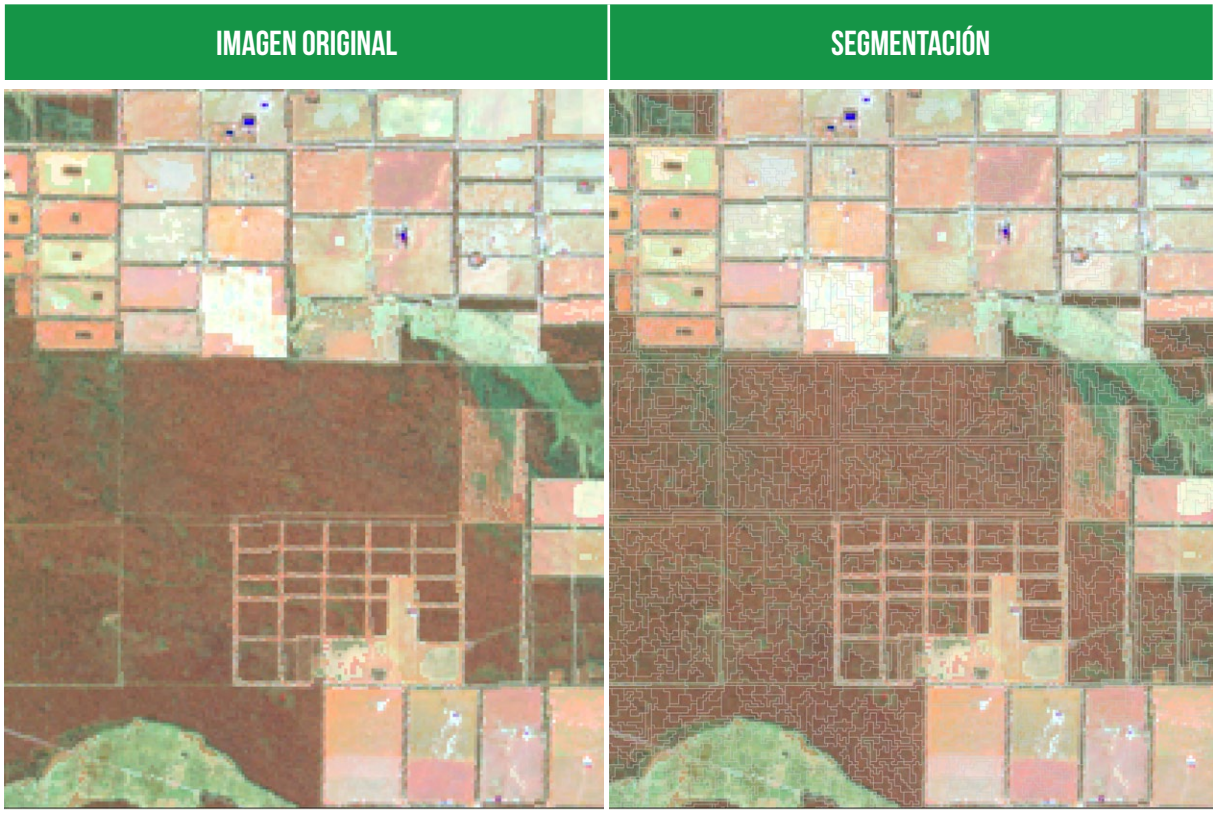


Figura 2. Resultados de segmentación de imágenes.

[4] Proceso donde se divide una imagen agrupando píxeles con características espectrales similares

Reclasificación

Con el fin de incluir y representar adecuadamente las demás coberturas y usos de la tierra no forestales, se llevó a cabo una reclasificación de valores de la clasificación con el objetivo de asignar un valor a estas. Esta reclasificación fue necesaria debido a que en el proceso de toma de muestras y clasificación solo se trabajó con la máscara correspondiente a la cobertura forestal de los periodos de análisis.

Cálculo de mayoría

Se realizó el cálculo de mayoría para los segmentos utilizando la herramienta "Estadísticas de zonas" del software QGis, con el fin de eliminar el efecto sal y pimienta[5] obtenido en la clasificación por píxeles. El valor o categoría de los píxeles que ocurren con mayor frecuencia dentro de los límites del polígono será el que determine la categoría del segmento. En la Figura 3 se observa un ejemplo de aplicación de la mayoría en el segmento seleccionado.

Análisis visual y depuración de resultados

Con el objetivo de detectar anomalías en los cálculos estadísticos y errores en la clasificación, se llevó a cabo un análisis visual del resultado obtenido mediante la fotointerpretación del mosaico multitemporal. Este análisis se realiza mediante la superposición de los segmentos que conforman la capa generada en la clasificación, junto con el cálculo de mayoría y las imágenes satelitales correspondientes a cada periodo. Para llevar a cabo este proceso, se utilizan herramientas de edición de programas SIG.

El primer paso consiste en crear un campo en la tabla de atributos de cada segmento, denominado "clase", donde se asignan los valores de mayoría generados. Estos valores pueden ser modificados en función de los errores identificados durante el análisis visual.

Además, en este proceso se realiza la separación de los distintos tipos de cambios detectados en función del uso de la tierra y las características observadas en el mapa. Esta separación permite

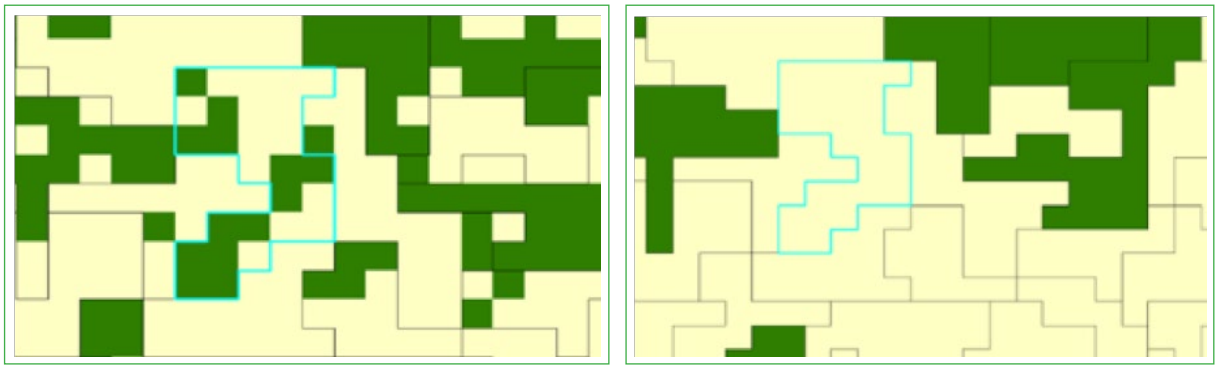
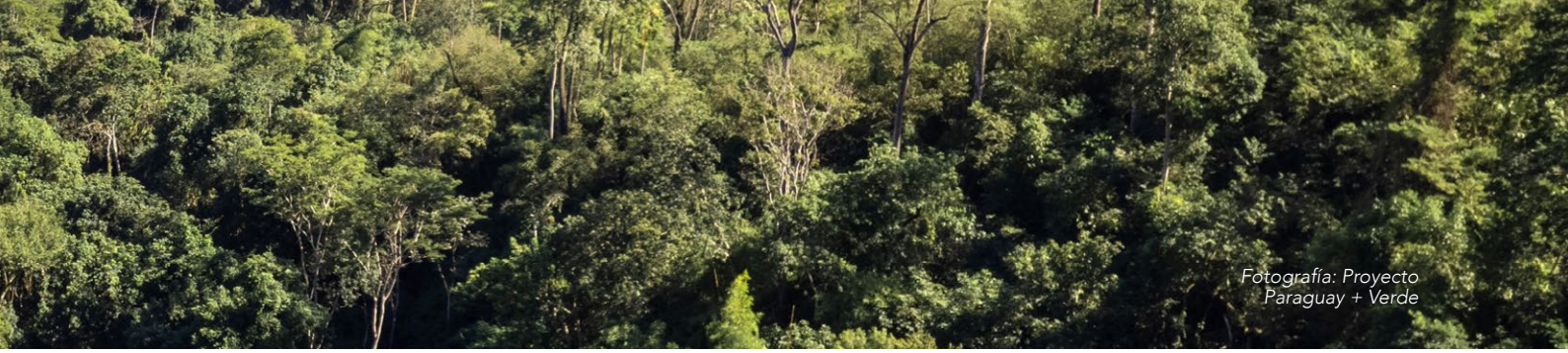


Figura 3. Resultado del cálculo de mayoría por segmentos

[5] Se denomina "efecto sal y pimienta" a la presencia de coberturas homogéneas salpicadas por píxeles individuales pertenecientes a otras categorías, se corrige a través de la aplicación de algún filtro a las imágenes resultantes de la clasificación.



Fotografía: Proyecto Paraguay + Verde

obtener un mayor nivel de detalle para asociar las posibles causas de los cambios de uso de la tierra. Por ejemplo, se separan los cambios en la cobertura forestal en categorías como cultivos de uso ilícito, asentamientos humanos y usos agropecuarios. De esta manera, se logra una mejor identificación y comprensión de los diferentes factores que contribuyen a los cambios observados de la cobertura forestal.

Consideraciones para la identificación y cuantificación de cultivos de uso ilícito (CUI)

Para identificar los cultivos de uso ilícito, se aplicó un filtro espacial a las capas que contienen las clases de coberturas y cambios de uso de la tierra. Se seleccionaron únicamente las clases que corresponden a cambios en la cobertura forestal mediante una selección basada en atributos específicos.

Posteriormente, se distribuyeron estos cambios en grillas de 100 x 100 km para realizar un análisis visual detallado. Estas grillas fueron generadas con el propósito de organizar y facilitar los procesos que requieren un análisis más minucioso.

Dentro de cada grilla, se contrastaron los polígonos de cambio de uso de la tierra con mosaicos multitemporales e imágenes de alta resolución. Si, al observar las imágenes satelitales, se cumplían los criterios establecidos para determinar que se trataba de cultivos de uso ilícito, se asignó una nomenclatura específica detallada en la tabla de atributos asociada al archivo geoespacial.

En cuanto a las características, estos cultivos se establecen principalmente en áreas con vegetación boscosa densa y son fácilmente distinguibles en las imágenes satelitales a simple vista. Se pueden verificar mediante la aplicación de criterios específicos, como los mencionados en la Figura 4.

Estos cultivos cuentan con una forma geométrica definida y en la mayoría de los casos su distribución es agrupada (en una misma zona se concentran varios polígonos de pequeña a mediana superficie). En ciertos casos, son establecidos dentro de áreas silvestres protegidas, puesto que cuentan con cobertura boscosa más densa y la dificultad para acceder a las zonas internas es mayor.

Así también, se establecen en cercanía a cauces hídricos, porque son un medio para el transporte de los cultivos cosechados, y como estas zonas cuentan con una topografía accidentada, dificultando las intervenciones para la erradicación y/o incautación.

Forma poligonal
En centro de zonas boscosas
Cercanos a cauces hídricos
Textura lisa
Tamaño
Zonas con dificultad de acceso

Figura 4. Parámetros empleados para identificar cultivos de uso ilegal

Fotografía: Proyecto Paraguay + Verde

RESULTADOS DEL MONITOREO

Cobertura forestal y cambios de uso de la tierra

De acuerdo al monitoreo realizado por el INFONA, la superficie total de cobertura forestal al final del año 2022 fue de 17.727.756,6 hectáreas, lo que corresponde al 44,3% de la superficie del territorio nacional. Los bosques nativos representan el 36,6% de la superficie nacional, los palmares el 7,2% y las plantaciones forestales el 0,5% del territorio nacional (Cuadro 5).

El 17,2% de la cobertura forestal se encuentra en la región Oriental, y el 82,8% en la región Occidental. Del total de cobertura forestal, el 82,6% corresponde a bosques nativos, 16,2% a palmares, y 1,2% a plantaciones forestales (Cuadro 6, Figura 5).

La superficie de bosques nativos se encuentra en un 18,4% en la región Oriental, y el 81,6% en la región Occidental. Así también, la región Occidental alberga la mayor parte de la superficie de palmares, con el 94,7%. Al contrario, el 99,2% de las plantaciones forestales se encuentra en la región Oriental (Cuadro 6).

CATEGORÍAS	SUPERFICIE (HA)	% DE LA SUPERFICIE NACIONAL
Bosques nativos	14.651.386,6	36,6
Palmares	2.871.738,3	7,2
Plantaciones forestales	204.631,7	0,5
Total	**17.727.756,6**	**44,3**

Cuadro 5. Cobertura forestal 2022

CATEGORÍAS	REGIÓN ORIENTAL		REGIÓN OCCIDENTAL	
	SUPERFICIE (HA)	%	SUPERFICIE (HA)	%
Bosques nativos	2.693.190,1	18,4	11.958.196,5	81,6
Palmares	152.211,2	5,3	2.719.527,1	94,7
Plantaciones forestales	202.988,9	99,2	1.642,8	0,8
Total	**3.048.390,2**	**100**	**14.679.366,4**	**100**

Cuadro 6. Distribución de la cobertura forestal por regiones

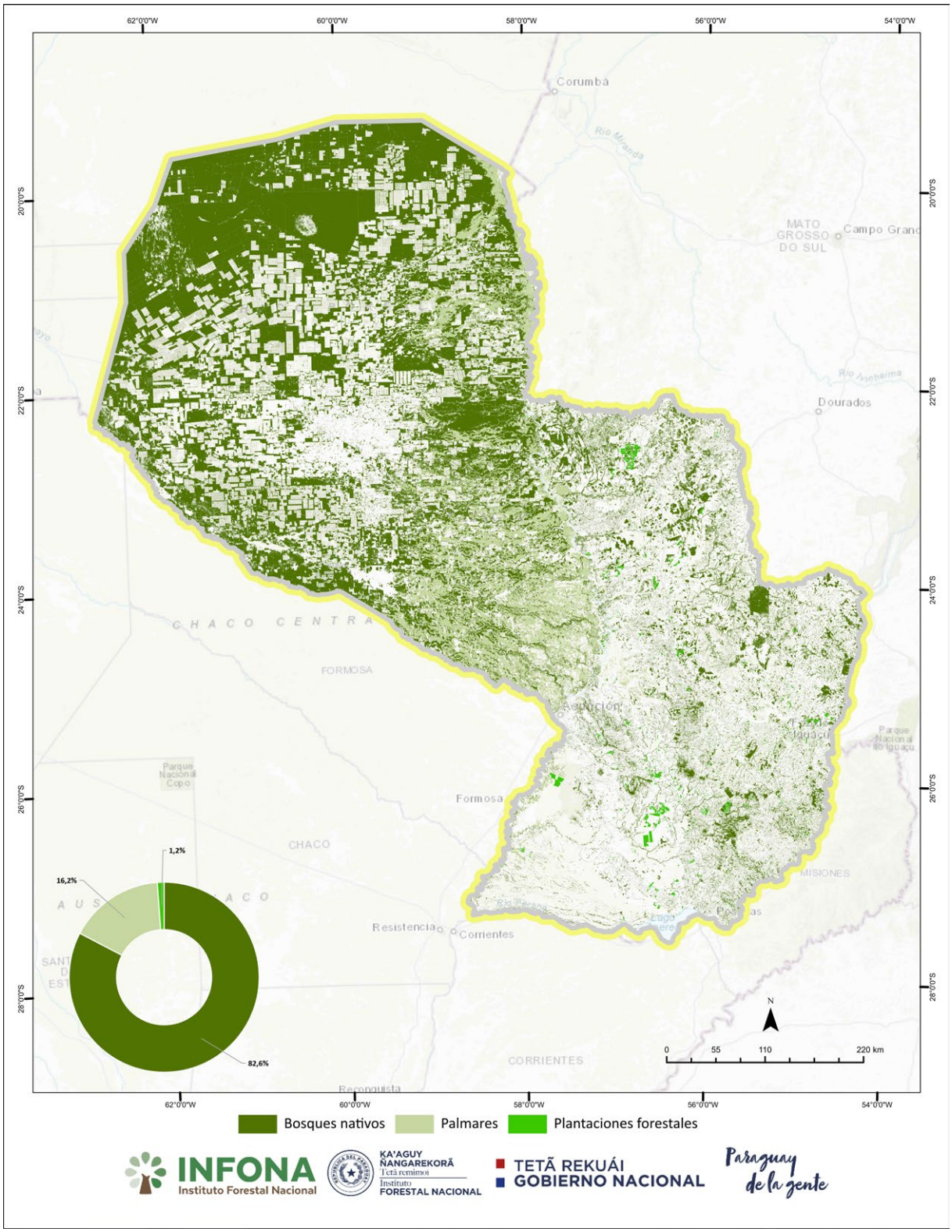


Figura 5. Mapa de distribución de la cobertura forestal 2022

Para este periodo de monitoreo, se incluyó en el análisis una subcategoría dentro del bosque nativo, y se trata del bosque nativo afectado por quemas, y corresponde, como indica su nombre, a bosque nativo que fue afectado por fuego, pero que posteriormente continuó siendo bosque. Para el 2020-2021, la superficie total de bosques nativos afectados por quema fue de 70.954,6 hectáreas, y el 92,4% corresponde a la región Oriental, quedando la región Occidental con el 7,6%. Sin embargo, para el periodo 2021-2022, el total fue de 44.822,5 hectáreas, y solo el 42,5% corresponde a la región Oriental, y el 57,5% a la región Occidental.

El monitoreo satelital realizado por el INFONA para este período, incluyó los cambios de uso en bosques nativos y palmares, así como también la cosecha de las plantaciones forestales. (Cuadro 7, Figura 6).

La superficie total de cambio de uso del bosque nativo totaliza 412.428,1 hectáreas, de las cuales el 45,4% se dio entre el 2020 y 2021, y el 54,6% entre 2021 y 2022. El total de cambios de uso de los palmares fue de 9.760,1 hectáreas para los dos años, y se dio en más del 80% en la región Occidental. Por otra parte, el total de cosecha de plantaciones forestales fue de 9.108,4 hectáreas, la totalidad en la región Oriental.

El resto de la superficie nacional corresponde a otras coberturas y usos de la tierra, totaliza alrededor de 22 millones de hectáreas en el año 2022, e incluye superficies de uso agropecuario, asentamientos humanos, infraestructura, cuerpos de agua, entre otros.

Según las matrices de confusión resultantes del proceso de Evaluación de Exactitud Temática de los mapas de cobertura forestal y cambios de uso de la tierra de los periodos 2020-2021 y 2021-2022, se obtuvo que la exactitud global de los mapas corresponde a 94% y 94,7%, respectivamente. Estos valores representan el porcentaje de exactitud; por ejemplo, si lo clasificado como bosque en el mapa efectivamente corresponde a lo que existe en el terreno.

Los Índices de Kappa, por su parte, indican una clasificación casi perfecta con valores obtenidos para los mapas de 0, 91 y 0,92. La combinación de una alta exactitud global y un índice de Kappa significativo sugiere que ambos mapas son confiables y pueden ser una herramienta útil para comprender la dinámica de la cobertura forestal y los cambios de uso de la tierra del país.

CATEGORÍAS	SUPERFICIE (HA)		TOTAL
	2020-2021	2021-2022	
Cambio de uso de bosque nativo	187.191,9	225.236,2	**412.428,1**
Cambio de uso de palmares	5.216,2	4.543,9	**9.760,1**
Cosecha de plantaciones forestales	6.010,1	3.098,3	**9.108,4**

Cuadro 7. Distribución del cambio de uso de la cobertura forestal y cosecha de las plantaciones forestales por periodos.

Fotografía: Proyecto Paraguay + Verde

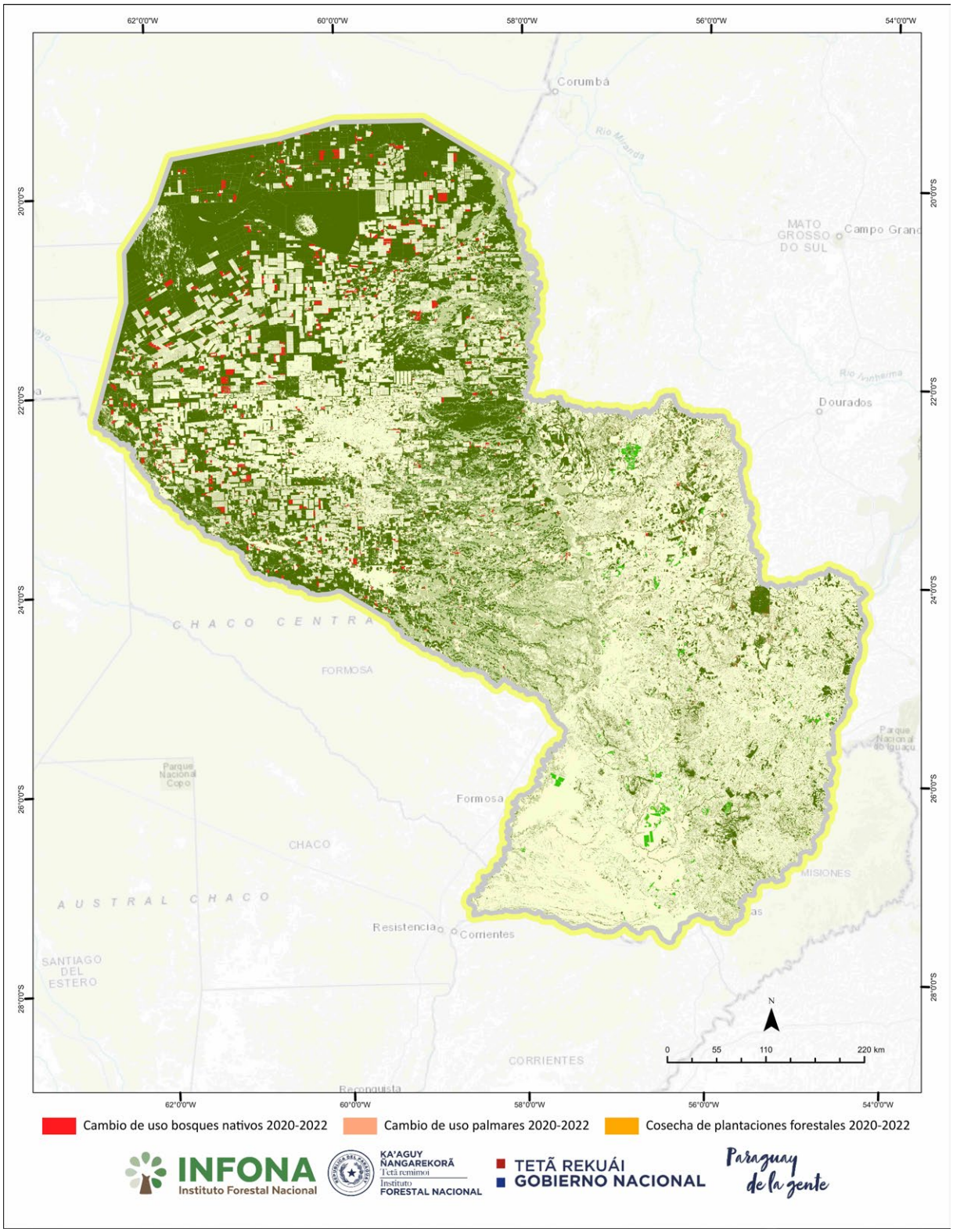


Figura 6. Mapa de cobertura forestal 2022 y cambios de uso

En el Anexo 1 se presenta un resumen de los principales resultados obtenidos del proceso de evaluación de exactitud temática.

Cobertura forestal y cambios de uso de la tierra por estratos forestales

Los estratos forestales fueron definidos para el Inventario Forestal Nacional, teniendo en cuenta variables biofísicas como el clima, temperatura y tipo de tierras, entre otros. Estos estratos son empleados para informar tanto en reportes nacionales como internacionales.

Según el análisis de la distribución de la cobertura forestal por estratos forestales al año 2022, el estrato denominado Bosque Seco Chaqueño (BSCh) representa el 56,3% de la cobertura forestal del país, y el 65% del total de bosques nativos (Cuadro 8, Figura 7). Y, por otra parte, este estrato alberga casi el 77% de los cambios de uso de bosque nativo a nivel nacional en el periodo de monitoreo, continuando la tendencia de periodos anteriores (Cuadro 9).

Los siguientes estratos, tanto con mayor cobertura forestal, como con la mayor superficie de cambios en bosques nativos para el periodo de monitoreo, son Bosque Subhúmedo Inundable del Río Paraguay (BSHIRP) y Bosque Húmedo de la Región Oriental (BHRO). El Bosque Subhúmedo del Cerrado (BSHC) representa menos del 1% de la cobertura forestal, y alberga menos del 1% de los cambios de uso del periodo (Cuadro 9).

ESTRATO FORESTAL	SUPERFICIE (HA)				%
	BOSQUE NATIVO	PALMAR	PLANTACIONES FORESTALES	TOTAL	
Bosque Húmedo de la Región Oriental (BHRO)	2.163.716,3	699,6	175.020,3	2.339.436,2	13,2
Bosque Subhúmedo del Cerrado (BSHC)	162.020,9	5,8	1.146,4	163.173,1	0,9
Bosque Subhúmedo Inundable del Río Paraguay (BSHIRP)	2.800.255,8	2.423.130,0	27.735,8	5.251.121,6	29,6
Bosque Seco Chaqueño (BSCh)	9.525.393,6	447.903,0	729,3	9.974.025,8	56,3
Total	**14.651.386,6**	**2.871.738,3**	**204.631,7**	**17.727.756,6**	**100**

Cuadro 8. Superficie de cobertura forestal 2022 según estratos forestales

ESTRATO FORESTAL	CAMBIO DE USO DE LA TIERRA (HA)		TOTAL	%
	2020-2021	2021-2022		
Bosque Húmedo de la Región Oriental (BHRO)	19.385,3	25.765,9	45.151,2	11
Bosque Subhúmedo del Cerrado (BSHC)	900,1	1.287,5	2.187,6	0,5
Bosque Subhúmedo Inundable del Río Paraguay (BSHIRP)	20.333,4	28.897,1	49.230,4	11,9
Bosque Seco Chaqueño (BSCh)	146.572,8	169.285,7	315.858,5	76,6
Total	**187.191,9**	**225.236,2**	**412.428,2**	**100**

Cuadro 9. Superficie de cambios de uso del bosque nativo según estratos forestales

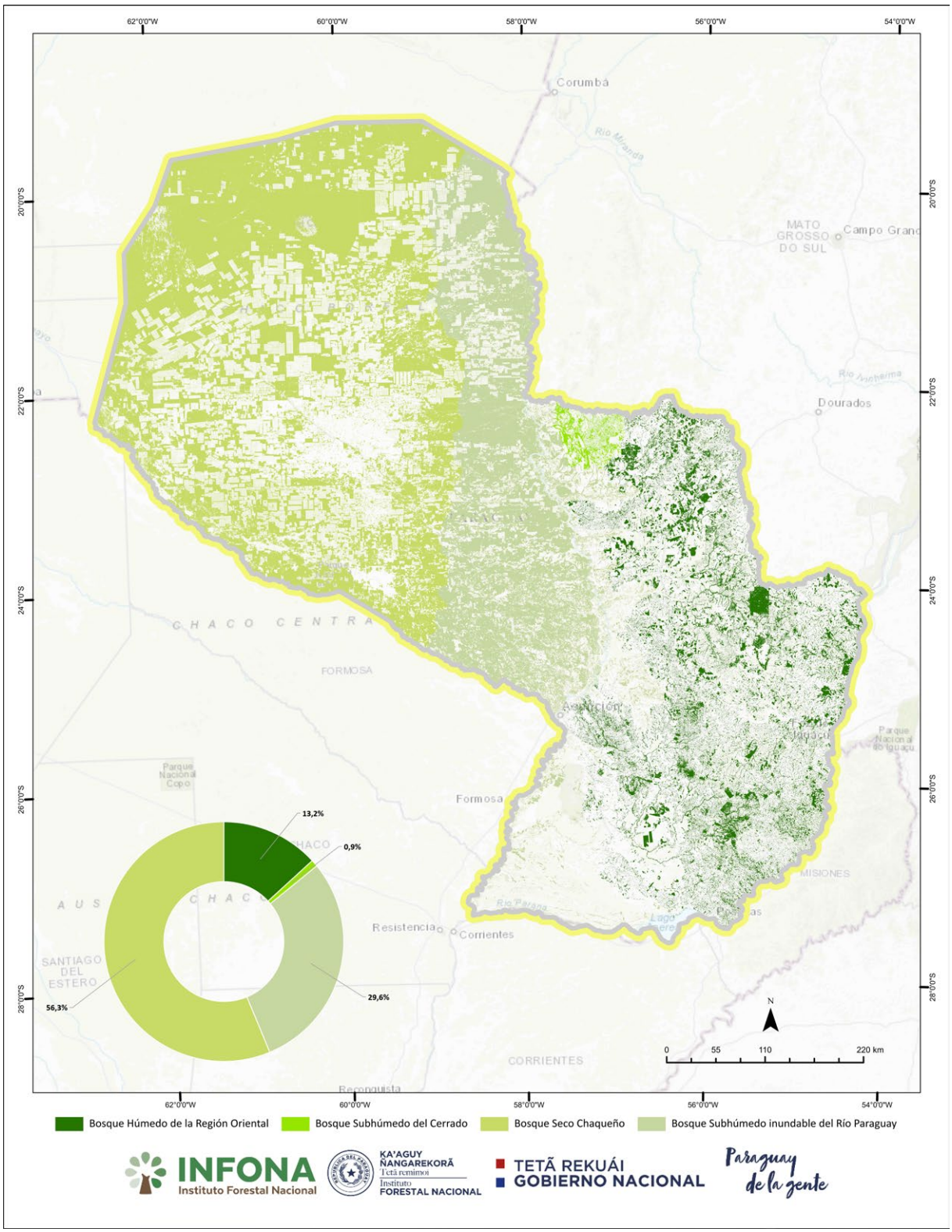


Figura 7. Mapa de cobertura forestal 2022 por estratos forestales

Cobertura forestal y cambios de uso de la tierra en la Región Oriental

La región Oriental alberga 3.048.390,2 hectáreas de cobertura forestal al año 2022, lo que representa el 17,2% del total en el territorio nacional. El 88,3% de la cobertura forestal de la región corresponde a bosques nativos, el 5% a palmares y el 6,7% a plantaciones forestales (Cuadro 10, Figura 8).

CATEGORÍAS	SUPERFICIE (HA)	%
Bosques nativos	2.693.190,1	88,3
Palmares	152.211,2	5,0
Plantaciones forestales	202.988,9	6,7
Total	**3.048.390,2**	**100**

Cuadro 10. Cobertura forestal en la región Oriental

Fotografía: Tetsu Espósito

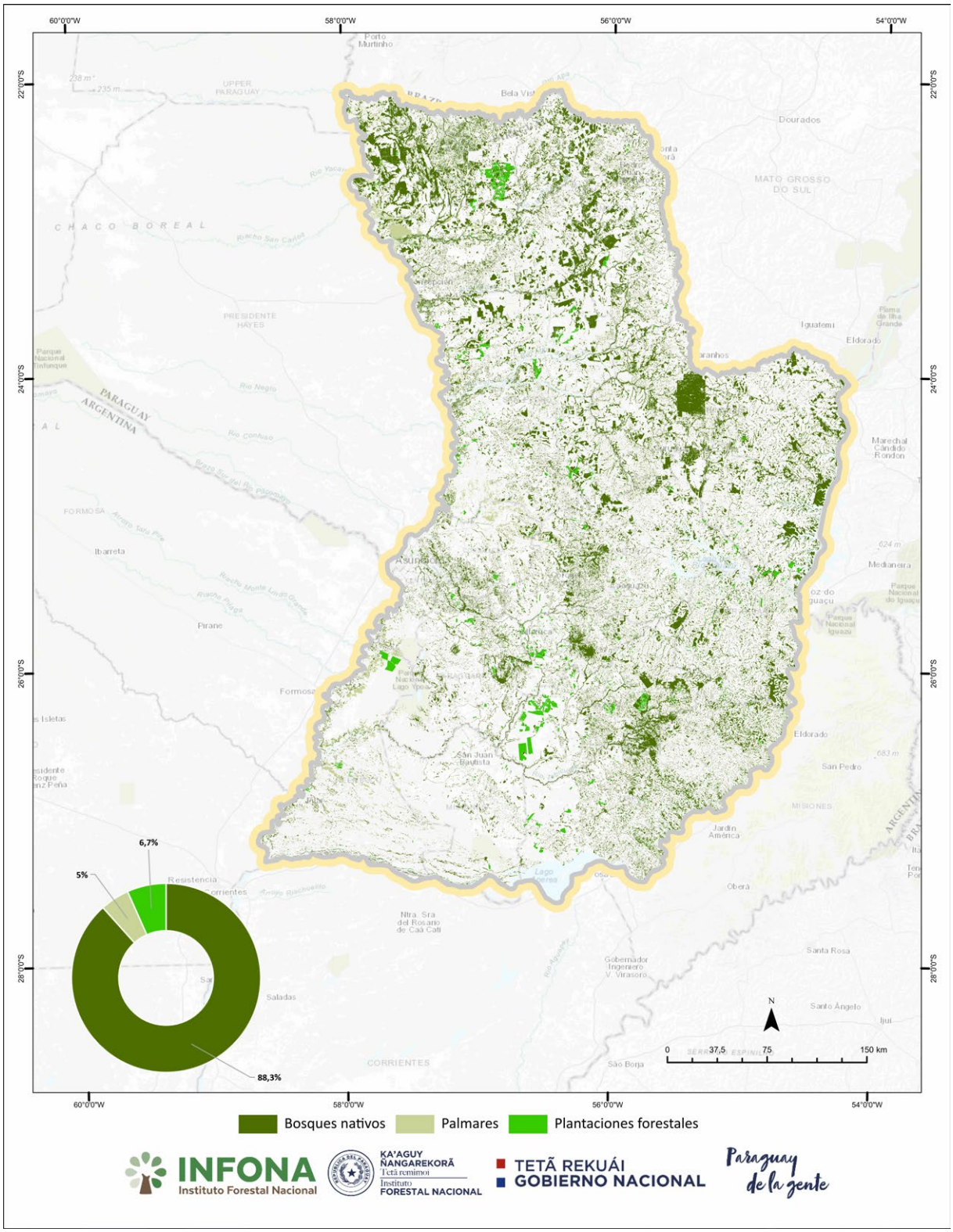


Figura 8. Distribución de la cobertura forestal en la región Oriental

Así mismo, durante los dos años de monitoreo, en la región Oriental se registró un total de 50.499,7 hectáreas de cambio de uso de bosques nativos, correspondiendo casi el 43% de las mismas al periodo 2020-2021, y el 57% al periodo 2021-2022 (Cuadro 11, Figura 9).

Los palmares registraron un total de 1.118,9 hectáreas de cambios para los dos años, con 24% en el primer periodo, y 76% para el segundo. Por otra parte, el total de cosecha de plantaciones forestales fue de 9.108,4 hectáreas, 66% en el periodo 2020-2021 y 34% en el periodo 2021-2022.

CATEGORÍAS	SUPERFICIE (HA)		
	2020-2021	2021-2022	TOTAL
Cambio de uso de bosque nativo	21.517,2	28.982,5	**50.499,7**
Cambio de uso de palmares	268,9	850,0	**1.118,9**
Cosecha de plantaciones forestales	6.010,1	3.098,3	**9.108,4**

Cuadro 11. Distribución del cambio de uso de la cobertura forestal y plantaciones forestales por periodos en la región Oriental.

Fotografía: INFONA

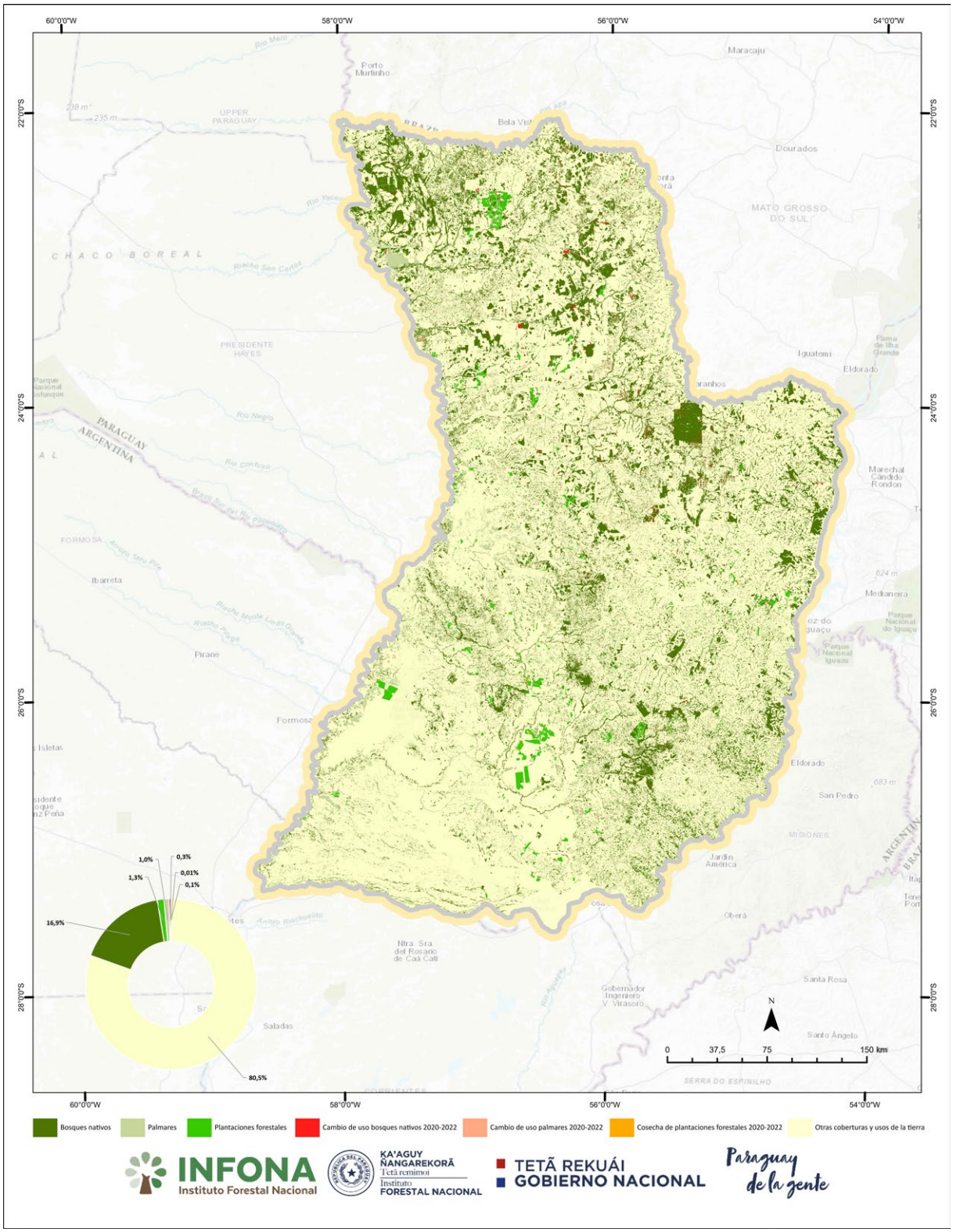


Figura 9. Mapa de cobertura forestal 2022 y cambios de uso de la tierra por periodos – Región Oriental

En el Cuadro 12 se puede observar la distribución de la cobertura forestal de la región Oriental por departamentos, siendo Concepción, San Pedro, Canindeyú, y Amambay los departamentos con la mayor superficie de cobertura forestal, alcanzando en conjunto más del 50% del total de la región Oriental (Figura 10).

DEPARTAMENTO	SUPERFICIE (HA)				%
	BOSQUE NATIVO	PALMAR	PLANTACIONES FORESTALES	TOTAL	
Concepción	495.545,6	56.281,7	25.977,7	577.805,0	19,0
San Pedro	329.754,7	25.914,9	32.767,6	388.437,3	12,7
Canindeyú	358.497,7	0,0	3.745,2	362.242,9	11,9
Amambay	280.770,4	0,0	3.645,3	284.415,7	9,3
Itapúa	255.177,0	0,0	19.182,9	274.359,9	9,0
Alto Paraná	249.914,2	0,0	20.340,0	270.254,2	8,9
Caaguazú	204.699,2	2.153,0	13.983,9	220.836,1	7,2
Caazapá	170.483,3	0,0	42.637,3	213.120,5	7,0
Paraguarí	101.462,2	2.200,0	8.226,4	111.888,7	3,7
Ñeembucú	62.354,4	34.942,1	12.776,3	110.072,8	3,6
Cordillera	59.419,9	20.980,5	3.834,9	84.235,3	2,8
Guairá	67.959,3	0,0	11.588,3	79.547,6	2,6
Misiones	36.955,8	3.173,2	2.935,9	43.064,8	1,4
Central	19.860,1	6.539,8	1.347,2	27.747,1	0,9
Asunción	336,3	25,9	0,0	362,2	0,0
Total	**2.693.190,1**	**152.211,2**	**202.988,9**	**3.048.390,1**	**100,0**

Cuadro 12. Distribución de la cobertura forestal 2022 por departamentos de la región Oriental

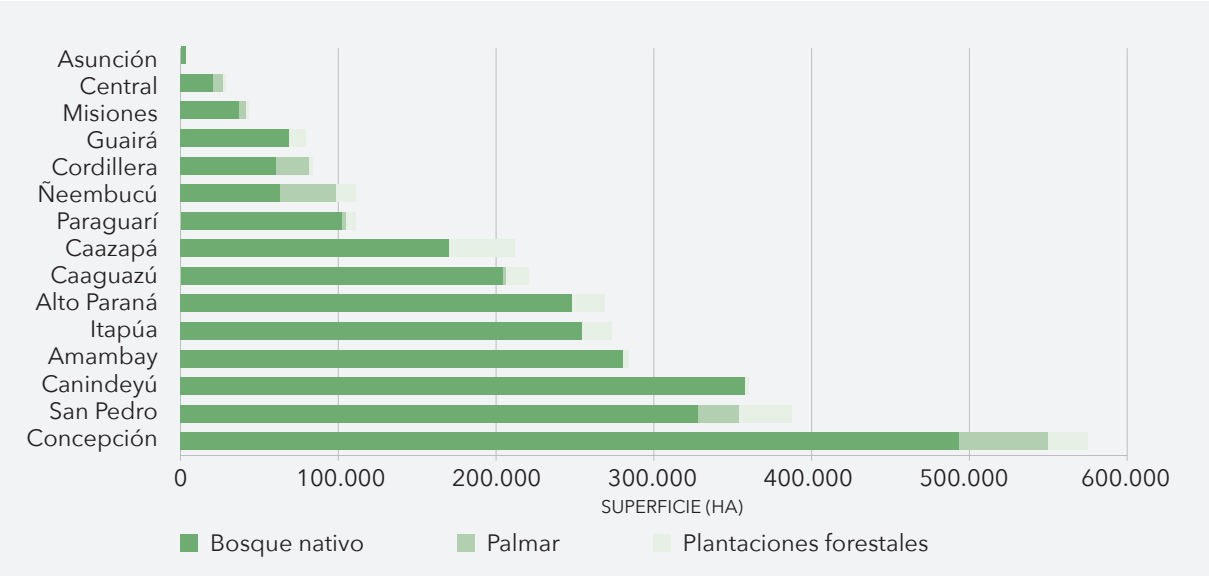


Figura 10. Distribución de la cobertura forestal 2022 por departamentos – Región Oriental

Los mismos departamentos que cuentan con la mayor cantidad de bosques nativos son los que registraron la mayor superficie de cambio de uso de los mismos. Los departamentos más afectados son Canindeyú, San Pedro, Concepción y Amambay, acumulando el 79% de la pérdida de bosques nativos para el periodo de monitoreo (Cuadro 13, Figura 11).

Estos fueron los mismos departamentos que registraron el mayor cambio de uso de bosques nativos en el periodo de monitoreo 2017-2020 (INFONA, 2022). Siendo en ese periodo, San Pedro el departamento con la mayor superficie de cambios. Para el periodo de monitoreo 2020-2022, el departamento con mayor pérdida de bosques nativos fue Canindeyú, registrando el 22,8% del cambio de uso, seguido por San Pedro (Cuadro 13, Figura 11).

Considerando el cambio de uso del bosque nativo en la Región Oriental, el Instituto Forestal Nacional realizó una clasificación más detallada de los tipos de cambios ocurridos según su extensión. Con esta tipificación, se busca asociar y caracterizar las pérdidas de bosque nativo en esta región.

En este sentido, se estimó que casi el 80% del cambio de uso de la tierra registrado entre los años 2020 y 2022, está asociada a cambios de uso de hasta 20 hectáreas (Cuadro 14, Cuadro 15, Figura 12).

DEPARTAMENTO	SUPERFICIE (HA)		
	CAMBIOS DE BOSQUE NATIVO	CAMBIOS DE PALMAR	COSECHA DE PLANTACIONES FORESTALES
Canindeyú	11.498,6	0,0	864,7
San Pedro	10.946,7	0,0	1.213,0
Concepción	8.860,7	268,9	122,1
Amambay	8.632,3	0,0	193,4
Caaguazú	5.337,9	0,0	1.292,9
Caazapá	1.904,9	0,0	1.359,4
Alto Paraná	1.112,0	0,0	2.047,3
Itapúa	876,5	0,0	914,6
Cordillera	466,0	0,0	24,6
Guairá	354,9	0,0	796,6
Paraguarí	238,2	0,0	263,8
Central	133,1	595,5	5,1
Ñeembucú	92,6	254,4	7,4
Misiones	45,3	0,0	3,6
Total	**50.499,7**	**1.118,9**	**9.108,5**

Cuadro 13. Distribución de los cambios de uso de la cobertura forestal y cosecha de plantaciones por departamentos de la región Oriental

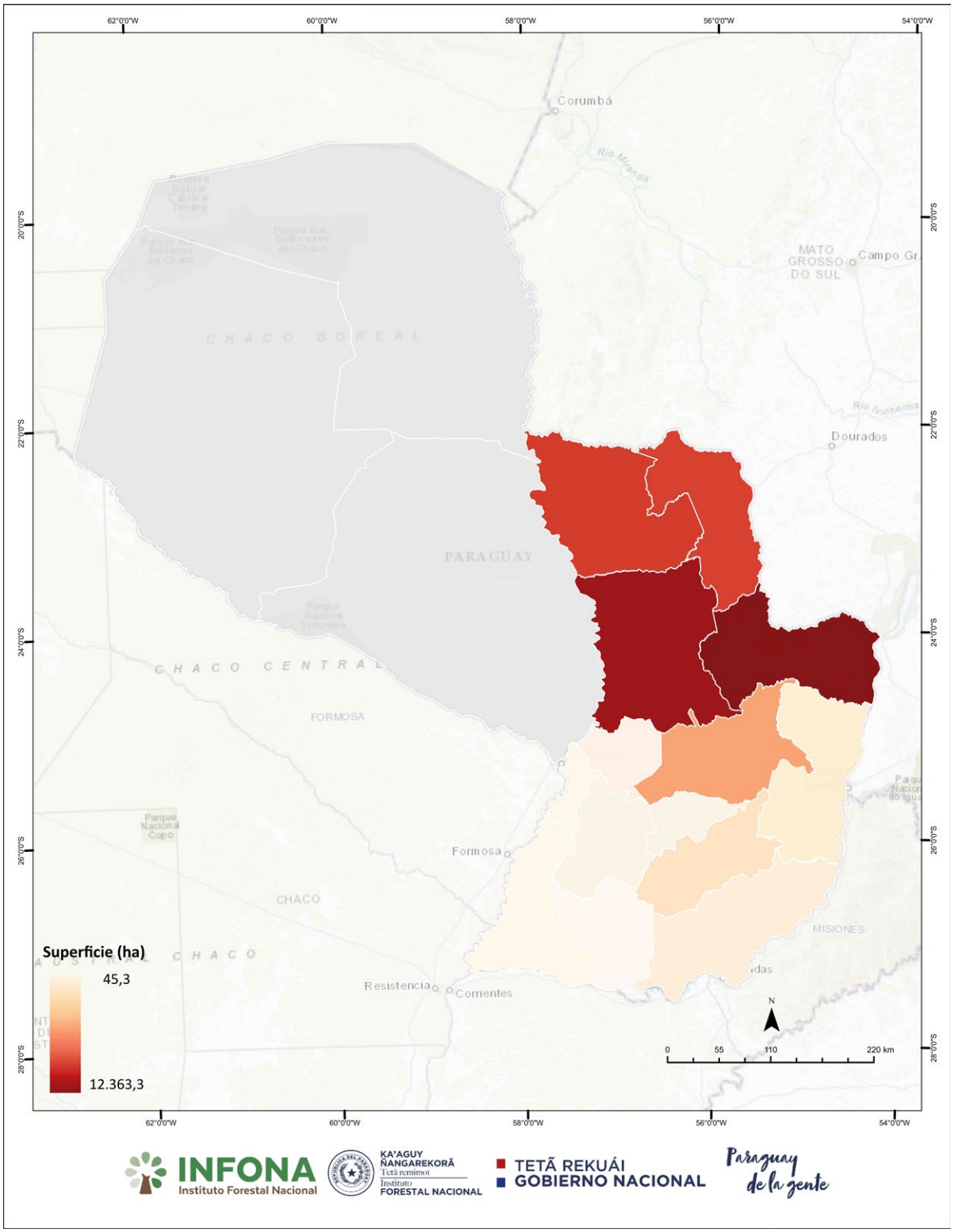


Figura 11. Concentración de cambios de uso por departamentos de la región Oriental

CLASIFICACIÓN DE CAMBIOS	CAMBIOS DE USO DE LA TIERRA (HA)		TOTAL	%
	2020-2021	2021-2022		
< 2 ha	4.224,4	6.542,6	10.766,99	21,3
> 2 a 5 ha	6.376,7	8.723,9	15.100,58	29,9
> 5 a 20 ha	6.446,5	7.578,4	14.024,92	27,8
> 20 a 50 ha	2.355,9	2.865,8	5.221,72	10,3
> 50 a 100 ha	762,0	1.110,5	1.872,50	3,7
> 100 a 250 ha	955,4	535,2	1.490,62	3,0
> 250 a 500 ha	396,1	251,5	647,59	1,3
> 500 ha	0,0	1.374,6	1.374,60	2,7
Total	**21.517,0**	**28.982,5**	**50.499,5**	**100**

Cuadro 14. Clasificación de cambios de uso de la tierra según tamaño en la Región Oriental

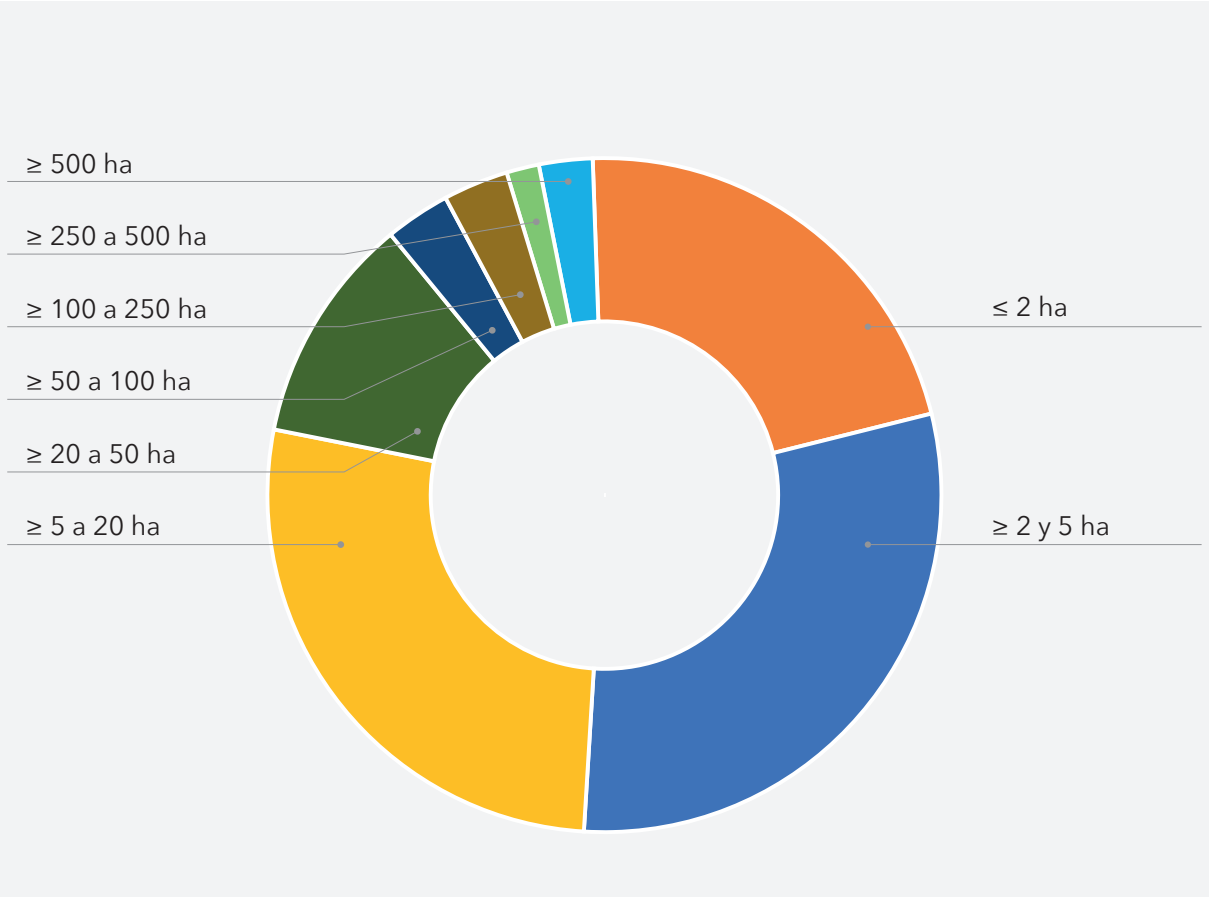


Figura 12. Clasificación de cambios de uso de la tierra según tamaño en la región Oriental

CATEGORÍAS	2020-2021			2021-2022		
	BN A AI	BN A UA	BN A CUI	BN A AI	BN A UA	BN A CUI
Cambios < 2 ha	317,5	2.988,8	918,09	623,2	4.702,8	1.216,6
Entre 2 y 5 ha	430,2	4.430,7	1.516,00	756,8	6.041,5	1.925,6
> 5 a 20 ha	506,0	4.079,2	1.861,38	368,5	5.370,1	1.839,8
> 20 y 50 ha	244,0	1.769,2	342,76	0,0	2.473,9	391,9
> 50 y 100 ha	129,4	632,6	0,00	0,0	1.110,5	0,0
> 100 y 250 ha	0,0	851,7	103,68	0,0	535,2	0,0
> 250 y 500 ha	0,0	396,1	0,00	0,0	251,5	0,0
> 500 ha	0,0	0,0	0,00	0,0	1.374,6	0,0
Total	**1.627,0**	**15.148,3**	**4.741,91**	**1.748,5**	**21.860,2**	**5.373,8**

BN: bosque nativo, **AI**: asentamientos humanos e infraestructura, **UA**: uso agropecuario, **CUI**: cultivos de uso ilícito.

Cuadro 15. Tipificación de cambios en la cobertura forestal en la Región Oriental

Considerando los cambios de uso de la tierra hasta 20 hectáreas, se tiene una superficie total de 39.892,5 hectáreas, de las cuales 73% corresponden a cambios de uso de la tierra de entre 2 y 20 hectáreas.

Las principales actividades que inciden en el cambio de uso de la tierra en la región Oriental son los cultivos de pequeña, mediana y gran escala, cultivos de uso ilícito, ganadería, ocupación ilegal o invasión de propiedades, asentamientos humanos y desarrollo de infraestructura.

Como se indica en el Reporte Nuestros Bosques (INFONA, 2022), varias de estas actividades podrían estar asociadas a sectores socioeconómicos en situación de vulnerabilidad.

Fotografía: Tetsu Espósito

Fotografía: Proyecto Paraguay + Verde

Cobertura forestal y cambios de uso de la tierra en la Región Occidental

La cobertura forestal al año 2022 en la región Occidental fue de 14.679.366,4 hectáreas, lo que representa el 82,8% de la cobertura forestal nacional, distribuidas en 81,5% de bosques nativos, 18,5% de palmares y menos del 1% de plantaciones forestales (Cuadro 16, Figura 13).

CATEGORÍAS	SUPERFICIE (HA)	%
Bosques nativos	11.958.196,5	81,5
Palmares	2.719.527,1	18,5
Plantaciones forestales	1.642,8	0,01
Total	**14.679.366,4**	**100**

Cuadro 16. Cobertura forestal en la región Occidental

Fotografía: Proyecto Paraguay + Verde

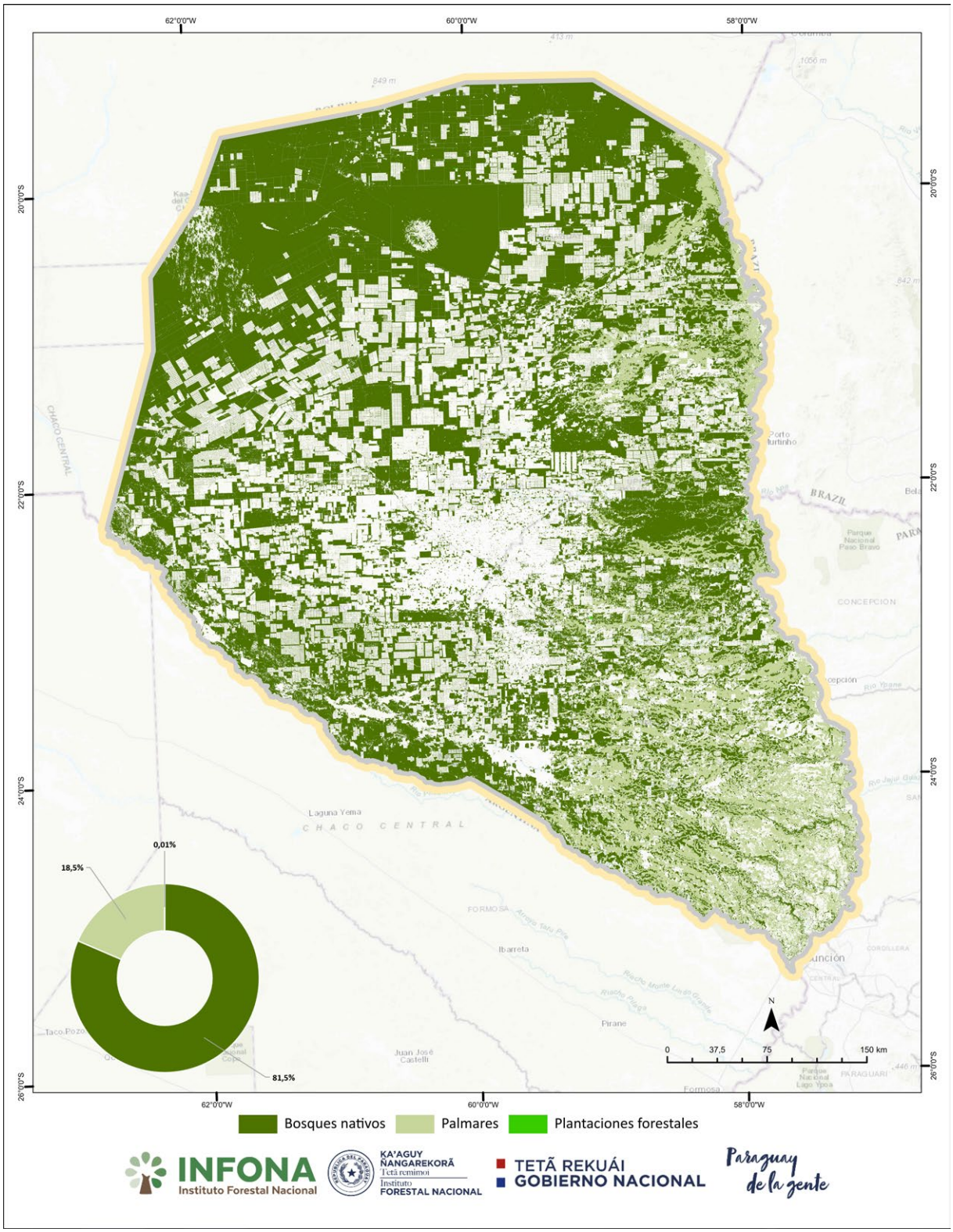


Figura 13. Distribución de la cobertura forestal en la región Occidental

Fotografía: Tetsu Esposito

Por otra parte, durante el periodo de monitoreo, se registraron 361.928,4 hectáreas de pérdida de bosque nativo, 45,8% correspondiente al periodo 2020-2021, y 54,2% correspondiente al periodo 2021-2022 (Cuadro 17, Figura 14).

Para la región Occidental, el total de cambios de uso de los palmares fue de 8.641,2 hectáreas para los dos años, con 57,3% en el primer periodo, y 42,7% para el segundo. Por otra parte, no se registró cosecha de plantaciones forestales en la región para el periodo de monitoreo.

CATEGORÍAS	SUPERFICIE (HA)		
	2020-2021	2021-2022	TOTAL
Cambio de uso de bosque nativo	165.674,7	196.253,7	**361.928,4**
Cambio de uso de palmares	4.947,3	3.693,9	**8.641,2**
Cosecha de plantaciones forestales	0,0	0,0	**0,0**

Cuadro 17. Distribución del cambio de uso de la cobertura forestal y plantaciones forestales por periodos en la región Occidental

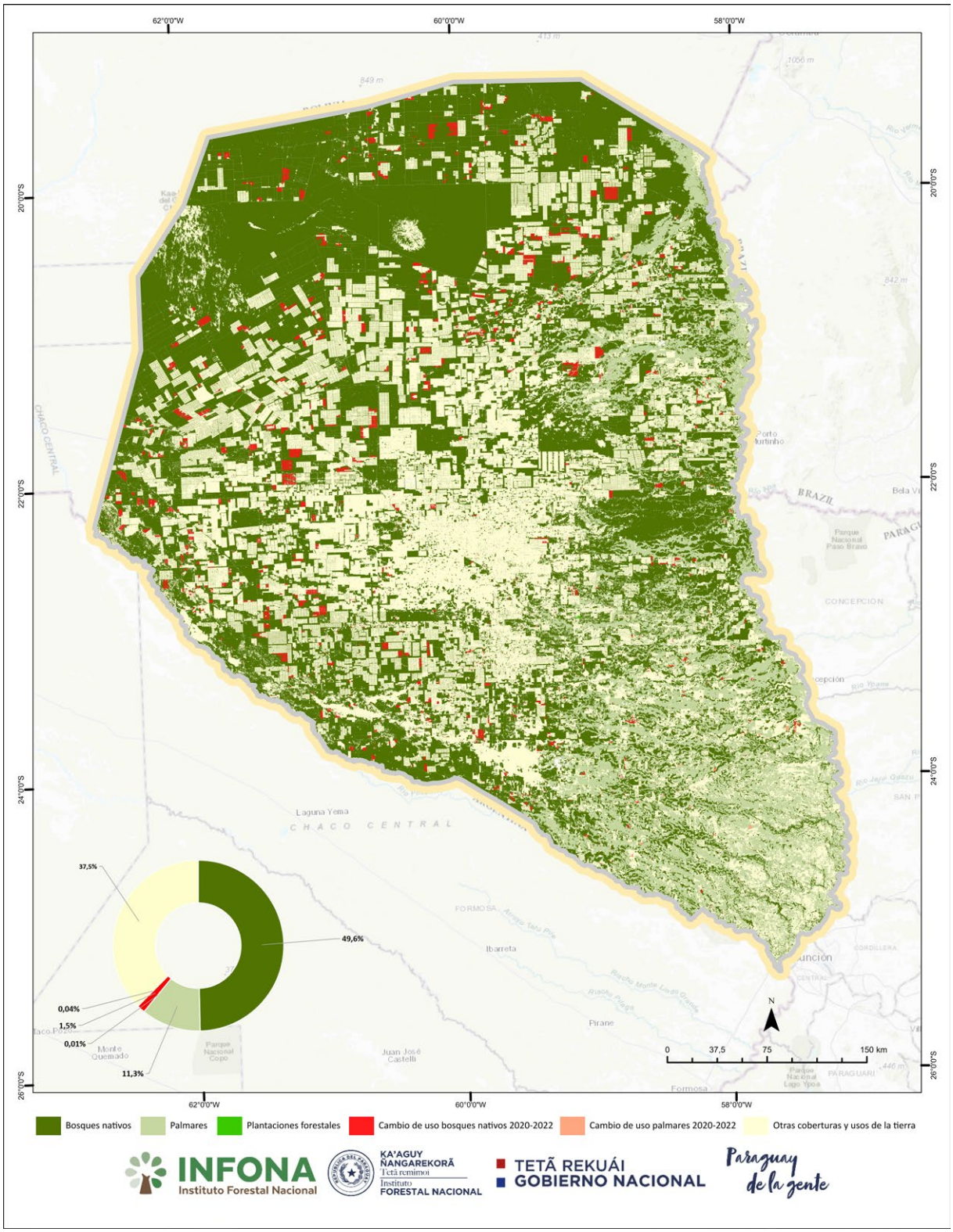


Figura 14. Mapa de cobertura forestal 2022 y cambios de uso de la tierra 2020-2022 – Región Occidental

En el Cuadro 18 se puede observar la distribución de la cobertura forestal de la región Occidental por departamentos, siendo Alto Paraguay el que registra la mayor superficie de cobertura forestal con el 37,3%, y la mayor superficie de bosque nativo, alcanzando el 40,5% del total. El departamento con la mayor superficie de palmares es Presidente Hayes, con el 76,7% de los mismos de la región Occidental.

En cuanto a los distritos de la región Occidental, los que cuentan con la mayor superficie de cobertura forestal son Bahía Negra y Mariscal José Félix Estigarribia, acumulando entre ambos más del 40% de la cobertura forestal de la región y más del 48% del bosque nativo. Los distritos con mayor superficie de palmares son Villa Hayes y Benjamín Aceval (Cuadro 19, Figura 15).

DEPARTAMENTO	SUPERFICIE (HA)				%
	BOSQUE NATIVO	PALMAR	PLANTACIONES FORESTALES	TOTAL	
Alto Paraguay	4.840.224,8	630.613,1	607,7	5.471.445,6	37,3
Boquerón	4.558.429,1	1.118,4	43,7	4.559.591,2	31,1
Presidente Hayes	2.559.542,6	2.087.795,6	991,4	4.648.329,6	31,7
Total	**11.958.196,5**	**2.719.527,1**	**1.642,8**	**14.679.366,4**	**100,0**

Cuadro 18. Distribución de la cobertura forestal 2022 por departamento – Región Occidental

DEPARTAMENTO	SUPERFICIE (HA)				%
	BOSQUE NATIVO	PALMAR	PLANTACIONES FORESTALES	TOTAL	
Bahía Negra	2.931.310,7	106.530,7	209,8	3.038.051,2	20,7
Mcal Estigarribia	2.844.569,4	0,0	0,0	2.844.569,4	19,4
Fuerte Olimpo	1.089.123,4	350.459,8	0,0	1.439.583,2	9,8
Villa Hayes	425.113,8	710.910,4	189,6	1.136.213,8	7,7
Boquerón	1.109.503,9	1.118,4	5,9	1.110.628,2	7,6
Puerto Pinasco	755.732,1	349.276,0	401,8	1.105.409,9	7,5
Benjamín Aceval	236.907,9	520.935,0	232,2	758.075,1	5,2
Puerto Casado	599.224,5	92.530,5	397,9	692.152,9	4,7
Filadelfia	582.206,5	0,0	16,3	582.222,8	4,0
Gral. Bruguez	216.172,4	296.390,1	47,1	512.609,6	3,5
Tte. Esteban Martínez	423.539,9	88.012,7	45,7	511.598,3	3,5
Carmelo Peralta	220.566,2	81.092,1	0,0	301.658,3	2,1
Campo Aceval	254.945,9	601,1	9,7	255.556,7	1,7
Tte. 1ro Irala Fernández	210.235,0	31.101,8	12,9	241.349,7	1,6
José Falcón	36.859,8	90.510,8	52,4	127.423,0	0,9
Loma Plata	22.149,3	0,0	21,6	22.170,9	0,2
Nanawa	35,8	57,7	0,0	93,5	0,0
Total	**11.958.196,5**	**2.719.527,0**	**1.642,8**	**14.679.366,3**	**100,0**

Cuadro 19. Distribución de la cobertura forestal 2022 por distrito – Región Occidental

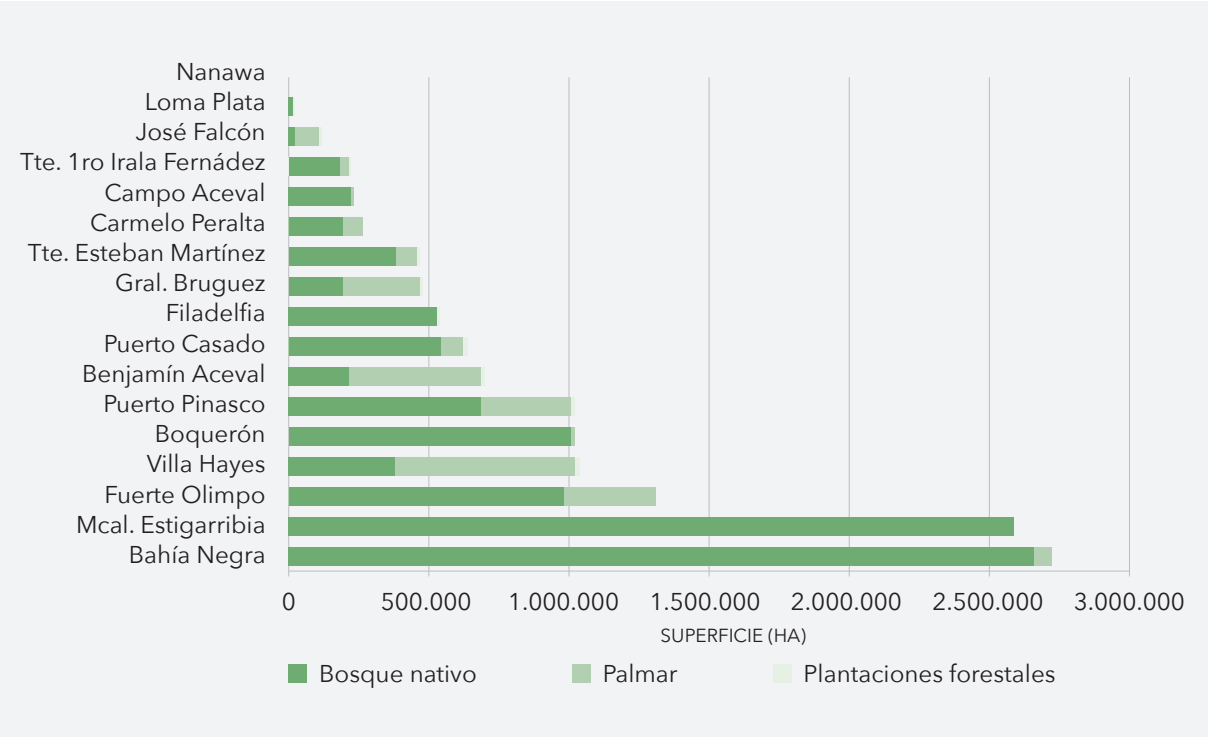


Figura 15. Distribución de la cobertura forestal 2022 por distritos – Región Occidental

En el periodo de monitoreo de dos años, de las 361.928,5 hectáreas de cambios de uso del bosque nativo en la región Occidental, el 51% se registró en el departamento de Boquerón, el 36,7% en Alto Paraguay, y el 12,3% en Presidente Hayes (Cuadro 20, Figura 16).

Por otra parte, los cambios de uso del palmar en el departamento se distribuyen en 23,6% en el departamento de Alto Paraguay, y el 76,4% en Presidente Hayes.

DEPARTAMENTO	SUPERFICIE (HA)		
	CAMBIOS DE BOSQUE NATIVO	CAMBIOS DE PALMAR	COSECHA DE PLANTACIONES FORESTALES
Boquerón	184.496,2	0,0	0,0
Alto Paraguay	132.903,3	2.038,4	0,0
Presidente Hayes	44.529,0	6.602,9	0,0
Total	**361.928,5**	**8.641,3**	**0,0**

Cuadro 20. Cambios de uso de la tierra y cosecha de plantaciones por departamento – Región Occidental

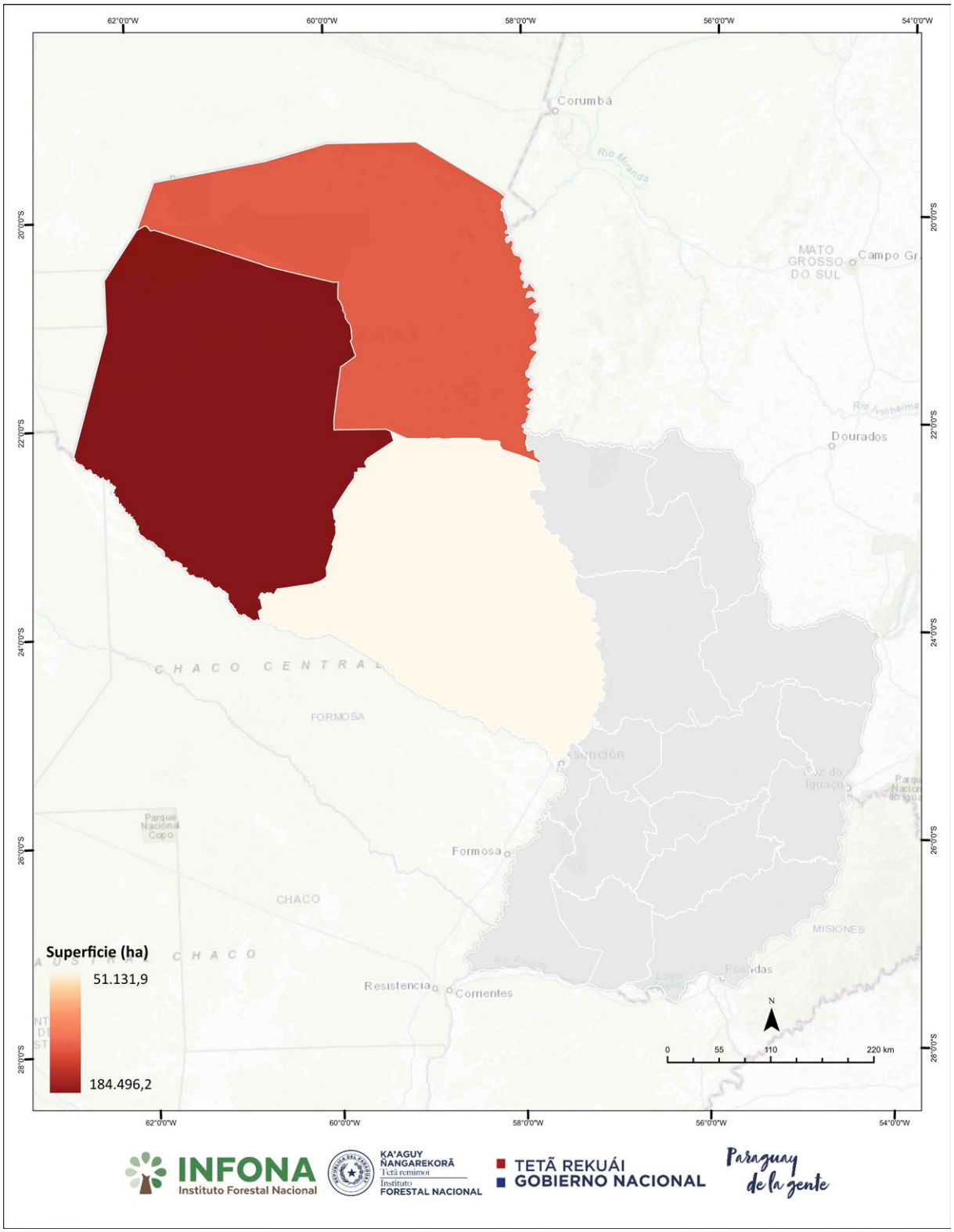


Figura 16. Concentración de cambios de uso por departamentos de la región Occidental

Mariscal José Félix Estigarribia es el distrito con la mayor superficie de cambio de uso del bosque nativo en ambos periodos de monitoreo, acumulando el 30,4% del total, seguido por Bahía Negra (Cuadro 21, Figura 17). Estos dos distritos son también los dos con mayor superficie de cobertura forestal en la región Occidental.

DISTRITO	SUPERFICIE (HA)		
	CAMBIOS DE BOSQUE NATIVO	CAMBIOS DE PALMAR	COSECHA DE PLANTACIONES FORESTALES
Mcal. Estigarribia	109.901,3	0,0	0,0
Bahía Negra	67.402,9	0,0	0,0
Fuerte Olimpo	55.103,3	1.329,7	0,0
Boquerón	51.030,2	0,0	0,0
Filadelfia	23.035,2	0,0	0,0
Tte. Esteban Martínez	12.517,8	176,1	0,0
Campo Aceval	9.763,5	0,0	0,0
Puerto Pinasco	6.708,1	1.233,3	0,0
Villa Hayes	6.431,2	2.905,7	0,0
Carmelo Peralta	5.360,4	543,3	0,0
Puerto Casado	5.036,7	165,4	0,0
Tte. 1ro Irala Fernández	3.784,4	0,0	0,0
General Bruguez	3.156,2	957,6	0,0
Benjamín Aceval	1.573,1	1.312,5	0,0
José Falcón	594,6	17,7	0,0
Loma Plata	529,60	0,0	0,0
Total	**361.928,5**	**8641,2**	**0,0**

Cuadro 21. Distribución de cambios de uso de la tierra y cosecha de plantaciones por distritos – Región Occidental

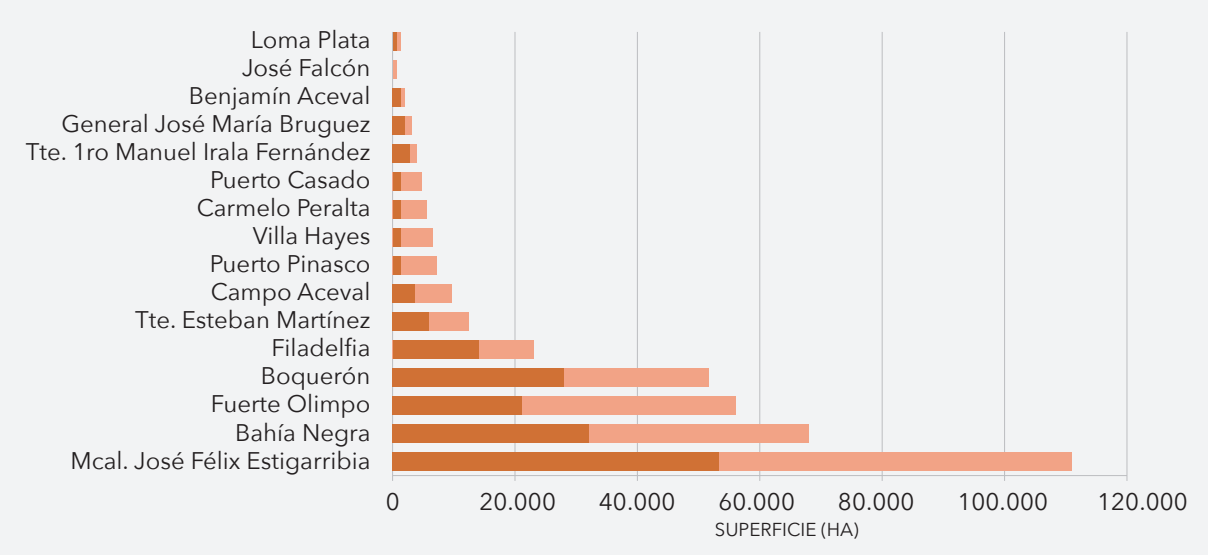
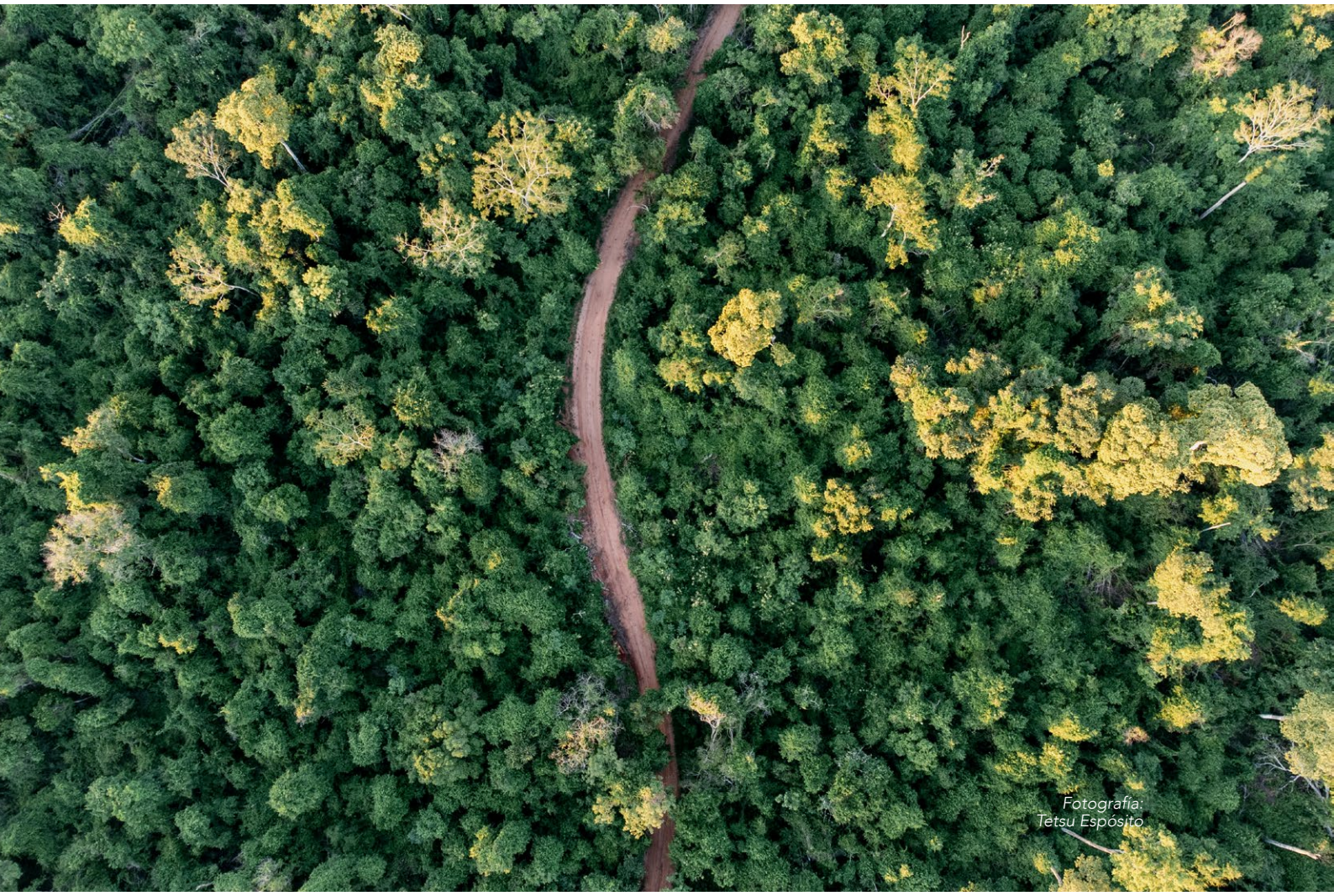


Figura 17. Distribución del cambio de uso del bosque nativo por periodos y por distritos – Región Occidental


Fotografía: Tetsu Espósito

Como se mencionó en un apartado anterior, el marco normativo nacional permite el cambio de uso de bosques nativos en la región Occidental a través de Planes de Uso de la Tierra (PUTs) otorgados por el INFONA. Se analizaron los cambios de uso de la tierra de la región Occidental con la base de datos del Catastro Forestal del INFONA.

Según este análisis, se pudo determinar que para el periodo 2020-2021, el 79,3% del cambio de uso de los bosques nativos se realizó dentro de Planes de Uso de la Tierra aprobados por el INFONA. Mientras que en el periodo 2021-2022, el 76,7% de los cambios en la región, se llevó a cabo dentro de PUTs (Cuadro 22, Figura 18).

En esta región las actividades relacionadas al cambio de uso de la tierra se deben principalmente a la producción ganadera. Si bien las actividades agrícolas se han ido incrementando en los últimos años, esta expansión se da en mayor parte de pasturas hacia cultivos agrícolas, y no implican mayormente cambios de uso de bosques nativos.

CAMBIOS REGIÓN OCCIDENTAL	PERIODO 2020-2021	PERIODO 2021-2022
Cambios de uso de bosques nativos (ha)	165.674,8	196.254,0
Cambios de uso de bosques nativos dentro de PUTs (ha)	131.351,3	150.463,9
% de cambios dentro de PUTs	**79,3**	**76,7**

Cuadro 22. Cambios de uso de la tierra dentro de Planes de Uso de la Tierra (PUT) en la Región Occidental

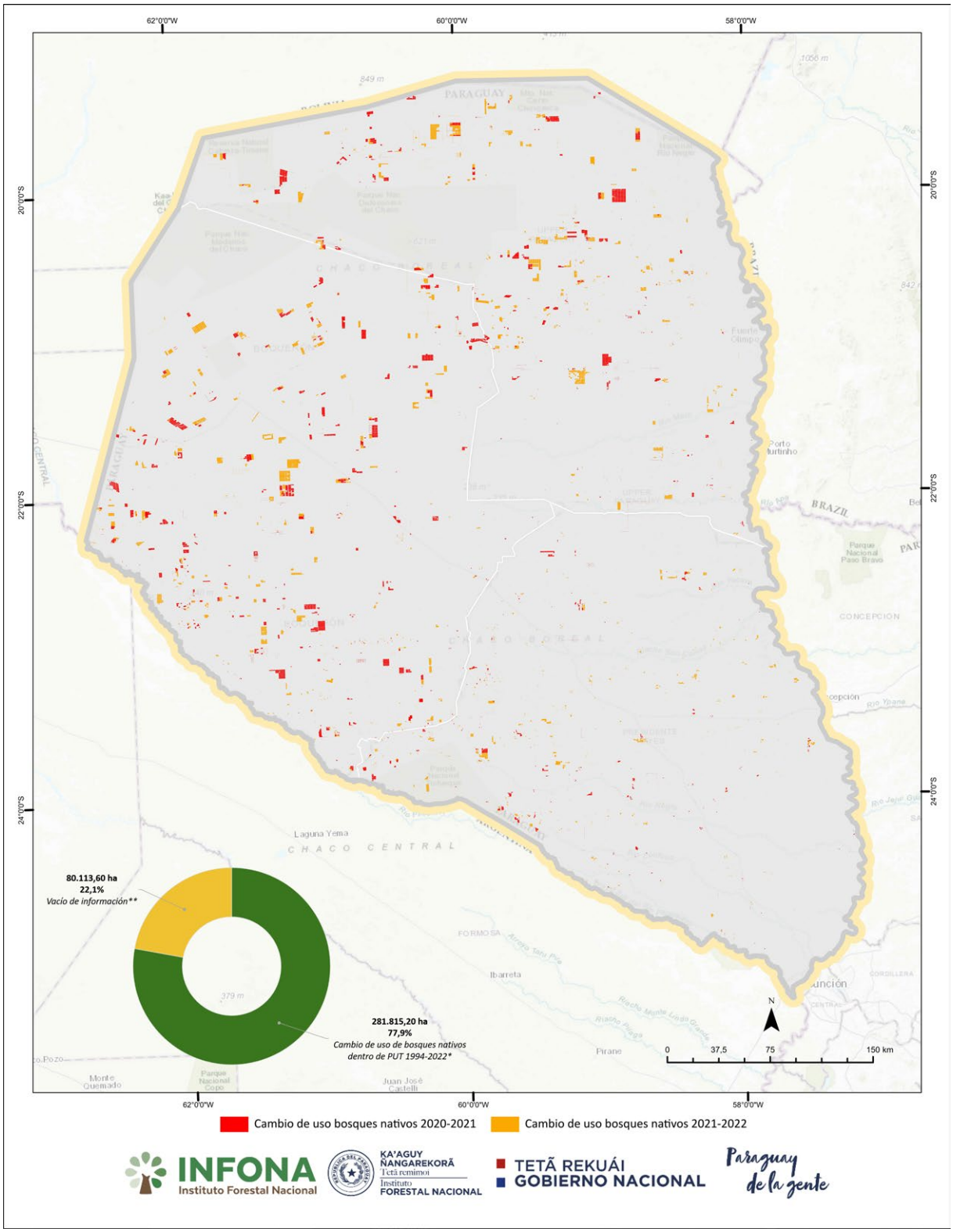


Figura 18. Cambios de uso de la tierra dentro de Planes de Uso de la Tierra (1994-2022)

(*) Según la base de datos del Catastro Forestal
(**) Vacíos de información: son aquellas áreas donde se observa cambios de cobertura forestal, pero no se cuenta con límites de la propiedad catastrados

Cultivos de Uso Ilícito (CUI)

El cambio de uso por cultivos de uso ilícito (CUI) representa el 2,5% del total de cambios en el bosque nativo, con más de 10.000 hectáreas para los dos años de monitoreo, distribuidas en 9 departamentos de la región Oriental del país (Cuadro 23). Esta superficie representa el 20% del total de cambios en bosques nativos en la región Oriental.

Los departamentos más afectados son Canindeyú y Amambay, sumando casi el 80% del total (Figura 19). Estos dos departamentos registraron también los mayores cambios por cultivos de uso ilícito para el periodo de monitoreo 2017-2020 (INFONA, 2022).

DEPARTAMENTO	CAMBIOS DE USO DE LA TIERRA POR CULTIVOS DE USO ILÍCITO (HA)			
	2020-2021	2021-2022	TOTAL	%
Canindeyú	1.868,1	2.626,1	4.494,2	44,4
Amambay	2.020,1	1.453,9	3.474,1	34,3
Concepción	547,3	456,1	1.003,4	9,9
Caaguazú	138,2	484,0	622,2	6,2
Caazapá	40,6	177,6	218,1	2,2
San Pedro	87,3	93,2	180,5	1,8
Itapúa	31,9	62,4	94,3	0,9
Alto Paraná	8,4	14,2	22,6	0,2
Guairá	0,0	6,4	6,4	0,1
Total	**4.741,9**	**5.373,8**	**10.115,8**	**100**

Cuadro 23. Distribución de los cambios de uso de la tierra por cultivos de uso ilícito (CUI) según departamentos y periodos de monitoreo.

Fotografía: PNUD

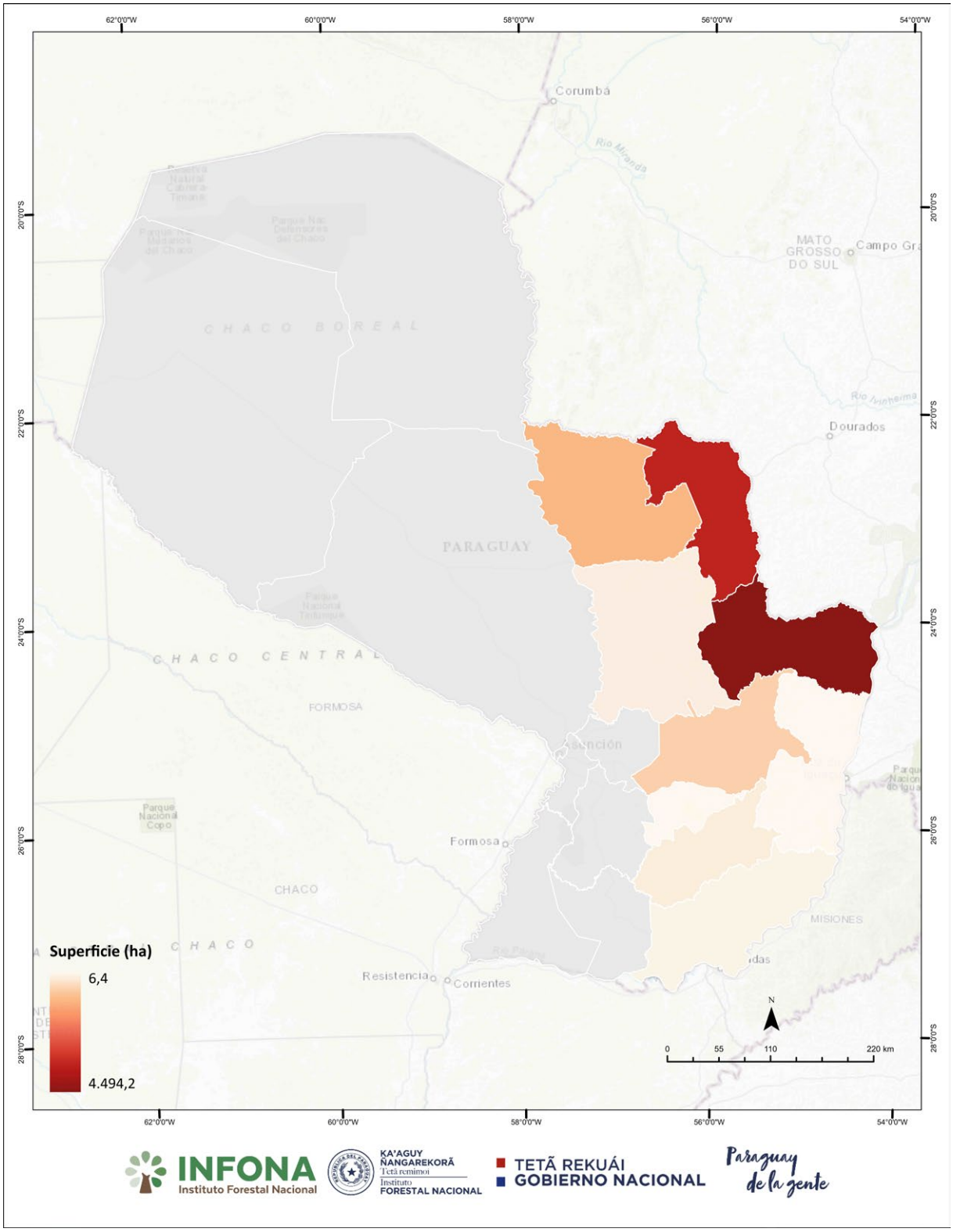


Figura 19. Mapa de concentración de cambios de uso del bosque nativo por cultivos de uso ilícito por departamentos de la región Oriental

Fotografía: Tetsu Espósito

El 25,7% del total de pérdida de bosque nativo por cultivos de uso ilícito se registró dentro de 9 áreas silvestres protegidas (ASP), totalizando 2.604,7 hectáreas, distribuidas el 33,5% en el periodo 2020-2021 y el 66,5% en el periodo 2021-2022 (Cuadro 24).

ÁREA SILVESTRE PROTEGIDA	CAMBIOS DE USO DE LA TIERRA POR CULTIVOS DE USO ILÍCITO (HA)		
	2020-2021	2021-2022	TOTAL
Reserva Natural del Bosque Mbaracayu	417,6	943,7	1.361,3
Reserva Natural Morombi	126,6	439,1	565,7
Reserva para Parque Nacional Paso Bravo	176,0	72,7	248,8
Reserva para Parque Nacional San Rafael	31,9	157,5	189,4
Parque Nacional Caazapá	34,3	65,1	99,5
Reserva Natural Estrella	62,3	0,6	62,9
Reserva Natural Arroyo Blanco	23,9	32,9	56,8
Reserva para Parque Nacional Bella Vista	0,0	10,7	10,7
Parque Nacional Cerro Corá	0,0	9,6	9,6
Total	**872,7**	**1.731,9**	**2.604,7**

Cuadro 24. Distribución de cambios de uso de la tierra por cultivos de uso ilícito en ASP

RESUMEN HISTÓRICO DE LOS CAMBIOS DE USO DEL BOSQUE NATIVO PERIODO 2005-2022

Este apartado presenta una actualización de la dinámica de los cambios de uso del bosque nativo ocurridos en el país a partir de la vigencia de la Ley de Deforestación Cero. Este análisis fue construido a partir de distintos mapas oficiales generados en el marco del Sistema Nacional de Monitoreo Forestal, complementados con los datos del Reporte Nuestros Bosques (INFONA, 2022), y el presente reporte.

A partir de la entrada en vigor de la Ley de Deforestación Cero, se registró en todo el país, entre el 2005 y el 2022, una pérdida de cobertura forestal de 5.373.558,7 hectáreas, de las cuales 88,2% se registraron en la región Occidental y 11,8% en la región Oriental. El mayor porcentaje de cambio de uso de la tierra ocurrió en el periodo 2005-2011 (Cuadro 25).

La tasa de deforestación entre el 2005 y el 2022 es de 316.091,7 hectáreas, y la tasa anual de deforestación se mantiene con tendencia a la baja, aunque no de manera constante, como se menciona en el Reporte Nuestros Bosques (INFONA, 2022). Cabe destacar la tasa de deforestación para el año 2020-2021, la cual es una de las más bajas junto con la del periodo 2018-2019 (Cuadro 25, Figura 20).

PERIODO DE CAMBIO DE USO DE LA TIERRA	SUPERFICIE (HA)	%
2005-2011	2.261.975	42,1
2011-2013	682.188,5	12,7
2013-2015	710.900,1	13,2
2015-2017	548.883,4	10,2
2017-2018	354.221,2	6,6
2018-2019	184.209	3,4
2019-2020	218.537,1	4,1
2020-2021	187.191,9	3,5
2021-2022	225.236,2	4,2
Total	**5.373.342,4**	**100**

Cuadro 25. Cambios de uso del bosque nativo en Paraguay registrados según periodos de monitoreo

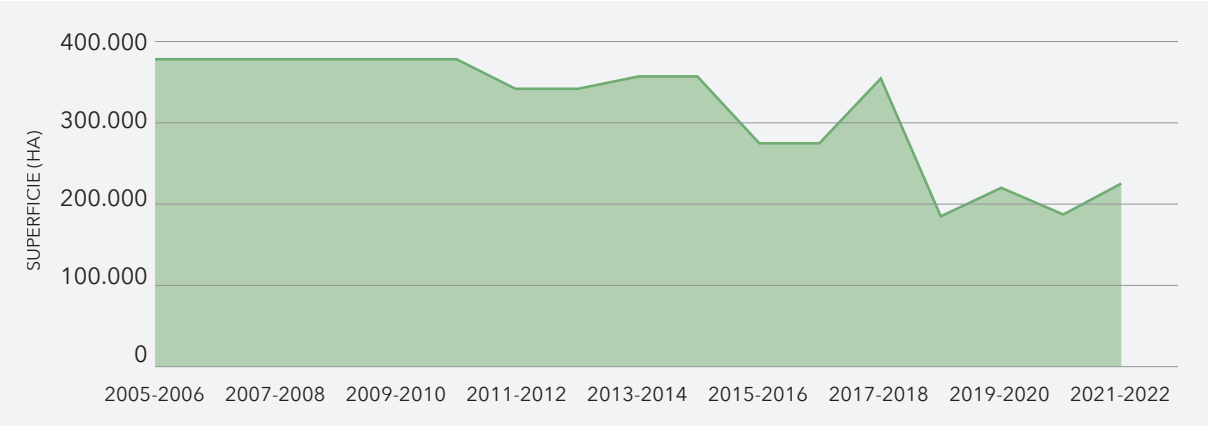


Figura 20. Cambios de uso de bosques nativos registrados entre 2005 y 2022

Región Oriental

Entre el 2005 y 2022 se ha registrado una pérdida de bosques nativos de 632.599 hectáreas en la región Oriental, entre los años 2005 y 2011 se registró el 41,4% de la deforestación ocurrida en 17 años (Cuadro 26). En el mencionado periodo de monitoreo, la tasa anual de cambio de uso en la región Oriental es de aproximadamente 37 mil hectáreas, sin embargo, esto se debe a las altas tasas registradas principalmente entre 2005 y 2011, ya que, en los últimos años, la misma se reduce considerablemente alrededor de las 28 mil hectáreas.

Región Occidental

En la región Occidental, entre 2005 y 2022, se han registrado 4.740.959,7 hectáreas de cambios de uso del bosque nativo, principalmente para actividades ganaderas, y más del 42% de estos cambios se registró entre 2005 y 2011 (Cuadro 27).

La tasa anual de deforestación en la región Occidental en 17 años de monitoreo es de 278.880 hectáreas. Sin embargo, como se destacó en el Reporte Nuestros Bosques (INFONA, 2022), se denota una considerable disminución de esta tasa en los últimos periodos de monitoreo, con un promedio de 181.000 hectáreas para el periodo de monitoreo de este reporte.

PERIODO DE CAMBIO DE USO DE LA TIERRA	SUPERFICIE (HA)	%
2005-2011	261.638,6	41,4
2011-2013	98.760	15,6
2013-2015	73.844,7	11,7
2015-2017	57.965,2	9,2
2017-2018	25.558,5	4,0
2018-2019	24.372,2	3,9
2019-2020	39.960,1	6,3
2020-2021	21.517,2	3,4
2021-2022	28.982,5	4,6
Total	**632.599,0**	**100,0**

Cuadro 26. Cambios de uso de bosques nativos en la Región Oriental registrados según periodos de monitoreo

PERIODO DE CAMBIO DE USO DE LA TIERRA	SUPERFICIE (HA)	%
2005-2011	2.000.336,4	42,2
2011-2013	583.428,5	12,3
2013-2015	637.055,4	13,4
2015-2017	490.918,2	10,4
2017-2018	328.662,7	6,9
2018-2019	159.836,8	3,4
2019-2020	178.577,0	3,8
2020-2021	165.674,7	3,5
2021-2022	196.470,0	4,1
Total	**4.740.959,7**	**100,0**

Cuadro 27. Cambios de uso de la tierra en la Región Occidental registrados según periodos de monitoreo

ACCIONES ANTE LA DEFORESTACIÓN

En el periodo 2020-2022, el INFONA ha sumado nuevas medidas y acciones ante la deforestación ilegal, mejorando las capacidades para el monitoreo, tanto en gabinete como en terreno, e impulsando el fortalecimiento del marco normativo.

Alertas Tempranas de Deforestación

Las alertas tempranas de deforestación son el resultado del procesamiento digital de imágenes satelitales a través de algoritmos complejos que detectan las perturbaciones en la cobertura forestal, proporcionando alertas cercanas al tiempo real, para tomar acciones tempranas ante actividades ilegales. Estas alertas son denominadas GLAD porque son generadas en el Laboratorio Global Land Analysis and Discovery de la Universidad de Maryland. Las millones de alertas generadas son filtradas a fin de identificar los casos más preocupantes de cambios en áreas con cobertura forestal.

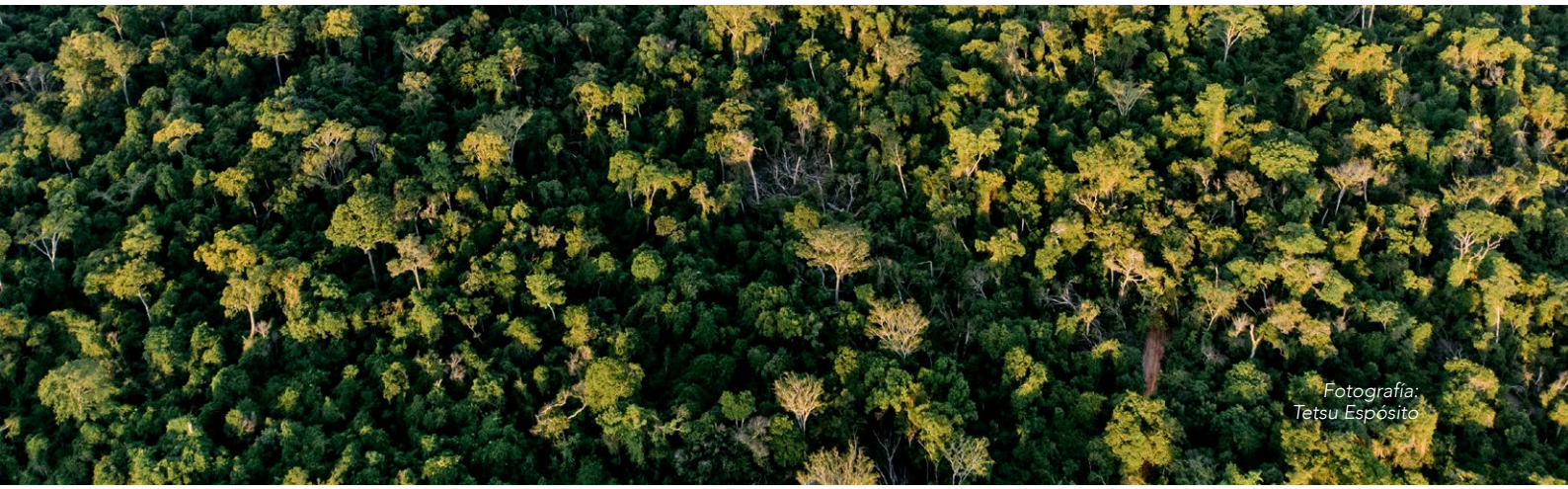
Estas alertas son un importante insumo para el SNMF, sin embargo, como se trata de una herramienta desarrollada a escala global, Paraguay adaptó la metodología para priorizar las alertas utilizando parámetros y datos nacionales de fuentes oficiales, y obtener una herramienta para el monitoreo y control de bosques nativos enfocada a su aplicación en terreno a través de las oficinas regionales del INFONA, aportando más transparencia a la fiscalización.

Los reportes de alertas tempranas son generados y remitidos semanalmente a las diferentes oficinas regionales del país, lo que ha incrementado las verificaciones e intervenciones en terreno.

Con estos reportes se puede dar seguimiento de forma regular a los cambios en el bosque nativo y evaluar la efectividad de las medidas de control. Este proceso de mejora representa un avance significativo en los esfuerzos por combatir la deforestación ilegal y proteger los recursos forestales. Permite tomar decisiones más informadas y estratégicas en cuanto a la asignación de recursos y la planificación de acciones de fiscalización.

Nuevo régimen de infracciones y sanciones forestales

Un logro importante en el ordenamiento jurídico del sector fue la promulgación del Decreto N° 7774/2022 "Por el cual se reglamentan artículos de la Ley 422/1973 "Forestal", establece el cuadro de sanciones y los métodos de valoración para las infracciones a la legislación Forestal" y la Resolución INFONA N° 777/2022 que establece un nuevo régimen de infracciones y sanciones forestales y el reglamento de trámites administrativos relativo a los sumarios por infracciones a la legislación forestal. Estos instrumentos sirven para establecer garantías en materia de procedimientos sumariales, dotando al INFONA de los instrumentos normativos para una mejor gestión técnica y procesal de los sumarios administrativos y evitar, sobre todo, ambivalencias e imprecisiones al momento de la aplicación de las disposiciones respectivas.



Fotografía: Tetsu Espósito

CONCLUSIÓN

El 44% de la superficie de Paraguay corresponde a cobertura forestal, conformada en su mayoría por bosques nativos, y en menor parte por palmares y plantaciones forestales. Casi el 83% de la cobertura forestal se encuentra en la región Occidental, y el 17% en la región Oriental.

El 88% de la pérdida de bosques nativos entre 2020 y 2022 se dio en la región Occidental o Chaco, y la mayor parte de este cambio se llevó a cabo dentro de Planes de Uso de la Tierra aprobados bajo criterios y normativas vigentes. En la región Oriental ocurrió el 12% de la pérdida de bosques nativos, y casi el 80% de este cambio se dio en unidades de terreno menores a 20 hectáreas.

La tendencia de cambio de uso de la tierra, en el periodo de monitoreo histórico de 2005 a 2022, muestra una clara disminución de la tasa de deforestación a nivel nacional.

El cambio de uso de la tierra en Paraguay es un problema complejo, con múltiples factores interrelacionados, y abordarlo requiere una combinación de medidas legales, políticas, económicas y sociales.

La generación de datos verificables e información confiable y precisa desempeña un papel fundamental en la formulación y ejecución de políticas públicas efectivas. Al contar con información fidedigna, los responsables de la toma de decisiones pueden entender de manera más clara los desafíos y oportunidades que enfrentan, identificando las áreas que requieren intervención y las estrategias más adecuadas para abordarlas.

La disponibilidad de datos confiables también fomenta la transparencia y la rendición de cuentas, lo que promueve una gestión responsable que permite evaluar y ajustar las políticas implementadas, asegurando que se logren los objetivos planteados y que se asignen adecuadamente los recursos públicos.

Fotografía: PNUD

ANEXO

ANEXO 1. Evaluación de Exactitud Temática del Mapa de Cobertura forestal y cambios de uso de la tierra periodo 2020-2021 y 2021-2022

Metodología aplicada

La Evaluación de Exactitud Temática (EET) es el proceso por el cual los mapas temáticos generados en el marco del SSMT/SNMF son sometidos a un control de calidad, con el fin de conocer la exactitud y confiabilidad de los mismos.

Los resultados de una EET evidencian la fidelidad de los valores asignados a los atributos de un mapa respecto a su verdadera característica en el terreno. Con esta evaluación se cierra el flujo de elaboración de mapas del SSMT, resaltando que este es un proceso independiente a la generación del mismo.

Los componentes clave de la evaluación de exactitud son los siguientes:

Diseño de muestreo: Este proceso se utiliza para seleccionar la muestra de referencia que será analizada. Su objetivo es decidir qué elementos de la población (el mapa) serán incluidos en la evaluación.

Diseño de respuesta: Se trata del protocolo mediante el cual se asigna la clasificación de cobertura de la tierra de referencia a cada unidad de muestreo. Es esencial para establecer la base de comparación con los datos obtenidos.

Análisis: Esta etapa permite organizar y resumir los datos recolectados, lo que a su vez posibilita hacer inferencias sobre la población completa (el área de estudio). Al realizar análisis estadísticos, es posible obtener información valiosa sobre la precisión y el área abarcada por las clasificaciones obtenidas.

Diseño de muestreo

El diseño de muestreo es el proceso utilizado para seleccionar una muestra representativa de una población objetivo. En otras palabras, es el enfoque mediante el cual se decide qué elementos del conjunto total se utilizarán en la muestra.

Se utilizó el muestreo aleatorio estratificado, que consiste en un muestreo aleatorio simple en subpoblaciones no superpuestas, llamadas estratos (Cuadro 28) y abarcan toda la población. Los estratos se construyen generalmente mediante mapas del área de estudio. Una ventaja clave de este enfoque es la posibilidad de intensificar el muestreo en áreas de interés, como la deforestación, mediante la creación de estratos específicos. Sin embargo, una desventaja es que podría aumentar la posibilidad de errores de omisión.

CLASES	CATEGORÍA	DESCRIPCIÓN
1	Bosque estable	Bosque nativo y bosque nativo degradado por quemas
2	Otras coberturas y usos de la tierra	Incluye coberturas y usos de la tierra no forestales, como cuerpos de agua, tierras agropecuarias, asentamientos humanos, caminos, pastizales
3	Cambios 20-21 y Cambios 20-22	Cambio de bosque nativo a otra tipo de uso de la tierra
4	Palmar	Tipo de vegetación comprendida principalmente por sabana palmar, distribuidos en toda la planicie inundable de la cuenca del Río Paraguay, con diferentes densidades y grado de perturbación. También se incluyen cambios en palmar para otros usos dentro de esta categoría
5	Plantaciones Forestales	Cobertura forestal que fue originalmente plantada o sembrada, principalmente de origen exótico. En estas categoría se incluye la cosecha de las plantaciones (cambio y suelo desnudo observado)

Cuadro 28. Estratos considerados en el muestreo

Cálculo de tamaño de muestras

El tamaño de muestra total se calculó suponiendo niveles de exactitud de cada clase. Este resultado indicó el tamaño de muestra necesario de acuerdo a la variabilidad requerida. Esto fue realizado siguiendo los criterios considerados en las EET de mapas elaborados previamente, empleando la siguiente ecuación:

$$n = \frac{(\sum_{i=1} W_i S_i)^2}{[S(O)]^2 + (1/N) \sum_{i=1} W_i S_i^2} \approx \left(\frac{\sum_{i=1} W_i S_i}{S(O)}\right)^2$$

n = tamaño de la muestra.
S(O) = Error estándar esperado de la exactitud general esperada.
Wi = Proporción de área cartografiada de la clase.
Si = Desviación estándar de la clase.

Considerando las buenas prácticas, se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos para este proceso:
Para que la muestra sea representativa, se debe medir el total de la población.

Como no se conoce la exactitud del usuario, se estima un valor para cada clase.

Se recomienda utilizar un mínimo de 100 muestras por clase.

Para el cálculo del tamaño de muestras de los mapas de cobertura forestal y cambios de uso de la tierra de los periodos 2020-2021 y 2021-2022, se utilizaron los parámetros detallados en los Cuadros 29 y 30, respectivamente.

CATEGORÍAS	ÁREA MAPA (HA)	PROPORCIÓN	PRECISIÓN	ERROR ESTÁNDAR	INTERVALO DE CONFIANZA (WSI)
Bosque estable	14.928.009,29	0,37	0,9	0,30	0,11
Otras coberturas y usos de la tierra	21.863.255,06	0,55	0,7	0,46	0,25
Cambios 2020-2021	187.193,15	0,005	0,8	0,40	0,002
Palmar	2.856.457,45	0,07	0,7	0,46	0,03
Plantaciones Forestales	171.632,34	0,004	0,7	0,46	0,002
Total	**40.006.547,29**	**1**			**0,40**

Cuadro 29. Parámetros empleados para el cálculo de muestras mapa 2020-2021

CATEGORÍAS	ÁREA MAPA (HA)	PROPORCIÓN	PRECISIÓN	ERROR ESTÁNDAR	INTERVALO DE CONFIANZA (WSI)
Bosque estable	14.653.424,58	0,37	0,9	0,30	0,11
Otras coberturas y usos de la tierra	22.043.554,58	0,55	0,7	0,46	0,25
Cambios 2021-2022	225.453,83	0,01	0,8	0,40	0,002
Palmar	2.876.367,26	0,07	0,7	0,46	0,03
Plantaciones Forestales	207.749,47	0,01	0,7	0,46	0,002
Total	**40.006.549,72**	**1**			**0,40**

Cuadro 30. Parámetros empleados para el cálculo de muestras mapa 2021-2022

Considerando un error estándar global esperado de 0.01 para la exactitud general, en los Cuadros 31 y 32 se detallan la cantidad de muestras requeridas para los periodos 2020-2021 y 2021-2022, respectivamente. Sin embargo, al asignar proporcionalmente muestras según el área ocupada por cada clase, se garantizó un mínimo de 100 muestras por clase para cumplir con las buenas prácticas.

CATEGORÍAS	NÚMERO DE MUESTRAS	NÚMERO DE MUESTRAS SEGÚN DISTRIBUCIÓN AJUSTADA
Bosque estable	594	600
Otras coberturas y usos de la tierra	870	870
Cambios 2020-2021	7	100
Palmar	114	120
Plantaciones Forestales	7	100
Total	**1591**	**1790**

Cuadro 31. Número de muestras para evaluación mapa 2020-2021

CATEGORÍAS	NÚMERO DE MUESTRAS	NÚMERO DE MUESTRAS SEGÚN DISTRIBUCIÓN AJUSTADA
Bosque estable	586	590
Otras coberturas y usos de la tierra	881	890
Cambios 2021-2022	9	100
Palmar	115	120
Plantaciones Forestales	8	100
Total	**1600**	**1800**

Cuadro 32. Número de muestras para evaluación mapa 2021-2022

Diseño de respuesta

En la etapa de diseño de respuesta se asigna una clasificación referencia a cada unidad de muestreo con el fin de establecer la concordancia entre la clase de referencia y la clase del mapa. Las fuentes de referencia son fundamentales en este proceso, ya que ayudan a determinar las condiciones de referencia y deben ser plenamente utilizados.

Se utilizaron diversos conjuntos de datos, incluyendo imágenes de alta resolución provenientes de fuentes como *Google Earth, Planet, Mapbox, entre otras*. También se emplearon series de tiempo de datos Landsat, así como información obtenida mediante a partir del conocimiento del terreno.

Las unidades de muestreo fueron etiquetadas con códigos identificadores y distribuidas entre el equipo de intérpretes de la FCA/UNA. Para garantizar la calidad del proceso de evaluación, se implementó un método de control mediante el cual cada muestra fue evaluada en tres ocasiones por diferentes intérpretes, el valor de la clase final del segmento resulta del cálculo de mayoría de las interpretaciones.

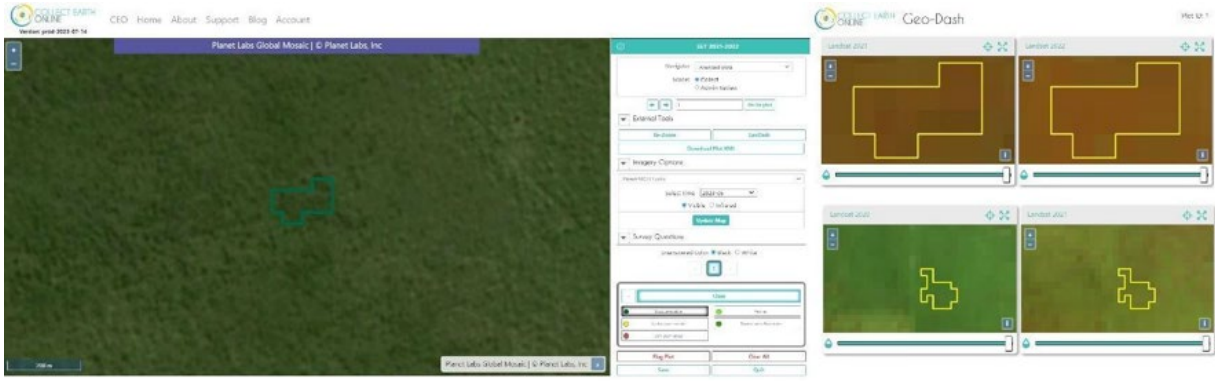


Figura 21. Geo Dash de imágenes de los años de análisis visualizadas simultáneamente

Se utilizó la plataforma *Collect Earth Online*[6] o CEO, que es una herramienta gratuita y de acceso abierto para visualización e interpretación de imágenes satelitales, útil para proyectos que requieren información sobre la cobertura y/o uso de la tierra. CEO permite interpretaciones visuales simultáneas de una variedad de fuentes y datos satelitales y la capacidad de conectarse con su propio Servicio de Web de Mapa (WMS, del inglés *Web Map Service*) o Servicio de Mosaico de Mapas Web (WMTS, del inglés *Web Map Tile Service*). La funcionalidad completa se implementa en línea, no se requiere ninguna instalación en el escritorio de la computadora.

Cada muestra analizada también puede ser automáticamente descargada en formato kml, para visualizaciones en Google Earth con imágenes de alta resolución.

Por otro lado, se creó un Geo Dash para visualizar simultáneamente las imágenes Landsat correspondientes a los años de estudio (Figura 21), en combinación de falso color, para la mejor interpretación visual de las clases a evaluar.

Análisis

El análisis especifica las medidas que se utilizaron para expresar la precisión y el área, y posee dos objetivos:

Evaluación de la precisión del mapa, y
Estimación de áreas insesgadas de categorías de interés.

Para analizar la correspondencia de los datos del mapa y los datos de referencia, se generaron distintas matrices de confusión. Estas matrices constituyen la base para la estimación de la exactitud de los mapas de cobertura forestal y cambios de uso de la tierra y las estimaciones insesgadas de las superficies de las categorías del mapa.

A partir de la matriz de confusión se generan tres tipos de exactitud:

> **Exactitud global:** Indica la precisión general del método de evaluación en todas las clases consideradas.
> **Exactitud del usuario:** Mide la precisión de una clase específica en relación con toda la clasificación. Es el complemento del error de comisión, que representa características mapeadas incorrectamente en comparación con los datos de referencia.
> **Exactitud del productor:** Representa la precisión de una clase específica en relación con la clasificación evaluada. Es el complemento del error de omisión, que representa características presentes en los datos de referencia, pero no incluidas en el mapa.

Según Rodríguez (2011[7]) estas medidas de exactitud solo se basan en resultados parciales de la matriz, por lo que no podrían aprovechar todos los datos en su totalidad; además toman resultados aleatorios, que pueden acarrear interpretaciones sesgadas del método. Para corregir los tipos de exactitud, se refuerza el cálculo con el índice Kappa.

El índice Kappa es un coeficiente que mide la concordancia entre dos metodologías y es utilizado para observar la similaridad entre dos clasificaciones de imágenes (Rodríguez, 2011).
El valor del coeficiente puede variar de 0 a 1, entre más cercano a 1 corresponde a una con concordancia muy alta. De acuerdo con el valor, este índice puede categorizarse en seis clases, como se observa en el Cuadro 33.

[6] https://collect.earth/

RANGO	CONCORDANCIA
0	Nula
0,01 – 0,02	Leve
0,21 – 0,40	Aceptable
0,41 – 0,60	Moderada
0,61 – 0,80	Considerable
0,81 – 1,00	Casi perfecta

Adaptado de Rodríguez (2011)

Cuadro 33. Valoración del Índice de Kappa

Resultados

Mapa de cobertura forestal y cambios de uso de la tierra para el año 2020-2021

Estimación por conteo

Empleando el método tradicional, donde cada muestra se considera una unidad, se construyó la matriz de confusión detallada en el Cuadro 34, en esta matriz se observan las concordancias y no concordancias resultantes entre las muestras según su clasificación en el mapa y su clasificación según la interpretación.

CATEGORÍAS		DATOS DE REFERENCIA					TOTAL
		1	2	3	4	5	MUESTRAS
Mapa	Bosque estable	580	10	2	8		600
	Otras coberturas y usos de la tierra	59	789	4	15	3	870
	Cambios 2020-2021	1	1	98			100
	Palmar	6	14	1	99		120
	Plantaciones Forestales	3	2		1	94	100
	Total muestras	**649**	**816**	**105**	**123**	**97**	**1790**

Cuadro 34. Matriz de confusión a partir del conteo de segmentos mapa 2020-2021

A continuación, en el Cuadro 35 se presentan los resultados de exactitud de usuario y productor para cada categoría del mapa según el conteo de segmentos.

CATEGORÍAS	EXACTITUD DEL USUARIO	EXACTITUD DEL PRODUCTOR
Bosque estable	96,7%	89,4%
Otras coberturas y usos de la tierra	90,7%	96,7%
Cambios 2020-2021	98%	93,3%
Palmar	82,5%	80,5%
Plantaciones Forestales	94%	96,9%

Cuadro 35. Resultados de exactitud del usuario y productor, según matriz de conteo de segmentos mapa 2020-2021

Según este tipo de estimación, para el mapa de cobertura forestal y cambios de uso de la tierra del periodo 2020-2021, se obtuvo una exactitud global de 92,7%. Así también, el índice de Kappa obtenido fue de 0,89.

Estimación por área
De modo a igualar el peso de cada segmento, se consideró el área expresada en hectáreas de las muestras evaluadas para construir la matriz de confusión. Se puede observar la matriz resultante en el Cuadro 36.

CATEGORÍAS		DATOS DE REFERENCIA					TOTAL
		1	2	3	4	5	MUESTRAS (HA)
Mapa	Bosque estable	1611,55	16,1	7,33	18,38		1653,36
	Otras coberturas y usos de la tierra	101,43	1499,86	7	30,09	6,16	1644,54
	Cambios 2020-2021	1,95	1,73	227,36			231,04
	Palmar	9,91	27,92	1,01	229,22		268,06
	Plantaciones Forestales	5,21	3,24		1,06	192,79	202,3
	Total muestras (ha)	**1730,05**	**1548,85**	**242,7**	**278,75**	**198,95**	**3999,3**

Cuadro 36. Matriz de confusión a partir del área de segmentos mapa 2020-2021

En el Cuadro 37, se observan los resultados de exactitud de usuario y productor en porcentajes (%) para cada categoría según la matriz de superficie de segmentos.

CATEGORÍAS	EXACTITUD DEL USUARIO	EXACTITUD DEL PRODUCTOR
Bosque estable	97,5%	93,2%
Otras coberturas y usos de la tierra	91,2%	96,8%
Cambios 2020-2021	98,4%	93,7%
Palmar	85,5%	82,2%
Plantaciones Forestales	95,3%	96,9%

Cuadro 37. Resultados de exactitud del usuario y productor, según matriz de área de segmentos mapa 2020-2021

Según este tipo de estimación, se obtuvo una exactitud global de 94%. Así también, el índice de Kappa obtenido fue de 0,91.

Mapa de cobertura forestal y cambios de uso de la tierra para el año 2021-2022

Estimación por conteo
Empleando el método de conteo de segmentos, se construyó matriz de confusión detallada en el Cuadro 38.

CATEGORÍAS		DATOS DE REFERENCIA					TOTAL
		1	2	3	4	5	MUESTRAS
Mapa	Bosque estable	577	6		6	1	590
	Otras coberturas y usos de la tierra	57	827	3	3		890
	Cambios 2021-2022	2	2	96			100
	Palmar	9	14		97		120
	Plantaciones Forestales	1	3			96	100
	Total muestras	**646**	**852**	**99**	**106**	**97**	**1800**

Cuadro 38. Matriz de confusión a partir del conteo de segmentos mapa 2021-2022

En el Cuadro 39 se presentan los resultados de exactitud de usuario y productor para cada categoría del mapa según el método de conteo de segmentos.

CATEGORÍAS	EXACTITUD DEL USUARIO	EXACTITUD DEL PRODUCTOR
Bosque estable	97,8%	89,3%
Otras coberturas y usos de la tierra	92,9%	97,1%
Cambios 2021-2022	96%	97%
Palmar	80,8%	91,5%
Plantaciones Forestales	96%	99%

Cuadro 39. Resultados de exactitud del usuario y productor, según matriz de conteo de segmentos

Según este tipo de estimación, para el mapa de cobertura forestal y cambios de uso de la tierra del periodo 2021-2022, se obtuvo una exactitud global de 94,1%. Así también, el índice de Kappa obtenido fue de 0,91.

Estimación por área

De modo a igualar el peso de cada segmento, se consideró el área expresada en hectáreas de las muestras evaluadas para construir la matriz de confusión. Se puede observar la matriz resultante en el Cuadro 40.

	CATEGORÍAS	DATOS DE REFERENCIA					TOTAL
		1	2	3	4	5	MUESTRAS (HA)
Mapa	Bosque estable	1662,65	9,50		14,76	1,76	1688,66
	Otras coberturas y usos de la tierra	118,41	1565,08	4,06	3,58		1691,13
	Cambios 2021-2022	4,99	3,98	201,33			210,31
	Palmar	10,99	34,77		198,62		244,37
	Plantaciones Forestales	2,27	4,91			169,45	176,63
	Total muestras (ha)	**1799,31**	**1618,24**	**205,39**	**216,95**	**171,21**	**4011,10**

Cuadro 40. Matriz de confusión a partir del área de segmentos mapa 2021-2022

En el Cuadro 41, se observan los resultados de exactitud de usuario y productor en porcentajes para cada categoría según la matriz de superficie de segmentos.

CATEGORÍAS	EXACTITUD DEL USUARIO	EXACTITUD DEL PRODUCTOR
Bosque estable	98,5%	92,4%
Otras coberturas y usos de la tierra	92,5%	96,7%
Cambios 2021-2022	95,7%	98,0%
Palmar	81,3%	91,5%
Plantaciones Forestales	95,9%	99,0%

Cuadro 41. Resultados de exactitud del usuario y productor, según matriz de área de segmentos mapa 2021-2022

Según este tipo de estimación, para el mapa de cobertura forestal y cambios de uso de la tierra del periodo 2021-2022, se obtuvo una exactitud global de 94,7%. Así también, el índice de Kappa obtenido fue de 0,92.

En el Cuadro 42 se presentan las áreas estimadas sin sesgo, calculadas a partir de la matriz de error proporcional que refleja las áreas ocupadas por las distintas categorías del mapa.

CATEGORÍA	ÁREA SIN SESGO (HA)	ÁREA MAPA (HA)
Bosque estable	16.108.491,5	14.653.424,6
Otras coberturas y usos de la tierra	20.902.245,5	22.043.554,6
Cambios 2021-2022	268.763,1	225.453,8
Palmar	2.512.505,0	2.876.367,3
Plantaciones Forestales	214.544,6	207.749,5

Cuadro 42. Estimación de áreas sin sesgo mapa 2021-2022

Conclusiones

Las estimaciones de exactitud a partir de la matriz de conteo de muestras como la de área, indican que los mapas de cobertura forestal y cambios de uso de la tierra de los periodos 2020-2021 y del 2021-2022 tienen una alta precisión y una capacidad considerable para reflejar la realidad del terreno.

La combinación de una alta exactitud global y un índice de Kappa significativo sugiere que ambos mapas son confiables y pueden ser una herramienta útil para comprender la dinámica de la cobertura forestal y los cambios de uso de la tierra del país.

Cabe resaltar que, al considerar el área de muestras evaluadas, las estimaciones de las métricas de precisión de los mapas aumentan. Esto se encuentra relacionado a que estadísticamente la representatividad aumenta al considerar la proporción del área que ocupan las muestras por lo tanto se reducen los sesgos.

Otro hallazgo de esta evaluación de exactitud es la identificación de áreas de cobertura forestal que fueron clasificadas como otras coberturas y usos de la tierra. Esto sugiere que el mapa podría estar subestimando la superficie real de bosque a nivel nacional, ya que las áreas estimadas o insesgadas indican una mayor extensión de bosque.

Esta discrepancia podría atribuirse a las limitaciones del sensor utilizado para generar los mapas, ya que se emplean imágenes satelitales Landsat que poseen una resolución espacial de 30 x 30 metros, que puede no ser suficiente para distinguir con precisión ciertos tipos de vegetación o remanentes de bosque en áreas más pequeñas o dispersas.

Fotografía:
Tetsu Espósito