

# Informe Final

## Elaboración de la Cartografía Forestal Nacional De Los Bosques Plantados 2024 República Oriental de Uruguay.

CENTRO TECNOLÓGICO FORESTAL  
MADERERO



CHOEL S.A. – RUT 211435690017

Lugar: Montevideo, Uruguay

Versión 1.1 13/12/2024

Cartografía Forestal Nacional 2024		V: 1.1 13/12/2024
Informe Técnico	Documento: Informe Final Cartografía Forestal del Uruguay 2024 v1.1.docx	Página 1 de 20

# Índice

<b>1. Implementación de la Metodología.....</b>	<b>3</b>
<b>2. Mosaico Imágenes Sentinel 2.....</b>	<b>5</b>
2.1. Resoluciones de las Imágenes Sentinel 2.....	6
2.2. Cobertura y Disponibilidad de Imágenes Sentinel 2.....	7
<b>3. Clasificación de Especies Forestales.....</b>	<b>10</b>
3.1. Determinación de Áreas Forestadas.....	10
3.2. Determinación de Áreas de Cambio y nuevas a partir de la Forestación 2021 .	14
3.3. Clasificación de Especies Forestales.....	17

Cartografía Forestal Nacional 2024		V: 1.1 13/12/2024
Informe Técnico	Documento: Informe Final Cartografía Forestal del Uruguay 2024 v1.1.docx	Página 2 de 20

# 1. Implementación de la Metodología

ICA presentó al CENTRO TECNOLÓGICO FORESTAL MADERERO (en adelante CTFM) una propuesta metodológica que comprende un flujo de trabajo que combina técnicas y algoritmos de clasificación de imágenes automáticos y manuales, tanto tradicionales como de última generación. Esto con la finalidad de garantizar exactitudes globales y particulares por encima del 90% para cada una de las clases, reduciendo al máximo los errores por comisión u omisión mediante un proceso depurativo e iterativo adaptado a las características específicas de las coberturas forestales del Uruguay. En este informe se describe la implementación de dicha metodología, así como los resultados finales obtenidos al consolidar los análisis efectuados para las 3 zonas previamente definidas.

El flujo de trabajo tendrá como resultado la clasificación de las imágenes Sentinel 2 para finales de 2023 y principios de 2024 en los estratos requeridos por el cliente:

- Especies:
  - Bosque plantado *Pinus elliotti* y *Pinus taeda*.
  - Bosque plantado *Pinus pinaster*
  - Bosque plantado *Eucalyptus dunnii*
  - Bosque plantado *Eucalyptus smithii*
  - Bosque plantado *Eucalyptus grandis* (se incluyen híbridos y clones) y *E. saligna*.
  - Bosque plantado *Eucalyptus globulus*, *E. maidenii* y *E. bicostata*.
  - Bosque plantado Otros *Eucalyptus*
  - Bosque plantado *Salix* y *Populus*
  - Bosque plantado mezcla de especies (Costero y Parques)
- Uso Forestal Plantaciones Jóvenes y Áreas cosechadas:
  - Bosque Cosechado (Área sin arboles pero que mantiene el uso forestal).
  - Nueva Plantación (Áreas nuevas en el uso forestal y con plantaciones jóvenes de menos de tres años).
  - Reforestación /Rebrote (Diferenciar áreas con rebrotes o

Cartografía Forestal Nacional 2024		V: 1.1 13/12/2024
Informe Técnico	Documento: Informe Final Cartografía Forestal del Uruguay 2024 v1.1.docx	Página 3 de 20

reforestaciones con menos de tres años cuando sea posible. Es de especial interés identificar cambios de especie, ejemplo: de Pino a Eucaliptus en las reforestaciones). Para los estratos de Uso Forestal, de ser necesario se deberá realizar la interpretación de imágenes SENTINEL 2 anteriores.

La entrega de los resultados de acuerdo con los TDR se llevó a cabo en tres zonas:

- Zona Norte: Artigas, Salto, Rivera, Tacuarembó y Cerro Largo.
- Zona Litoral y Centro: Paysandú, Río Negro, Soriano, Colonia, Flores, San José y Durazno.
- Zona Sur y Sureste: Florida, Canelones, Montevideo, Maldonado, Lavalleja, Rocha y Treinta y Tres.

El presente informe comprende la descripción de las imágenes satelitales Sentinel 2 utilizadas, así como los resultados consolidados para todo el país.

Cartografía Forestal Nacional 2024		V: 1.1 13/12/2024
Informe Técnico	Documento: Informe Final Cartografía Forestal del Uruguay 2024 v1.1.docx	Página 4 de 20

## 2. Mosaico Imágenes Sentinel 2

De acuerdo con los requerimientos del cliente, la clasificación se llevó a cabo utilizando imágenes multiespectrales Sentinel 2 (A ó B) construidos y mantenidos por la Agencia Espacial Europea (ESA), los cuales son de libre acceso a través del portal: <https://browser.dataspace.copernicus.eu/> del programa Copernicus de la Unión Europea.

Con respecto a los niveles de procesamiento de las imágenes ofrecidos por la ESA, las mismas fueron descargadas en nivel 2A (BOA o Base de la Atmosfera), el cuál es el mejor nivel de corrección atmosférica disponible para las imágenes Sentinel 2. Cuentan con las siguientes correcciones:

- **Geométricas:** Ortorectificadas mediante la utilización de un Modelo Digital de Elevación (DEM) y reproyectadas a UTM WGS-84. Se entregan en cuadrículas de 100 x 100 kms. El error en geolocalización de acuerdo con el reporte anual de calidad de la Agencia Espacial Europea (ESA) del año 2023 (<https://sentiwiki.copernicus.eu/attachments/1673423/OMPC.CS.APR.003%20-%20S2%20MSI%20Annual%20Performance%20Report%202023%20-%201.0.pdf?inst-v=96d17fe4-230f-47de-a686-20cdeca186cf>) es <15,5 metros con un nivel de confianza del 95,5% de confianza. Debido a esto, no se considera necesario efectuar correcciones geométricas adicionales a las imágenes.
- **Radiométricas:** las imágenes se proveen por la Agencia Espacial Europea (ESA) con corrección atmosférica de reflectancia en la Base de la Atmosfera (BOA) mediante el procesador operacional de nivel 2A, el cual a partir de algoritmos de clasificación de escenas y corrección atmosférica permite obtener imágenes cuyos pixeles son más fieles a la realidad que las imágenes con nivel de corrección 1C. El algoritmo utilizado es el Sen2Cor, que es una combinación de técnicas de última generación para efectuar correcciones atmosféricas ajustado a la medida para los satélites Sentinel 2. Este modelo utiliza el modelo de transferencia radiativa LIBRADTRAN (Mayer & Kylling, 2005).

Cartografía Forestal Nacional 2024		V: 1.1 13/12/2024
Informe Técnico	Documento: Informe Final Cartografía Forestal del Uruguay 2024 v1.1.docx	Página 5 de 20

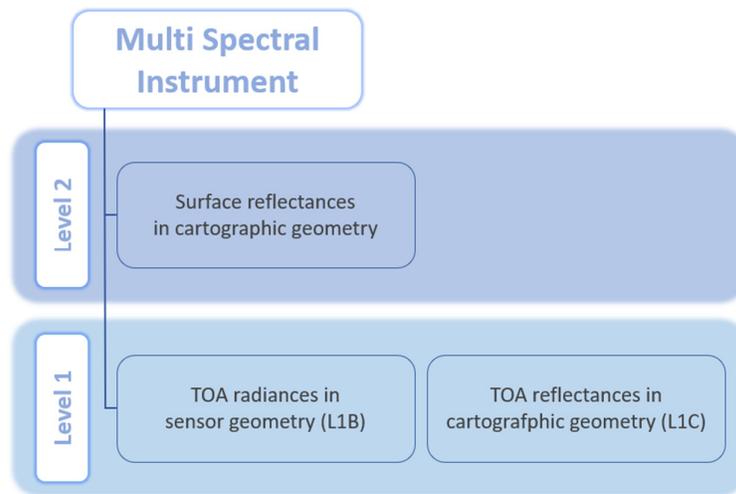


Figura 1. Niveles de Procesamiento de las Imágenes Sentinel 2 (Fuente: ESA, 2024).

## 2.1. Resoluciones de las Imágenes Sentinel 2

Las imágenes Sentinel 2, cuentan con ventajas importantes con respecto a las imágenes Landsat 8/9, principalmente en las resoluciones temporal, con un tiempo de revisita para la constelación de unos 5 días en el Ecuador; y espacial, contando con 4 bandas con una resolución nativa de 10 metros/píxel.

Debido a que la banda 8 abarca casi todo el espectro electromagnético de las bandas 7 y 8A, y a que las bandas 5 y 6 tienen una menor resolución espacial (20 metros), se decidió efectuar la clasificación utilizando las 4 bandas con una resolución nativa de 10 metros (Bandas 2, 3, 4 y 8), ya que efectuar un remuestreo a 10 metros de las bandas 5 y 6 podría conducir a errores, ya que no es la resolución nativa de dichas bandas, y la otra opción de remuestrear las bandas de 10 metros a 20 metros, conllevaría la pérdida de resolución real.

Cartografía Forestal Nacional 2024		V: 1.1 13/12/2024
Informe Técnico	Documento: Informe Final Cartografía Forestal del Uruguay 2024 v1.1.docx	Página 6 de 20

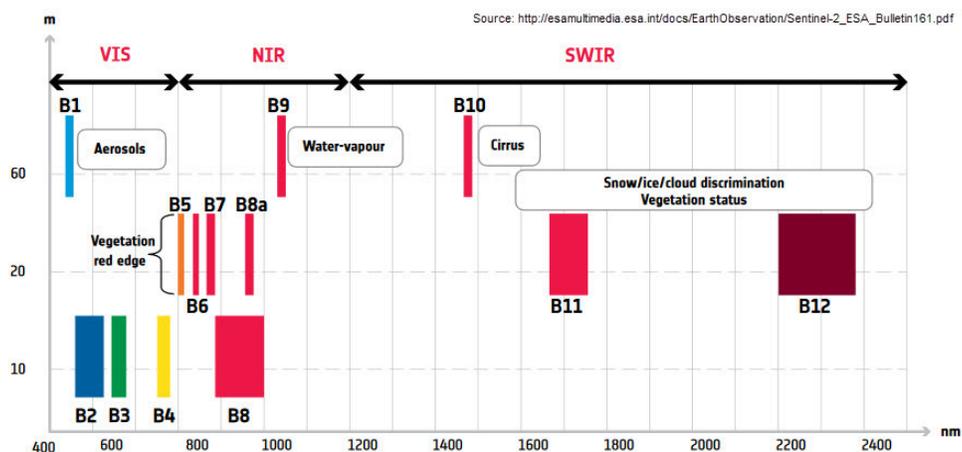


Figura 2. Resoluciones Espacial y Espectral de los Satélites Sentinel 2 (Fuente: ESA,2021).

## 2.2. Cobertura y Disponibilidad de Imágenes Sentinel 2

Las imágenes nivel 2A de Sentinel 2 vienen en cuadrículas de 100 x 100 kms en proyección UTM WGS-84, por lo que se requieren de unas 30 imágenes para contar con una cobertura total del Uruguay (ver figura 3).



Figura 3. Grilla de imágenes Sentinel 2 para la ROU.

Cartografía Forestal Nacional 2024		V: 1.1 13/12/2024
Informe Técnico	Documento: Informe Final Cartografía Forestal del Uruguay 2024 v1.1.docx	Página 7 de 20

De acuerdo con los Términos de Referencia del Proyecto, la actualización de la Cartografía Forestal Nacional debe ser hecha en base a las imágenes Sentinel 2 más recientes de los años 2023-2024. Por dicha razón, y tomando en cuenta que las anteriores cartografías de especies forestales de 2018 y 2021 se llevaron a cabo utilizando imágenes del periodo de verano en Uruguay, se procedió a la búsqueda de imágenes para el periodo comprendido entre Noviembre de 2023 y Enero 2024. Dicha búsqueda se llevó a cabo en el nuevo portal del proyecto Copernicus de la Agencia Espacial Europea (ESA): <https://browser.dataspace.copernicus.eu/>

Debido a las condiciones meteorológicas que se presentaron en la ROU durante el verano 2023-2024, que se caracterizó por precipitaciones por encima del promedio, sobre todo en la zona norte y litoral del país (Informe de Verano, INUMET, 2024). Esto dificultó encontrar pasadas del satélite que no presenten nubosidad en alguna de las zonas. Por esta razón, se amplió el rango de búsqueda a un periodo de alrededor de 3 meses.

Los satélites Sentinel 2 tienen un ancho de barrido o Swath de 300 kms. En el caso de Uruguay, el país es cubierto con tres pasadas del satélite. Con la finalidad de mejorar la homogeneidad de las imágenes se decidió efectuar un mosaico para cada una de las pasadas y unirlos para generar las 3 zonas definidas en el proyecto: Zona Norte, Zona Litoral y Zona Atlántica.

Luego de efectuar una búsqueda exhaustiva en el portal de la ESA, se encontraron imágenes sin nubes correspondientes a las siguientes fechas:

- **Zona Norte:** 23/11, 09/12 y 26/12 de 2023.
- **Zona Litoral:** 09/12 y 26/12 de 2023.
- **Zona Atlántica:** 26/12/2023 y 01/02/2024.

En total se descargaron 47 imágenes de 100 x 100 kms para la ROU y se construyó un Mosaico con las Bancas RGB+IR para todo el país. Posteriormente se recortó dicho mosaico para cada una de las 3 áreas definidas.

Cartografía Forestal Nacional 2024		V: 1.1 13/12/2024
Informe Técnico	Documento: Informe Final Cartografía Forestal del Uruguay 2024 v1.1.docx	Página 8 de 20

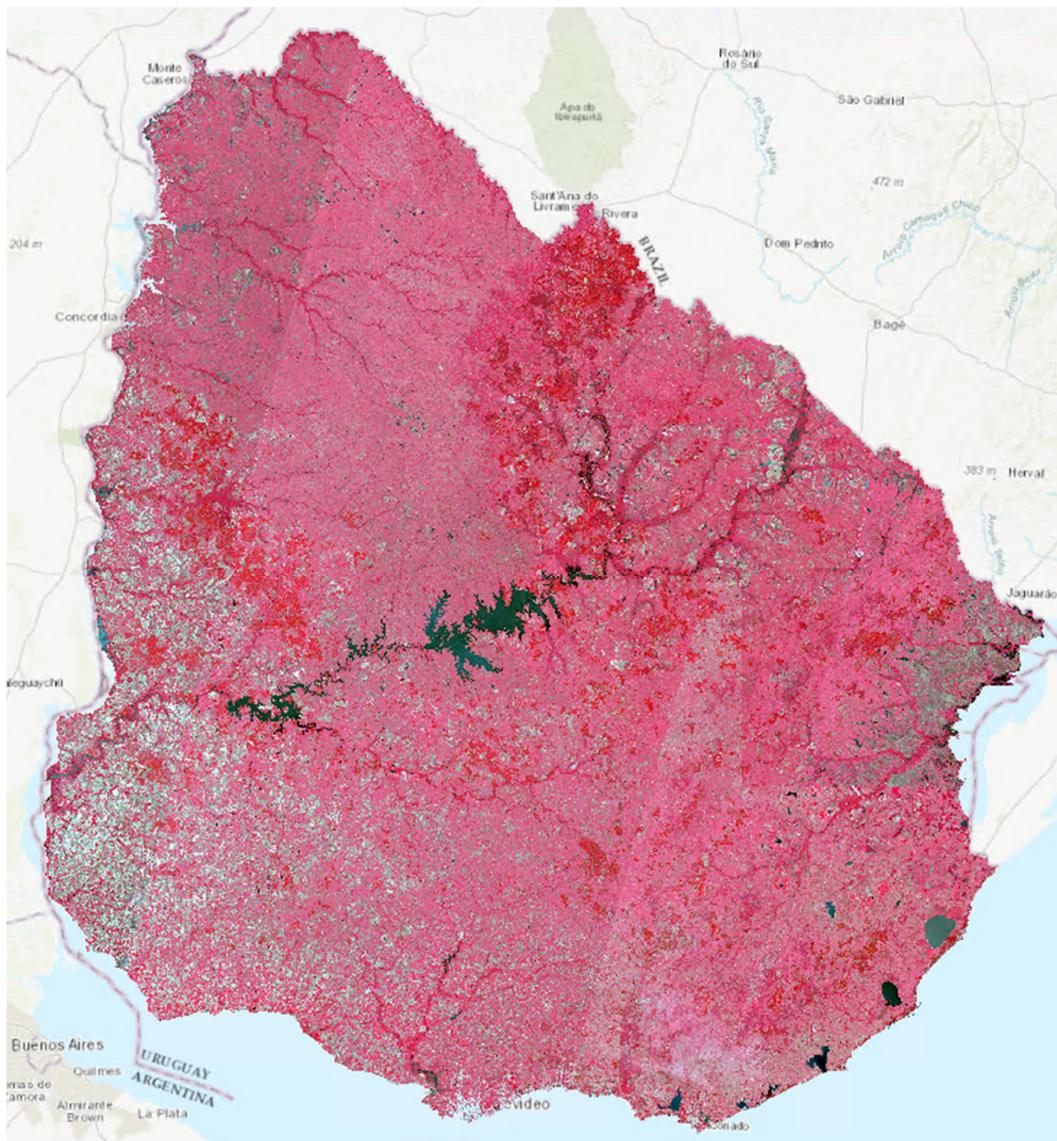


Figura 4. Mosaico Sentinel 2 para la ROU Finales 2023 – Principios 2024.

Cartografía Forestal Nacional 2024		V: 1.1 13/12/2024
Informe Técnico	Documento: Informe Final Cartografía Forestal del Uruguay 2024 v1.1.docx	Página 9 de 20

### 3. Clasificación de Especies Forestales

De acuerdo con los requerimientos del CTFM, se dividió el país en tres zonas, con características de forestación relativamente similares y se efectuó la identificación y clasificación de plantaciones forestales para cada una de estas zonas. Finalmente se unieron los resultados de las 3 zonas y se generaron las capas correspondientes.

#### 3.1. Determinación de Áreas Forestadas

El primer paso consistió en la clasificación de las áreas de forestación para cada una de las zonas que comprenden el área de estudio. Para lograr esto se ejecutó una Clasificación Supervisada mediante el algoritmo de Support Vector Machine (SVM) que utiliza conceptos de Inteligencia Artificial. La herramienta de clasificador de SVM ofrece varias ventajas, en comparación con los métodos de clasificación tradicionales:

- Permite manejar imágenes segmentadas muy grandes cuya tabla de atributos puede llegar a ser bastante grande, algo que resulta especialmente útil en imágenes de alta resolución.
- Es menos susceptible al ruido, a las bandas correlacionadas y al desequilibrio entre la cantidad o el tamaño de los sitios de formación dentro de cada clase.

El algoritmo de SVM permite efectuar clasificaciones supervisadas mediante dos enfoques: orientada a píxeles o a objetos. El primero constituye la aproximación clásica en donde cada píxel se clasifica sin tomar en consideración los píxeles circundantes ni su localización espacial.

El proceso de extracción de entidades orientado a objetos es un flujo de trabajo que se utiliza en las herramientas y que abarca tres áreas funcionales principales: la segmentación de imágenes, la derivación de información analítica sobre los segmentos y la clasificación. La salida de datos de una herramienta se convierte en la entrada para otras herramientas, donde el objetivo es obtener un mapa de clase de entidades orientado a objetos significativos. El proceso orientado a los objetos es similar al

Cartografía Forestal Nacional 2024		V: 1.1 13/12/2024
Informe Técnico	Documento: Informe Final Cartografía Forestal del Uruguay 2024 v1.1.docx	Página 10 de 20

proceso tradicional de clasificación de imágenes basado en píxeles, en el que se utilizan técnicas de clasificación supervisadas y no supervisadas. En lugar de clasificar los píxeles, el proceso clasifica segmentos, que se pueden interpretar como superpíxeles. Cada segmento, o superpíxel, se representa mediante un conjunto de atributos que se utiliza en las herramientas del clasificador para obtener la imagen clasificada.

Se determinaron 7 coberturas principales del Terreno: Forestación, Monte Nativo, Urbano, Agua, Suelo Desnudo, Cultivos y Pradera. La selección de la cantidad de clases de coberturas es un factor clave en la diferenciación espectral de las clases informacionales generadas por el algoritmo de Clasificación Supervisada SVM.

Utilizando la herramienta de generación de muestras de capacitación se generaron 3143 polígonos de las distintas coberturas del área de estudio. Posteriormente se dividieron en 2457 muestras de capacitación o entrenamiento y 686 polígonos de validación para la elaboración de la matriz de confusión. A continuación, se presenta la distribución por clase de las 3143 muestras.

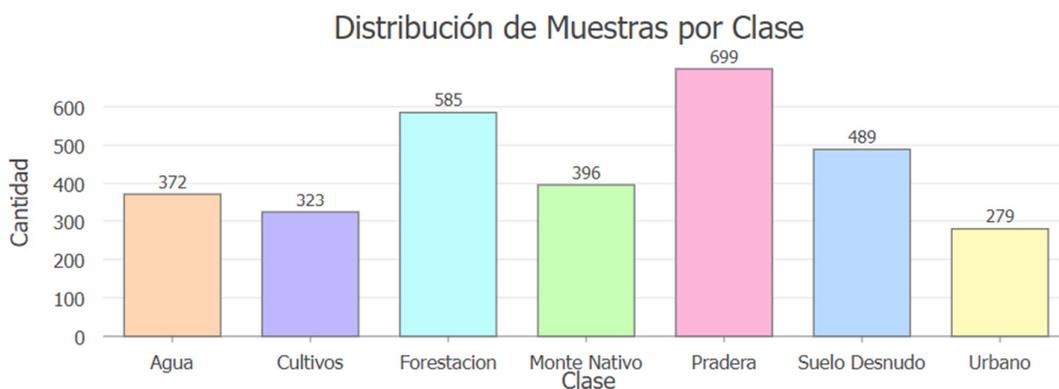


Figura 5. Distribución de las muestras de entrenamiento para todo el país.

Con respecto a los parámetros del algoritmo, se utilizó una clasificación SVM orientada

Cartografía Forestal Nacional 2024		V: 1.1 13/12/2024
Informe Técnico	Documento: Informe Final Cartografía Forestal del Uruguay 2024 v1.1.docx	Página 11 de 20

a objetos con una imagen segmentada con un detalle espacial y espectral de 18, un segmento mínimo de 20 píxeles y utilizando 800 puntos de muestreo por cada una de las 7 clases generadas. A continuación, se muestran las firmas espectrales de las coberturas generadas.

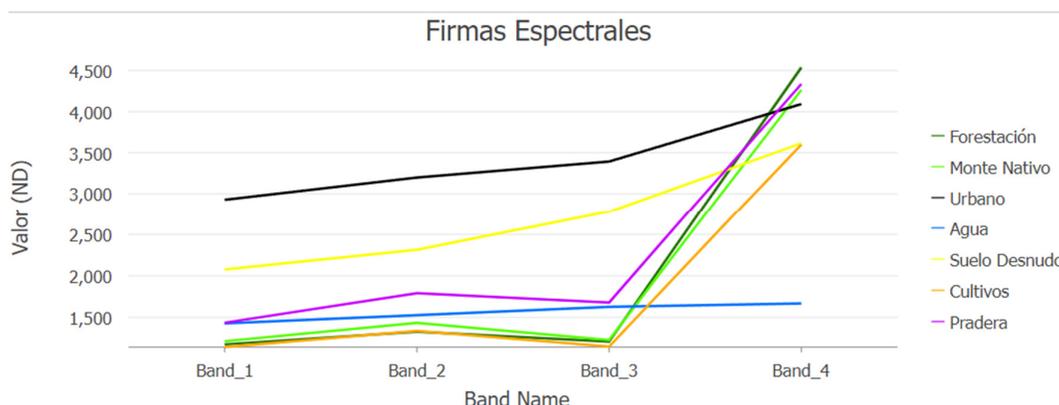


Figura 6. Firmas Espectrales tipo de las coberturas del terreno.

Como se aprecia en el gráfico, las firmas espectrales del Monte Nativo y Forestación son muy similares, por lo que se utilizaron los atributos del segmento de compactación y rectangularidad para mejorar la clasificación. Posteriormente se efectuó una revisión y reclasificación manual para mejorar la exactitud de la clasificación.

Luego, se efectúa la evaluación cuantitativa con los polígonos de validación generados previamente. Para esto se genera una matriz de confusión que es una tabla de dimensión  $N \times N$ , donde  $N$  es el número de clases definido por el usuario, las columnas corresponden a los valores observados y los de las filas (en el mismo orden) a los predichos por la clasificación. Para evaluar el grado de confiabilidad de la clasificación se calculan una serie de indicadores que evalúan el error de omisión (subestimación de los píxeles que realmente deberían pertenecer a una clase), el error de comisión (sobrestimación de los píxeles que realmente deberían pertenecer a una clase), y el error o fiabilidad total del proceso (Paruelo, 2008). En este sentido la matriz generada de la clasificación supervisada arrojó los siguientes resultados:

Cartografía Forestal Nacional 2024		V: 1.1 13/12/2024
Informe Técnico	Documento: Informe Final Cartografía Forestal del Uruguay 2024 v1.1.docx	Página 12 de 20

Valor de Clase	Forestación	Monte Nativo	Urbano	Agua	Suelo Desnudo	Cultivos	Pradera	Total	Exactitud del Usuario
Forestación	126	4	0	0	0	8	0	138	91.30
Monte Nativo	7	130	0	0	0	18	1	156	83.33
Urbano	0	0	89	0	2	0	0	91	97.80
Agua	0	0	0	347	0	0	0	347	100.00
Suelo Desnudo	0	0	2	0	164	0	0	166	98.80
Cultivos	4	9	0	0	0	90	8	111	81.08
Pradera	0	0	0	0	0	9	490	499	98.20
Total	137	143	91	347	166	125	499	1508	100.00
Exactitud del Productor	91.97	90.91	97.80	100.00	98.80	72.00	98.20	92.81	93.81

Tabla 1. Firmas Espectrales de las coberturas del terreno para todo el país.

Se observan exactitudes bastante altas para la mayoría de las clases, exceptuando la clase de cultivos (72% en promedio) en la cual se presentan falsos positivos con las clases de Monte Nativo y Forestación. Sin embargo, debido a que esta clasificación se efectuó para extraer la clase de Forestación, la confusión entre las clases de Cultivos con Monte Nativo no afecta los resultados. La exactitud global de la clase de Forestación (promedio entre la exactitud del productor y la del usuario) es de 91,6%.

Posteriormente se reclasificó el ráster generado para extraer solo la clase asignada a la Forestación y se vectorizaron los resultados para generar los polígonos de los rodales de las plantaciones forestales. Se suavizaron los polígonos para ajustarse a la forma característica de las plantaciones forestales.

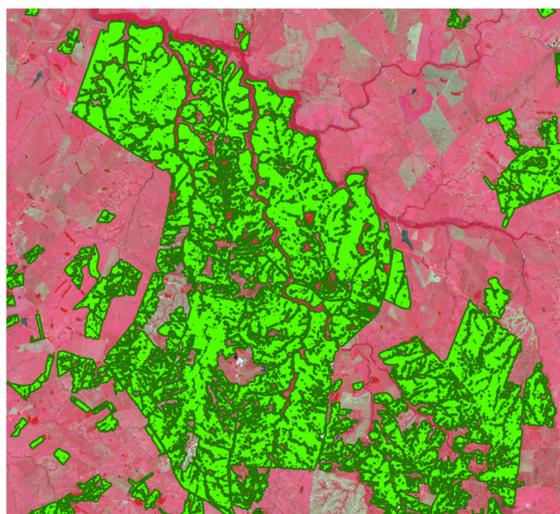


Figura 7. Ejemplo de Polígonos de Plantaciones Forestales clasificadas del Proyecto 2024.

Cartografía Forestal Nacional 2024		V: 1.1 13/12/2024
Informe Técnico	Documento: Informe Final Cartografía Forestal del Uruguay 2024 v1.1.docx	Página 13 de 20

### 3.2. Determinación de Áreas de Cambio y nuevas a partir de la Forestación 2021

---

La metodología para determinar el Estrato de Uso forestal cuya superficie esté cosechada o recién plantada (reforestaciones y campos nuevos), se enfoca en la comparación de la Cartografía Forestal del Uruguay elaborada en 2021 con imágenes Sentinel 2 de finales de 2020, con las imágenes de finales de 2023 y principios de 2024 del Proyecto de Cartografía Forestal Nacional 2024. Considerando que las plantaciones forestales son cultivos con ciclos de larga duración que puede llegar a los 10 años para las plantaciones destinadas a la producción de pulpa para papel y hasta 25 años para las plantaciones para producir madera aserrada (INIA, 2006), es adecuado considerar que solo una fracción de las plantaciones cartografiadas en 2021 han cambiado su uso, bien sea por cosecha y/o resiembra, así como por la incorporación de áreas nuevas por siembra.

En función de lo anterior, el flujo de trabajo implementado consistió, en primer lugar, en determinar las áreas de cambios relevantes dentro de la capa de áreas forestadas 2021 en comparación con las imágenes del proyecto de Cartografía Forestal de 2024. Esto se hace uniendo las capas de Especie Forestales de 2021 + Estrato Uso Forestal 2021 + Áreas Forestación 2024, obteniendo una capa que contiene la totalidad de los polígonos de forestación en 2021 o en 2024.

Posteriormente, se extrajeron por mascara las áreas de forestación en los mosaicos Sentinel 2 de 2021 y de 2024, con la finalidad de comparar temporalmente los cambios entre fechas. La variable comparada para ambos periodos de tiempo fue el Índice de Verdor Normalizado (NDVI, por sus siglas en ingles). Dentro de dichas áreas los cambios pueden ser explicados por las siguientes posibilidades:

- Cosecha de áreas forestadas en 2021.
- Cosecha y posterior reforestación de áreas forestadas en 2021.
- Nuevas plantaciones: con siembra posterior a 2021.

Cartografía Forestal Nacional 2024		V: 1.1 13/12/2024
Informe Técnico	Documento: Informe Final Cartografía Forestal del Uruguay 2024 v1.1.docx	Página 14 de 20

- Plantaciones jóvenes o menores a 3 años: aquellas plantaciones o reforestaciones ya existentes en el estrato forestal 2021, pero que aún no es posible determinar la especie forestal correspondiente.
- Disminución de NDVI por enfermedades, incendios, sequías, etc. En este caso se determinarán los umbrales significativos para que dichas detecciones no sean clasificadas como áreas de cambio.

Los polígonos de Especies Forestales del Proyecto Nacional Forestación de 2021 sin cambio significativo en el NDVI en el año 2024 son tomados como áreas de forestación sin cambio, es decir, se mantiene la especie forestal asignada en el Proyecto Nacional de Cartografía Forestal 2021.

Las áreas de cambio se obtienen mediante la diferencia del mosaico 2023-24 menos el mosaico 2021, para luego determinar los umbrales de cambio positivo (forestación) y negativo (cosecha). Los polígonos de cambios relevantes determinados en este paso fueron extraídos y vectorizados.

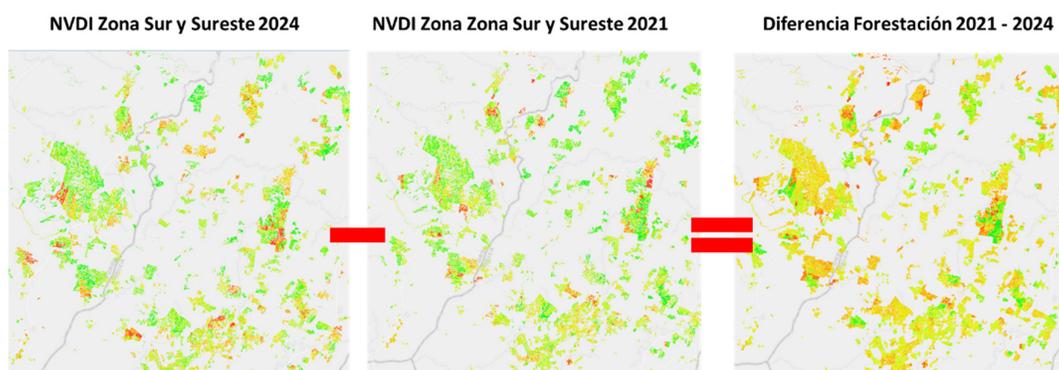


Figura 8. Ejemplo de Cuantificación de Cambio mediante comparación Multitemporal de NDVI en la Zona Sur y Sureste.

Con respecto a las áreas nuevas de forestación, utilizando las imágenes Sentinel 2 de finales de 2023 y principios de 2024, se extrajeron por máscara las áreas sin forestación para el año 2021 y se efectuó una clasificación supervisada de coberturas generales del terreno, para determinar las áreas de bosques nuevas para 2021. Posteriormente se aplicaron las técnicas de clasificación de especies para obtener las especies o estratos

Cartografía Forestal Nacional 2024		V: 1.1 13/12/2024
Informe Técnico	Documento: Informe Final Cartografía Forestal del Uruguay 2024 v1.1.docx	Página 15 de 20

forestales requeridos por el cliente.

En resumen, de acuerdo con la clasificación del estrato de uso forestal 2021, pueden obtenerse las siguientes categorías:

Clasificación 2021	Clasificación 2024
<b>Monte Cosechado</b>	Reforestación / Rebrote
	Cambio de uso del suelo (poco probable)
<b>Nueva Plantación</b>	Pasa a capa Especie
	Plantaciones Jóvenes
<b>Reforestación</b>	Pasa a capa Especie
	Reforestación de más de 3 años

De acuerdo con los términos de referencia, el estrato de uso forestal: Plantaciones Jóvenes y Áreas cosechadas se clasificaron de la siguiente manera:

- Bosque Cosechado
- Nueva Plantación
- Reforestación.

Posterior a la determinación de las zonas de cambio positivo (forestación) y negativo (cosecha) significativo entre 2021 y 2024, se efectuó una revisión manual de los polígonos generados con la finalidad de determinar las 3 clases definidas. A continuación, se presentan los resultados del análisis de los estratos forestales para todo el país.

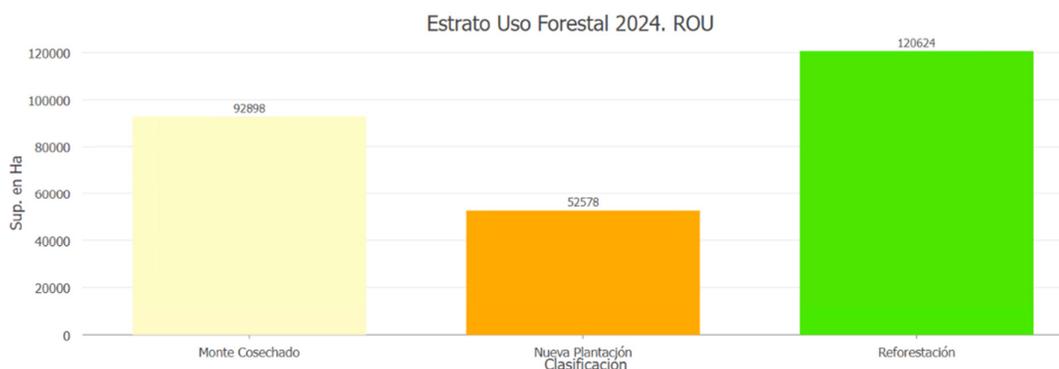


Figura 9. Estrato Uso Forestal 2021-2024 para todo el Uruguay.

Los resultados del análisis dan una superficie cosechada de 92.898 ha a finales 2023/principios 2024 con respecto a la imagen Sentinel 2 de principios de 2021, así como una superficie reforestada de 120.624 ha y 52.578 ha de nuevas plantaciones.

TIPO DE CAMBIO	AREA (ha)
Bosque Cosechado	92.898
Reforestación	120.624
Nueva Plantación	52.578
<b>Total</b>	<b>266.100</b>

### 3.3. Clasificación de Especies Forestales

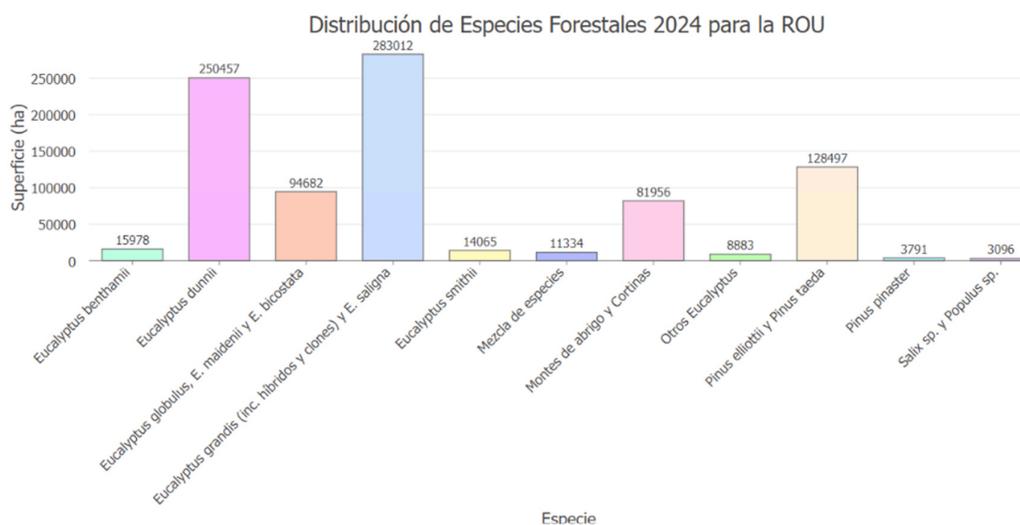
Debido a la similar respuesta espectral entre algunas de las especies forestales consideradas, se requiere la utilización de avanzados algoritmos de clasificación de imágenes, basados en las firmas espectrales de las imágenes. Uno de los más novedosos algoritmos de Clasificación Supervisada es el Clasificador de Máquina de Vectores de Soporte (Support Vector Machine, o SVM) que proporciona un método de clasificación potente y moderno que permite manejar una entrada de Raster segmentado o una imagen estándar.

Para la obtención de las muestras de capacitación y entrenamiento se utilizaron imágenes de muy alta resolución (WorldView-04, Pleiades Neo, Ortomosaico IDEuy), junto con el conocimiento técnico de un especialista en el área forestal, para la

generación de polígonos con las distintas especies forestales. En este sentido, la utilización de polígonos de capacitación en lugar de puntos (técnica tradicional) representa una gran ventaja, ya que además de proporcionar una mayor cantidad de píxeles para el entrenamiento, suministra una mejor variabilidad espectral y espacial de las distintas coberturas. Esto es una gran ventaja, ya que debido a condiciones particulares presentes en cada una de las áreas (suelos, humedad, nutrientes), una misma plantación o monte nativo, presenta ligeras variaciones espaciales en los valores de reflectancia de los píxeles que la componen.

Posterior a la clasificación digital, se procedió a efectuar una revisión y reclasificación manual de algunos de los polígonos de especies forestales, principalmente para reducir el error por falsos positivos (error de comisión) y falsos negativos (error de omisión). Adicionalmente, se mejoró la clasificación, en aquellos rodales en donde por condiciones particulares del mismo (estado de salud, contenido de agua, rodalización, etc), la firma espectral no coincidía con la especie correspondiente.

En conclusión, la clasificación digital de especies forestales mediante el algoritmo de SVM en la República Oriental de Uruguay, aunado al trabajo manual de reclasificación y corrección, arrojó los siguientes resultados:



Cartografía Forestal Nacional 2024		V: 1.1 13/12/2024
Informe Técnico	Documento: Informe Final Cartografía Forestal del Uruguay 2024 v1.1.docx	Página 18 de 20

Figura 10. Superficie de Plantaciones Forestales por Especie en la República Oriental del Uruguay.

La superficie total de plantaciones forestales con especie definida resultante se presenta en el siguiente cuadro:

ESPECIE	AREA (has)
Eucalyptus dunnii	250.457
Eucalyptus globulus, maidenii y bicostata	94.682
Eucalyptus grandis (inc. híbridos y clones) y E. saligna	283.012
Eucalyptus benthamii	15.978
Eucalyptus Smithii	14.065
Otros Eucalyptus	8.883
Pinus elliottii y Pinus taeda	128.497
Pinus Pinaster	3.791
Salix y Populus	3.096
Mezcla de Especies	11.334
Montes de Abrigo y Cortinas	81.956
<b>Total</b>	<b>895.750</b>

Cabe acotar que, si bien en los TDR no se solicitaba la clasificación de la especie “Eucalyptus benthamii”, ya que la misma quedaba inserta dentro de “Otros Eucalyptus”, se logró hacer dicha diferenciación, por lo que se agregó como una nueva especie.

Con respecto a la validación de los datos, se elaboró una matriz de confusión a partir de 1507 puntos de verdad terrestre con las distintas coberturas de especies forestales, obteniéndose una exactitud global de 95%.

Valor de Clase	Eucalyptus dunnii	Eucalyptus grandis (inc. híbridos y clones) y E. saligna	Eucalyptus globulus, E. maidenii y E. bicostata	Eucalyptus benthamii	Otros Eucalyptus	Pinus elliottii y Pinus taeda	Salix sp. y Populus sp.	Mezcla Especies	Total	Exactitud del Usuario
Eucalyptus dunnii	391	22	4	0	1	1	1	1	421	92.87
Eucalyptus grandis (inc. híbridos y clones) y E. saligna	17	478	1	0	1	8	0	0	505	94.65
Eucalyptus globulus, E. maidenii y E. bicostata	3	5	240	0	0	0	0	0	248	96.77
Eucalyptus benthamii	0	0	0	10	0	0	0	0	10	100.00
Otros Eucalyptus	0	0	0	0	27	1	1	0	29	93.10
Pinus elliottii y Pinus taeda	0	5	1	0	1	218	0	1	226	96.46
Salix sp. y Populus sp.	0	1	0	0	0	0	29	0	30	96.67
Mezcla Especies	0	0	0	0	0	0	0	38	38	100.00
<b>Total</b>	<b>411</b>	<b>511</b>	<b>246</b>	<b>10</b>	<b>30</b>	<b>228</b>	<b>31</b>	<b>40</b>	<b>1507</b>	<b>100.00</b>
<b>Exactitud del Productor</b>	<b>95.13</b>	<b>93.54</b>	<b>97.56</b>	<b>100.00</b>	<b>90.00</b>	<b>95.61</b>	<b>93.55</b>	<b>95.00</b>	<b>95.05</b>	<b>96.73</b>

La superficie total destinada a forestación es de **1:161.850 hectáreas**, resultado de la sumatoria de la superficie de especies forestales con especie definida, más la superficie de bosques cosechados, nuevas plantaciones y/o reforestaciones.