



Organización de las Naciones
Unidas para la Alimentación
y la Agricultura



Protocolo metodológico para la elaboración de cartografías de usos y cambios de usos de la tierra



FONDO PARA EL MEDIO AMBIENTE MUNDIAL
INVERTIMOS EN NUESTRO PLANETA



Sistema Integrado
de Monitoreo
de Ecosistemas
Forestales Nativos



Protocolo metodológico para la elaboración de cartografías de usos y cambios de usos de la tierra

Elaborado por: Abraham Albornoz, Daniela Alegría,
Fernanda Cortés y Jorge Moya
Corporación Nacional Forestal, Chile

Publicado por
la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
y
el Ministerio de Agricultura de Chile

Referencia requerida:

Albornoz A., Alegría D., Cortés, F. y Moya, J. 2021. *Protocolo metodológico para la elaboración de cartografías de usos y cambios de usos de la tierra*. FAO y MINAGRI. <https://doi.org/10.4060/cbo845es>

Las denominaciones empleadas en este producto informativo y la forma en que aparecen presentados los datos que contiene no implican, por parte de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) o el Ministerio de Agricultura de Chile (MINAGRI), juicio alguno sobre la condición jurídica o nivel de desarrollo de países, territorios, ciudades o zonas, o de sus autoridades, ni respecto de la delimitación de sus fronteras o límites. La mención de empresas o productos de fabricantes en particular, estén o no patentados, no implica que la FAO o MINAGRI los apruebe o recomiende de preferencia a otros de naturaleza similar que no se mencionan.

Las opiniones expresadas en este producto informativo son las de su(s) autor(es), y no reflejan necesariamente los puntos de vista o políticas de la FAO o MINAGRI.

ISBN 978-92-5-133260-3 [FAO]

© FAO y MINAGRI, 2021



Algunos derechos reservados. Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 3.0 Organizaciones intergubernamentales.; https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/igo/deed.es_ES.

De acuerdo con las condiciones de la licencia, se permite copiar, redistribuir y adaptar la obra para fines no comerciales, siempre que se cite correctamente, como se indica a continuación. En ningún uso que se haga de esta obra debe darse a entender que la FAO o MINAGRI refrenda una organización, productos o servicios específicos. No está permitido utilizar el logotipo de la FAO o MINAGRI. En caso de adaptación, debe concederse a la obra resultante la misma licencia o una licencia equivalente de Creative Commons. Si la obra se traduce, debe añadirse el siguiente descargo de responsabilidad junto a la referencia requerida: "La presente traducción no es obra de Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) o MINAGRI. La FAO/MINAGRI no se hace responsable del contenido ni de la exactitud de la traducción. La edición original en español será el texto autorizado".

Toda controversia que surja en el marco de la licencia y no pueda resolverse de forma amistosa se resolverá a través de mediación y arbitraje según lo dispuesto en el artículo 8 de la licencia, a no ser que se disponga lo contrario en el presente documento. Las reglas de mediación aplicables serán las del Reglamento de Mediación de la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual <http://www.wipo.int/amc/en/mediation/rules> y todo arbitraje se llevará a cabo de conformidad con el Reglamento de Arbitraje de la Comisión de las Naciones Unidas para el Derecho Mercantil Internacional (CNUDMI).

Materiales de terceros. Si se desea reutilizar material contenido en esta obra que sea propiedad de terceros, por ejemplo, cuadros, gráficos o imágenes, corresponde al usuario determinar si necesita autorización para tal reutilización y obtener la autorización del titular del derecho de autor. El riesgo de que se deriven reclamaciones de la infracción de los derechos de uso de un elemento que sea propiedad de terceros recae exclusivamente sobre el usuario.

Ventas, derechos y licencias. Los productos informativos de la FAO están disponibles en la página web de la Organización (<http://www.fao.org/publications/es>) y pueden adquirirse dirigiéndose a publications-sales@fao.org. Las solicitudes de uso comercial deben enviarse a través de la siguiente página web: www.fao.org/contact-us/licence-request. Las consultas sobre derechos y licencias deben remitirse a: copyright@fao.org.

Fotografía de la cubierta:
©CONAF

Índice

| | |
|--|----|
| Presentación | IX |
| Introducción | 1 |
| Capítulo 1: Objetivos y alcances | 3 |
| Objetivo general | 3 |
| Objetivos específicos..... | 3 |
| Alcances | 3 |
| Capítulo 2: Consideraciones técnicas | 5 |
| Sistema de clasificación | 5 |
| Descripción de las categorías de uso de la tierra | 7 |
| Categorías y atributos del mapa final de cambio | 8 |
| <i>Softwares</i> requeridos para la ejecución del proyecto | 11 |
| Imágenes satelitales <i>Landsat 8</i> | 12 |
| Fuentes de información | 13 |
| Sistema de monitoreo de cambios de uso del suelo y vegetación basado en el Catastro del bosque nativo | 13 |
| Límites políticos y administrativos o DPA, Odepa | 14 |
| Área de estudio | 15 |
| Capítulo 3: Desarrollo metodológico | 17 |
| Etapas 1: Generación de mosaicos base T_0 y T_1 | 18 |
| Etapas 2: Generación de coberturas de pérdidas y ganancias en bosques..... | 23 |
| Etapas 3: Edición y depuración de resultados | 34 |
| Etapas 4: Atribuciones mediante clasificación supervisada | 37 |
| Etapas 5: Integración geométrica y alfanumérica | 58 |
| Capítulo 4: Recomendaciones | 63 |
| Referencias | 67 |

Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1: Mapa del área de estudio..... | 16 |
| Figura 2: Etapas del proceso metodológico..... | 17 |
| Figura 3: Resumen metodológico de Etapa 1: Generación de mosaicos T_0 y T_1 | 18 |

| | |
|--|----|
| Figura 4: Mosaicos To y T1 | 22 |
| Figura 5: Resumen metodológico de Etapa 2: Generación de coberturas de pérdidas y ganancias en bosques. | 23 |
| Figura 6: dNDVI vs dNBR en puntos de cambios de usos de la tierra | 28 |
| Figura 7: NDVI en To vs NDVI en T1 en puntos de cambios de usos de la tierra | 29 |
| Figura 8: NDVI en To vs NDVI en T1 aplicando valores de dNBR mayores o iguales que 0,27 en puntos de cambio de uso real | 30 |
| Figura 9: Ejemplo de visualización de transformaciones de la cobertura de trazabilidad de formato vectorial a ráster para determinación de pérdidas en bosque nativo, Región de La Araucanía | 31 |
| Figura 10: Resumen metodológico de Etapa 3: Edición y depuración de resultados | 34 |
| Figura 11: Resumen metodológico de Etapa 4: Atribuciones mediante clasificación supervisada | 37 |
| Figura 12: Geoprocesos efectuados a la cobertura de clasificación supervisada para atribución de usos de la tierra 2016..... | 43 |
| Figura 13: Ejemplo de visualización de la aplicación de reemplazo de píxeles (derecha) en cobertura de clasificación supervisada (izquierda), Región de La Araucanía..... | 51 |
| Figura 14: Ejemplo de visualización de la aplicación de filtro mayoritario dos veces consecutivas (derecha) sobre cobertura de clasificación supervisada | 52 |
| Figura 15: Geoprocesos efectuados a la cobertura de clasificación supervisada para la atribución de pérdidas en bosque nativo | 53 |
| Figura 16: Geoprocesos realizados para la obtención de cobertura de cambios | 56 |

| | |
|--|----|
| Figura 17: Ejemplo de visualización de la aplicación de suavizado (derecha) en cobertura de cambios atributada (izquierda) en Región de La Araucanía | 57 |
|--|----|

| | |
|--|----|
| Figura 18: Geoprocesos efectuados para la obtención de la cobertura final de cambios de usos de la tierra 2016 (T1) enfocados a los cambios de usos de la tierra en bosque nativo período 2013 (To)-2016 (T1) | 58 |
|--|----|

Cuadros

| | |
|--|----|
| Cuadro 1: Sistema de clasificación de usos de la tierra | 6 |
| Cuadro 2: Atributos integrados en mapa de cambios de usos de la tierra 2016 | 9 |
| Cuadro 3: Actualizaciones del Catastro de Recursos Vegetacionales de Chile a nivel regional | 13 |
| Cuadro 4: Imágenes Landsat 8 utilizadas para el período To y T1 mediante repositorio de Google Earth Engine (GEE) | 19 |
| Cuadro 5: Áreas sin información por región, sumando las superficies de los mosaicos To y T1 | 20 |
| Cuadro 6: Imágenes Landsat 8 utilizadas para rellenar las zonas sin información en el período To y T1 | 20 |
| Cuadro 7: Áreas sin información por región, al incluir nuevos píxeles de un rango de fecha ampliado | 21 |
| Cuadro 8: Muestras para evaluación de umbrales de bosque nativo | 27 |
| Cuadro 9: Variación de superficie de pérdidas (en hectáreas) en la aplicación de depuración y suavizado | 36 |

Cuadro 10: Variación de superficie de ganancias (en hectáreas)
en la aplicación de depuración y suavizado 36

Cuadro 11: Ejemplo de usos, subusos, id (código) y
reclasificación de muestras 39

Cuadro 12: Número de muestras por región 41

Cuadro 13: Reglas de decisión para reemplazo de píxeles
sobre la base de la trazabilidad 2013 para la Región del Maule 47

Cuadro 14: Reglas de decisión para reemplazo de píxeles
sobre la base de la trazabilidad 2013 para la Región del Biobío 48

Cuadro 15: Reglas de decisión para reemplazo de píxeles
sobre la base de la trazabilidad 2013 para la Región de La Araucanía 48

Cuadro 16: Reglas de decisión para reemplazo de píxeles
sobre la base de la trazabilidad 2013 para la Región de Los Ríos 49

Cuadro 17: Reglas de decisión para reemplazo de píxeles
sobre la base de la trazabilidad 2013 para la Región
de Los Lagos-Chiloé 49

Cuadro 18: Reglas de decisión para reemplazo de píxeles
sobre la base de la trazabilidad 2013 para la Región de
Los Lagos-Palena 50

Cuadro 19: Reglas de decisión para reemplazo de píxeles
sobre la base de la trazabilidad 2013 para la Región de
Los Lagos-Lagos Norte 50

Abreviaturas y siglas

| | |
|------------------|--|
| AOI | Área de Influencia o Área de Interés |
| BQA | Aseguramiento de Calidad |
| CIREN | Centro de Información Recursos Naturales |
| CONAF | Corporación Nacional Forestal |
| COT | Carta de Ocupación de la Tierra |
| CSRF | Clasificación Supervisada Random Aleatorios |
| CV | Change Vector |
| DEM / MDE | Modelo digital de elevación |
| dNBR | Normalized Differenced Burn Ratio |
| DOS | Dark object Subtraction |
| DPA | División Política Administrativa |
| ENCCRV | Estrategia Nacional de Cambio Climático y Recursos Vegetacionales |
| EPSG | European Petroleum Survey Group |
| FAO | Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura |
| GEE | Google Earth Engine |
| FMAM | Fondo para el Medio Ambiente Mundial |
| GeoTIFF | Archivos geográficos |
| GIS | Sistema de Información Geográfica |
| IDE | Infraestructura de Datos Espaciales |
| INFOR | Instituto Forestal |
| IPCC | Panel Intergubernamental del Cambio Climático |
| MIICA | Metodología Integrada de Investigación Científica de Accidentes |
| MINAGRI | Ministerio de Agricultura |

| | |
|----------------|---|
| ADDV | Áreas desprovistas de vegetación |
| NBR | Normalized Burn Ratio |
| NDVI | Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada |
| NREF | Nivel de Referencia de Emisiones Forestales |
| NRF | Nivel de Referencia Forestal Subnacional de Chile |
| ODEPA | Oficina de Estudios y Políticas Agrarias |
| OLI | Operational Land Imager |
| RCV max | Relative Change Vector |
| REDD+ | Reducción de emisiones por deforestación y degradación de los Bosques |
| SIMEF | Sistema Integrado de Monitoreo de Ecosistemas Forestales Nativos |
| TIRS | Thermal Infrared Sensor |
| UMC | Unidad Mínima Cartografiable |
| USGS | Servicio Geológico de los Estados Unidos |
| UTM | Sistema de coordenadas geográficas |
| WGS-84 | Sistema Geodésico Mundial 1984 |



El Sistema Integrado de Monitoreo y Evaluación de los Ecosistemas Forestales Nativos (SIMEF) es una iniciativa impulsada por los ministerios de Agricultura y de Medio Ambiente, ejecutada por el Instituto Forestal (INFOR) y coejecutada por la Corporación Nacional Forestal (CONAF) y el Centro de Información en Recursos Naturales (CIREN). Cuenta con el apoyo y la supervisión de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), el financiamiento del Fondo para el Medio Ambiente Mundial (FMAM) y el Estado chileno.

Este proyecto nacional responde a la necesidad de contar con información integrada, estandarizada y actualizada sobre los ecosistemas forestales nativos de Chile, para lo cual se estableció un modelo de trabajo interinstitucional coordinado entre CONAF, CIREN e INFOR.

Su objetivo es apoyar con información actualizada para la toma de decisiones que aporten al uso sostenible de los recursos forestales nativos, y contribuir a una mejor calidad de vida de las comunidades que cohabitan con el bosque y de la sociedad en su conjunto.

A cuatro años de ejecución de la Iniciativa SIMEF, uno de los logros es haber ampliado en superficie la cobertura del Inventario Forestal Nacional, que ahora cubre más de 14 millones de hectáreas e incorpora territorios inexplorados de las islas al sur de Chiloé. A su vez, se expandió la concepción de inventario y monitoreo, incluyendo, junto con las dimensiones biofísicas, los componentes socioeconómicos y de biodiversidad que son consustanciales a los bosques nativos.

Otros logros sustantivos fueron la actualización y mejora de la metodología de evaluación del cambio de uso de la tierra, reduciendo su ciclo de actualización de cinco a dos años, lo que permitió, entre otras materias, dar una respuesta más eficiente a los compromisos internacionales de Chile en materia de cambio climático, y al mismo tiempo elaborar protocolos y manuales consensuados.

De esta manera, SIMEF pone al país a la vanguardia del conocimiento de sus bosques y ecosistemas forestales permitiendo evaluar, entre otros, el stock de carbono, así como los cambios y proyecciones del mismo en el tiempo, materia de alta trascendencia ante la situación que afecta al planeta.

La presente publicación refleja parte de las actividades y resultados alcanzados durante estos cuatro años de trabajo del SIMEF y pretende ser un aporte para la consolidación de un sistema de monitoreo de los ecosistemas forestales nativos de Chile.



Con el fin de cumplir con los compromisos internacionales adquiridos por Chile ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), ante la Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (CNULD) y ante el Convenio sobre la Diversidad Biológica (CDB), la Corporación Nacional Forestal (CONAF) se convirtió en el agente principal de desarrollo de actividades que buscan reducir las emisiones derivadas de la deforestación y la degradación, y aumentar la existencia de carbono forestal dentro del contexto de actividades definidas como REDD+ (ENCCRV, 2016).

De esta manera, en el marco de los objetivos del SIMEF, CONAF se propuso como meta al año 2019 el desarrollo e implementación de una metodología que permita generar una cartografía a escala nacional para la representación del uso y cambio de uso de la tierra con énfasis en el bosque nativo. Para el cumplimiento de dicho propósito, se hacía necesario automatizar la metodología de detección de cambios y mejorar la periodicidad y escala de actualización de los métodos utilizados hasta el momento, como son el Catastro de Recursos Vegetacionales (CONAF, 2016) y los monitoreos regionales, entre otros.

Los métodos semiautomatizados para la detección de cambios mediante el empleo de imágenes satelitales representan una mejora sustancial si se consideran la visión panorámica, la frecuencia temporal y la resolución espacial que estas imágenes ofrecen. Es así como se analizaron una serie de estos métodos, además de técnicas de teledetección para captar cambios de uso de la tierra, los que en una primera instancia se aplicaron a un área piloto (provincia de Osorno y Llanquihue, Región de Los Lagos). Los resultados fueron expuestos en un taller de expertos que convocó a

académicos y profesionales especialistas en el manejo de técnicas y metodologías de teledetección en diferentes áreas temáticas (académicos de la Universidad de Chile y de la Universidad Austral de Chile, profesionales de la FAO, del Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN), de la Corporación Nacional Forestal (CONAF) y del Instituto Forestal (INFOR), quienes seleccionaron el método Multiíndice o MIICA (Jin *et al.*, 2013) de entre otros tres (Fotointerpretación con *Collect Earth*, Análisis de Componentes Principales o Segmentación y Fusión de Imágenes). La discusión y evaluación se enfocó en los detalles técnicos de las metodologías expuestas, y por medio de una evaluación multicriterio mediante método AHP, en la que se ponderaron la precisión, la exactitud, los costos y la interoperabilidad, se optó por la metodología Multiíndice como la más apropiada para la obtención del mapa de cambios de usos de la tierra.

Este método se basa en la combinación de cuatro índices espectrales (dNBR, dNDVI, RCVmax, y CV), los que, a través de reglas de integración, entregan una cobertura de cambio de uso de la tierra, e indican la magnitud y direccionalidad de dicho cambio (pérdidas y ganancias).

En primera instancia, se implementó en el área de estudio definida en los niveles de referencia de emisiones forestales subnacional (CONAF, 2016), correspondiente a las regiones del Maule, Biobío, La Araucanía, Los Ríos y Los Lagos, pero cabe mencionar que este protocolo se podría poner en funcionamiento a nivel nacional.

La metodología MIICA utilizó imágenes del sensor *Landsat 8*, y fue aplicada a través de una serie de códigos en lenguaje de programación (*Javascript*, *R*) complementados con procesamientos en la nube de *Google Earth Engine*, con programas de SIG y el *software R*, con el objetivo de obtener un mapa de cambios de usos de la tierra eficiente. Cabe mencionar que la metodología MIICA planteada por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) no se ajusta a la realidad de Chile, por lo cual fue necesario adaptarla y enfocarla principalmente en la determinación de umbrales empíricos para definir los cambios de cobertura en bosque (ganancias y pérdidas) para los diferentes índices espectrales utilizados.

El mapa de cambios de usos de la tierra es un insumo de información básica para que Chile pueda presentar ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC) el Anexo de resultados REDD+ incluido en el Informe Bienal de Actualización del año 2018. Este es considerado un elemento obligatorio para aquellos países en desarrollo que pretenden participar en la fase de pagos por resultados de este enfoque de políticas para la reducción de emisiones por deforestación y degradación forestal y el incremento de absorciones por el aumento de las reservas de carbono forestal, el manejo sustentable y la conservación de los bosques.

Capítulo 1

Objetivos y alcances

Objetivo general

El objetivo del presente documento técnico es describir los pasos necesarios para generar cartografía temática y reportes estadísticos a nivel nacional sobre la extensión, distribución y cambios de la cobertura de uso de la tierra, a partir del procesamiento digital de imágenes satelitales, de manera que permita su réplica y reconstrucción.

Objetivos específicos

- a. Establecer una metodología para la evaluación del uso y cambio del uso de la tierra con periodicidad bienal.
- b. Generar coberturas de uso y cambios de usos de la tierra.

Alcances

Escala

La unidad mínima cartografiable para la detección de cambios de usos de la tierra corresponde a 3 píxeles de la imagen satelital *Landsat 8*, es decir, 0,27 ha.

Público objetivo

El siguiente protocolo de trabajo está dirigido a todo el personal de CONAF y profesionales del sector que trabajen en el monitoreo de cambios de usos de la tierra, convirtiéndose así en una herramienta transferible e interoperable. Además, su finalidad es ser una guía que oriente y promueva el desarrollo semiautomatizado del monitoreo de cambios de usos de la tierra empleando insumos ya existentes en la institución (*software*, *hardware*, bases de datos, catastros, etc.).

Errores

Como se trabaja con imágenes satelitales ópticas, es esperable que la metodología planteada no genere información exacta para aquellas regiones de Chile que presentan una nubosidad constante (por ejemplo, de la Región de La Araucanía a la Región de Magallanes), ya que para un funcionamiento adecuado requiere de imágenes con la menor presencia de nubes. En vista de esto, se tiene que recurrir a información auxiliar a modo de complemento.

Herramientas disponibles

Considerando la disponibilidad, ventajas y capacidad de diversos *softwares* libres y de código abierto (*open-source*), este protocolo ha sido desarrollado en su mayoría con este tipo de herramientas para que pueda ser reproducido sin mayores dificultades.



Capítulo 2

Consideraciones técnicas

Sistema de clasificación

Con el fin de clasificar todas las superficies de la tierra de una manera más práctica, en el desarrollo de esta metodología se implementó una categorización mixta basada en las directrices del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero, las que definieron categorías de uso de primer nivel (en adelante usos IPCC), y en la Carta de Ocupación de la Tierra (COT) del catastro de recursos vegetacionales de CONAF (catastro del bosque nativo) para las categorías de segundo nivel (en adelante subusos o simplemente usos). Para esto, las categorías utilizadas (Catastro de Recursos Vegetacionales de Chile o Catastro de Bosque Nativo) se obtuvieron del Consolidado de documentos del proyecto de actualización y monitoreos de los Catastros y Recursos Vegetacionales de Chile (CONAF, 2018); estos usos y subusos se clasificaron en usos IPCC (IPCC, 2006) y posteriormente se reagruparon en diferentes subusos para mejorar la representatividad en las categorías de uso de la tierra (Cuadro 1).



Cuadro 1: *Sistema de clasificación de usos de la tierra*

| Subusos catastro bosque nativo (CONAF) | Usos-IPCC | Subusos |
|--|----------------------|----------------------------|
| Ciudad-Pueblo-Zona industrial; Minería industrial | Asentamientos | Áreas urbanas-industriales |
| Terreno de uso agrícola; Rotación cultivo-pradera | Tierras de cultivo | Terrenos agrícolas |
| Estepa altiplánica; Estepa andina norte; Pradera anual; Pradera perenne; Estepa andina central; Estepa patagónica | Praderas | Praderas |
| Matorral pradera; Matorral; Matorral con suculentas; Formación de suculentas; Plantación de arbustos | | Matorral |
| Matorral arborescente | | Matorral arborescente |
| Plantación adulta; Plantación joven o recién cosechada; Plantación con exóticas asilvestradas | Tierras forestales | Plantaciones |
| Bosque nativo adulto; Bosque nativo renoval; Bosque nativo adulto-renoval; Bosque nativo achaparrado; Bosque mixto; Bosque nativo-plantación; Bosque nativo con exóticas asilvestradas | Tierras forestales | Bosque nativo |
| Vegetación herbácea en orilla de río; Marisma herbácea; Ñadi herbáceo y arbustivo; Turbal; Bofedal; Vega; Otros terrenos húmedos | Humedales | Humedales |
| Mar; Río; Lago-Laguna-Embalse-Tranque | | Cuerpos de agua |
| Playa y duna; Afloramiento rocoso; Terreno sobre el límite altitudinal de la vegetación; Corrida de lava y escorial; Derrumbe sin vegetación; Salar; Otros sin vegetación; Caja de río | Otros usos del suelo | Áreas sin vegetación |
| Nieve; Glaciar; Campo de hielo | | Nieves y glaciares |

Fuente: CONAF, 2019.

En el resultado final de los mapas de usos y cambios de usos de la tierra 2016 se muestran las categorías propias del catastro, y esta clasificación es utilizada en el desarrollo del proceso metodológico, lo que facilita las labores de procesamiento y posterior atribución de las coberturas.

Descripción de las categorías de uso de la tierra

A modo de referencia, y a partir de las definiciones de los usos de la tierra dadas por el IPCC (2006), las categorías empleadas en este trabajo se describen y detallan de la siguiente manera:

- **Asentamientos:** Esta categoría comprende todas las tierras desarrolladas, incluidas la infraestructura de transporte y los asentamientos humanos de cualquier tamaño, a menos que ya estén considerados en otras categorías. Esto debe ser coherente con las definiciones nacionales.
- **Tierras de cultivo:** Esta categoría abarca la tierra cultivada, incluidos arrozales y los sistemas de agrosilvicultura, en los que la estructura de la vegetación se encuentra por debajo de los umbrales utilizados para la categoría de tierras forestales.
- **Pastizales o praderas:** Esta categoría engloba las tierras de pastoreo y los pastizales que no se consideran tierras de cultivo, además de los sistemas con vegetación boscosa y otra vegetación herbácea, como las hierbas y la maleza que están por debajo de los valores umbrales utilizados en la categoría de tierras forestales. La categoría encierra todos los pastizales, desde las tierras sin cultivar hasta las zonas de recreo, así como los sistemas silvopastoriles coherentes con las definiciones nacionales.
- **Tierras forestales:** Esta categoría incluye toda la tierra con vegetación boscosa coherente con los valores umbrales utilizados para definir las tierras forestales en el inventario nacional de gases de efecto invernadero. Incluye también los sistemas con una estructura de vegetación que actualmente se encuentra por debajo, pero que potencialmente podría alcanzar *in situ* dichos valores.
- **Humedales:** Esta categoría comprende las zonas de extracción de turba y la tierra que está cubierta o saturada de agua durante todo el año o parte de este (por ejemplo, las turberas) y que no se encuentran dentro de las categorías de tierras forestales, tierras de cultivo, pastizal o asentamientos. Incluye los reservorios como subdivisiones gestionadas, y los ríos naturales y los lagos como subdivisiones no gestionadas.
- **Otros usos de la tierra:** Esta categoría abarca el suelo desnudo, roca, hielo y todas aquellas zonas que no estén en ninguna de las otras cinco categorías. Permite que el total de las superficies de tierra identificadas coincida con la superficie nacional de la que se tengan datos. Si hay información disponible, se aconseja que los países clasifiquen las tierras no gestionadas dentro de las categorías de uso de la tierra descritas anteriormente (por ejemplo, dentro de las tierras forestales no gestionadas, los pastizales no gestionados y los humedales no gestionados). Esto mejora tanto la transparencia como la capacidad para realizar el seguimiento de las conversiones del uso la tierra de determinados tipos específicos de tierras no gestionadas en otros tipos que se encuentren dentro de las categorías anteriores.



Categorías y atributos del mapa final de cambio

De acuerdo con los requerimientos mínimos necesarios para la estimación de resultados REDD+ para el NREF/NRF (Nivel de Referencia de Emisiones Forestales/ Nivel de Referencia Forestal Subnacional de Chile), se establecen las siguientes categorías de cambios, representadas en el mapa de usos y cambios de uso de la tierra 2016:

- **Bosque nativo permanente por tipo forestal:** corresponde a la superficie reportada como bosque nativo en el “Mapa de usos y cambios de uso de la tierra 2013”. Se mantiene en la misma categoría en 2016.
- **Matorral arborescente permanente:** corresponde a la superficie reportada como matorral arborescente en el “Mapa de usos y cambios de uso de la tierra 2013”. Se mantiene en la misma categoría en 2016.
- **Plantaciones permanentes:** corresponde a la superficie reportada como plantaciones en el “Mapa de usos y cambios de uso de la tierra 2013”. Se mantiene en la misma categoría en 2016.
- **Otros usos permanentes:** corresponden a la superficie reportada como usos de la tierra diferentes a bosque nativo, matorral arborescente o plantaciones en el “Mapa de usos y cambios de uso de la tierra 2013”. Se mantienen en la misma categoría en 2016.
- **Degradación de bosque nativo:** corresponde a la superficie de bosque nativo reportada como matorral arborescente o plantaciones en los mapas de 2013 y 2016, especificando el uso final de la tierra.
- **Degradación de matorral arborescente:** corresponde a la superficie de matorral arborescente reportada como plantaciones en los mapas de 2013 y 2016.
- **Deforestación de bosque nativo:** corresponde a la superficie de bosque nativo reportada como otros usos de la tierra en los mapas de 2013 y 2016, especificando el uso final de la tierra.
- **Deforestación de matorral arborescente:** corresponde a la superficie de matorral arborescente reportada como otros usos de la tierra en los mapas de 2013 y 2016, especificando el uso final de la tierra.
- **Aumento a bosque:** corresponde a la superficie de otros usos de la tierra, del matorral arborescente o de plantaciones reportada como bosque nativo en los mapas de 2013 y 2016.
- **Aumento a matorral arborescente:** corresponde a la superficie de otros usos de la tierra o de plantaciones reportada como matorral arborescente en los mapas de 2013 y 2016.
- **Otros usos a plantaciones:** corresponde a la superficie de otros usos de la tierra reportada como plantaciones en los mapas de 2013 y 2016.
- **Cambios de otros usos a otro uso:** corresponde a la superficie de otros usos de la tierra que cambia a otro uso diferente en los mapas de 2013 y 2016.

A partir de los requerimientos del informe bienal de actualización, el Mapa de cambios de usos de la tierra 2016 es generado en formato vectorial (*shapefile*) para dar continuidad a la serie INGEI 1990-2018, el cual debe contar con los atributos especificados en el Cuadro 2.

Cuadro 2: Atributos integrados en mapa de cambios de usos de la tierra 2016

| Nombre del atributo | Descripción del atributo | Fuente |
|---------------------|---|---|
| CL1997 | Código uso en el año 1997 combinado (Id_uso 97+id_sub_97+id_Est_97+id_TIFO_97+id_STIF_97) | Catastro 1997 |
| ID_USO_97 | Código uso | |
| ID_SUB_97 | Código subuso | |
| ID_EST_97 | Código estructura | |
| ID_TIFO_97 | Código tipo forestal | |
| ID_STIF_97 | Código subtipo forestal | |
| T_F_97 | Descriptor tipo forestal | |
| S_TF_97 | Descriptor subtipo forestal | |
| CLYYYY | Código uso en el año YYYY Combinado (Id_uso_YY+id_sub_YY+id_Est_YY+id_TIFO_YY+id_STIF_YY) | Actualizaciones históricas regionales de catastro: -Maule: 2009, 2016 -Biobío: 2008, 2014 -La Araucanía: 2007, 2013 -Los Ríos: 2006, 2013 -Los Lagos N: 2006, 2013 -Los Lagos S: 2013 |
| ID_USO_YY | Código uso | |
| ID_SUB_YY | Código subuso | |
| ID_EST_YY | Código estructura | |
| ID_TIFO_YY | Código tipo forestal | |
| ID_STIF_YY | Código subtipo forestal | |
| T_F_YY | Descriptor tipo forestal | |
| S_TF_YY | Descriptor subtipo forestal | |
| CL2017 | Código uso en el año 2016 combinado (Id_uso_17+id_sub_17+id_Est_17+id_TIFO_17+id_STIF_17) | Desarrollado en “Mapa de uso y cambio de uso de la tierra 2016” |
| ID_USO_17 | Código uso | |
| ID_SUB_17 | Código subuso | |
| ID_EST_17 | Código estructura | |
| ID_TIFO_17 | Código tipo forestal | |
| ID_STIF_17 | Código subtipo forestal | |
| T_F_17 | Descriptor tipo forestal | |
| S_TF_17 | Descriptor subtipo forestal | |
| T1 | Código uso inicial combinado (Id_uso97+id_sub_97+id_Est_97) | Catastro 1997 |
| USO_T1 | Descripción uso inicial combinado (uso_97+sub_97+Est_97) | |

| | | |
|--------------|---|--|
| T2 | Código uso actualización combinado (Id_uso_YY+id_sub_YY+id_Est_YY) | Actualizaciones históricas regionales, incluido en "Mapa de uso y cambio de uso de la tierra 2013" |
| USO_T2 | Descripción uso actualización combinado (uso_YY+sub_YY+Est_YY) | |
| T3 | Código uso actualización combinado (Id_uso_YY+id_sub_YY+id_Est_YY) | |
| USO_T3 | Descripción uso actualización combinado (uso_YY+sub_YY+Est_YY) | |
| T4 | Código uso actualización combinado (Id_uso_17+id_sub_17+id_Est_17) | Desarrollado en "Mapa de uso y cambio de uso de la tierra 2016" |
| USO_T4 | Descripción uso actualización combinado (uso_17+sub_17+Est_17) | |
| C_1_2 | Código de uso permanente (1) o cambio de uso (2) entre tiempo 1 y tiempo 2 | Incluido en "Mapa de uso y cambio de uso de la tierra 2013" |
| TC_1_2 | Código tipo de cambio de acuerdo con las categorías generadas | |
| DES_TC_1_2 | Descriptor tipo de cambio de acuerdo con las categorías generadas | |
| C_2_3 | Código de uso permanente (1) o cambio de uso (2) entre tiempo 2 y tiempo 3 | Incluido en "Mapa de uso y cambio de uso de la tierra 2013" |
| TC_2_3 | Código tipo de cambio de acuerdo con las categorías generadas | |
| DES_TC_2_3 | Descriptor tipo de cambio de acuerdo con las categorías generadas | |
| C_3_4 | Código de uso permanente (1) o cambio de uso (2) | Desarrollado en "Mapa de uso y cambio de uso de la tierra 2016" |
| TC_3_4 | Código tipo de cambio de acuerdo con las categorías generadas | |
| DES_TC_3_4 | Descriptor tipo de cambio de acuerdo con las categorías generadas | |
| CODREG | Código de la región (DPA) | Desarrollado en "Mapa de uso y cambio de uso de la tierra 2016" |
| Región | Nombre de la región | |
| CODPROV | Código de la provincia(DPA) | |
| Provincia | Nombre de la provincia | |
| CODCOM | Código de la comuna (DPA) | |
| Comuna | Nombre de la comuna | |
| NOM_SNASPE | Nombre de área Snaspe | Incluido en "Mapa de uso y cambio de uso de la tierra 2013" |
| Conservación | Nombre de área de conservación privada | |
| COD | Código de conservación: 0 = área no conservación, 1 = área Snaspe, 2 = área protegida privada | |
| SUP_HA | Superficie en hectáreas del polígono | Desarrollado en "Mapa de uso y cambio de uso de la tierra 2016" |

Fuente: CONAF, 2019.

Softwares requeridos para la ejecución del proyecto

- **ArcGis:** sistema de Información Geográfica (GIS). Ofrece una serie de herramientas que permiten recopilar, administrar, analizar, compartir y distribuir información georreferenciada. Es un *software* licenciado, ampliamente utilizado para procesamiento de datos en formato vectorial y ráster. En el desarrollo de este trabajo se utilizó la versión 10.2.
- **QGIS:** sistema de Información Geográfica (GIS). Integra *softwares* y una serie de herramientas que permiten recopilar, administrar, analizar, compartir y distribuir información georreferenciada. Es un *software* libre, ampliamente utilizado para procesamiento de datos en formato vectorial y ráster. En el desarrollo de este trabajo se utilizó la versión 2.18.x
- **R:** funciona en un entorno de programación, enfocado al análisis estadístico, que permite manipular datos, visualizarlos gráficamente y calcular. Es un *software* libre, ampliamente usado en múltiples áreas de investigación. Actúa a partir de una serie de “paquetes” o librerías que representan extensiones de funciones y algoritmos de procesamiento. En él se pueden crear y agregar funciones y algoritmos para la obtención de resultados específicos. En el desarrollo de este trabajo se utilizó la versión 3.4.x
- **Google Earth Pro:** plataforma de visualización de la cobertura terrestre basada en la superposición de fotografía e imagen satelital. Es una herramienta que permite visualizar, medir, recopilar y compartir información georreferenciada. Es un *software* licenciado, ampliamente utilizado para visualizar territorios en 2D y 3D a través de la disposición de una serie de imágenes satelitales multitemporales de alta resolución espacial, logrando así una visualización del territorio cercana a la realidad. En el desarrollo de este trabajo se utilizó la versión 7.1.4.x



A modo de recomendación, se sugiere utilizar las siguientes herramientas que permiten realizar diversos análisis una vez obtenidas las coberturas finales. Por ejemplo, para efectuar un proceso de validación de resultados generando matrices de confusión por uso, calcular los errores de omisión y de comisión, y obtener la precisión y exactitud global del mapa.

- **Open Foris Collect:** herramienta de *Open Foris* desarrollada por FAO. Proporciona una manera rápida, fácil y flexible de configurar encuestas con una interfaz fácil de usar. *Collect* maneja múltiples tipos de datos y reglas de validación complejas, todo en un entorno multilinguaje.
- **Collect Earth:** otra herramienta de *Open Foris*. Permite registrar datos a través de la visualización e interpretación de imágenes satelitales o fotografías aéreas de alta resolución espacial disponibles en *Google Earth*. En conjunción con *Google Earth*, *Bing Maps* y *Google Earth Engine*, los usuarios pueden utilizar esta herramienta para evaluar y monitorear usos de la tierra, cambios de usos, coleccionar una variedad de datos espacialmente explícitos, cuantificar deforestación, reforestación y desertificación, entre otras aplicaciones. La toma de datos en esta plataforma se basa en las encuestas desarrolladas en *Open Foris Collect*, y los datos tomados son registrados y almacenados en formatos de uso común para realizar los análisis posteriores.

Imágenes satelitales *Landsat 8*

Las imágenes satelitales obtenidas del sensor *Landsat 8* tienen las siguientes características (Codazzi, 2013):

- Resolución espacial de 30 m (bandas multiespectrales)
- Resolución temporal de 16 días
- Resolución espectral de 11 bandas
- Resolución radiométrica de 16 bits
- Formato de datos en GeoTIFF
- Extensión de 180 * 180 km

Fuentes de información

Sistema de monitoreo de cambios de uso del suelo y vegetación basado en el Catastro del bosque nativo

Este insumo corresponde a una actualización periódica a escala regional del catastro de recursos vegetacionales que tuvo su primera publicación el año 1997 (Cuadro 3), y representa la línea base de información cartográfica vegetal de Chile, en el que los objetivos específicos son:

- Monitorear los cambios y análisis de los procesos que afectan a los distintos usos del suelo o de la tierra, con énfasis en la vegetación (bosques, plantaciones forestales, matorrales y praderas).
- Cartografiar y caracterizar los bosques, incluidas las plantaciones forestales, otras formaciones vegetales naturales, así como también el uso del suelo en general.
- Disponer la base de datos digital georreferenciada en un sistema de uso público para la toma de decisiones.

Cuadro 3: Actualizaciones del Catastro de Recursos Vegetacionales de Chile a nivel regional

| Región | Años | Año primera actualización | Año segunda actualización | Año tercera actualización |
|--------------------|------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Arica y Parinacota | 1997 | 2014 | | |
| Tarapacá | | 2015* | | |
| Antofagasta | | 2009 | | |
| Atacama | | 2008* | | |
| Coquimbo | | 2003 | 2008 | 2015* |
| Valparaíso | | 2001 | 2013 | |
| Metropolitana | | 2001 | 2013 | |
| L.G.B. O'Higgins | | 2001 | 2005 | 2013 |
| Maule | | 1999 | 2009 | 2015 |
| Biobío | | 1998 | 2008 | 2015* |
| La Araucanía | | 2007 | 2014 | |
| Los Ríos | | 1998 | 2006 | 2014 |
| Los Lagos | | 1998 | 2006 | 2013 |
| Aysén | | 2010-2011 | | |
| Magallanes | | 2005 | | |

Fuente: CONAF, 2019.

NOTA: (*) Actualización solo para sitios prioritarios de conservación de la biodiversidad.

Trazabilidad 2013

Este insumo corresponde a una cobertura vectorial en formato *shapefile* que contiene información histórica de los cambios de usos de la tierra ocurridos a partir del inicio del catastro de recursos vegetacionales en 1997. Representa la información base de los datos de actividad para el NREF/NRF. Además, contiene una serie de atributos que describen la categoría del cambio, es decir, si el cambio corresponde a degradación, deforestación, aumento de existencia o permanece como bosque. El objetivo de este insumo cartográfico es evidenciar y registrar la trazabilidad de la dinámica del uso bosque y los demás usos de la tierra para de esta forma tener un registro histórico de cambios a nivel regional tomando como base el catastro de recursos vegetacionales nativos. Para efectos prácticos vinculados a la ejecución del proceso metodológico, los usos del catastro son transformados a las nuevas categorías de usos, anteriormente definidas, mediante un nuevo campo de atributos de subsusos.

Límites políticos y administrativos o DPA, Odepa

Este insumo corresponde a la cobertura vectorial en formato *shapefile* de los límites de la División Político-Administrativa oficial utilizados por los distintos organismos dependientes del Ministerio de Agricultura. Este archivo contiene información desagregada a nivel de comuna, provincia y región y puede ser descargada del sitio de la Infraestructura de Datos Espaciales del Ministerio de Agricultura o IDE MINAGRI en sistema de proyección cartográfico UTM.



Área de estudio

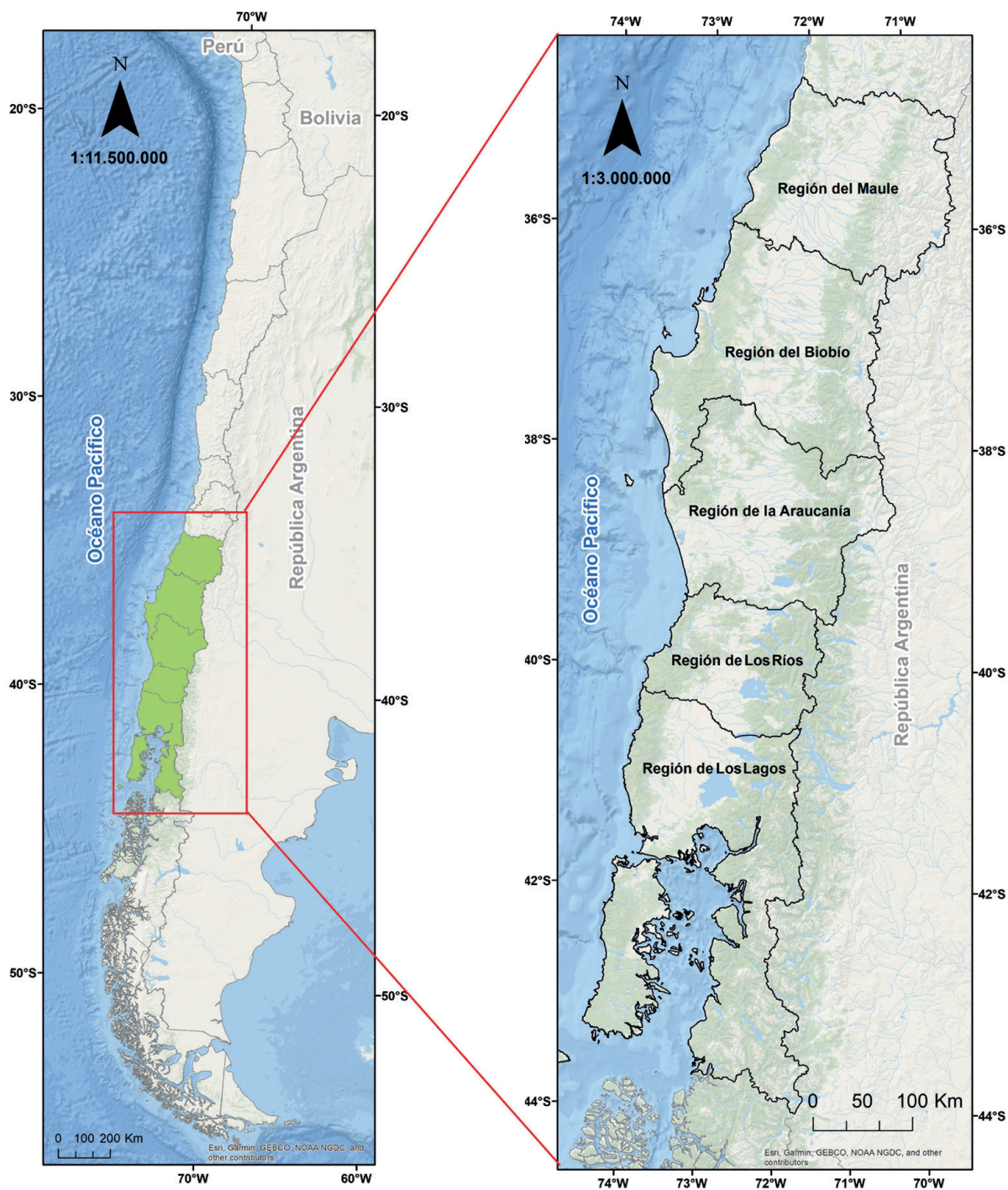
En una primera instancia, el área de estudio donde se aplicó esta metodología correspondió a las regiones del centro-sur del país (Figura 1), las cuales fueron definidas para los niveles de referencia de emisiones forestales subnacional (CONAF, 2016). Este protocolo se puede reproducir a nivel nacional.

- a. Región del Maule, con 3 034 193,6 ha de superficie.
- b. Región del Biobío, con 3 710 483,9 ha de superficie.
- c. Región de La Araucanía, con 3 180 336,7 ha de superficie.
- d. Región de Los Ríos, con 1 835 914,1 ha de superficie.
- e. Región de Los Lagos, con 4 839 333,1 ha de superficie.

Esta zona es un área con una fuerte dinámica en el uso y cambio de uso de la tierra dentro del país, en donde se concentra una gran proporción de asentamientos, tierras de cultivos, praderas, plantaciones forestales y vegetación nativa.



Figura 1: *Mapa del área de estudio*



Fuente: Imágenes de ArcGIS 10.3 de Esri. 2019. Modificado por CONAF. 2019.

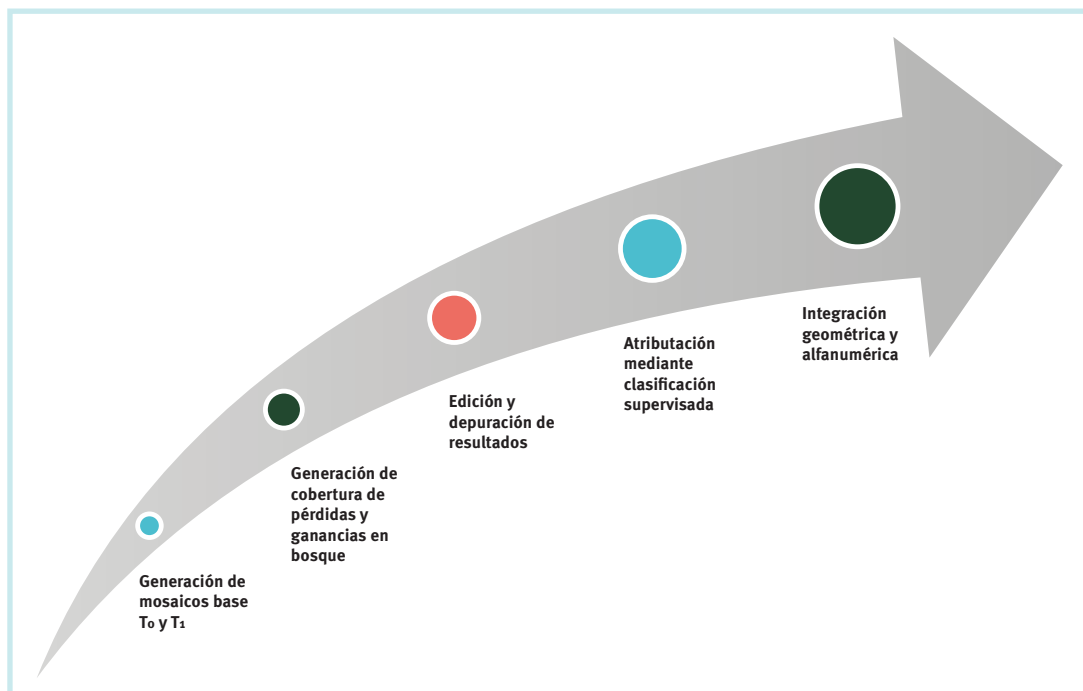
Conforme al mapa de Naciones Unidas.

Capítulo 3

Desarrollo metodológico

En general, el proceso metodológico puede resumirse en cinco etapas, cada una de ellas con distintos procesos y productos intermedios obtenidos tras la aplicación de la metodología de detección de cambios de usos de la tierra, las cuales serán explicadas detalladamente en este apartado.

Figura 2: *Etapas del proceso metodológico*



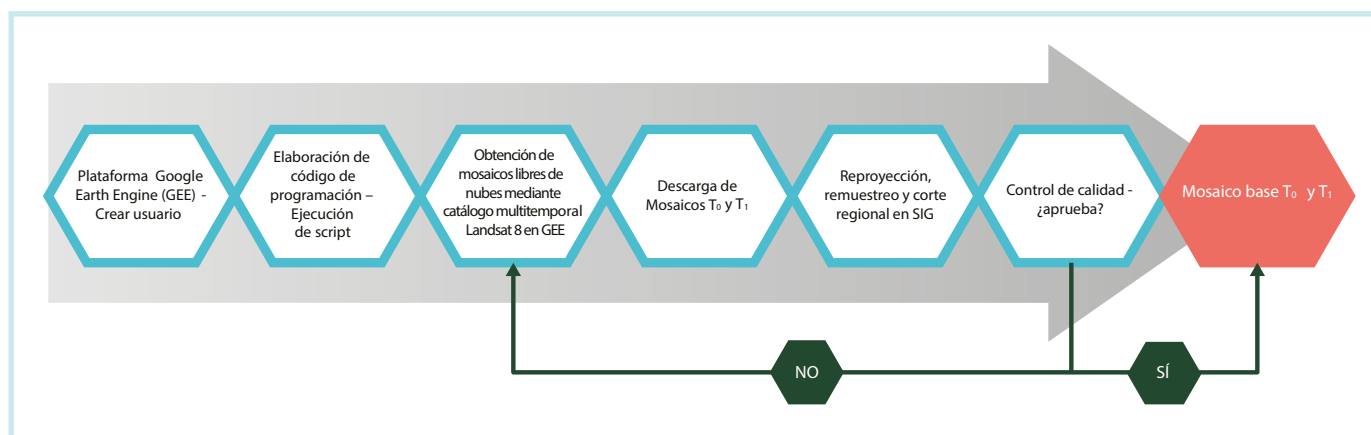
Fuente: CONAF, 2019.

Etapa 1: Generación de mosaicos base T_0 y T_1

El principal objetivo de esta primera etapa es generar los mosaicos para los períodos en que es evaluada la detección de cambios de uso de la tierra, los que son elaborados a partir de una serie de imágenes *Landsat* 8 en tiempo inicial (T_0) y tiempo final (T_1). Estas presentan la menor cantidad de píxeles con nubes y sombras de nube y deben tener coincidencia geométrica (corregistro), el mismo sistema de proyección cartográfico (WGS-84, UTM 18S o EPSG: 32 718) y resolución espacial de 30×30 m para que las escenas utilizadas puedan ser comparables.

Para la obtención de los mosaicos base se deben realizar una serie de procedimientos que se resumen en la siguiente figura y se describen a continuación:

Figura 3: Resumen metodológico de Etapa 1: Generación de mosaicos base T_0 y T_1



Fuente: CONAF, 2019.

Elaboración de código de programación en plataforma *Google Earth Engine*

Para lograr el objetivo, se elaboró y aplicó un código en lenguaje de programación *Javascript* para *Google Earth Engine* (GEE), el cual permite descargar, seleccionar y procesar las distintas imágenes satelitales para hacer el proceso más eficiente y automatizado.

La principal ventaja de este código es que hace posible generar un mosaico pixel a pixel, es decir, selecciona el mejor pixel de diferentes escenas *Landsat* para un área de interés (AOI) o estudio. Para esto se define un rango de fechas de la serie temporal de imágenes satelitales disponibles en el AOI, tanto para T_0 como para T_1 . Posteriormente, el algoritmo selecciona el mejor pixel de todas las escenas disponibles (mejor pixel se refiere a uno sin nubes o sombras de nubes, y que tenga el más alto valor del índice NDVI disponible, de manera que siempre se puedan comparar los píxeles con la mayor vigorosidad de la vegetación entre las diferentes temporalidades). La generación de un mosaico pixel a pixel da la ventaja de que se puede contar con más información del AOI, porque si una escena presenta un área con nubes, esta puede ser reemplazada con los píxeles de otra fecha, por tanto, hay una menor pérdida de información.

A continuación se presenta una breve descripción general de algunas de las funciones de *GEE* utilizadas en este *script* para tener una idea general de cómo trabaja.

- **Definición de área de estudio:** se aplica la función “*.filterBounds*” para definir el área de interés (AOI) para el procesamiento de los diferentes códigos de programación en *GEE*. El AOI fue definido por un polígono realizado a mano alzada en la interfaz de *GEE*, el cual marca el límite regional de manera referencial (el polígono delimita el AOI por fuera del límite regional oficial).
- **Definición de imágenes que se utilizarán:** se aplica la función “*ee.ImageCollection*” en *GEE* para seleccionar el tipo de sensor que se utilizará, en este caso *Landsat 8 OLI*, con escenas ortorectificadas y con reflectancia calibrada al tope de la atmósfera (TOA). El nombre de esa colección de imágenes en *GEE* es “LANDSAT/LCo8/Co1/T1_TOA”.
- **Definición del rango de fechas:** se aplica la función “*.filterDate*” para definir el alcance temporal de la selección de imágenes, considerando el criterio de selección del mejor pixel anteriormente descrito. Para esto, fue necesario definir una fecha inicial y una final para el Tiempo 0 (T_0) y una fecha inicial y una final para Tiempo 1 (T_1).

El Tiempo 0 (T_0) corresponde al año de la última actualización del catastro de bosque nativo utilizado en los “Mapas de usos y cambios de uso de la tierra 2013”, que para la mayoría de las regiones en estudio fue el 2013, exceptuando la región del Maule, para la cual la última actualización fue el 2014. Por otra parte, el Tiempo T_1 corresponde al período primavera-verano del año 2016 (Cuadro 4).

Cuadro 4: *Imágenes Landsat 8 utilizadas para el período T_0 y T_1 mediante repositorio de Google Earth Engine (GEE)*

| Región | T_0 inicio: Fechas de adquisición (dd/mm/aaaa) | T_0 fin: Fechas de adquisición (dd/mm/aaaa) | T_1 inicio: Fechas de adquisición (dd/mm/aaaa) | T_1 fin: Fechas de adquisición (dd/mm/aaaa) |
|--------------|--|---|--|---|
| Maule | 01/11/2014 | 31/03/2015 | 01/11/2016 | 31/12/2016 |
| Biobío | 01/10/2013 | 31/01/2014 | 01/11/2016 | 31/12/2016 |
| La Araucanía | 01/10/2013 | 31/01/2014 | 01/11/2016 | 03/01/2017 |
| Los Ríos | 01/10/2013 | 31/01/2014 | 01/11/2016 | 03/01/2017 |
| Los Lagos | 01/10/2013 | 31/01/2014 | 01/11/2016 | 31/12/2016 |

Fuente: CONAF, 2019.

- **Generación de máscara libre de nubes y sombra de nubes:** para esto se confeccionó un algoritmo con una serie de funciones propias de *GEE*, las cuales utilizan y combinan información de la banda BQA propia del sensor *Landsat 8 OLI*, cuyos valores son proporcionados en bits procesados para determinar la calidad de un pixel.

Como resultado de la aplicación de esta máscara se generan zonas sin información al interior de los mosaicos debido a que no se encontraron píxeles sin presencia de nubes y sombras de nubes dentro del rango de fechas evaluado, tanto para el mosaico T_0 como para el T_1 . El resumen de la superficie sin información en los mosaicos regionales se muestra en el Cuadro 5.

Cuadro 5: *Áreas sin información por región, sumando las superficies de los mosaicos T_0 y T_1*

| Región | Superficie sin información (ha) | Superficie total regional (ha) | Porcentaje sin información |
|--------------|---------------------------------|--------------------------------|----------------------------|
| Maule | 296 527,7 | 3 034 193,6 | 9,8 |
| Biobío | 380 896,6 | 3 710 483,9 | 10,3 |
| La Araucanía | 967 703,7 | 3 180 336,7 | 30,4 |
| Los Ríos | 1 016 168,2 | 1 835 914,1 | 55,3 |
| Los Lagos | 2 978 056,6 | 4 839 333,1 | 61,5 |

Fuente: CONAF, 2019.

Para revertir esta situación, y contar con mosaicos regionales que tengan la mayor cantidad de superficie con información, se decide limitar el área sin información a un 5% del total regional en función de la calidad del trabajo. Por tanto, se resuelve rellenar esas zonas de vacíos de información con píxeles de otras fechas. Estas zonas están constituidas por píxeles de todo un año calendario, tanto para T_0 como para T_1 . El Cuadro 6 indica los rangos de fechas para los mosaicos T_0 y T_1 .

Cuadro 6: *Imágenes Landsat 8 utilizadas para rellenar las zonas sin información en el período T_0 y T_1*

| Región | T_0 inicio: Fechas de adquisición (dd/mm/aaaa) | T_0 fin: Fechas de adquisición (dd/mm/aaaa) | T_1 inicio: Fechas de adquisición (dd/mm/aaaa) | T_1 fin: Fechas de adquisición (dd/mm/aaaa) |
|--------------|--|---|--|---|
| Maule | 01/01/2014 | 31/12/2015 | 01/01/2016 | 31/12/2016 |
| Biobío | 01/01/2013 | 31/12/2014 | 01/01/2016 | 31/12/2016 |
| La Araucanía | 01/01/2013 | 31/12/2014 | 01/01/2016 | 31/12/2016 |
| Los Ríos | 01/01/2013 | 31/12/2014 | 01/01/2016 | 31/12/2016 |
| Los Lagos | 01/01/2013 | 31/12/2014 | 01/01/2016 | 31/12/2016 |

Fuente: CONAF, 2019.

Con la inclusión de estos nuevos pixeles, la superficie de zonas sin información presenta una disminución considerable (Cuadro 7), por lo que se obtiene una mayor superficie del territorio para ser analizada.

Cuadro 7: Área sin información por región al incluir nuevos pixeles de un rango de fecha ampliado

| Región | Superficie sin información (ha) | Superficie total regional (ha) | Porcentaje sin información |
|--------------|---------------------------------|--------------------------------|----------------------------|
| Maule | 2 020,50 | 3 034 193,60 | 0,07 |
| Biobío | 9 941,49 | 3 710 483,90 | 0,26 |
| La Araucanía | 428,85 | 3 180 336,70 | 0,01 |
| Los Ríos | 113,85 | 1 835 914,10 | 0,00 |
| Los Lagos | 1 736,91 | 4 839 333,10 | 0,04 |

Fuente: CONAF, 2019.

Obtención de mosaicos libres de nubes mediante catálogo multitemporal de imágenes Landsat 8

Los mosaicos generados a partir de las imágenes satelitales *Landsat 8 OLI* y que presentan la mayor cantidad de pixeles libres de nubes y sombras de nubes fueron descargados y almacenados en *Google Drive*. Estos son revisados en cualquier *software* de SIG de manera de asegurarse de que contengan pixeles de 30*30 m y que estén en el sistema de proyección WGS 1984 UTM 18S.

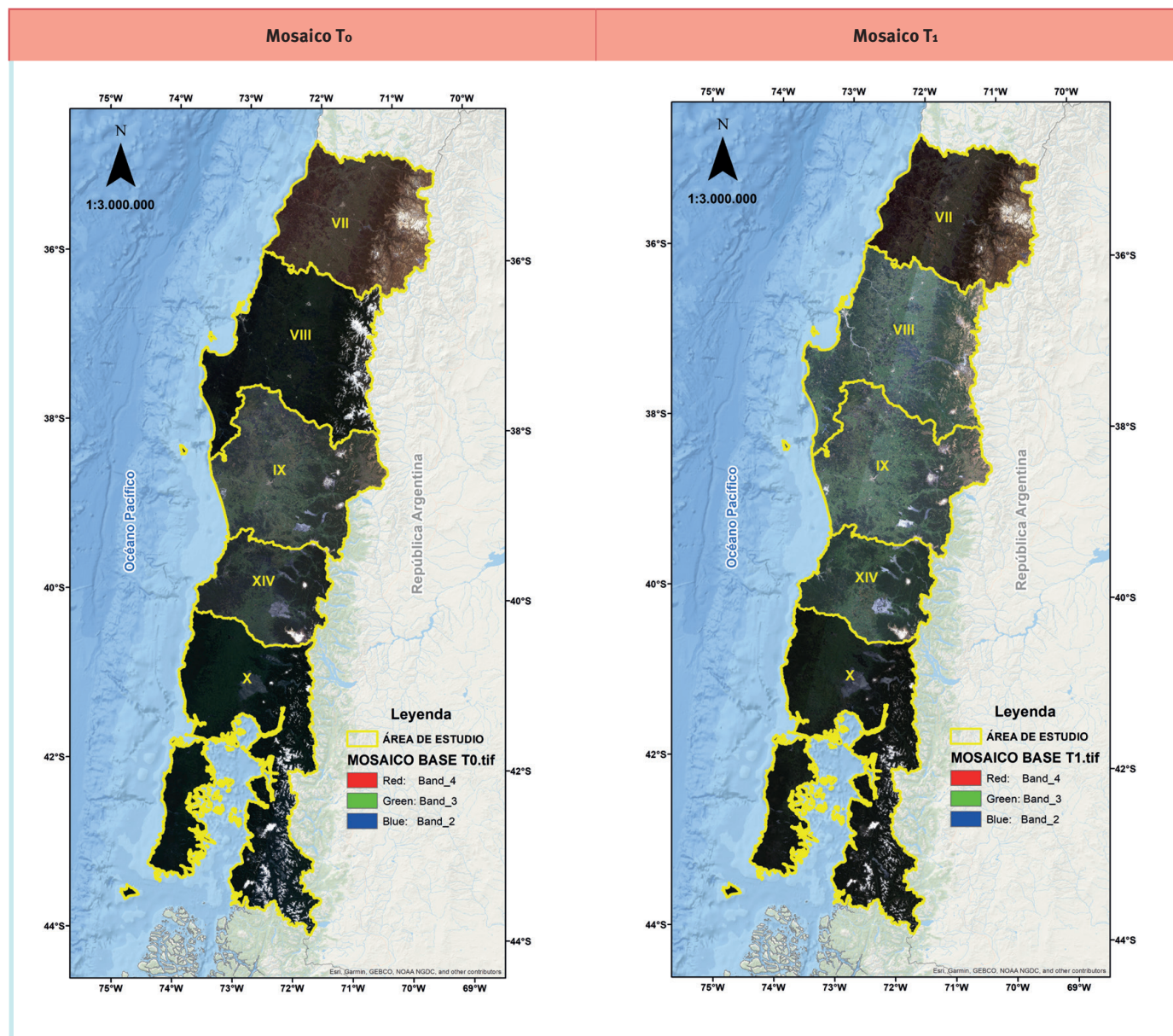
Posteriormente, se debe realizar el corte por el límite de cada región, debido a que se encuentran cortados por un límite referencial, para así llevar a cabo las diferentes etapas de esta metodología a nivel regional. El corte de los mosaicos se efectuó en un *software* de SIG (*ArcGis* o *QGIS*) utilizando como base vectorial las divisiones político-administrativas (DPA) de la cobertura realizada por Odepa (Odepa, 2015). Cabe destacar que cada mosaico cortado por el límite regional es revisado y validado visualmente en su calce geométrico y que para cada región los mosaicos T_0 y T_1 deben ser exactamente iguales en extensión y en el número de filas y columnas.



Mosaicos base para los tiempos T_0 y T_1

La expresión espacial de estos mosaicos generados se muestra en la Figura 4.

Figura 4: *Mosaicos T_0 y T_1*



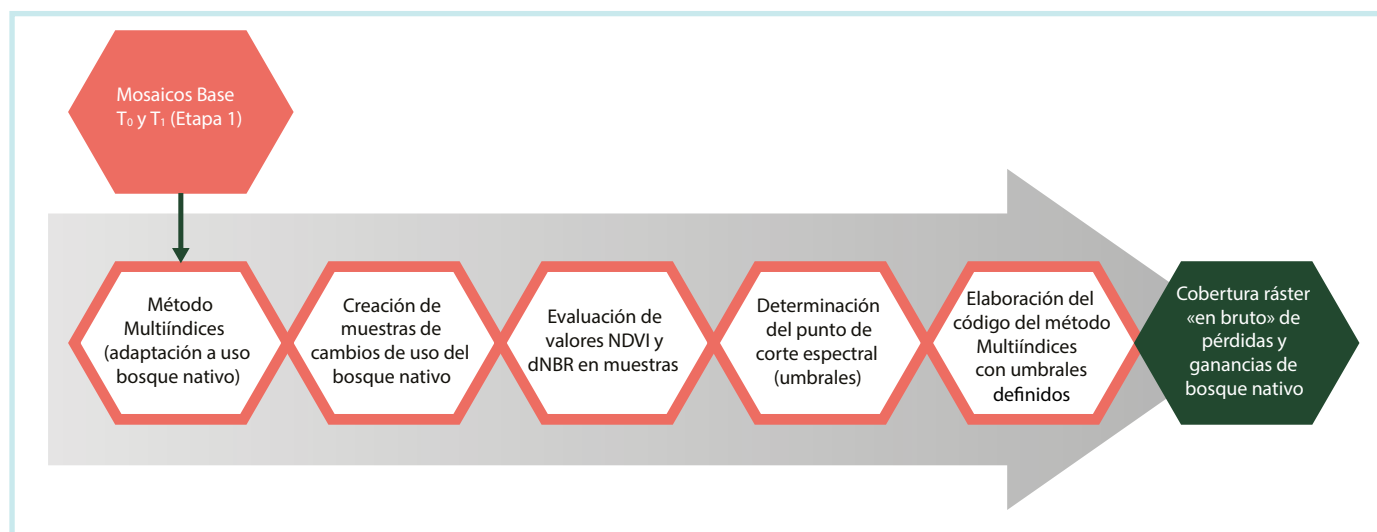
Fuente: Imágenes de ArcGIS 10.3 de Esri. 2019. Modificado por Equipo SIMEF- CONAF. 2019.

Conforme al mapa de Naciones Unidas.

Etapa 2: Generación de coberturas de pérdidas y ganancias en bosques

El objetivo principal de esta etapa es alcanzar las coberturas ráster de pérdidas y ganancias en bosque nativo mediante la aplicación del método Multiíndices (adaptado) en los mosaicos base T_0 y T_1 obtenidos en la etapa anterior. Para ello, fue necesario determinar umbrales empíricos para los índices espectrales NDVI y dNBR de manera de especificar un punto de corte que se define cuando se detecta un cambio del uso del bosque nativo a otros usos o viceversa. Estas coberturas son llamadas “en bruto”, porque en la posterior etapa se les aplica una serie de geoprocursos para depurar, suavizar y mejorar la geometría de las zonas detectadas como cambios de uso.

Figura 5: Resumen metodológico de Etapa 2: Generación de coberturas de pérdidas y ganancias en bosques



Fuente: CONAF, 2019.

Método multiíndices

Tras la realización de un taller de expertos que convocó tanto a profesionales como a académicos vinculados a técnicas y metodologías de teledetección y percepción remota aplicadas a la temática de uso y cambios de uso de la tierra, realizado en Santiago durante el año 2016, se determinó que la metodología Multiíndices o MIICA (Jin *et al.*, 2013) era la más apropiada. Para esto se analizaron diversas metodologías de detección de cambios de usos de la tierra, y tras una evaluación multicriterio, se seleccionó este método porque satisface una serie de normas específicas y propósitos, como la actualización con mayor periodicidad del catastro de los recursos vegetacionales, la generación de información base para dar cumplimiento a los compromisos de la estrategia de cambio climático, y también porque puede ser un apoyo a las actividades de fiscalización forestal y los compromisos del proyecto SIMEF.

Los criterios evaluados durante el taller de expertos se describen a continuación:

- a. **Precisión:** la precisión de MIICA está asociada a la unidad mínima cartografiable de 0,27 ha vinculada a las imágenes del sensor *Landsat 8*. Estas imágenes proveen las bandas espectrales necesarias para calcular los índices espectrales ocupados por MIICA.
- b. **Exactitud:** la exactitud de MIICA está asociada al acierto de la metodología en la detección de cambios (ganancias y pérdidas). La exactitud del método se obtiene al calcular la matriz de confusión de la Clasificación Supervisada *Random Forest* (CSRF) sobre los polígonos de cambios detectados con MIICA. Cada región y cada clase (uso de la tierra) tienen su propia exactitud. De esta manera, se obtiene la exactitud de MIICA de manera indirecta. Esta validación debería realizarla un ente externo.
- c. **Costos:** el costo de MIICA se desglosa en tres ítems:
 - **Terreno:** el terreno está reservado solo para la etapa de validación de los polígonos de cambio (que debería ser hecha por un ente externo). Las áreas de entrenamiento se realizan con la herramienta *Google Earth* e imágenes del sensor *Landsat 8*, y se complementan con la cobertura vectorial del catastro del bosque nativo por región.
 - **Horas persona:** esta metodología está elaborada de manera que los procesos ejecutados sean aplicados de forma semiautomatizada, con menos investigación y más aplicación. Por tanto, se ha invertido tiempo en desarrollar y reproducir una serie de algoritmos de procesamiento de datos ráster y vectoriales, descritos en un protocolo de trabajo, con el objetivo de que la metodología pueda ser copiada por otros operadores (sin mayor complejidad) en un menor tiempo de procesamiento.
 - **Software:** para reducir costos en este ítem se ha priorizado el trabajo de procesamiento de datos en *softwares* libres. Existen algunos procesos (10%, aproximadamente) que se realizan en *softwares* de pago (*ArcGis* principalmente), mientras que el resto (90%) se hace en *softwares* libres (*R*, *Qgis*, *Google Earth*, *Google Earth Engine*).
- d. **Interoperabilidad:** este criterio está enfocado en que todos y cada uno de los procesos ejecutados por la metodología MIICA sean reproducibles por operarios de CONAF en regiones. De esta manera, se elaboró un protocolo de trabajo en que se detalla cada proceso ejecutado: cómo se hizo y qué herramientas y *softwares* se utilizaron. Los *scripts*, algoritmos y procesos están definidos paso a paso.



La metodología Multiíndices se basa en la combinación de cuatro índices espectrales que, a través de ciertas reglas de integración, entregan una cobertura de cambio de uso de la tierra e indican su magnitud y direccionalidad (pérdidas y ganancias). Para esto, es necesario realizar pruebas empíricas de los umbrales.

Los índices utilizados en este método son: dNBR (*Normalized difference burn ratio*), dNDVI (*Normalized difference vegetation index*), CV (*Change Vector*), RCVmax (*Relative Change Vector*). Su comportamiento y aporte al método se describe a continuación:

dNBR

Índice ocupado para el monitoreo y detección de cambios, en magnitud y dirección, producidos por incendios y por alteraciones en las condiciones de humedad de la vegetación. Es altamente sensible a la regeneración del bosque y a cosechas debido a que detecta variaciones en el contenido de humedad de la vegetación (banda del infrarrojo medio) y alteraciones en la estructura interna de la vegetación (banda del infrarrojo cercano) (Key y Benson, 2005).

Ecuación 1. Normalized difference burn ratio, dNBR.

$$dNBR = \frac{(B_{14} - B_{17})}{(B_{14} + B_{17})} - \frac{(B_{24} - B_{27})}{(B_{24} + B_{27})}$$

donde B_{1i} (con $i = 4, 7$) denota la i -ésima banda de *Landsat* del primer período que se evaluará y B_{2i} (con $i = 4, 7$) denota la i -ésima banda de *Landsat* del segundo período que se evaluará.

dNDVI

Índice utilizado en la detección de cambios de vigor de la vegetación. Es muy sensible a la regeneración del bosque y a cosechas. Indica la magnitud y dirección del cambio a partir de alteraciones en la estructura interna de la vegetación (banda del infrarrojo cercano), como también de la mayor o menor concentración de clorofila en la vegetación (banda roja) (Rouse, 1973).

Ecuación 2. Normalized difference vegetation index, dNDVI.

$$dNDVI = \frac{(B_{14} - B_{13})}{(B_{14} + B_{13})} - \frac{(B_{24} - B_{23})}{(B_{24} + B_{23})}$$

donde B_{1i} (con $i = 4, 3$) denota la i -ésima banda de *Landsat* del primer período que se evaluará y B_{2i} (con $i = 4, 3$) denota la i -ésima banda de *Landsat* del segundo período que se evaluará.

RCVmax

Índice que mide el cambio espectral relativo entre dos fechas. Indica direccionalidad y magnitud del cambio. Utiliza siete bandas del sensor *Landsat 8* (aerosol, azul, verde, roja, infrarrojo cercano, infrarrojo medio 1 e infrarrojo medio 2) (Fry *et al.*, 2011).

Ecuación 3. Relative Change Vector, RCVmax.

$$RCVmax = \sum_i \frac{B_{1i} - B_{2i}}{\max(B_{1i}, B_{2i})^2}$$

donde B_{1i} (con $i = 1, \dots, 7$) denota la i -ésima banda de *Landsat* del primer período que se evaluará y B_{2i} (con $i = 1, \dots, 7$) denota la i -ésima banda de *Landsat* del segundo período que se evaluará. $\max(B_{1i}, B_{2i})$ corresponde al máximo valor de B_{1i} y B_{2i} .

CV

Entrega valor absoluto del cambio. Utiliza siete bandas del sensor *Landsat 8* (aerosol, azul, verde, roja, infrarroja cercana, infrarroja media 1 e infrarroja media 2) (Xian y Homer, 2009).

Ecuación 4. Change Vector, CV.

$$CV = \sum_i (B_{1i} - B_{2i})^2$$

donde B_{1i} (con $i = 1, \dots, 7$) denota la i -ésima banda de *Landsat* del primer período que se evaluará y B_{2i} (con $i = 1, \dots, 7$) denota la i -ésima banda de *Landsat* del segundo período que se evaluará.



Adaptación del método: evaluación de umbrales de bosque nativo

A partir de los requerimientos para el anexo REDD+, en cuanto a las categorías del mapa final de cambio de uso de la tierra que se desea obtener, se adapta el método Multiíndices previamente descrito y se evalúan tanto los índices como los umbrales enfocados en los cambios de uso desde y hacia el uso bosque nativo. Para ello, se realizaron múltiples pruebas dirigidas al análisis estadístico de datos de cambio y se estudiaron el comportamiento de los índices y el de los cambios espectrales detectados (mayor detalle de estos análisis en apartado iv).

Creación de muestras de cambios de uso de bosque nativo

Para enfocar el análisis de umbrales de corte en zonas de cambio de uso, se tomaron 73 muestras de cambios de pérdida en uso de bosque nativo (Cuadro 8) distribuidas en las cinco regiones de análisis. Fueron creadas y evaluadas mediante análisis visual y temporal a través de *Google Earth Pro* de forma similar a la detección de cambios que se realiza en el catastro de bosque nativo. Posteriormente, estos polígonos de cambio de uso de bosque nativo se transformaron a formato ráster, que luego se convirtió a formato punto mediante *software ArcGis*, obteniendo un registro total de 15 015 puntos de cambios. Finalmente, los puntos fueron cruzados con los índices NDVI y NBR en T_0 , NDVI y NBR en T_1 , dNDVI y dNBR con el objeto de obtener los valores de estos índices para cada punto de cambio de uso real y así poder analizar la distribución estadística multivariada de los datos, determinar la forma en que las variables se relacionan entre sí y especificar posibles umbrales empíricos para los índices.

La creación de las muestras de cambios de uso de bosque nativo se realizó de acuerdo con la proporción del tamaño regional, así como también en función de las situaciones que se pudieron detectar visualmente como cambios de uso de la tierra.

Cuadro 8: Muestras para evaluación de umbrales de bosque nativo

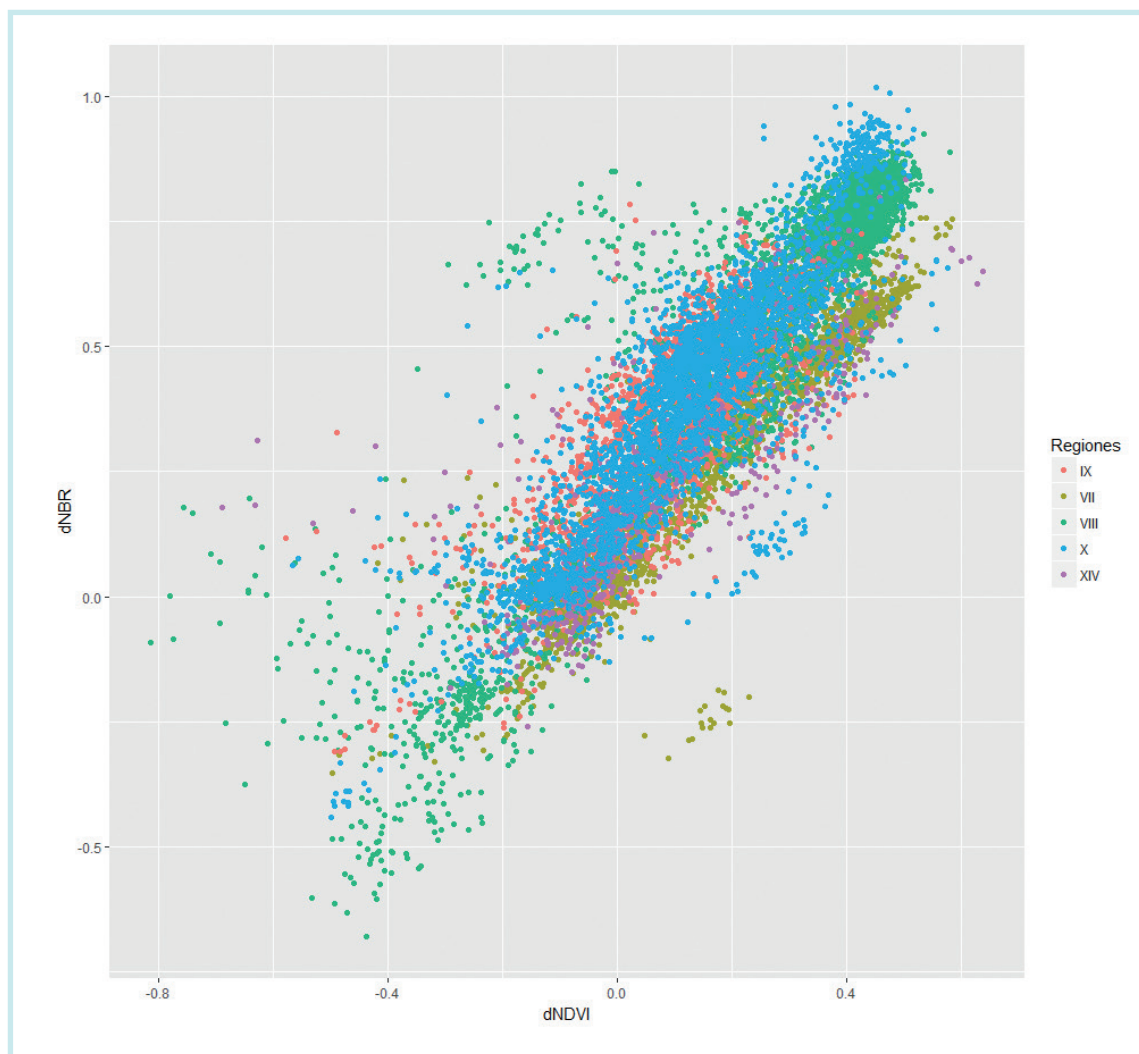
| Región | Polígonos muestra bosque | Puntos muestras bosque |
|--------------|--------------------------|------------------------|
| Maule | 13 | 3 569 |
| Biobío | 12 | 4 107 |
| La Araucanía | 14 | 1 604 |
| Los Ríos | 13 | 1 417 |
| Los Lagos | 21 | 4 318 |
| Total | 73 | 15 015 |

Fuente: CONAF, 2019.

Evaluación de valores NDVI y NBR en muestras

Como primer resultado, se observa un alto grado de relación lineal entre las variables dNDVI y dNBR ($r = 0,88$, $p\text{-value} < 0,00001$); por tanto, ambas variables fluctúan de la misma manera en su comportamiento. A partir de esto, se puede inferir que si un índice detecta un cambio (a nivel espectral), el otro también recoge esa misma información, aun cuando se usan diferentes bandas para la construcción de estos índices. Esta relación lineal permitiría descartar falsos positivos en polígonos de cambios detectados debido a que si un índice muestra que hay cambios y otro no, es altamente probable que se trate de un cambio falso y no de un cambio real. Además, como se puede observar en la Figura 6, este comportamiento es consistente en todas las regiones evaluadas.

Figura 6: *dNDVI vs dNBR en puntos de cambios de uso de la tierra*

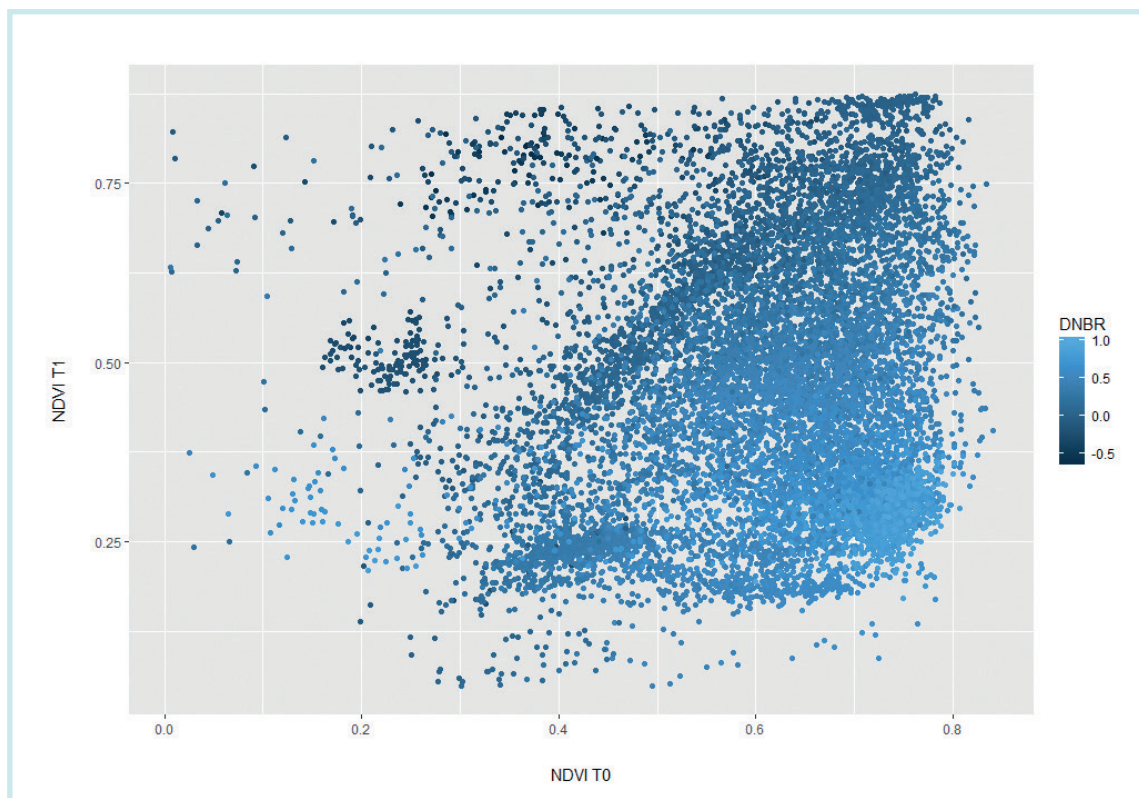


Fuente: Imágenes de ArcGIS 10.3 de Esri. 2019. Modificado por CONAF. 2019.

El segundo análisis realizado establece la nula relación entre el NDVI en T_0 vs NDVI en T_1 . Esto quiere decir que los valores de este índice en un período no están correlacionados con los valores en otro período, lo cual nos habla de la independencia estadística de esta variable en el tiempo.

Sin embargo, cuando los datos se cruzan con la información del índice dNBR, se observa que los altos valores de este se concentran en la esquina inferior derecha del gráfico (Figura 7). Los puntos en esta zona corresponden a una combinación de altos valores de NDVI en T_0 (vegetación vigorosa) junto con bajos valores de NDVI en T_1 (pérdida de vigorosidad en la vegetación). Por otra parte, altos valores de dNBR implican que existe una alta disminución en el contenido de humedad y en el vigor de la vegetación, por tanto están asociados a potenciales pérdidas de vegetación, dando cuenta de la correlación entre ambos índices mencionada anteriormente. Esto permitiría usar un umbral de corte del índice dNBR para los datos de NDVI T_0 y T_1 , estableciendo aquellos valores como potenciales pérdidas de vegetación.

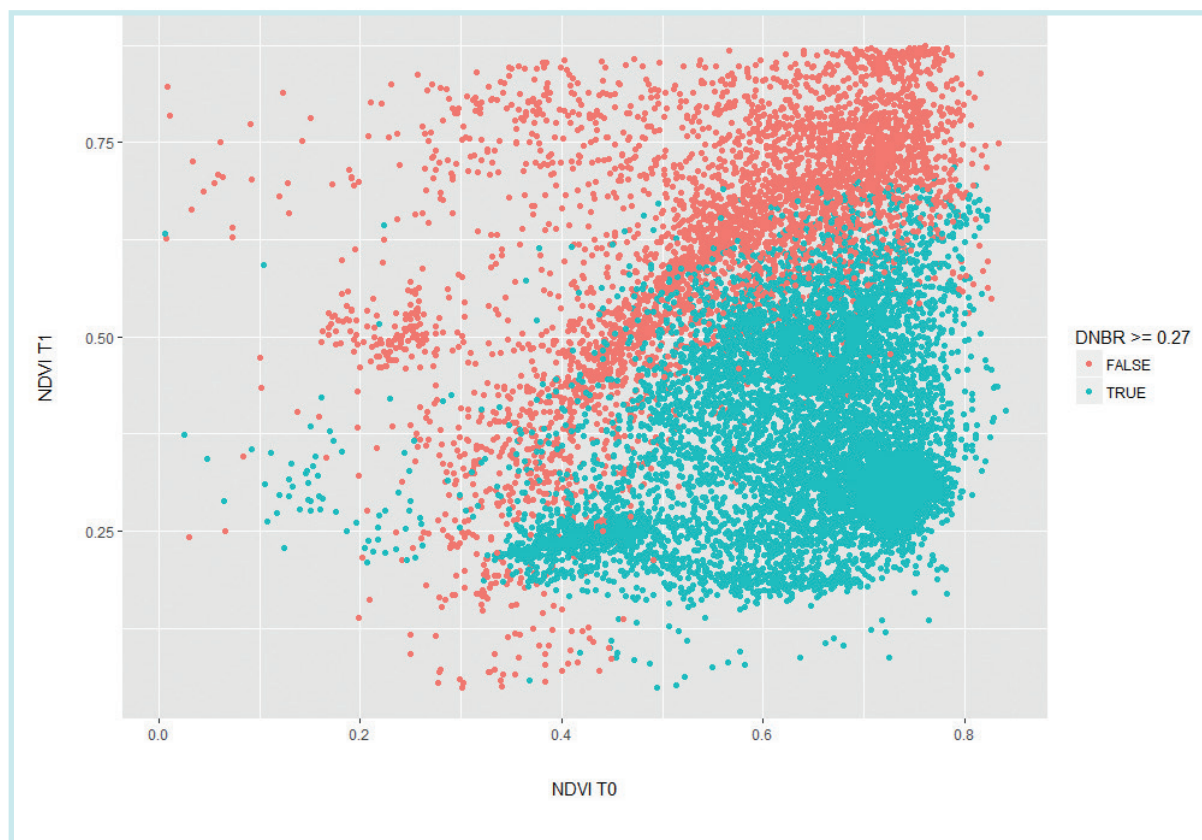
Figura 7: NDVI en T_0 vs NDVI en T_1 en puntos de cambios de uso de la tierra



Fuente: Imágenes de ArcGIS 10.3 de Esri. 2019. Modificado por CONAF. 2019.

A partir de este punto, basados en los valores de dNBR, se determinaron los valores umbrales para pérdidas y ganancias (espectrales) en bosque nativo. Para el caso de las pérdidas, el valor de corte del índice dNBR corresponde a 0,27, por tanto, todos los valores mayores o iguales que esta cifra son potenciales pérdidas (Figura 8). Este valor corresponde al usado por la USGS para determinar áreas de incendios categorizadas como de severidad media baja, superficies en las que ya existiría una importante pérdida de la cobertura vegetal (Key y Benson, 2005). Por otra parte, en cuanto a las ganancias, el valor de dNBR usado correspondió a -0,1, por tanto, todos los valores menores que esta cifra podrían ser potenciales ganancias. Este valor también es utilizado por la USGS para determinar áreas de incendios categorizadas como de crecimiento mejorado bajo (Key y Benson, 2005).

Figura 8: *NDVI en T_0 vs NDVI en T_1 aplicando valores de dNBR mayores o iguales que 0,27 en puntos de cambio de uso real*



Fuente: Imágenes de ArcGIS 10.3 de Esri. 2019. Modificado por CONAF. 2019.

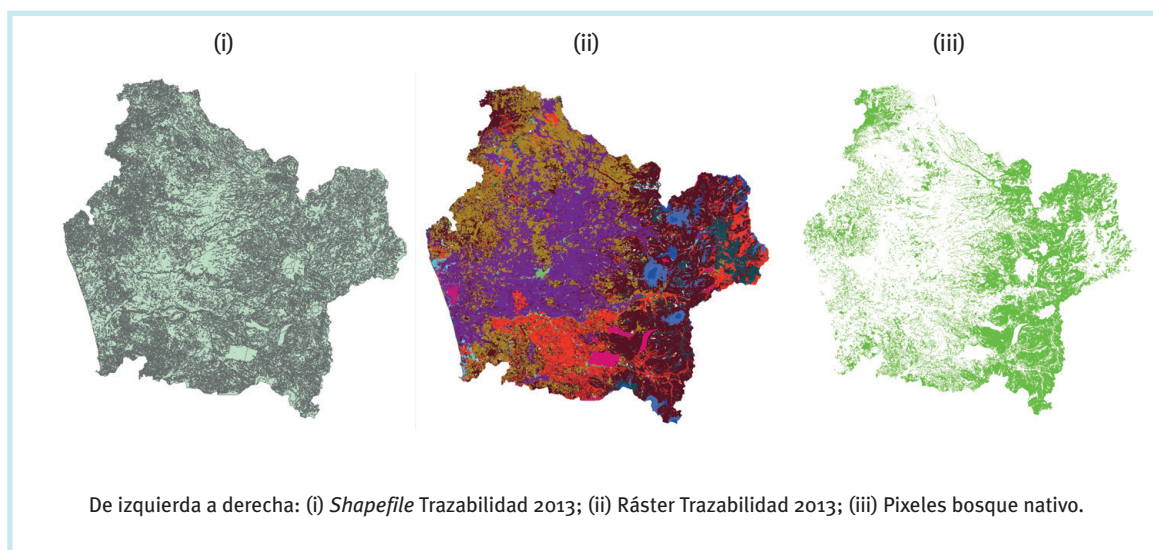
Cobertura de pérdidas y ganancias T_0

A partir de los resultados de la evaluación de umbrales usando las muestras de cambios de uso real en bosque nativo, se elaboraron y aplicaron códigos de programación para la obtención de pérdidas y ganancias en bosque nativo según los índices NDVI en T_0 y T_1 , NBR en T_0 y T_1 y dNBR de manera automatizada. Para transparentar este proceso, se explicará a continuación el razonamiento empleado para la obtención de pérdidas y ganancias mediante los umbrales definidos para estos índices.

Pérdidas

Para comenzar, la cobertura de trazabilidad 2013 fue transformada de formato vectorial a formato ráster y codificada de acuerdo con el atributo subuso de la tierra (ver sección 4, c). Este cambio de formato se realizó debido a que algunos de los geoprocursos dentro de este protocolo requieren del formato ráster para el desarrollo de la metodología.

Figura 9: *Ejemplo de visualización de transformaciones de la cobertura de trazabilidad de formato vectorial a ráster para determinación de pérdidas en bosque nativo, Región de La Araucanía*



Fuente: Imágenes de ArcGIS 10.3 de Esri. 2019. Modificado por CONAF. 2019.
Conforme al mapa de Naciones Unidas.

Para el caso de las pérdidas, el código selecciona los píxeles correspondientes al uso bosque nativo de cada región (Figura 9) y con esta cobertura se genera una máscara, de manera de trabajar con los índices anteriormente descritos.

Posteriormente, se calcula el valor promedio de todos los píxeles de bosque nativo, tanto para NDVI T_0 como para NDVI T_1 , y se selecciona el menor. A partir de este punto, todos los píxeles cuyos valores de NDVI en T_0 y en T_1 sean mayores que el menor valor promedio se descartan, pues no representan cambios correspondientes a pérdidas, y solo serían fluctuaciones espectrales, propias de la vegetación, que están dentro de los promedios esperados para dicha formación vegetal. Si un píxel tiene un valor de NDVI T_0 menor que NDVI T_1 , se descarta, porque no correspondería a una pérdida, dado que su vigorosidad, medida a nivel espectral, en el tiempo T_1 es mayor que en el tiempo T_0 .

Por otra parte, aquellos píxeles cuyos valores de NDVI en T_1 fueron menores que el promedio más bajo entre T_0 y T_1 se analizan. Si el valor de NDVI del píxel en T_1 es menor que en T_0 , esto se considera una potencial pérdida, dado que la vigorosidad a nivel espectral ha disminuido entre las dos temporadas, y esta disminución es menor que el promedio de NDVI de ambos tiempos. A estos píxeles de pérdida potencial se les aplica una máscara que tiene un valor 1 si el de dNBR es mayor que 0,27, y el resto sin valor. Por tanto, si su valor de NDVI T_1 es menor que el de NDVI T_0 y, a su vez, es inferior al mínimo promedio de NDVI T_0 y T_1 , y su valor de dNBR es mayor que 0,27, son seleccionados como píxeles de cambio.

Adicionalmente, se analizaron los valores de los píxeles para los índices NBR T_0 y T_1 . Si un píxel presenta un valor de NBR T_0 menor que el de NBR T_1 , es descartado, pues indicaría que el contenido de humedad y el de vigorosidad han aumentado de T_0 a T_1 , mientras que en el caso contrario, cuando el valor del píxel en NBR T_0 es mayor que en NBR T_1 , se considera que es una potencial pérdida. A estos píxeles de potencial pérdida se les aplicó la máscara de $dNBR \geq 0,27$, de manera de seleccionar solo aquellos que cumplan esta condición para posteriormente crear una máscara basada en los píxeles de NBR T_1 generados con anterioridad.

Por último, basándose en los resultados entregados al analizar las muestras de cambio de uso real, a los píxeles de NDVI T_1 seleccionados como píxeles de cambio se les aplicó una última máscara utilizando los píxeles de NBR T_1 anteriormente nombrados. Si existe una pérdida, esta debería reflejarse en ambos índices por la relación lineal entre ellos, por tanto, al aplicar esta máscara, los resultados deberían permanecer iguales y solo se descartarían los píxeles de cambios en NDVI T_1 si el cambio es percibido solo por el índice NDVI y no por el NBR.

Ganancias

El código generado para la detección de ganancias en bosque nativo funciona de manera similar al de pérdidas. Se seleccionan los píxeles correspondientes a todos los usos distintos a bosque nativo de cada región para generar una máscara y calcular los índices NDVI T_0 y T_1 , NBR T_0 y T_1 , y dNBR, de manera de trabajar solo con estos valores.

Posteriormente, se calcula el promedio tanto para NDVI T_0 como para NDVI T_1 y se selecciona el mayor. Todos los píxeles cuyos valores de NDVI en T_0 como en T_1 sean menores que el máximo valor promedio entre las dos temporadas de NDVI se descartan, pues no representan cambios correspondientes a



ganancias debido a que no habría un aumento en la vigorosidad (a nivel espectral), sino que los valores se encuentran dentro de los promedios de NDVI de ambas temporadas.

Por otra parte, aquellos píxeles cuyos valores de NDVI en T_1 sean mayores que el máximo valor promedio entre T_0 y T_1 se consideran para los análisis. Si un píxel tiene un valor de NDVI T_0 mayor que el de NDVI T_1 , se descarta, ya que no correspondería a una ganancia, porque si bien su vigorosidad medida por medio del índice NDVI es más alta que la de los promedios calculados para ambas fechas, el vigor en el tiempo T_1 es menor que en el tiempo T_0 . En tanto, si el valor de NDVI del píxel en T_1 es mayor que en T_0 , se considera como una ganancia potencial, porque la vigorosidad a nivel espectral se ha incrementado entre las dos temporadas, y este aumento es mayor que el promedio de NDVI de ambos tiempos.

A estos píxeles de ganancia potencial se les aplica una máscara, en la que los píxeles cuyo valor de dNBR es menor que -0,10 están reclasificados con el valor 1, y el resto sin valor. Por tanto, si su valor de NDVI T_1 es mayor que el de NDVI T_0 y, a su vez, supera al máximo valor promedio de NDVI T_0 y T_1 , y su valor de dNBR es menor que -0,10, son seleccionados como píxeles de cambio.

Adicionalmente, se analizaron los valores de los píxeles para los índices NBR T_0 y T_1 . Si un píxel presenta un valor de NBR T_0 mayor que NBR T_1 , es descartado, pues indicaría que el contenido de humedad y su vigorosidad han disminuido de T_0 a T_1 , mientras que en el caso contrario, cuando el valor del píxel en NBR T_0 es menor que en NBR T_1 , se considera que es una potencial ganancia. A estos píxeles de potencial ganancia se les aplicó la máscara de $dNBR \leq -0,10$, de manera de seleccionar solo aquellos que cumplan esta condición para posteriormente crear una máscara basada en los valores de NBR T_1 resultantes.

Por último, a los píxeles de NDVI T_1 seleccionados como píxeles de cambio se les aplicó una última máscara utilizando los píxeles de NBR T_1 anteriormente nombrados. Si existe una ganancia, esta debería reflejarse en ambos índices por la relación lineal entre ellos, por tanto, al aplicar esta máscara, los resultados deberían permanecer iguales y solo se descartarían los píxeles de cambio en NDVI T_1 si el cambio es percibido solo por el índice NDVI y no por el NBR.

Cobertura de pérdidas y ganancias para matorral y matorral arborescente

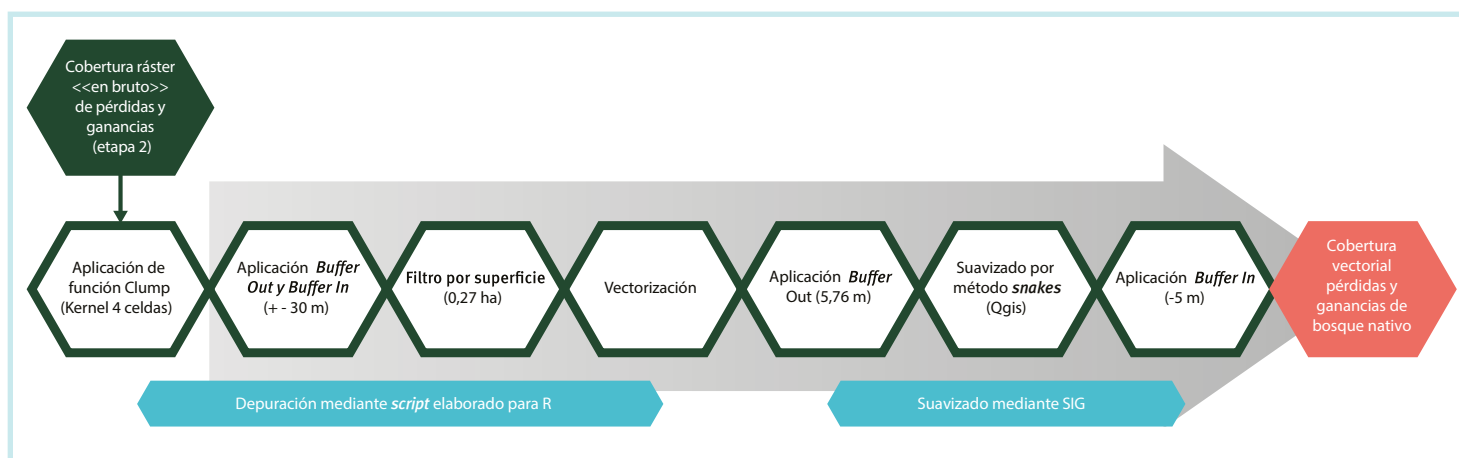
De la misma manera que se detectaron pérdidas y ganancias en el uso bosque nativo, se produjeron cambios en los usos matorral y matorral arborescente. Sin embargo, en lugar de cortar por un valor específico del índice dNBR (mayor o iguales que 0,27 para las pérdidas, y menor que -0,10 para las ganancias), se utilizó uno asociado a la distribución de frecuencias de los valores de dNBR tanto para matorral como para matorral arborescente. En el caso de las pérdidas, se usó como valor de corte el del cuantil 0,125, por tanto, todos los valores menores a este fueron considerados, mientras los mayores fueron descartados. En el caso de las ganancias, se usó como valor de corte el del cuantil 0,875, por tanto, todos los valores mayores a este fueron considerados, mientras los menores fueron descartados. Se llegó a estos valores de cuantiles mediante una serie de pruebas con datos empíricos de cambio de estos dos usos.

Etapa 3: Edición y depuración de resultados

El objetivo principal de esta etapa es la obtención de la cobertura vectorial depurada de ganancias y pérdidas de bosque nativo, la que debe pasar por una serie de procesos de filtrado y suavizados para eliminar píxeles aislados en que la superficie mínima de cambio es mayor o igual que 0,27 ha.

Cabe mencionar que todos los procesos de esta etapa también fueron realizados para las coberturas de pérdidas y ganancias de los usos matorral y matorral arborecente.

Figura 10: *Resumen metodológico de Etapa 3: Edición y depuración de resultados*



Fuente: CONAF, 2019.

Depuración mediante *script* elaborado para *software R*

El código de programación fue desarrollado para realizar todo el proceso de depuración a través del *software R*. La depuración involucra cuatro procesos: *Buffer Out-In*, *Clumping*, Filtro por superficie mínima y Vectorización.

Como se mencionó en la etapa anterior, el *script* utiliza las coberturas en bruto de pérdidas y ganancias en formato ráster. Estas coberturas se transforman a formato vectorial y se les aplica en primer lugar una *buffer* con distancia de 30 m (*Buffer Out*), con el que se pretende unir aquellos polígonos que se encuentran separados por esa distancia, lo que equivale a un píxel para las imágenes multiespectrales del sensor *Landsat 8 OLI* que pueden pertenecer a una misma zona de cambio. A continuación, a esta capa *Buffer Out* se le aplica otro *buffer* con una distancia de -30 m (*Buffer In*) con la intención de desagregar los polígonos de cambio que superan esa distancia y que se unieron en el proceso anterior solo por cierta disposición geométrica de los polígonos. Una vez realizado estos procesos de *Buffer Out-In*, las coberturas son rasterizadas.

Posteriormente, se emplea un proceso de *Clumping* o agrupamiento, con el que se pretenden agrupar, en la cobertura ráster, las celdas continuas con un criterio de cuatro vecinos directos (ortogonales), lo cual permite diferenciar distintos grupos de celdas de cambios. Una vez diferenciados los grupos de celdas, se les aplica un filtro de superficie que elimina aquellas áreas de cambio menores de 0,27 ha, es decir, cambios que ocurren en grupos que poseen un tamaño de entre uno y dos píxeles.

Por último, las coberturas de cambios (pérdidas y ganancias por separado) se transforman a formato vectorial.

Suavizado mediante SIG

El suavizado de las zonas detectadas como cambio consta de tres procesos, que son ejecutados mediante *Qgis* y *ArcGis*: *Buffer Out*, Suavizado *Snake* y *Buffer In*.

En primer lugar, se aplica un *buffer* de 5,76 m antes del suavizado de polígonos, ya que en ese momento se pierden esquinas de los polígonos que están con una geometría “cuadrada”, lo que implica que todos aquellos polígonos de 0,27 ha queden con una superficie menor, por tanto, se eliminarían al emplear un filtro de superficie en las etapas posteriores, restando así superficies de cambio (ganancia o pérdida). Debido a esto, se hizo necesario incorporar este *buffer* antes del proceso de suavizado. El valor de 5,76 m se calculó a partir de una fórmula que permite, por una parte, mantener los polígonos de 0,27 tras el suavizado y, por otra, no sumar nueva superficie a las 0,27 ha.

A continuación, se les aplica un suavizado en *QGIS* a través de la función *v.generalize.smooth*, la cual proviene de la librería de *GRASS*. Se selecciona el método *snake*, que está diseñado para alisar las esquinas dentadas (como es el caso de la transformación de un ráster a polígono) y se configuran los parámetros alfa y beta en 7 y 4, respectivamente. Los parámetros alfa y beta son los que definen la rigidez de las líneas. Valores inferiores a 1 entregan resultados que permiten conservar la forma original de las líneas y evitar errores topológicos debido al desplazamiento. Por el contrario, si los valores son superiores a 1, pueden generarse desplazamientos que aumenten los errores topológicos, aunque entregan formas mucho más suavizadas. Según los autores Bundala y Bergenheim (2017), es recomendable encontrar estos valores por ensayo y error.

Posteriormente, se aplica otro *buffer* con una distancia de -5,0 m para volver al valor de superficie original de cada polígono. A continuación, se debe aplicar la función de “Expandir entidad multiparte”, ubicada en la barra de Edición Avanzada de *ArcGis*, porque el último proceso de *buffer* genera un solo polígono en su base de datos. Con esta función se logra separar cada polígono de cambio con un ID único.

Finalmente, luego de la aplicación de los filtros y suavizados descritos anteriormente, se obtienen las coberturas de ganancias y pérdidas del uso bosque nativo. A continuación, se muestra la variación que han experimentado las hectáreas de pérdidas y ganancias hasta la aplicación de la Etapa 3.



Cuadro 9: *Variación de superficie de pérdidas (en hectáreas)
en la aplicación de depuración y suavizado*

| Región | En bruto | Clump | Buffer y filtro superficie | Suavizado |
|--------|-----------|-----------|----------------------------|-----------|
| VII | 2 941,56 | 3 201,66 | 2 615,31 | 2 788,27 |
| VIII | 5 496,12 | 5 968,53 | 4 445,64 | 3 655,53 |
| IX | 8 258,04 | 8 888,04 | 7 676,91 | 7 987,88 |
| XIV | 2 395,44 | 2 614,32 | 1 803,33 | 2 850,49 |
| X | 13 347,63 | 14 574,87 | 12 073,95 | 12 689,56 |
| Total | 32 438,79 | 35 247,42 | 28 615,14 | 29 971,74 |

Fuente: CONAF, 2019.

Cuadro 10: *Variación de superficie de ganancias (en hectáreas)
en la aplicación de depuración y suavizado*

| Región | En bruto | Clump | Buffer y filtro superficie | Suavizado |
|--------|------------|------------|----------------------------|------------|
| VII | 16 607,34 | 19 792,62 | 13 757,94 | 14 725,47 |
| VIII | 8 423,64 | 9 340,92 | 6 684,93 | 5 679,36 |
| IX | 26 933,31 | 30 709,26 | 23 172,39 | 24 736,99 |
| XIV | 124 651,89 | 140 301,09 | 134 959,68 | 141 297,14 |
| X | 8 384,31 | 9 241,65 | 6 267,78 | 6 684,62 |
| Total | 185 000,49 | 209 385,54 | 184 842,72 | 193 123,59 |

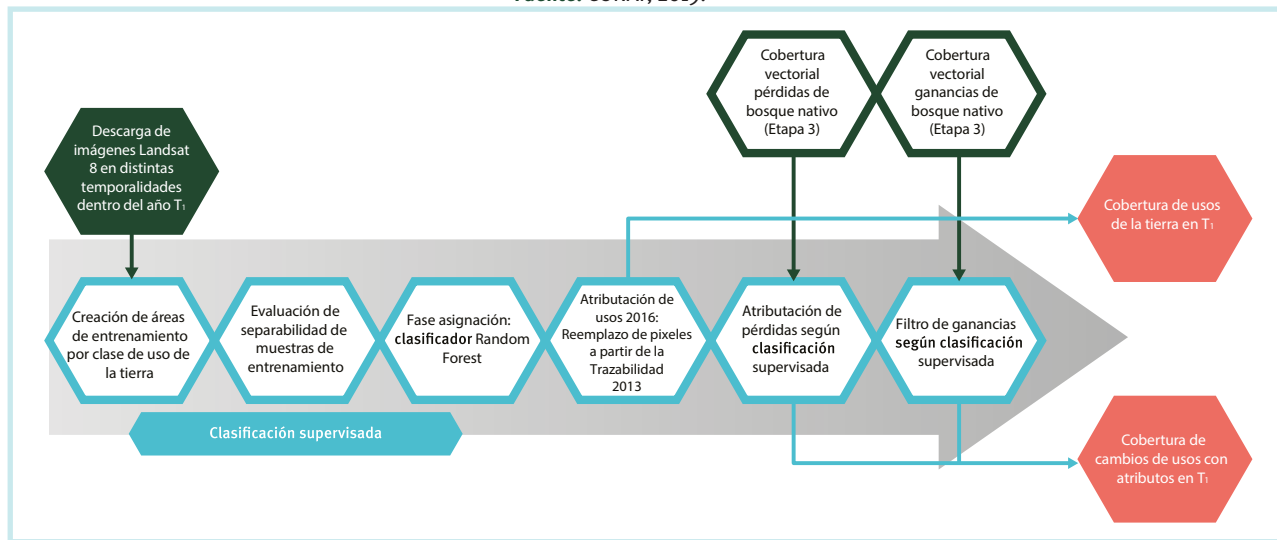
Fuente: CONAF, 2019.

Etapa 4: Atribución mediante clasificación supervisada

El objetivo principal de esta etapa corresponde a la asignación del uso de la tierra a la cobertura vectorial de pérdidas generada en la etapa anterior para de esta forma saber el uso final del cambio de los polígonos de cambio desde el uso bosque nativo. La determinación del uso se realiza mediante una clasificación supervisada actualizada para el período de tiempo T_1 , la cual se interseca con los polígonos de pérdidas para asignar el uso final de estos.

Figura 11: Resumen metodológico de Etapa 4: Atribución mediante clasificación supervisada

Fuente: CONAF, 2019.



Clasificación supervisada en T_1

El principal objetivo que se persigue en la realización de la clasificación supervisada es obtener los usos de la tierra (IPCC, 2006) de las coberturas al año 2016.

Existen varios métodos para clasificar una imagen satelital óptica, siendo *Random Forest* uno de los algoritmos de clasificación de imágenes más utilizados en teledetección. Este es un clasificador de coberturas que utiliza árboles de decisión como clasificadores base, en el que cada árbol (o clasificador) contribuye con un voto para la asignación de la clase más frecuente (Breiman, 2001).

Catálogo de imágenes para clasificación supervisada



©CONAF

Las clasificaciones supervisadas se realizan sobre una serie de imágenes del sensor *Landsat 8 OLI/TIRS C1 level-1* descargadas desde el sitio <https://earthexplorer.usgs.gov/>, las cuales se reproyectaron al sistema de proyección WGS-84 UTM 18S, remuestreadas a 30 m, corregistradas con mosaico T_0 (2013-2014) en *ArcGis* y corregidas atmosféricamente mediante modelo *Dark Object Subtraction* o DOS (Chávez, 1988) en *QGIS*.

Para cada región en estudio se descargaron tres temporalidades para ser ingresadas al modelo de clasificación supervisada *Random Forest* y así representar de mejor manera la secuencia estacional y fenológica de cultivos, praderas, matorrales y toda la dinámica del territorio, permitiendo mejorar la salida de la clasificación. Las escenas fueron seleccionadas a partir de un intervalo temporal establecido, del cual se seleccionan las imágenes con menor cobertura de nubes entre las siguientes fechas:

1. Diciembre 2015 – Febrero 2016
2. Marzo 2016 – Junio 2016
3. Noviembre 2016 – Diciembre 2016

Mosaicos para clasificación supervisada

Para realizar los mosaicos, se debió hacer primero una composición de bandas, la que se llevó a cabo en *ArcGis* mediante la herramienta “Análisis de imágenes”, pestaña “Procesamiento”, selección “Combinar”.

Posteriormente, fue necesaria la reproyección y corte de los mosaicos que se utilizarán. Para efectuar el corte del mosaico, se usa la cobertura vectorial DPA-ODEPA (IDE-MINAGRI) como polígono de corte y la cobertura Frutales (CIREN, 2016), que se empleó para generar una máscara de frutales. Es preciso revisar que cada mosaico de cada período resultante cuente con el mismo número de filas y columnas, el mismo sistema de proyección y el mismo tamaño de pixel.

Determinación del número de muestras o áreas de entrenamiento por clase de uso de la tierra

Los usos de la tierra de interés definidos por este proyecto corresponden a 11 y siguen los lineamientos de IPCC 2006 (Cuadro 11). Considerando que la clasificación supervisada se aplicó sobre un catálogo de imágenes del sensor *Landsat 8* compuesto por siete bandas espectrales, cada uso de la tierra necesita al menos ocho muestras por región (Chuvienco, 2006). La selección de muestras se elabora tomando como referencia las categorías de subuso de la tierra IPCC descritas en el Cuadro 11.

Es necesario mencionar que las categorías de usos de la tierra (bosque, matorral, asentamientos, etc.) tienen un comportamiento espectral específico, que si bien el sensor *Landsat 8* no es capaz de distinguir en detalle (debido a su resolución espectral), sí lo puede diferenciar entre las siguientes subcategorías (columna subcategorías muestras):

Cuadro 11: *Ejemplo de usos, subusos, id (código) y reclasificación de muestras*

| Uso | Subcategorías muestras | Código | Nº Muestras | Reclasificación |
|-----------------------|------------------------|--------|-------------|-----------------|
| Asentamiento | Asentamiento | 1 | 69 | 1 |
| Tierras de cultivo | Frutales | 2 | 0 | 2 |
| | Cultivos 1 | 3 | 125 | 2 |
| | Cultivos 2 | 4 | 50 | 2 |
| | Cultivos 3 | 5 | 51 | 2 |
| | Cultivos 4 | 36 | 34 | 2 |
| | Cultivos 5 | 37 | 46 | 2 |
| | Cultivos 6 | 38 | 13 | 2 |
| | Cultivos 7 | 44 | 25 | 2 |
| | ADDV_C | 42 | 26 | 2 |
| | Vina1 | 32 | 0 | 2 |
| | Vina2 | 33 | 0 | 2 |
| | Vina3 | 34 | 0 | 2 |
| Praderas | Naturales valle | 6 | 11 | 3 |
| | Naturales altoandinos | 7 | 28 | 3 |
| | Natural costa | 31 | 52 | 3 |
| Matorral | Abierto | 8 | 37 | 4 |
| | Denso-semidenso | 9 | 59 | 4 |
| | Pradera | 10 | 44 | 4 |
| Matorral arborescente | Matorral arborescente | 11 | 75 | 5 |
| Plantación forestal | PF PF PF | 12 | 99 | 6 |
| | PF C PF | 13 | 5 | 6 |
| | C PF PF | 14 | 45 | 6 |
| | PJ PF PF | 15 | 68 | 6 |
| | PF_PF_C | 35 | 47 | 6 |
| | ADDV_F | 40 | 54 | 6 |
| | PF_C_C | 43 | 33 | 6 |
| Bosque nativo | Achaparrado | 16 | 0 | 7 |
| | Siempreverde | 17 | 104 | 7 |
| | Esclerófilo | 18 | 40 | 7 |
| | Caducifolio | 19 | 63 | 7 |

| | | | | |
|----------------------------------|----------------------------------|----|----|----|
| Humedales | Altoandino | 20 | 32 | 8 |
| | Orilla río | 21 | 20 | 8 |
| | Costero | 22 | 28 | 8 |
| | Turbales | 23 | 0 | 8 |
| Áreas desprovistas de vegetación | Playas y dunas | 24 | 16 | 9 |
| | Caja de río | 25 | 38 | 9 |
| | Corrida de lava | 26 | 29 | 9 |
| | Sobre el límite de la vegetación | 27 | 46 | 9 |
| Nieves y glaciares | Nieves | 28 | 28 | 10 |
| Cuerpos de agua | Lago, laguna, embalse, tranque | 29 | 25 | 11 |
| | Río | 30 | 28 | 11 |
| Total muestras | 1593 | | | |

Fuente: CONAF, 2019.

NOTA: Dónde,

- **ADDV_C:** Áreas desprovistas de vegetación en cultivos. Se refiere a que según la muestra elaborada, el cultivo se mantuvo sin vegetación durante los tres o cuatro períodos analizados.
- **Cultivos 1, 2, 3, 4:** Corresponde a cuatro cultivos diferentes. A pesar de que no se sabe a qué cultivo corresponde, en cada período estos cultivos tuvieron un comportamiento espectral similar (entre ellos) y diferentes entre sí.
- **PF_PF_PF:** Corresponde a una presencia de plantación forestal en los tres períodos analizados.
- **PF_C_PF:** Corresponde a una plantación forestal en período 1; cosecha forestal en período 2 y plantación forestal en período 3.
- **C PF PF:** Corresponde a una cosecha forestal en período 1, plantación forestal en períodos 2 y 3.
- **PJ_PF_PF:** Corresponde a una plantación forestal joven en período 1, plantación forestal en períodos 2 y 3.
- **PF_PF_C:** Corresponde a una plantación forestal en períodos 1 y 2 y cosecha forestal en período 3.
- **ADDV_F:** Corresponde a un área desprovista de vegetación en períodos 1, 2 y 3 ocurridos en un terreno de uso forestal.
- **PF_C_C:** Corresponde a una plantación forestal en período 1, y cosecha forestal en períodos 2 y 3.

Estas muestras y sus respectivas subcategorías son referenciales y empíricas (Cuadro 11) es un ejemplo usado en la Región del Maule), es decir, fueron elaboradas en relación con el comportamiento espectral de los subusos sobre la serie de imágenes *Landsat 8* descargadas, corregidas, en mosaicos, reproyectadas y cortadas, tomando como base los polígonos de usos de la tierra del último catastro de bosque nativo para la región (última actualización). Todo esto se hizo considerando que, posteriormente, estas nuevas subcategorías serán reclasificadas en los respectivos 11 subusos descritos en el Cuadro 11: Dado que cada región tiene un comportamiento espectral diferente, el número de muestras seleccionadas varía por región (Cuadro 12).

Para la toma de muestras se tuvieron en cuenta ciertos criterios que se detallan a continuación:

- La distribución de las muestras debe ser homogénea sobre las imágenes y no concentradas en un sector reducido.
- Se deben utilizar imágenes *Landsat* como base para la creación de muestras, y no imágenes auxiliares (como *Google Earth*).
- Los polígonos creados (muestras) deben ser homogéneos espectralmente entre sí (tonalidad), y heterogéneos espectralmente entre las diferentes categorías (diferenciación).
- El tamaño de las muestras no debe sobrepasar las 30 ha.

Las muestras de entrenamiento fueron creadas, evaluadas y ajustadas sobre el catálogo de imágenes por clasificar para cada región. A las muestras creadas se les aplica un proceso *Buffer In* de 15 m en *ArcGis* para obtener muestras puras y no incorporar el ruido de los bordes producto del cambio de clase ocurrido en las zonas límites (efecto borde).

Cuadro 12: *Número de muestras por región*

| Región | Número de muestras |
|--------------|--------------------|
| Maule | 1389 |
| Biobío | 1750 |
| La Araucanía | 1593 |
| Los Ríos | 785 |
| Los Lagos | 1756 |
| Total | 7273 |

Fuente: CONAF, 2019.

Evaluación de separabilidad de muestras de entrenamiento

Para obtener la pureza de las muestras, es necesario evaluarlas estadísticamente a través de su separabilidad, es decir, estimar el comportamiento espectral de cada una de las muestras para evitar confusión de clases.

Para ello existen diferentes métodos. En este caso se aplicó una evaluación de divergencia transformada en *software* ENVI, en la que un reporte evalúa pares de clase, las varianzas y las covarianzas espectrales, y se obtienen valores que van del 0 al 2. Según este método, una clase se diferencia de otra si el valor de separabilidad es superior a 1,9, mientras que si ese valor es inferior a 1, no hay diferencia entre clases, para lo cual es necesario unir las muestras. Cuando el valor fluctúa entre 1 y 1,79, es necesario redefinir las muestras. Este análisis se realizó para las muestras por clase de uso para cada región, y en él se ajustaron y redefinieron dos veces las muestras por clase.

Creación de ráster virtual

Para que la clasificación supervisada *Random Forest* (CSRF) sea exitosa, es necesario contar con un set de imágenes extenso con el objetivo de seguir la secuencia espectral de cada uso que se clasificará. Para ello, se crea un ráster virtual que contiene las bandas de todas las imágenes que se utilizarán. Lo primero es la separación de bandas mediante la herramienta “*raster calculator*” de *Qgis*. Luego, se procede a la creación de un archivo .vrt o “ráster virtual”, que consiste en el resumen de las bandas que se emplearán para la clasificación (por ejemplo, si se utilizan tres imágenes *Landsat 8*, de seis bandas cada imagen, el ráster virtual resumirá las 18 bandas en un solo archivo). La herramienta usada fue “Construir ráster virtual” de *Qgis*.

Fase de asignación

Para asignar las categorías de usos de la tierra sobre la imagen de 2016 (T_1), se aplicó el clasificador *Random Forest* a través del *software R*.

Random Forest actúa como árbol de decisión, en el que se integran y ajustan distintas reglas de acuerdo con el comportamiento espectral de las categorías por analizar, tomando de referencia las muestras de entrenamiento y las bandas espectrales utilizadas. Para la aplicación de este método es necesario:

- **Precisar el número de píxeles por clase:** este valor se refiere a la cantidad de píxeles aleatorios dentro de la serie de imágenes que *Random Forest* utilizará por cada clase para calcular las estadísticas y asignar la clasificación. Para cada región se aplicaron 1.000 píxeles por clase.



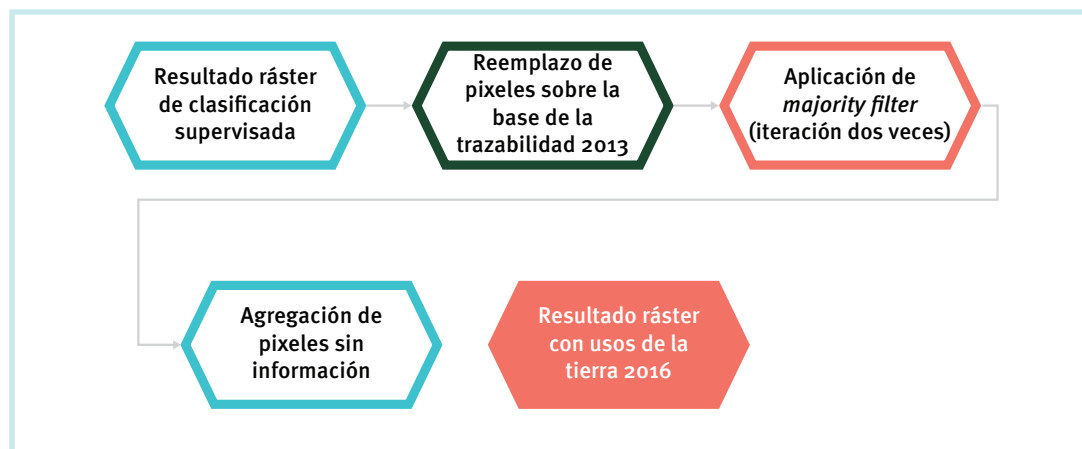
- **Precisar la probabilidad de clasificación:** considerando que las muestras son aleatorias, se debe definir cuál es la probabilidad de que el pixel clasificado pertenezca a tal clase. Se ingresa una probabilidad esperada que después se traduce en la obtención de dos imágenes: una que muestra solo los pixeles que cumplen con la probabilidad, enmascarando el resto de la imagen, y otra que muestra la clasificación, pero con los valores de probabilidad de cada pixel de cada clase. En este caso la probabilidad de clasificación aplicada corresponde al 75%.

Una vez aplicada la clasificación, se extrae la banda correspondiente a la CSRF y se procede a reclasificar los resultados siguiendo el ejemplo de la estructura y nomenclatura especificada en el Cuadro 11. Se utiliza la herramienta “Reclasificar” de “Análisis espacial” de *ArcGis*. De esta manera, se obtiene un mapa reclasificado con los subusos IPCC.

Atribución de usos 2016: reemplazo de pixeles sobre la base de la trazabilidad 2013

Al resultado de la clasificación supervisada se le realizan una serie de procesos con el objetivo de mejorar el resultado final a partir de filtros de mayoría y reglas de decisión basadas en situaciones con mayor posibilidad de ocurrencia que se dan en la dinámica territorial. El resultado será una cobertura ráster con los usos de la tierra 2016, cuyo objetivo es atributar las coberturas de pérdidas y encontrar cambios entre los períodos T_0 y T_1 en otros usos de la tierra.

Figura 12: *Geoprocesos efectuados a la cobertura de clasificación supervisada para la atribución de usos de la tierra 2016*



Fuente: CONAF, 2019.

Reemplazo de píxeles sobre la base de la trazabilidad 2013

Dado que el resultado de la clasificación supervisada mediante *Random Forest* puede entregar una cobertura con zonas que presentan mucha variabilidad entre un píxel y sus vecinos, o áreas cuyos píxeles muestran un cambio de uso entre T_0 y T_1 con nula o poca posibilidad de que ocurra (e.g. cambio de asentamientos a nieves y glaciares), se desarrolló un algoritmo que permite arreglar estos resultados a partir de una serie de reglas de decisión que evalúan y comparan el uso entregado por la clasificación supervisada con la última cobertura de trazabilidad disponible (2013). Adicionalmente, se incorpora un modelo digital de terreno (DEM) para evaluar algunos usos con respecto a la altitud. Todas las reglas de decisión se evalúan y se aplican píxel a píxel, lo que genera una nueva cobertura en formato ráster.

Las reglas de decisión se basan en la dinámica conocida del territorio, en las posibilidades o imposibilidades de ocurrencia de los cambios de uso de la tierra en el período evaluado y también en los alcances de la metodología. Adicionalmente, estas reglas incorporan dos criterios que permiten una mejor asignación de los usos de la tierra. El primero dice relación con la mala asignación de usos provenientes del catastro de bosque nativo, los cuales vienen por defecto en la cobertura de trazabilidad. Esta mala asignación corresponde a un error del tipo sistemático, el cual puede ser subsanado, en su mayoría, por medio de las reglas. El segundo criterio va en relación con la calidad de los mosaicos generados y utilizados para cada región, los cuales son distorsionados a nivel espectral por algunos tipos de nubes, sombras de nubes y otras partículas, lo que trae como consecuencia una mala asignación de usos por parte de la clasificación supervisada.

Ambos criterios tienen la ventaja de mejorar bastante la salida final de la clasificación supervisada; no obstante, requieren de la observación de las diferentes áreas de cada región teniendo en cuenta los errores que trae la cobertura de trazabilidad y los usos que se ven afectados por las partículas atmosféricas presentes en los mosaicos generados. Por esto se construyeron reglas en función de cada región por separado para mejorar la asignación de usos de la tierra. Estas son mostradas del Cuadro 13 al 19.

De acuerdo con estos criterios, este equipo de trabajo definió una serie de reglas de reemplazo, las cuales se agrupan dentro de seis categorías:

Baja o nula posibilidad de ocurrencia del cambio de uso

Estas situaciones se establecieron en relación con el período de evaluación del cambio de uso de la tierra, siendo el 2013-2016 (2014-2016 para la Región del Maule) muy corto para su ocurrencia. Por lo tanto, si un píxel de la cobertura de trazabilidad 2013 ha cambiado según la clasificación supervisada 2016 a algún uso con baja o nula posibilidad de ocurrencia, entonces este píxel mantendrá el uso asignado al año 2013 por la cobertura de trazabilidad (ejemplo de esto es el cambio del uso asentamiento a nieves y glaciares).

Alcance metodológico (confusión espectral)

Estas situaciones se establecieron en relación con dos factores. El primero corresponde a cambios de uso que son altamente susceptibles a confusiones espectrales (por ejemplo, las tierras de cultivo que se encuentran en fase de barbecho o suelo desnudo, en las cuales la clasificación supervisada puede confundir estos píxeles con áreas de alta reflectividad, como asentamientos o áreas sin vegetación). El segundo factor corresponde a sectores que generalmente son detectados y asignados a los usos cuerpos de agua o humedales debido a la presencia de nubosidad en el mosaico, lo que genera confusión en la cobertura final. Por lo tanto, si un píxel de la cobertura de trazabilidad 2013 ha cambiado, según la clasificación supervisada 2016, a algún uso con alcance metodológico, entonces este píxel mantendrá el uso asignado el año 2013 por la cobertura de trazabilidad.

Preferencia histórica de la trazabilidad 2013

Estas situaciones se establecieron en función de la dinámica de los usos praderas-tierras de cultivo y viceversa, como también para los usos humedales-cuerpos de agua. Esta dinámica del territorio es generalmente cíclica, y para evitar confusión se decide crear una preferencia histórica en estos cambios de uso. Por lo tanto, si un píxel de la cobertura de trazabilidad 2013 ha cambiado, según la clasificación supervisada en 2016, a algún uso con preferencia histórica de trazabilidad 2013, entonces este píxel mantendrá el uso asignado el año 2013 por la cobertura de trazabilidad.

Posibilidad de ocurrencia del cambio de uso

Estas situaciones se establecieron a partir de los cambios de usos más recurrentes que no presentan alcances metodológicos en su detección. Por lo tanto, si un píxel de la cobertura de trazabilidad 2013 ha cambiado, según la clasificación supervisada 2016, a algún uso con posibilidad de ocurrencia, entonces a este píxel se le asignará el uso que indica la clasificación supervisada el año 2016. En esta categoría caen los casos en que se quieren corregir errores de asignación de clases de uso que presenta la cobertura de trazabilidad 2013.



Posibilidad de ocurrencia condicionada a cota altitudinal

Estas situaciones se establecieron sobre la base de los cambios de usos más recurrentes que no presentan alcances metodológicos en su detección, pero que condicionaron su ocurrencia a una cota altitudinal a través de un modelo digital de terreno (DEM).

Para todos los usos en esta situación se determinó empíricamente la altitud máxima a la que se pueden presentar en función de la distribución estadística de los datos presentados por la cobertura de trazabilidad. Por lo tanto, si un pixel de la cobertura de trazabilidad 2013 ha cambiado, según la clasificación supervisada el año 2016, a algún uso con posibilidad de ocurrencia condicionada a cota altitudinal, entonces a este pixel se le asignará el uso que indica la clasificación supervisada el año 2016, siempre que este pixel no salga de la cota establecida. Del mismo modo, si el pixel cae fuera de la cota establecida, se le asignará el uso asignado el año 2013 por la cobertura de trazabilidad.

Cabe mencionar que esta cota es variable en función del uso de la tierra que se considerará y de la región con la que se esté trabajando. Adicionalmente, se puede dar que las reglas anteriormente señaladas caigan dentro de este caso en que la posibilidad de cambio no esté supeditada a una cota altitudinal, por tanto se clasifican dentro de este grupo.



Sin cambio de uso

En estas situaciones se mantiene el uso de la tierra asignado en el año 2013 (T_0) al año 2016 (T_1), y el pixel mantiene el uso histórico según la trazabilidad 2013.

Según estas seis reglas, más la observación de las diferentes situaciones encontradas en cada región, se construyen distintas matrices de reglas de decisión para el reemplazo de pixeles, diferenciadas para cada región en estudio, las cuales se resumen en los Cuadros que se muestran a continuación.

Cuadro 13: Reglas de decisión para reemplazo de pixeles sobre la l

| | | Clasificación supervisada 2016 | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----------------------|--------------------------------|--------------------|---------|----------|-----------------------|------------|---------------|-----------|------|--------------------|-----------------|
| | | Asentamiento | Tierras de cultivo | Pradera | Matorral | Matorral arborescente | Plantación | Bosque nativo | Humedales | ADDV | Nieves y glaciares | Cuerpos de agua |
| Trazabilidad 2013 | Asentamiento | | | | | | | | | | | |
| | Tierras de cultivo | P | | | | | P | | | | | |
| | Pradera | DEM | | | | | DEM | | | | | |
| | Matorral | DEM | DEM | P | | P | DEM | | | | | |
| | Matorral arborescente | DEM | DEM | P | P | | P | | | | | |
| | Plantación | DEM | DEM | P | | | | | P | | | P |
| | Bosque nativo | DEM | DEM | DEM | DEM | DEM | DEM | | | P | | |
| | Humedales | DEM | DEM | P | | | | | | P | P | P |
| | ADDV | DEM | DEM | P | P | P | DEM | P | P | | P | P |
| | Nieves y glaciares | | | | | | | | | P | | P |
| | Cuerpos de agua | | DEM | | | | | | | | | |

Fuente: CONAF, 2019.

Cuadro 14: Reglas de decisión para reemplazo de pixeles

sobre la base de la trazabilidad 2013 para la Región del Biobío

| | | Clasificación supervisada 2016 | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----------------------|--------------------------------|--------------------|---------|----------|-----------------------|------------|---------------|-----------|------|--------------------|-----------------|
| | | Asentamiento | Tierras de cultivo | Pradera | Matorral | Matorral arborescente | Plantación | Bosque nativo | Humedales | ADDV | Nieves y glaciares | Cuerpos de agua |
| Trazabilidad 2013 | Asentamiento | | | | | | | | | | | |
| | Tierras de cultivo | P | | | | | P | | | | | P |
| | Pradera | DEM | | | | | DEM | | | | | P |
| | Matorral | DEM | DEM | P | | P | DEM | | | | | P |
| | Matorral arborescente | DEM | DEM | P | P | | DEM | P | | | | P |
| | Plantación | DEM | DEM | P | | | | | | | | P |
| | Bosque nativo | DEM | DEM | DEM | DEM | DEM | DEM | | DEM | P | | P |
| | Humedales | DEM | DEM | P | | | P | | | P | P | |
| | ADDV | DEM | DEM | P | P | P | DEM | P | P | | P | |
| | Nieves y glaciares | | | | | | | | | P | | P |
| | Cuerpos de agua | | DEM | | | | | | | | | |

Fuente: CONAF, 2019.

Cuadro 15: Reglas de decisión para reemplazo de píxeles sobre la base de la trazabilidad 2013 para la Región de La Araucanía

| | | Clasificación supervisada 2016 | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----------------------|--------------------------------|--------------------|---------|----------|-----------------------|------------|---------------|-----------|------|--------------------|-----------------|
| | | Asentamiento | Tierras de cultivo | Pradera | Matorral | Matorral arborescente | Plantación | Bosque nativo | Humedales | ADDV | Nieves y glaciares | Cuerpos de agua |
| Trazabilidad 2013 | Asentamiento | | | | | | | | | | | |
| | Tierras de cultivo | | | | P | P | P | P | P | | | P |
| | Pradera | DEM | | | DEM | P | DEM | P | P | DEM | P | P |
| | Matorral | DEM | DEM | P | | P | DEM | DEM | | | | P |
| | Matorral arborescente | DEM | DEM | P | P | | DEM | DEM | | | | P |
| | Plantación | DEM | DEM | P | P | P | | P | | | | |
| | Bosque nativo | DEM | DEM | DEM | DEM | DEM | DEM | | DEM | P | | |
| | Humedales | DEM | DEM | P | | | P | | | P | P | |
| | ADDV | DEM | DEM | P | P | P | DEM | P | P | | P | |
| | Nieves y glaciares | | | | | | | | | P | | |
| | Cuerpos de agua | | DEM | | | | | | | | | |

Fuente: CONAF, 2019.

Cuadro 16: Reglas de decisión para reemplazo de píxeles sobre la base de la trazabilidad 2013 para la Región de Los Ríos

| | | Clasificación supervisada 2016 | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----------------------|--------------------------------|--------------------|---------|----------|-----------------------|------------|---------------|-----------|------|--------------------|-----------------|
| | | Asentamiento | Tierras de cultivo | Pradera | Matorral | Matorral arborescente | Plantación | Bosque nativo | Humedales | ADDV | Nieves y glaciares | Cuerpos de agua |
| Trazabilidad 2013 | Asentamiento | | | | | | | | | | | |
| | Tierras de cultivo | DEM | | | | | DEM | | DEM | DEM | | P |
| | Pradera | DEM | | | DEM | | DEM | P | DEM | DEM | P | DEM |
| | Matorral | P | DEM | P | | P | DEM | | | | | DEM |
| | Matorral arborescente | P | DEM | P | P | | DEM | P | | | | DEM |
| | Plantación | DEM | DEM | DEM | DEM | DEM | | DEM | DEM | | | DEM |
| | Bosque nativo | DEM | DEM | DEM | DEM | DEM | DEM | | DEM | P | | DEM |
| | Humedales | DEM | DEM | | | | | | | P | P | |
| | ADDV | DEM | DEM | DEM | P | P | DEM | P | DEM | | P | |
| | Nieves y glaciares | | | | | | | | | | | |
| | Cuerpos de agua | | DEM | | | | | | | | | |

Fuente: CONAF, 2019.

Cuadro 17: Reglas de decisión para reemplazo de píxeles sobre la base de la trazabilidad 2013 para la Región de Los Lagos-Chiloé

| | | Clasificación supervisada 2016 | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----------------------|--------------------------------|--------------------|---------|----------|-----------------------|------------|---------------|-----------|------|--------------------|-----------------|
| | | Asentamiento | Tierras de cultivo | Pradera | Matorral | Matorral arborescente | Plantación | Bosque nativo | Humedales | ADDV | Nieves y glaciares | Cuerpos de agua |
| Trazabilidad 2013 | Asentamiento | | | | | | | | | P | | |
| | Tierras de cultivo | | | | P | P | P | P | P | P | | P |
| | Pradera | DEM | | | DEM | P | DEM | P | DEM | DEM | | DEM |
| | Matorral | DEM | DEM | P | | P | DEM | P | P | P | | P |
| | Matorral arborescente | P | DEM | P | P | | DEM | P | P | P | | DEM |
| | Plantación | DEM | DEM | DEM | P | P | | | DEM | DEM | | |
| | Bosque nativo | DEM | DEM | DEM | P | P | | | DEM | DEM | | |
| | Humedales | DEM | DEM | DEM | DEM | DEM | DEM | DEM | | DEM | | DEM |
| | ADDV | DEM | DEM | DEM | DEM | DEM | DEM | DEM | DEM | | | |
| | Nieves y glaciares | | | | | | | | | DEM | | |
| | Cuerpos de agua | | DEM | | | | | | | | | |

Fuente: CONAF, 2019.

Cuadro 18: Reglas de decisión para reemplazo de píxeles sobre la base de la trazabilidad 2013 para la Región de Los Lagos-Palena

| | | Clasificación supervisada 2016 | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----------------------|--------------------------------|--------------------|---------|----------|-----------------------|------------|---------------|-----------|------|--------------------|-----------------|
| | | Asentamiento | Tierras de cultivo | Pradera | Matorral | Matorral arborescente | Plantación | Bosque nativo | Humedales | ADDV | Nieves y glaciares | Cuerpos de agua |
| Trazabilidad 2013 | Asentamiento | | | | | | | | | P | | |
| | Tierras de cultivo | | | | P | P | P | P | P | P | | P |
| | Pradera | DEM | | | DEM | P | DEM | P | DEM | DEM | P | DEM |
| | Matorral | DEM | DEM | P | | P | DEM | | DEM | P | | DEM |
| | Matorral arborescente | DEM | DEM | P | P | | DEM | P | DEM | P | | DEM |
| | Plantación | DEM | DEM | DEM | P | P | | | P | P | | |
| | Bosque nativo | DEM | DEM | DEM | P | P | DEM | | | P | | |
| | Humedales | | | | | | | | | DEM | P | |
| | ADDV | DEM | DEM | P | P | P | DEM | P | DEM | | P | |
| | Nieves y glaciares | | | | | | | | | P | | |
| | Cuerpos de agua | | DEM | | | | | | | | | |

Fuente: CONAF, 2019.

Cuadro 19: Reglas de decisión para reemplazo de píxeles sobre la base de la trazabilidad 2013 para la Región de Los Lagos-Lagos Norte

| | | Clasificación supervisada 2016 | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----------------------|--------------------------------|--------------------|---------|----------|-----------------------|------------|---------------|-----------|------|--------------------|-----------------|
| | | Asentamiento | Tierras de cultivo | Pradera | Matorral | Matorral arborescente | Plantación | Bosque nativo | Humedales | ADDV | Nieves y glaciares | Cuerpos de agua |
| Trazabilidad 2013 | Asentamiento | | | | | | | | | | | |
| | Tierras de cultivo | | | | P | P | DEM | P | P | P | | P |
| | Pradera | DEM | | | | P | DEM | P | | DEM | P | P |
| | Matorral | DEM | P | P | | P | DEM | DEM | | DEM | | |
| | Matorral arborescente | DEM | DEM | P | P | | | P | DEM | DEM | | DEM |
| | Plantación | DEM | DEM | DEM | P | | | | | P | | |
| | Bosque nativo | DEM | DEM | DEM | P | DEM | DEM | | DEM | DEM | | |
| | Humedales | | | | | | | | | DEM | P | |
| | ADDV | DEM | DEM | P | DEM | P | DEM | P | DEM | | P | |
| | Nieves y glaciares | | | | | | | | | P | | P |
| | Cuerpos de agua | | DEM | | | | | | | | | |

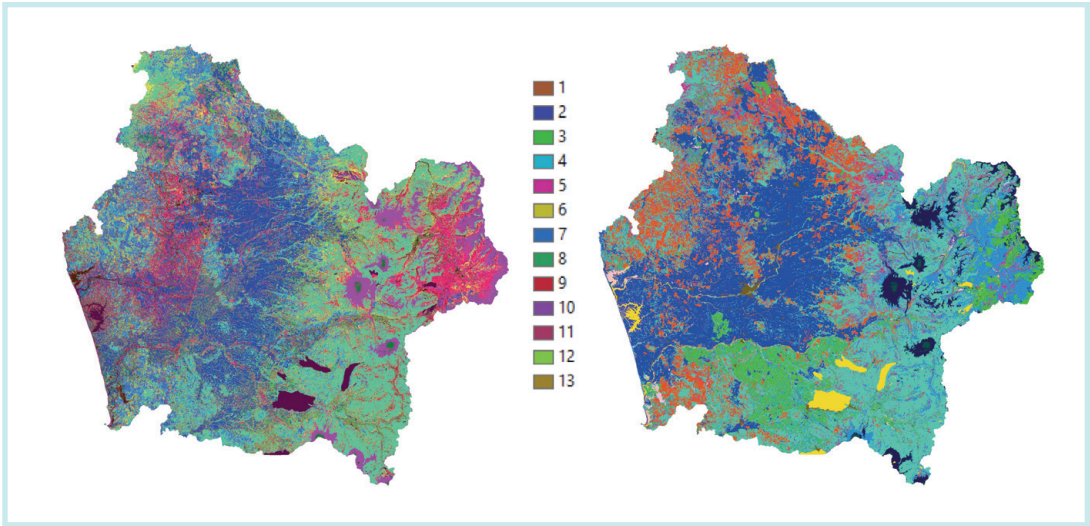
Fuente: CONAF, 2019.

Dónde:

| | |
|-----|---|
| | Baja o nula posibilidad de ocurrencia del cambio de uso |
| | Alcance metodológico (confusión espectral) |
| | Preferencia histórica trazabilidad 2013 |
| | Posibilidad de ocurrencia del cambio de uso |
| DEM | Posibilidad de ocurrencia condicionada a cota altitudinal |
| | Sin cambio de uso |

La creación y aplicación de estas reglas es producto de un proceso iterativo en el que se parte de un conjunto reducido de reglas a las cuales se le van agregando otras hasta obtener una capa que sea lo más parecida a lo observado en la realidad por medio de *Google Earth*. En la Figura 18 se observa el cambio desde la salida de la clasificación supervisada en bruto (sin aplicación de reglas) a la cobertura de clasificación supervisada final, a la que se le aplicaron todas las reglas de reemplazo de píxeles para esa región.

Figura 13: *Ejemplo de visualización de la aplicación de reemplazo de píxeles (derecha) en cobertura de clasificación supervisada (izquierda), Región de La Araucanía*

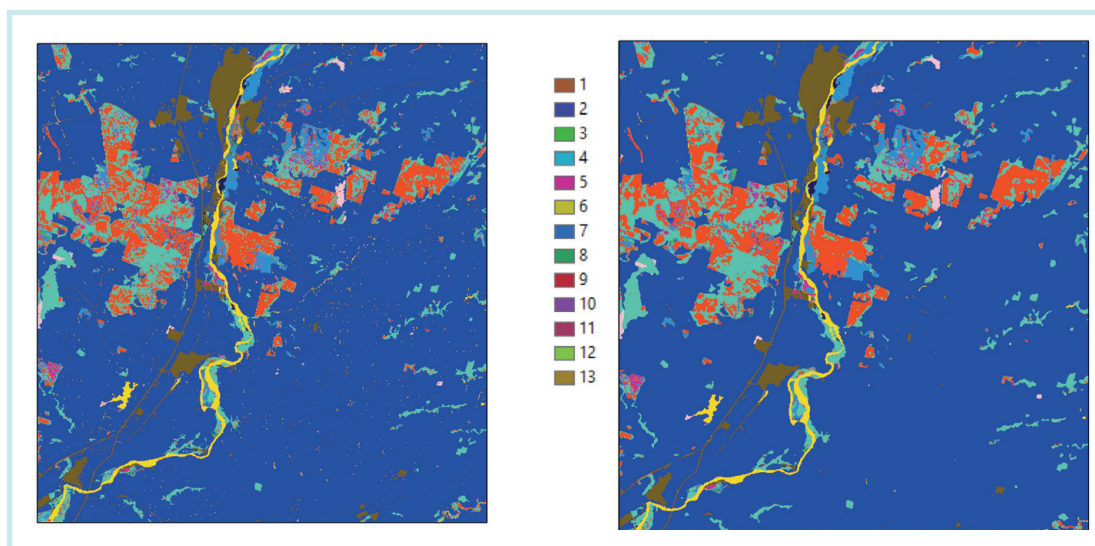


Fuente: Imágenes de ArcGIS 10.3 de Esri. 2019. Modificado por CONAF. 2019.
Conforme al mapa de Naciones Unidas.

Aplicación de *majority filter*

A la cobertura obtenida a partir del reemplazo de píxeles se le aplica un filtro mayoritario (*majority filter*) dos veces consecutivas en *ArcGis* mediante la función del mismo nombre. Con esto se busca reemplazar celdas basándose en el valor mayoritario de las celdas contiguas, de manera de eliminar posibles píxeles aislados que generen ruido en la cobertura final. Esta función se empleó considerando dos parámetros: el número de vecinos y el umbral de reemplazo. En cuanto al número de vecinos, se usó un *kernel* de ocho, es decir, se consideraron todos los vecinos alrededor de un píxel, mientras que en el umbral de reemplazo se usó la opción de mayoría. Dicho en otros términos, al menos cinco de ocho celdas deben estar conectadas y tener el mismo valor alrededor del píxel para generar un reemplazo de valores, de lo contrario el valor de la celda se mantiene (en este caso, el valor de la celda corresponde al uso).

Figura 14: *Ejemplo de visualización de la aplicación de filtro mayoritario dos veces consecutivas (derecha) sobre cobertura de clasificación supervisada*



Fuente: Imágenes de ArcGIS 10.3 de Esri. 2019. Modificado por CONAF. 2019.

Agregación de píxeles sin información

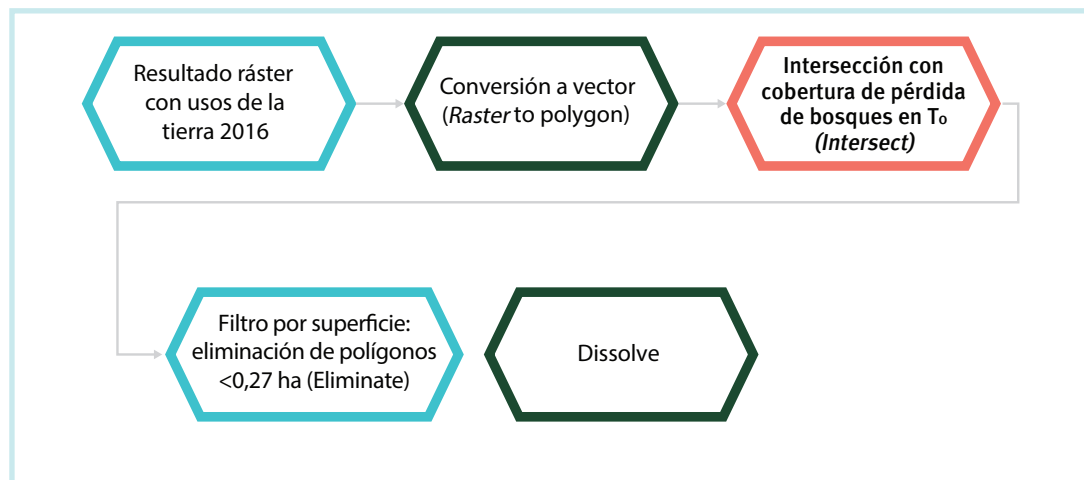
En última instancia se generó una regla cuyo objetivo es rellenar aquellos píxeles que quedaron sin información del paso anterior. Esta regla sería la siguiente:

- Si un píxel en la cobertura de trazabilidad tiene un valor dentro de los once subusos utilizados (asentamientos, tierras de cultivos, praderas, matorral, matorral arborescente, plantación, bosque nativo, humedales, áreas desprovistas de vegetación, nieves y glaciares o cuerpos de agua) y en la cobertura proveniente del paso anterior ese mismo píxel no posee información, se mantiene el uso de la cobertura de trazabilidad para no generar una capa final con vacíos de información.

Atribución de pérdidas según clasificación supervisada

Este paso consiste en asignar las categorías de usos de la tierra obtenidas de la clasificación supervisada (con aplicación de filtro de mayoría y reglas de decisión) a la cobertura vectorial de pérdidas de bosque nativo en To resultantes de la adaptación al método Multiíndices.

Figura 15: *Geoprocesos efectuados a la cobertura de clasificación supervisada para la atribución de pérdidas en bosque nativo*



Fuente: CONAF, 2019.

Lo primero que se debe hacer es transformar la cobertura ráster a formato vectorial con su respectivo atributo de categoría de uso de la tierra, proceso que puede efectuarse a través de *ArcGis* en su módulo *Raster to polygon*. Posteriormente, se lleva a cabo la intersección entre las coberturas vectoriales de la clasificación supervisada y las pérdidas de bosque nativo (previamente suavizada, ver sección 6, c, ii) para asignar el uso T_1 a los cambios de usos, y por último se eliminan los polígonos menores de 0,27 ha por ser inferiores a la unidad mínima cartografiable. Ambos procesos se realizan, respectivamente, mediante el módulo *Intersect* y *Eliminate* disponibles en *ArcGis*. Por último, se practica un proceso de *Dissolve* también en *ArcGis*, con la finalidad de fusionar las regiones adyacentes.

Filtro de ganancias según clasificación supervisada

Este proceso consiste en mejorar la exactitud en la detección de ganancias entregadas por el proceso Multiíndice, ya que su resultado se basa en el aumento espectral de la actividad fotosintética de la vegetación. Es posible que se detecten áreas consideradas como ganancias, que en la realidad no impliquen un cambio de uso al uso bosque. Por tanto, a la cobertura de ganancias se le aplica un filtro para excluir estas áreas de falsas ganancias.

Se consideraron tres usos en los que este error se puede presentar en grandes superficies: el uso plantaciones, el uso terrenos agrícolas y el uso pradera. Las plantaciones fueron consideradas por su crecimiento innato, sobre todo en las plantaciones juveniles, y por su extensión en superficie dentro del área de estudio, en especial en la zona más septentrional (Región del Maule y Biobío), mientras que los terrenos agrícolas y praderas pueden presentar un gran aumento espectral, sobre todo si consideramos la posibilidad de que en la imagen T₀ este uso se encuentre en barbecho y en la imagen T₁ en producción, además de la extensa área de este uso en la zona sur del área de estudio (regiones de Los Ríos y de Los Lagos).

En este proceso de filtrado se usaron tres coberturas: la cobertura de ganancias, la cobertura de trazabilidad 2013 y la cobertura de clasificación supervisada. De la cobertura de trazabilidad 2013 fueron escogidos los tres usos anteriormente nombrados, y mediante la función Selección por Localización en *ArcGis* se seleccionaron los polígonos de la cobertura de ganancias que se intersecan con los polígonos escogidos de la cobertura de trazabilidad 2013. A continuación, de la cobertura de clasificación supervisada se eligen los tres usos (plantaciones, terrenos agrícolas y praderas), y mediante la función Selección por Localización en *ArcGis*, se seleccionan los polígonos que se intersecan con los de la cobertura de ganancias anteriormente elegidas. Estos polígonos que se intersecaron y seleccionaron de la cobertura de ganancias son eliminados.

La razón de por qué estos polígonos son eliminados se debe a que no representan un cambio hacia el uso bosque nativo (aumento a bosque), porque tanto la cobertura de trazabilidad 2013 como la de clasificación supervisada señalan que estos polígonos tienen un uso destino distinto a bosque. De esta forma las ganancias detectadas solo corresponden a un aumento espectral en la actividad fotosintética, propio de los usos seleccionados.



Atribución de cambios de matorral y matorral arborescente mediante clasificación supervisada

Para las coberturas de cambio de los usos matorral y matorral arborescente se aplicó un filtro similar al del punto anterior para mejorar la exactitud del cambio. Estas coberturas de cambio se intersecan con la cobertura de clasificación supervisada. Para ambas se consideraron las siguientes reglas. Si la intersección con los polígonos de cambios sigue siendo uso matorral o matorral arborescente, se descarta porque no hay cambio. En el caso particular de esta actualización el año 2016, se descartaron los cambios hacia humedales y cuerpos de agua, ya que estos se debían a la presencia de pequeñas nubes de baja altitud que generaron confusión a la clasificación supervisada. Esta situación debería ser reanalizada para las próximas actualizaciones.

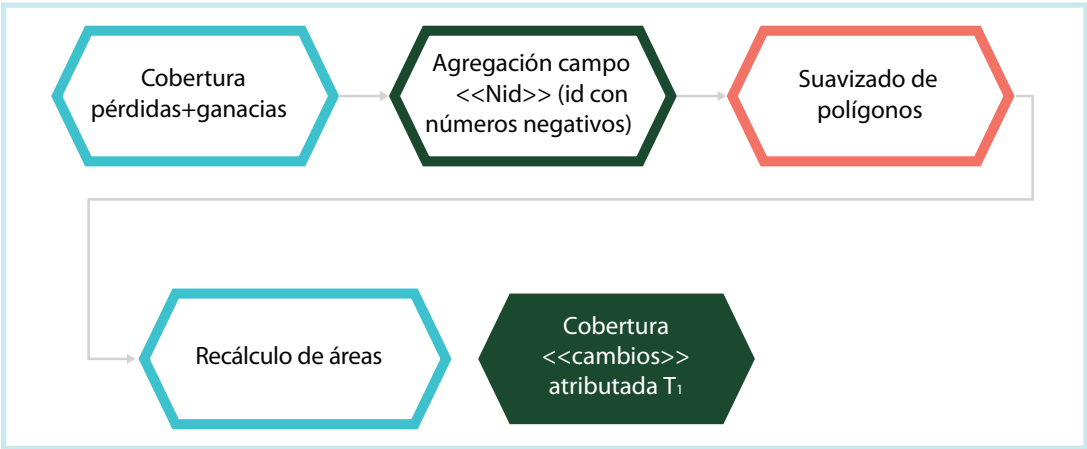


Detección de cambios de otros usos mediante clasificación supervisada

Para la detección de cambios de los usos diferentes a bosque nativo, matorral y matorral arborescente se comparó la cobertura de trazabilidad (2103/2014) con la clasificación supervisada uso por uso. Esto quiere decir que se tomaron todos los píxeles de un uso; en particular, se enmascararon y se intersecaron con los píxeles de la clasificación supervisada. Si como resultado ambos píxeles eran iguales en uso, se descartaban. En el caso particular de plantaciones y terrenos agrícolas, si alguno de estos aparecía como resultado de cambios del otro (de terrenos agrícolas a plantaciones, o viceversa), se descartaba este cambio, porque la clasificación supervisada tiende a confundir los terrenos agrícolas recién arados con las líneas de plantaciones jóvenes. Después de este proceso de comparación de uso por uso, a nivel de píxel, se les aplicó el mismo proceso de depuración descrito en la Etapa 3.

Generación de cobertura de cambios

Figura 16: Geoprocesos realizados para la obtención de cobertura de cambios

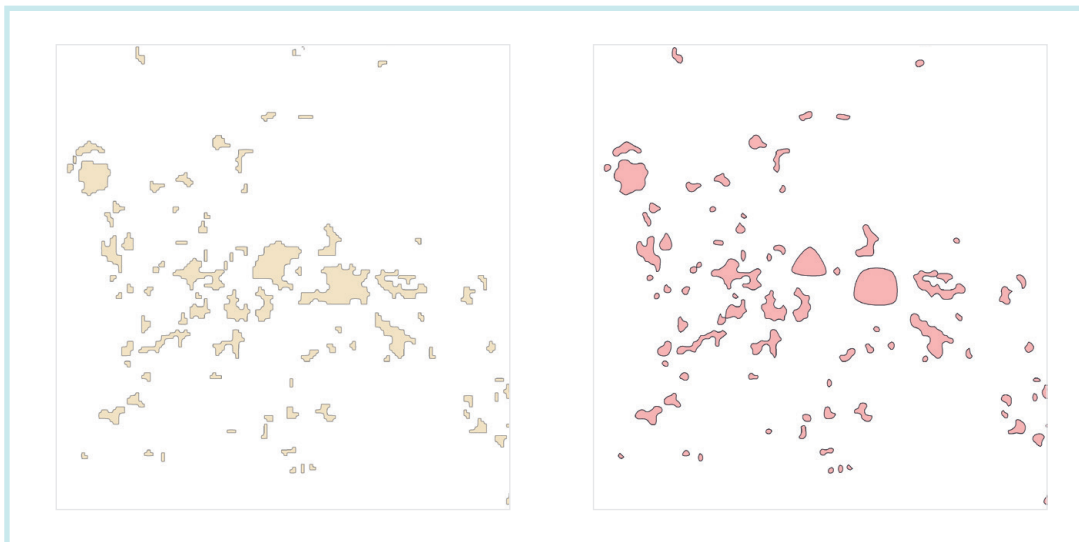


Fuente: CONAF, 2019.



A partir de la cobertura atributada de pérdida y ganancia de bosque nativo, más la coberturas de cambios de matorral y matorral arborescente y la de otros usos, se genera una nueva capa vectorial denominada cobertura de cambios. A esta se le agrega un nuevo campo (denominado Nid), el cual es un “id”, pero con números negativos (esto tiene directa relación con la programación realizada para generar la nueva base de datos de trazabilidad 2016, explicado en la Sección 4, c), y finalmente se realiza otro proceso de suavizado mediante la función “Suavizado” ubicada en la barra de Edición Avanzada de *ArcGis*. Se utiliza el valor dos para el desplazamiento máximo permisible y se recalculan las áreas para cada polígono. Una vez llevado a cabo el último proceso de suavizado, se recomienda efectuar una revisión de la topología de esta cobertura, poniendo especial énfasis en el error producido por el solapamiento de los polígonos suavizados.

Figura 17: *Ejemplo de visualización de la aplicación de suavizado (derecha) en cobertura de cambios atributada (izquierda) en Región de La Araucanía*



Fuente: Imágenes de ArcGIS 10.3 de Esri. 2019. Modificado por CONAF. 2019.

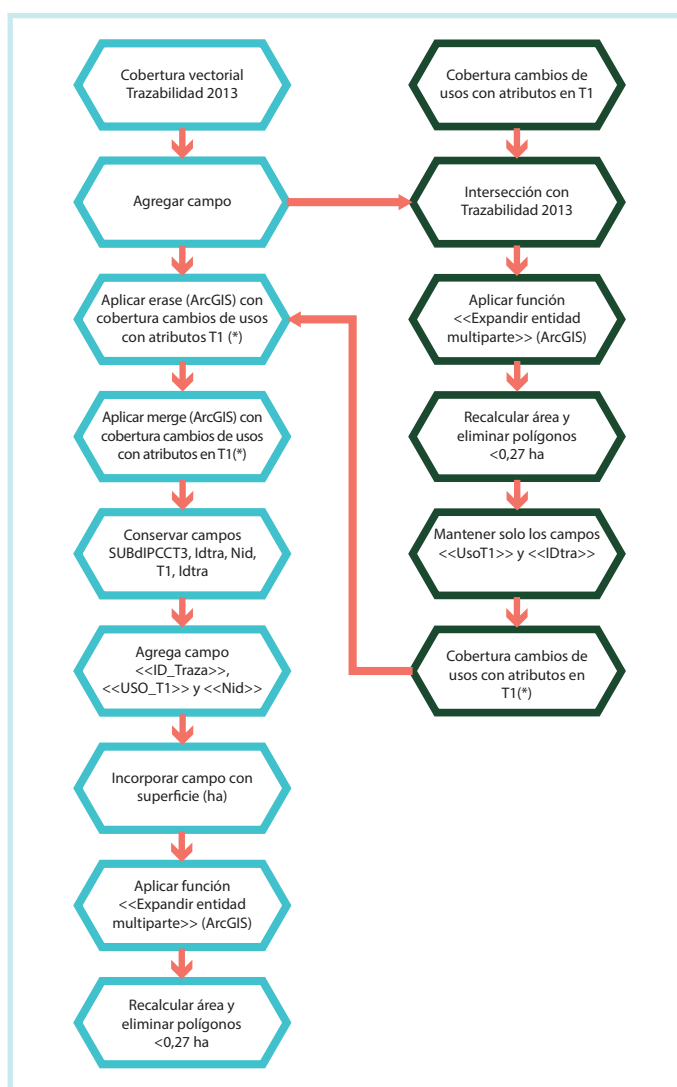


Etapla 5: Integración geométrica y alfanumérica

Integración geométrica de cambios de uso de la tierra a cobertura de trazabilidad 2016

El objetivo de este paso es integrar a la cobertura vectorial de trazabilidad 2013 la geometría de los elementos espaciales identificados como cambios y generar campos que luego serán utilizados para la creación de la base de datos de la cobertura final de cambios de usos 2017. Para esto se deben efectuar una serie de geoprocenos, como muestra la siguiente figura, que son detallados a continuación.

Figura 18: Geoprocenos efectuados para la obtención de la cobertura final de cambios de usos la tierra 2016 (T_1) enfocados a los cambios de usos de la tierra en bosque nativo período 2013 (T_0)-2016 (T_1)



Fuente: CONAF, 2019.

A la cobertura de trazabilidad se le agrega un campo denominado “IDtra”, el cual le da un ID único a cada polígono de esta cobertura. Esto permite hacer el seguimiento de ese polígono a través de los sucesivos procesos que se desarrollarán en los próximos pasos.

Paso 1:

La cobertura de cambios suavizada se interseca con la cobertura de trazabilidad. A los polígonos resultantes se les aplica la función “Expandir entidad multiparte”, ubicada en la barra de Edición Avanzada de *ArcGis*, se recalcula el área y se eliminan los polígonos resultantes menores de 0,27 ha.

Paso 2:

A la cobertura de trazabilidad 2013 se le aplica la función erase (*ArcGis*) o deferencia (*QGIS*) con los nuevos polígonos de cambios generados, de manera de borrar en la cobertura de trazabilidad la posición de los polígonos de cambios. Posteriormente, la cobertura de trazabilidad con “agujeros” se fusiona con la cobertura de cambios (suavizada, intersecada, explosionada y filtrada por superficie) mediante la función *merge* (*ArcGis*) o *unión* (*QGIS*). En este punto, es importante conservar los siguientes campos de las coberturas de trazabilidad y de cambios.

Paso 3:

Posteriormente, la cobertura de trazabilidad con “agujeros” se fusiona con la cobertura de cambios (suavizada, intersecada, explosionada y filtrada por superficie) mediante la función *merge* (*ArcGis*) o *unión* (*QGIS*). En este punto, es importante conservar los siguientes campos de las coberturas de trazabilidad y de cambios:

- Trazabilidad: SUBdIPCCT3, IDtra
- Cambios: Nid, T₁, IDtra (este último campo, se debe nombrar de otra manera, por ejemplo, “IDtra_cambios”)

Paso 4:

Luego, se debe generar un nuevo campo en esta capa llamado “ID_Traza”. En *ArcGis* se debe correr el siguiente código en lenguaje Python en la calculadora de campo:

- En Pre-logic (primer cuadro blanco):

```
def reclass(x,y):
    if x < 0:
        return x
    else:
        return y
```
- ID_Traza = (segundo cuadro blanco):

```
reclass( !Nid!, !IDtra!)
```

Adicionalmente, se genera otro campo llamado “Uso_T₁”. En *ArcGis* se debe correr el siguiente *script* en lenguaje *Python* en la calculadora de campo:

```

• En Pre-logic:
  def reclass(x,xx,xxx):
    if x < 0:
      return xx
    else:
      return xxx
• Uso_T1=:
  reclass(!Nid!, !T1!, !SUBdIPCCT3!)

```

Este *script* lee el campo “Nid”. Si este es negativo (lo cual corresponde a un polígono de cambio), se asigna el valor del campo “T₁” al campo nuevo, campo “USO_T₁”; por el contrario, si el valor es positivo (polígono sin cambios), se asigna el valor del campo “SUBdIPCCT3” al campo “USO_T₁”.

Finalmente, se genera un tercer campo denominado “ID_T₀”. En *ArcGis* se debe correr el siguiente *script* en lenguaje *Python* en la calculadora de campo:

```

• En Pre-logic:
  def reclass(x,xx,xxx):
    if x < 0:
      return xx
    else:
      return xxx
• Uso_T1=:
  reclass(!Nid!, !IDtra_cambios!, !IDtra!)

```

Este script lee el campo “Nid”. Si este es negativo (lo cual corresponde a un polígono de cambio), este valor se asigna al campo “ID_traza”; si el valor es positivo (polígono sin cambios), se asigna el valor del polígono de trazabilidad del campo “IDTra”. En Pre-logic es importante respetar los espacios precedentes a las funciones if, else (dos espacios) y return (cuatro espacios).

Este *script* lee el campo “Nid”. Si este es negativo (lo cual corresponde a un polígono de cambio), se asigna el valor del campo “IDtra_cambios” al campo nuevo, campo “ID_T₀”; por el contrario, si el valor es positivo (polígono sin cambios), se asigna el valor del campo “IDtra” al campo “ID_T₀”. En la base de datos se deben dejar estos tres primeros campos en el siguiente orden: “ID_Traza”, “Uso_T₁” y “ID_T₀”. Adicionalmente, se debe incorporar un campo que tenga la superficie de cada polígono.

A esta cobertura, producto de la unión de trazabilidad con los cambios y que posee los tres campos anteriormente nombrados, se le aplica la función “Expandir entidad multiparte”, ubicada en la barra de Edición Avanzada de *ArcGis*. Para la cobertura resultante es necesario recalculare las áreas de cada polígono. A continuación, seleccionar las superficies menores de 0,27 ha y aplicar la función *eliminate* (*ArcGis*), asegurándose de que estos polígonos pequeños sean absorbidos por el polígono de mayor área. En *QGIS* se debe usar la función *eliminar polígonos* <<astillas>> seleccionando el campo de área como atributo, con un valor menor de 0,27 ha; a su vez, se debe seleccionar la opción “Combina la selección con el polígono vecino” eligiendo la opción “Área más grande”. Se deben recalculare las áreas de la nueva capa para verificar si se eliminaron todos los polígonos menores de 0,27 ha. En caso de que todavía queden algunos, se repite este paso hasta que desaparezcan o que el programa arroje la misma cantidad de polígonos menores de 0,27 ha al aplicar esta función varias veces.

Integración alfanumérica de cambios de uso de la tierra a cobertura de trazabilidad 2016

Obtenida esta capa, se procede a su atribución en el *software R*. Este *script* vincula la nueva capa de usos de la tierra con la base de datos de la cobertura de trazabilidad 2013, agregando los campos correspondientes para el período 2016.

La lógica de este algoritmo es la siguiente:

- Se comparan los valores de los campos “ID_Traza” con “ID_T₀”. Si son coincidentes y el campo “Uso_T₁” es distinto de los valores correspondientes a los usos matorral arborescente, plantación o bosque nativo, el algoritmo copia los valores de los campos de la última actualización (año 2013/2014) de la cobertura de Trazabilidad 2013 To a los campos del año 2016. Estos usos atributados corresponden a la categoría de “otros usos permanentes”.
- Si los valores de los campos “ID_Traza” e “ID_T₀” son iguales y el campo “Uso_T₁” presenta los valores correspondientes a los usos matorral arborescente, plantación o bosque nativo, el algoritmo copia los valores de los campos de la última actualización (año 2013/2014) de la cobertura de Trazabilidad 2013 To a los campos del año 2016. Sin embargo, se deja especificado el paso de 2013 a 2016 para estos usos, es decir, de matorral arborescente a matorral arborescente, de plantación a plantación o de bosque nativo a bosque nativo para mantener la misma estructura de la base de datos de la cobertura de trazabilidad. Cabe mencionar que el paso de bosque nativo a bosque nativo corresponde a la categoría de “bosque permanente”.
- Si los valores de los campos “ID_Traza” e “ID_T₀” son diferentes y el campo “Uso_T₁” presenta los valores correspondientes al uso bosque nativo adicionalmente en el año 2013/2014, este cambio se clasifica como “aumento a bosque” dentro de los campos del año 2016.
- Si los valores de los campos “ID_Traza” e “ID_T₀” son diferentes y el campo y el uso bosque nativo están en el año 2013/2014, entonces los campos del año 2016 se atributan como pérdida. Si los valores del campo “Uso_T₁” corresponden a asentamientos, terrenos agrícolas, praderas, matorral, humedales, áreas desprovistas de vegetación, nieves y glaciares o cuerpos de agua, la pérdida se clasifica como “deforestación”. Por otro lado, si los valores del campo “Uso_T₁” corresponden a matorral arborescente o plantación, la pérdida se clasifica como “degradación”, siguiendo la misma estructura de la base de datos de la cobertura de trazabilidad.

Los campos que se deben rellenar correspondientes al año 2016 fueron atributados con los códigos y descriptores de códigos usados por el catastro de bosque nativo de CONAF siguiendo la misma estructura presente en la cobertura de trazabilidad.

Capítulo 4

Recomendaciones

A lo largo del desarrollo de este protocolo han surgido diferentes observaciones y alcances, los cuales pueden interpretarse como puntos críticos dentro de este trabajo. La recopilación, organización y clasificación de estos puntos tienen como objetivo mejorar distintos aspectos de este protocolo, tanto del alcance de este trabajo como de la mejora en el logro de sus objetivos. Por tanto, el fin de esta sección es unificar estos puntos a modo de recomendaciones para las futuras actualizaciones de este protocolo y de los trabajos vinculados a él. Estas observaciones están organizadas a partir de la estructura del protocolo, en la que para cada ítem se propondrán las recomendaciones pertinentes según corresponda.

Respecto de los alcances

La Unidad Mínima Cartografiable (UMC) debe someterse a discusión acerca de si se mantienen las 0,5 ha de bosque determinadas por la Ley 20.283, que es la UMC utilizada por el Catastro de Bosque Nativo, o si se emplean las 0,27 ha (tres píxeles) de UMC para imágenes satelitales del sensor *Landsat 8*. Esto se debe considerar y definir de forma estandarizada para las siguientes actualizaciones del catastro y de las coberturas de trazabilidad, sobre todo si se ocupa otro sensor, como *Sentinel-2*, el cual posee una resolución espacial mayor que *Landsat 8*.

Respecto de la infraestructura tecnológica: *hardware y software*

- Considerando que el resultado del mapa de cambios de usos de la tierra a nivel regional requiere una actualización cada dos años, el uso de un set temporal de imágenes satelitales necesita computadores de alta capacidad de procesamiento. Se recomienda que los computadores cuenten con las siguientes características: 16 GB de RAM como mínimo; procesador de al menos 3,4 GHz, en lo posible de 8 núcleos, y un disco duro de al menos 2 TB.
- Respecto del punto anterior, se recomienda que los usuarios que procesan las imágenes satelitales para la obtención del mapa de cambios de usos de la tierra tengan por lo menos un nivel de conocimiento mínimo de técnicas y manejo de software GIS y de percepción remota, así como también de lenguaje de programación (R y JavaScript).

- Como la metodología expuesta en el presente protocolo se aplica al procesamiento de nivel medio-avanzado de programación, es necesaria la capacitación a los usuarios que quieran reproducirla, por tanto, se recomienda destinar algunas horas a este fin.
- Respecto del tratamiento de archivos vectoriales en formato *shapefile*, se recomienda utilizar *software* licenciado *ArcGis* que cuente con una licencia *Desktop Extensions* para así aplicar técnicas de análisis espacial, análisis 3D y análisis estadístico. En caso de no contar con esta licencia pagada, se recomienda reproducir funciones en el software libre *QGIS*, aunque no todas las funciones de las extensiones de *ArcGis* puedan estar disponibles en él.
- Si consideramos que las técnicas de reconocimiento de cambios espectrales sobre imágenes satelitales se realizan de manera automatizada, se hace necesaria la complementación del componente humano en la etapa de fotointerpretación visual para la obtención de cambios de usos de la tierra. Se recomienda esto teniendo en cuenta que los métodos automatizados de procesamiento de imágenes satelitales son capaces de reconocer cambios de cobertura de la tierra y no cambios de su uso.

Respecto de las fuentes de información

- Las coberturas de trazabilidad pueden presentar errores de topología (agujeros, duplicado de polígonos, nodos que comparten más de 1 polígono, etc.). Se recomienda corregir estos errores antes de comenzar a trabajar en la obtención del mapa de cambios, considerando que los resultados de los cambios (ganancias y pérdidas) serán incorporados a la cobertura de trazabilidad para cada una de las regiones.
- Se recomienda mejorar la base cartográfica del catastro bosque nativo, específicamente en las categorías bosque, matorral arborescente y matorral, considerando que el catastro es un insumo base para la determinación de muestras de entrenamiento para la clasificación supervisada.
- Se aconseja incorporar información vectorial auxiliar proveniente de otras áreas de CONAF, de otras instituciones, así como también de otras entidades (e. g. empresas forestales). Esta información permitirá un mejor resultado en la coberturas posteriores, ya que tendrá una mayor exactitud en cuanto a los usos de la tierra del país. Esta información es relevante y debe ser un punto importante de considerar en la próximas actualizaciones.
- En línea con el punto anterior, es necesario integrar la información sistematizada de las parcelas asociadas a los planes de manejo. Este punto es clave debido a que corresponde a la información adicional que necesita ser incorporada en las actualizaciones del catastro. De lo anterior se desprende la necesidad de contar con información espacialmente explícita y con el estado de desarrollo de tales planes de manejo.

Respecto de la metodología

- Se sugiere evaluar el uso de imágenes *Sentinel-2* para las próximas actualizaciones. Para esta se disponían imágenes solo de la última temporada.
- El método del mosaico con menor cobertura de nubes obtenido en *GEE* presenta nubes en las regiones de La Araucanía, de Los Ríos y Los Lagos. Estas nubes no logran ser enmascaradas por los algoritmos desarrollados en la plataforma *GEE* por diversas razones. Se recomienda seguir investigando en nuevos algoritmos que permitan la eliminación o reemplazo de nubes. Lo mismo para la eliminación o reemplazo de sombras de nubes para tener la menor cantidad de áreas sin información.
- Se propone también, a nivel de manejo de datos (imágenes satelitales), la división del territorio a nivel de macrozonas o macrorregiones (zonas bioclimáticas, pisos vegetacionales, etc), considerando que algunos de los usos del suelo, como la vegetación nativa, no siguen una lógica de división política administrativa. Esto permitiría generar umbrales de detección de cambios más precisos para estas formaciones vegetales, sin caer en la separación artificial impuesta al usar una región administrativa.
- Respecto de los resultados de ganancias y pérdidas, se recomienda hacer retroalimentación con el personal de CONAF de regiones, considerando su experiencia de trabajo en terreno, lo cual se traduciría en un filtro importante para descartar superficies de falsos cambios.
- El método de clasificación supervisada puede ser mejorado en su exactitud, considerando que es más efectivo en la medida que se incorpore un set mayor de imágenes satelitales. De esta manera, se recomienda incorporar al menos tres imágenes satelitales de distinta temporalidad por región, para así optimizar los resultados. En este ítem también se aconseja realizar dos campañas de terreno: una para la obtención de áreas de entrenamiento, y otra para la validación del resultado de la clasificación. Otra sugerencia para este ítem es la retroalimentación con personal de CONAF de regiones para la definición de las áreas de entrenamiento, considerando la experiencia de trabajo en terreno que ellos pueden aportar.
- Se recomienda compilar la mayoría de los *scripts* generados en diferentes etapas, de manera de automatizar aún más los procesos y, por tanto, su tiempo de ejecución. Esto también puede inducir a menores errores en la ejecución por parte de los usuarios y del personal a cargo de estas etapas.

- En la etapa de integración alfanumérica se recomienda considerar los usos señalados en todas las actualizaciones del catastro, de manera de construir una línea de tiempo que permita reconocer los cambios de uso en el tiempo y los posibles errores en la mala atribución de estos: ejemplo de esto es que T_1 tenga un uso “bosque nativo”, T_2 uso “bosque nativo”, T_3 uso “cuerpos de agua” y T_4 uso “bosque nativo”. De esta manera se puede determinar si un cambio es real o se debe solo a una mala atribución. Siguiendo el ejemplo anterior, el aumento de bosque nativo desde cuerpos de agua no es un cambio real, ya que corresponde a bosque permanente.
- En el caso de los incendios, se recomienda incorporar una columna en que se señale que un polígono fue afectado por este siniestro, de manera de tener una visión más clara de las posibles causas de cambio del polígono.
- En concordancia con el punto anterior, también es deseable saber si un polígono fue revisado (ya sea en terreno o en gabinete) para conocer el nivel de control y validación que se tiene de la cobertura final.



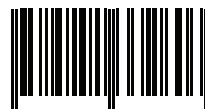


- Breiman, Leo. 2001. *Random Forests*. Editado por Robert E. Schapire. Machine Learning. Kluwer Academic Publishers.
- Chuvieco, Emilio. 2007. *Teledetección ambiental: la observación de la Tierra desde el espacio*. España. Editorial Ariel.
- Corporación Nacional Forestal (CONAF). 2008. *Catastro de Recursos Vegetacionales de la Región de Biobío*. Santiago.
- CONAF. 2008. *Catastro de Recursos Vegetacionales de la Región de Los Ríos*. Santiago.
- CONAF. 2009. *Catastro de Recursos Vegetacionales de la Región de Los Lagos*. Santiago.
- CONAF. 2009. *Catastro de los Recursos Vegetacionales de la Región de La Araucanía*. Santiago.
- CONAF. 2016. *Catastro de Recursos Vegetacionales de la Región del Maule*. Santiago.
- CONAF. 2016. *Estrategia Nacional de Cambio Climático y Recursos Vegetacionales 2017- 2025*. Santiago.
- CONAF. 2016. *Nivel de Referencia de Emisiones Forestales / Nivel de Referencia Forestal Subnacional de Chile*. Santiago.
- CONAF. 2019. *Protocolo metodológico de elaboración de mapas de usos y cambios de usos de la tierra*. Santiago
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. 2013. *Descripción y Corrección de Productos Landsat 8 LDCM (Landsat Data Continuity Mission)*. Bogotá. Centro de Investigación y Desarrollo CIAF.
- Grupo Intergubernamental de expertos sobre el cambio climático (IPCC). 2006. *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero*. Editado por Simon Eggleston, Leandro Buendia, Kyoko Miwa, Todd Ngara y Kiyoto Tanabe. Japón. Institute for Global Environmental Strategies.
- Jin, S., Yang, L., Danielson, P., Homer, C., Fry, J., y Xian, G. 2013. *A comprehensive change detection method for updating the National Land Cover Database to circa 2011*. Remote Sensing of Environment.
- Ministerio de Agricultura. IDE- MINAGRI. 2016. (Disponilbe en <https://ide.minagri.gob.cl/geoweb/2019/11/20/limites/>) Acceso: 18 de enero de 2019.

Este documento forma parte de una serie de 21 publicaciones técnicas y refleja algunas de las actividades y resultados alcanzados durante cinco años de trabajo del proyecto Sistema Integrado de Monitoreo y Evaluación de los Ecosistemas Forestales Nativos (SIMEF), una iniciativa del Gobierno de Chile, con apoyo técnico de la FAO y financiamiento del Fondo para el Medioambiente Mundial (FMAM). La iniciativa ha implementado un inventario nacional incorporando las dimensiones biofísicas, socioeconómicas, biodiversidad y el cambio de uso de la tierra, consolidando finalmente un sistema de monitoreo y la evaluación del stock de carbono de los bosques chilenos.

Estas publicaciones se agrupan en protocolos técnicos, que sistematizan las diversas modalidades de inventario de los ecosistemas forestales nativos; informes técnicos con presentación de los resultados producto de la aplicación de estos protocolos y también se entrega un conjunto de manuales técnicos útiles para profesionales y propietarios en su trabajo de campo.

ISBN 978-92-5-133260-3



9 789251 332603

CB0845ES/1/02.21