

Informe Final

Actualización de mapas de stock y flujo de carbono para el área del Proyecto GEF Corredores Biológicos de Montaña



Corredores Biológicos
de **Montaña**
Proyecto GEF

Autor: Javier Cano Martín

JavierCano



Especialista:

M.Sc. Javier Cano Martín

Contraparte Técnica:

División Recursos Naturales y Biodiversidad - MMA

Equipo Proyecto GEF Corredores Biológicos de Montaña (GEFSEC ID 5135)

Financiado por:

Proyecto GEFSEC ID 5135 “Protegiendo la Biodiversidad y Múltiples Servicios Ecosistémicos en Corredores Biológicos de Montaña, en el Ecosistema Mediterráneo de Chile”. Ministerio del Medio Ambiente - ONU Medio Ambiente (2016-2022).

Citar como:

MMA - ONU Medio Ambiente (2020). Estimación de las emisiones y capturas de carbono de la vegetación nativa en el área del proyecto GEF Montaña. Encargado a: M.Sc. Javier Cano Martín. Financiado en el marco del proyecto GEFSEC ID 5135 Ministerio del Medio Ambiente - ONU Medio Ambiente. Santiago, Chile. 28pp.



Tabla de Contenidos

Estimación de las emisiones y capturas de carbono de la vegetación nativa en la zona central de Chile.....	9
Resumen.....	9
Antecedentes	10
Metodología.....	11
Objetivos	11
Materiales y herramientas	11
Procedimiento metodológico	14
Resultados	19
Resultados a nivel de área de proyecto	19
Resultados a nivel comuna	22
Conclusiones	27
Bibliografía	28

Índice de Tablas

Tabla 1. Superficie por tipo de cobertura.....	19
Tabla 2. Existencias de carbono por tipo de cobertura y año.....	20
Tabla 3. Existencias por hectárea por tipo de cobertura y año.....	20
Tabla 4. Emisiones netas por periodo y tipo de cobertura.....	20
Tabla 5. Emisiones por degradación y tipo de cobertura.....	20
Tabla 6. Capturas por aumento de existencias y tipo de cobertura.....	20
Tabla 7. Variación de emisiones/capturas por degradación/aumento de existencias y tipo de cobertura ..	20
Tabla 8. Existencias totales por año y comuna.....	22
Tabla 9. Existencias por hectárea y comuna.....	23
Tabla 10. Emisiones netas por periodo y comuna.....	24
Tabla 11. Emisiones por degradación y captura por aumento de existencias por periodo y comuna.....	26

Índice de Figuras

Figura 1. Serie histórica de satélites Landsat y años de operación desde 1972 hasta el presente. Fuente; (USGS, 2019).....	12
Figura 2. Número, ancho y rango de bandas de sensores a bordo de satélites Landsat. Fuente: (NASA, 2020).....	12
Figura 3. Mapa de tipo de cobertura en el área del Proyecto GEF Corredores Biológicos de Montaña.....	19
Figura 4. Superficie bajo degradación, aumento de existencias o flujo natural en el periodo 2001/2013.	21

Acrónimos

BID	Banco Interamericano de Desarrollo
C	Carbono
C/ha	Carbono por hectárea
CMNUCC	Convención de Naciones Unidas sobre Cambio Climático
CO ₂	Dióxido de carbono
CO ₂ eq	Dióxido de carbono equivalente
CONAF	Corporación Nacional Forestal
ETM+	Sensor a bordo de Landsat-7, Enhanced Thematic Mapper Plus
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación
GEF	Fondo para el Medio Ambiente Mundial (por su sigla en inglés Global Environmental Facility)
ha	Hectárea
LOOCV	Método de evaluación de precisión: Leave One Out Cross Validation
MMA	Ministerio del Medio Ambiente
NASA	Administración Nacional Espacial y Aeronáutica de EE. UU.
NIR	Infrarrojo Cercano
OLI	Sensor a bordo de Landsat-8, Operational Land Imager
OSGeo	Fundación para el acceso libre a geoinformación, Open Source Geospatial Foundation
QGIS	Quantum Geographic Information System
SWIR-1	Infrarrojo de onda corta 1
SWIR-2	Infrarrojo de onda corta 2
t	Tonelada
TIF	Formato de archivo de imágenes con etiquetas: Tagged Image File Format,
TM	Sensor a bordo de Landsat-5, Thematic Mapper
USGS	Servicio Geológico de Estados Unidos (por su sigla en inglés US Geological Service)

Glosario

C	Isótopo de carbono estable de peso atómico aproximadamente igual a 13. La medición del cociente $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ en las moléculas de dióxido de carbono se utiliza para inferir la importancia de diferentes procesos del ciclo de carbono y procesos climáticos y el tamaño del reservorio de carbono terrestre.
CO_2	Dióxido de carbono. Gas de origen natural, subproducto entre otros de la quema de biomasa, y de los cambios de uso del suelo.
CO_2eq	Unidad de medida utilizada para calcular la masa de gases de efecto invernadero emitidos a la atmósfera
REDD+	Enfoque de políticas para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero por deforestación y degradación forestal; y para el fomento el aumento de las existencias carbono forestal, el manejo sostenible de los bosques y la conservación forestal
Existencias de carbono	Contenido de carbono acumulado en los reservorios de carbono, en el caso de este trabajo se refiere a la biomasa acumulada por la biomasa de los usos naturales. Usualmente se reporta en toneladas de carbono o toneladas de materia seca.
Biomasa aérea	Masa de organismos vivos presentes en un área o volumen dados, compuesta por el tronco, ramas, ramillas y hojas.
Biomasa subterránea	Masa de organismos vivos presentes en un área o volumen dados, compuesta por las raíces.
Umbral de degradación	En el marco del presente estudio, se entiende como el límite consensuado por los autores que delimita un bosque de alto contenido de carbono y un bosque de contenido de carbono medio
Degradación	En el marco del presente estudio, se entiende como la reducción de contenido de carbono en un bosque o matorral, que traspasa o se produce por debajo del umbral de degradación
Aumento de existencias	En el marco del presente estudio, se entiende como el incremento de contenido de carbono en un bosque o matorral, que traspasa o se produce por debajo del umbral de degradación
Emisiones	Transferencia dióxido de carbono desde la troposfera a la atmósfera, en el caso del presente estudio se debe a la transformación de la biomasa.
Emisiones netas	Estimación de emisiones de acuerdo con la diferencia de existencias entre dos momentos determinados
Emisiones por degradación	Emisiones producto de la reducción de contenido de carbono en un bosque o matorral, que traspasa o se produce por debajo del umbral de degradación
Capturas	Transferencia dióxido de carbono desde la atmósfera a la troposfera, en el caso del presente estudio es producto de la fijación de carbono de la vegetación natural
Capturas netas	Estimación de capturas de acuerdo con la diferencia de existencias entre dos momentos determinados

Captura por
aumento de
existencia

Capturas producto el incremento de contenido de carbono en un bosque o matorral,
que traspasa o se produce por debajo del umbral de degradación

Estimación de las emisiones y capturas de carbono de la vegetación nativa en la zona central de Chile

Autor: Javier Cano Martín.

Contacto: canomartin.javier@gmail.com

Resumen

El presente trabajo, desarrollado en el marco del Proyecto GEF Corredores Biológicos de Montaña, ha permitido estimar las emisiones y capturas de carbono de la vegetación nativa localizados en la Región Metropolitana y las comunas de la Región de Valparaíso en Chile que integran el [área del proyecto](#).

Para la estimación se aplicó un modelo de regresión lineal sobre mosaicos de imágenes satelitales Landsat correspondientes a los años 2001 y 2013.

El área de estudio abarca más de 900.000 hectáreas, en las cuales, para el periodo 2001-2013 se estimó un volumen de emisiones netas de 563.808 t CO₂eq anuales. A nivel comunal los resultados indican que el mejor desempeño, es decir, las comunas que mayor volumen capturan, entre el año 2001 y 2013, son San José de Maipo, Casablanca y Alhué. Por el contrario, las comunas con mayor volumen de emisiones por degradación en el mismo período son Colina, San José de Maipo, Curacaví, Melipilla y Til-Til.

Antecedentes

El proyecto GEF “Protegiendo la Biodiversidad y Múltiples Servicios Ecosistémicos en Corredores Biológicos de Montaña en el Ecosistema Mediterráneo de Chile”, conocido por su nombre abreviado como Proyecto GEF Montaña, pretende: 1) generar conciencia sobre el valor de la biodiversidad a los actores relevantes a nivel local y regional, para fomentar su conservación y uso sostenible; 2) fomentar el conocimiento sobre servicios ecosistémicos en instrumentos de gestión y planificación; 3) generar indicadores nacionales, concretamente en el sistema de cuentas ecosistémicas que desarrolla el Ministerio del Medio Ambiente (MMA); y 4), y emplear este conocimiento en la promoción de prácticas que promuevan la protección de la biodiversidad en la agricultura, silvicultura, turismo y minería, actividades otras económicas que se desarrollan en el área del proyecto.

En este contexto, el Proyecto GEF Montaña busca hacer conciencia de los servicios que prestan los ecosistemas de montaña en las regiones Metropolitana y de Valparaíso. Específicamente, de los servicios ecosistémicos de captura de carbono y purificación del aire.

Uno de los servicios ecosistémicos de mayor interés para el Proyecto GEF Montaña, es el servicio de captura de carbono a través de la vegetación nativa. La cuantificación del impacto positivo de este servicio ha sido poco estudiada en Chile central mediterráneo. Se espera que este estudio permita la actualización y monitoreo de las emisiones de carbono en el área del proyecto, y a su vez dar cuenta de aspectos como el estado de la vegetación y su degradación.

En el año 2015, el Centro de Estudios OTERRA, por encargo la Corporación Nacional Forestal (CONAF), punto focal de Chile para el enfoque REDD+ ante la Convención de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC), con apoyo financiero del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y otras instituciones, desarrolló una metodología para cuantificar las emisiones de carbono por deforestación y degradación forestal, y las absorciones por incremento de las reservas forestales en los bosques nativos chilenos de la región mediterránea a través de información obtenida por imágenes de satélite. La metodología fue aplicada en las regiones de Valparaíso, O’Higgins y Metropolitana para el periodo 2001-2013.

Específicamente, se desarrolló un modelo de cuantificación de existencias de carbono basado en el análisis de la relación entre la biomasa aérea del bosque, y la reflectividad registrada por imágenes satelitales combinando información espectral de las bandas de Infrarrojo Cercano (NIR) y de la primera banda del Infrarrojo de Onda Corta (SWIR-1) de los satélites Landsat 5 y Landsat 8. Los datos de terreno fueron obtenidos a partir de mediciones estándar realizadas en las parcelas del Inventario de Dendroenergía y Carbono Forestal de CONAF.

La variación de las existencias de carbono entre cada uno de los años analizados permitió la estimación de las emisiones por degradación y las capturas por aumento de existencias.

Metodología

Objetivos

El objetivo general del estudio consiste en la estimación de las emisiones y capturas de dióxido de carbono (CO₂) de la vegetación nativa, específicamente de bosques y matorrales, para las regiones de Valparaíso y Metropolitana en el periodo 2001-2013.

Dentro de los objetivos específicos se pretende:

1. Estimar las existencias de carbono de la vegetación nativa en el área del proyecto en los años 2001 y 2013.
2. Estimar las emisiones y capturas por tipo de vegetación nativa: bosque y matorral en el periodo 2001-2013.
3. Cuantificar la superficie y volumen de emisiones por degradación de bosque y matorral para este periodo.
4. Cuantificar la superficie y volumen de capturas por recuperación de bosque y matorral para este periodo.
5. Realizar las estimaciones a nivel comunal.

Materiales y herramientas

Los materiales y herramientas utilizados para la realización de este estudio fueron seleccionados con el objetivo de mantener la consistencia temporal a lo largo del periodo de análisis, reducir en la medida de lo posible la incertidumbre de los resultados, aumentar la eficiencia de los procedimientos y facilitar la replicabilidad de las estimaciones.

Los principales materiales utilizados fueron: 1) las colecciones de imágenes satelitales Landsat disponibles para los años de análisis, 2) la cobertura cartográfica de base entregada por el equipo GEF Montaña denominada "Biotopos Naturales", y 3) el modelo de existencias de carbono desarrollado por el Centro de Estudios OTERRA para la CONAF.

Por su parte, las principales herramientas utilizadas han sido la plataforma SEPAL (<https://sepal.io/>); y los Sistemas de Información Geográfica Quantum GIS (QGIS) y ArcGIS.

Colección de imágenes satelitales Landsat

Landsat es un programa conjunto entre la Administración Nacional Espacial y Aeronáutica de EE.UU (NASA) y el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) que proporciona información satelital de la totalidad del planeta de manera continua desde 1972 hasta la actualidad (USGS, 2019)

Durante el periodo de análisis correspondiente al presente estudio los satélites Landsat-5 (1985-2012) con el sensor Thematic Mapper (TM), Landsat-7 (1999-2020) con el sensor Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+), y Landsat-8 (2013-Presente) con el sensor Operational Land Imager (OLI) estuvieron activos al menos para una de las fechas seleccionadas (Figura 1) (USGS, 2019)

Sin embargo, los problemas en el lanzamiento de Landsat-6, que hizo que no fuera operativo en ningún momento, en conjunto con los problemas en la captura de información desde el año 2002 del sensor ETM+ de Landsat-7, que provocan en las imágenes un efecto conocido como bandeo, hicieron que la vida útil del satélite Landsat-5 se extendiera hasta 2012.

Los tres sensores cuentan con una resolución espacial de 30 metros para las bandas correspondientes a las regiones del espectro óptico e infrarrojo, siendo estas las utilizadas para el desarrollo del modelo.

Pese a que, a lo largo del tiempo los sensores a bordo de los diferentes satélites Landsat, han incorporado nuevos registros, y han modificado ligeramente la forma de cuantificar la radiancia de la superficie en algunas bandas, estas modificaciones no han afectado a su capacidad para realizar estudios multitemporales. Landsat-5 TM, Landsat-7 ETM+ y Landsat-8 OLI cuentan con bandas que registran información en los rangos espectrales del Azul, Verde, Rojo, Infrarrojo Cercano (NIR) y dos bandas en el Infrarrojo de Onda Corta (SWIR-1, SWIR2) (NASA, 2020).

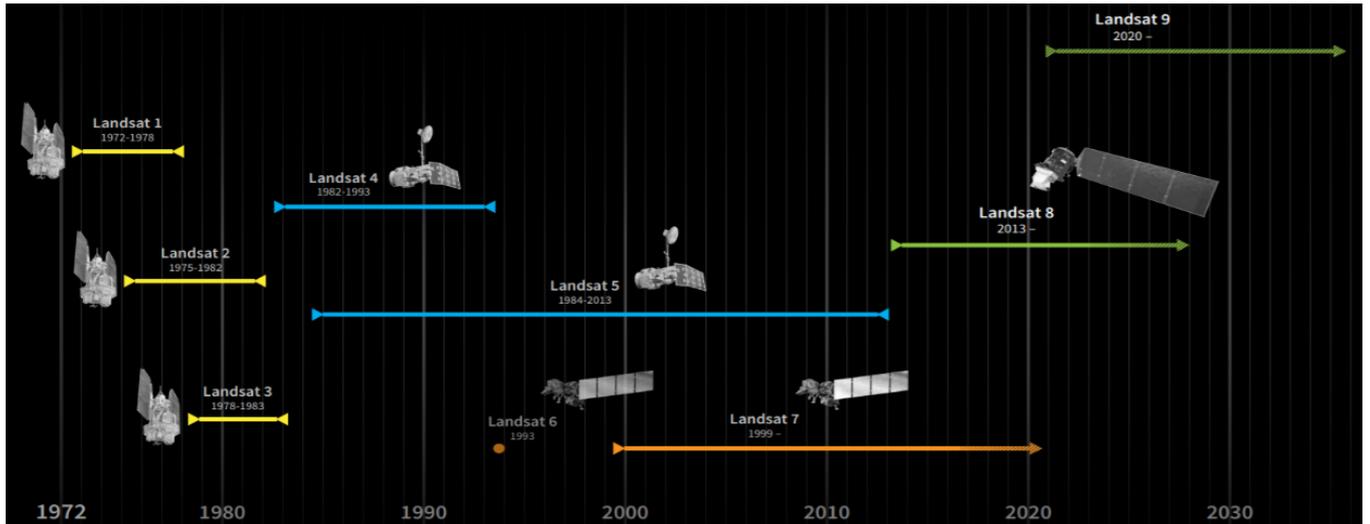
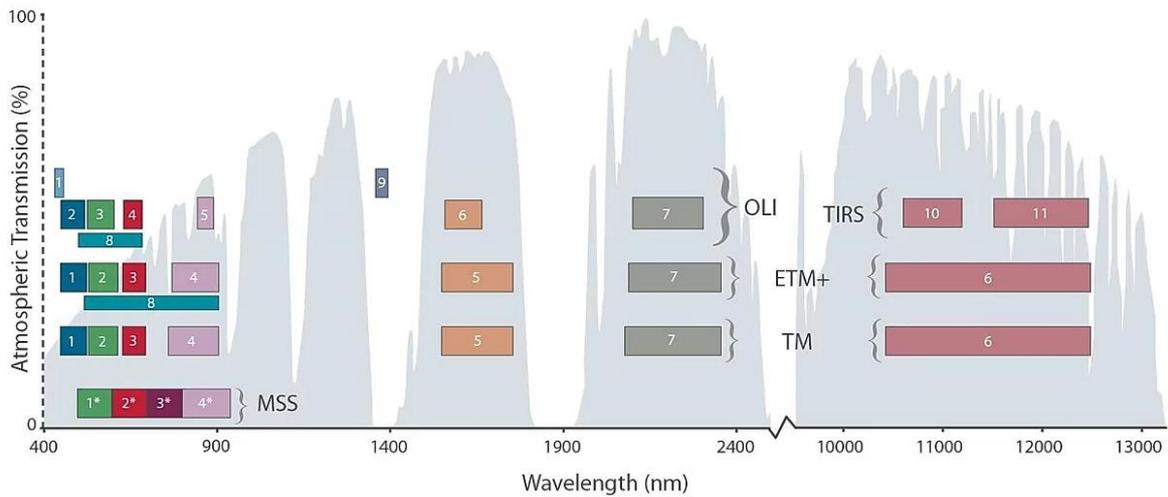


Figura 1. Serie histórica de satélites Landsat y años de operación desde 1972 hasta el presente. Fuente; (USGS, 2019)



* MSS bands 1-4 were known as bands 4-7, respectively, on Landsats 1-3

Figura 2. Número, ancho y rango de bandas de sensores a bordo de satélites Landsat. Fuente: (NASA, 2020)

Modelo de carbono

En el año 2015 el Centro de Estudios OTERRA desarrolló para la CONAF, un modelo de regresión lineal para cuantificar las emisiones y capturas de carbono del bosque esclerófilo mediterráneo. Para el desarrollo del modelo se utilizó la información de terreno correspondiente a 28 parcelas del Inventario de Dendroenergía y Carbono Forestal de CONAF, todas ellas correspondientes al Tipo Forestal esclerófilo, en conjunto con imágenes del Landsat-8 OLI de abril de 2013.

Los datos de terreno fueron estimados en base la aplicación de una serie de funciones alométricas de carbono y biomasa, para la biomasa aérea las especies registradas. En los casos en que se aplicaron funciones de biomasa, esta se transformó a carbono aplicando un valor de fracción de Carbono de la biomasa de 0,5. Para la estimación de la biomasa total (biomasa aérea y biomasa subterránea) se aplicó una razón raíz-tallo (Ratio R) de 0,25. Finalmente el valor carbono total de la biomasa se transformó en CO₂eq el factor 44/12 (CONAF, 2016).

El mayor grado de correlación entre datos de terreno y los valores de reflectividad de la superficie de las imágenes satelitales se obtuvo aplicando el Índice de Diferencia Normalizado entre las bandas del Infrarrojo Cercano (NIR – 860 nanómetros) y la primera banda del Infrarrojo de Onda Corta (SWIR 1 – 1650 nanómetros) del sensor OLI de Landsat-8, siendo este índice la base del modelo de regresión lineal resultante:

Ecuación 1. Modelo de estimación de existencias de CO₂eq Landsat-8

$$CO_2eq = 28.879 \left[\frac{b_{NIR} - b_{SWIR1}}{b_{NIR} + b_{SWIR1}} \right] + 9.0093$$

En el caso de aplicar el modelo sobre imágenes del sensor Landsat-5, se considera un parámetro de calibración, modificando la ecuación de la siguiente forma:

Ecuación 2. Modelo de estimación de existencias de CO₂eq Landsat-5

$$CO_2eq = 28.879 \left[\frac{b_{NIR} - b_{SWIR1}}{b_{NIR} + b_{SWIR1}} + 0.015 \right] + 9.0093$$

El error medio del Modelo de existencias de carbono fue calculado mediante el método Leave One Out Cross Validation (LOOCV), óptimo para estudios con un reducido número de datos de terreno que reflejan la realidad, ya que permite el uso de los datos utilizados para el desarrollo del modelo, obteniendo un error medio de 32,1%.

Cobertura Biotopos

De acuerdo a la información registrada en el Resumen ejecutivo del protocolo de obtención de biotopos para el área del Proyecto GEF Montaña¹, los biotopos son unidades ecosistémicas básicas, de escala local, que se relacionan con los ecosistemas terrestres de escala regional y nacional conocidos como “Pisos Vegetacionales” (Luebert & Plissock 2017). Corresponden a una región ambiental caracterizada por un conjunto de condiciones abióticas y poblada por una biota característica, en un tiempo determinado. Se representan por un área homogénea en términos de su geoforma y de la estructura y fisionomía de la vegetación.

Para la representación de biotopos a escala 1:25.000, el equipo del Proyecto GEF Montaña trabajó con seis variables (altitud, exposición norte – sur, exposición este – oeste, pendiente, Índice de Humedad Topográfica e Índice de Humedad Normalizada) con las cuales se realizó un análisis de conglomerado para clasificar zonas físicas.

La siguiente fase de este proceso correspondió a la superposición de coberturas que representan la vegetación característica en cada geoforma, obteniéndose subdivisiones dentro de cada geoforma, en función de los Pisos Vegetacionales (Luebert y Plissock 2017) que representan las unidades ecosistémicas

¹ Información facilitada por el equipo del Proyecto GEF Montaña

reconocidas por el Ministerio del Medio Ambiente. A partir de la concatenación de estos elementos se construyó el nombre de los biotopos naturales, el cual se forma de acuerdo con la estructura vegetal dominante representada por el nivel jerárquico de formación vegetal, luego se hace referencia a la geoforma y finalmente se cierra el nombre con las especies dominantes según lo indican los pisos vegetacionales.

Plataforma SEPAL

SEPAL es un proyecto del Departamento Forestal de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) financiado por el Gobierno de Noruega.

El sistema proporciona una plataforma para que los usuarios accedan a imágenes satelitales (Landsat y Sentinel-2) y realicen la detección de cambios y las clasificaciones de cobertura terrestre utilizando un conjunto de herramientas fáciles de usar.

SEPAL es un recurso en línea, al que se puede acceder a través del siguiente enlace: <https://sepal.io/> , que permite a los usuarios acceder a potentes recursos de computación en la nube para consultar y procesar datos satelitales de manera rápida y eficiente para crear análisis avanzados.

En el marco del presente estudio SEPAL fue utilizado para la generación de los mosaicos de imágenes Landsat libres de nubes.

Quantum GIS y ArcGIS

La aplicación del modelo de existencias de carbono y los procedimientos de ajuste de este, se realizaron utilizando el software de acceso libre QGIS.

QGIS es una aplicación profesional de SIG que está construida sobre Software Libre y de Código Abierto. Es un proyecto oficial de Open Source Geospatial Foundation (OSGeo), corre sobre Linux, Unix, Mac OSX, Windows y Android y soporta numerosos formatos y funcionalidades de datos vectoriales, datos ráster y bases de datos

Por su parte, el software ArcGIS fue utilizado para la preparación y ajuste de la información cartográfica base y para los procedimientos de análisis vectoriales y presentación de resultados.

ArcGIS es un sistema licenciado que permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica. Es la plataforma líder mundial para crear y utilizar sistemas de información geográfica (SIG), así como para poner el conocimiento geográfico al servicio de los sectores del gobierno, la empresa, la ciencia, la educación y los medios.

Procedimiento metodológico

A continuación se describe el proceso metodológico seguido para la obtención de los resultados.

Los pasos principales realizados fueron:

1. Generación de mosaicos
2. Aplicación de modelo de existencias de carbono
3. Preparación de cartografía base
4. Intersección de modelo y cartografía base
5. Estimación de contenido y variación de carbono

Generación de mosaicos

Los avances tecnológicos de la última década han derivado en una mejora sustancial en los tiempos y requerimientos de recursos para el procesamiento y análisis de datos satelitales.

El aumento del número de sensores en órbita y la proliferación de políticas de apertura de la información, han sido acompañados por el desarrollo de nuevos softwares, aplicaciones y herramientas de código y/o acceso libre, que han democratizado y multiplicado el uso de imágenes satelitales a través del planeta.

Procedimientos que hace pocos años requerían de recursos informáticos muy potentes, de softwares costosos, de profesionales con un alto nivel de conocimiento específico, y de tiempos de procesamiento importantes, pueden ser realizados en la actualidad a través de herramientas online que permiten el procesamiento en la nube, diseñados para facilitar su ejecución y obtener resultados en pocos minutos.

La generación de mosaicos, composiciones de diferentes imágenes satelitales para la obtención de una cobertura homogénea de un amplio sector del territorio, requiere de la descarga, la aplicación de correcciones y la integración de las diferentes imágenes, pudiendo requerir semanas para su procesamiento. Actualmente herramientas como SEPAL o Google Earth Engine, permiten obtener mosaicos libres de nubes para una amplia porción del territorio en pocos minutos.

La generación de mosaicos libres de nubes para los años 2001 y 2013 correspondientes al área del Proyecto GEF Montaña, fue aplicado a través de la herramienta de procesamiento en línea SEPAL. Los mosaicos fueron generados utilizando escenas Landsat, en valores de reflectividad de superficie corregida atmosféricamente y con una corrección de función de distribución de reflectividad bidireccional (BRDF). De acuerdo con la disponibilidad se determinó el uso de las siguientes imágenes para la elaboración de cada uno de los mosaicos:

- Mosaico 2001, imágenes de Landsat 5 correspondientes a las siguientes fechas:
 - Franja central: 10 de marzo de 2001.
 - Franja costera zona Norte: 1 de marzo de 2001.
 - Franja cordillera: 3 de marzo de 2001.
- Mosaico 2013, imágenes de Landsat 8 correspondientes a las siguientes fechas:
 - Franja central: 12 de abril de 2013.
 - Franja costera zona Norte: 5 de mayo de 2013.
 - Franja cordillera: 7 de abril de 2013.

Es de especial importancia resaltar que el modelo de carbono aplicado por CONAF se desarrolló en base al análisis de reflectividad de imágenes Landsat 8 del mes de abril de 2013, por lo que la selección de las fechas permite mantener la coherencia para todos los años incluidos en el análisis.

Las características generales de los mosaicos fueron establecidas de forma homogénea para los tres mosaicos, estableciendo la resolución espacial en 30 metros, y seleccionando las bandas Blue, Green, Red, NIR, SWIR1 y SWIR2 para su composición.

Aplicación del Modelo de carbono²

El Modelo de carbono desarrollado por el Centro de Estudios OTERRA en 2015 fue diseñado para estimar las emisiones y capturas de carbono de la biomasa viva total del bosque, incluyendo biomasa aérea y

²Nota del autor: El Modelo de carbono desarrollado por el Centro de Estudios OTERRA, estaba orientado a estimar emisiones y capturas de carbono, por lo que se utilizó como unidad de reporte el volumen en toneladas de CO₂eq. Esta unidad es adecuada para la estimación de emisiones y capturas de carbono, sin embargo, el volumen de existencias debe ser reportado en toneladas de Carbono, por ello en la presentación de resultados, las existencias de carbono se reportan en t C mientras que las emisiones y capturas se reportan en t CO₂eq.

biomasa subterránea. Para la estimación de carbono biomasa subterránea se aplicó el parámetro para Ratio R de 0,25.

En el caso de la estimación a realizar en el marco de este estudio de actualización, el objetivo abarca tanto el bosque nativo como los matorrales naturales. De acuerdo a las fuentes de información existentes en reportes oficiales de Chile, para la estimación de emisiones y capturas de carbono total en áreas de praderas y matorrales se han utilizado tres valores distintos:

- Gayoso (2005): 1,72;
- INGEI 2018 (IPCC - Templado húmedo): 2,8;
- INGEI 2018 (IPCC - Templado seco): 4,0.

Para el caso del bosque nativo se ha utilizado, tanto en el Nivel de Referencia (Cano et al., 2016) como en el INGEI, el ratio 0,29

Teniendo en cuenta que la idea inicial del proyecto es estimar las emisiones y capturas de carbono de la biomasa, tanto para bosque como para matorrales, se ajustó el modelo para estimar los valores de biomasa aérea resultando en las ecuaciones detalladas a continuación.

El Modelo ajustado de carbono para la Biomasa Aérea está basado en el Índice de Diferencia Normalizado entre las bandas del NIR (860 nanómetros) y del SWIR 1 (1650 nanómetros) del sensor OLI de Landsat-8.

Ecuación 3. Modelo ajustado de estimación de existencias de CO₂eq Landsat-8

$$\text{CO}_2\text{eq Biomasa Aerea} = (28.879 \left[\frac{b_{\text{NIR}} - b_{\text{SWIR1}}}{b_{\text{NIR}} + b_{\text{SWIR1}}} \right] + 9.0093) / 1.25$$

En el caso de aplicar el modelo sobre imágenes del sensor Landsat-5, se aplica un parámetro de calibración, modificando la ecuación de la siguiente forma:

Ecuación 4. Modelo ajustado de estimación de existencias de CO₂eq Landsat-5

$$\text{CO}_2\text{eq Biomasa Aerea} = \left(28.879 \left[\frac{b_{\text{NIR}} - b_{\text{SWIR1}}}{b_{\text{NIR}} + b_{\text{SWIR1}}} + 0.015 \right] + 9.0093 \right) / 1.25$$

Para eliminar los potenciales valores con perturbaciones o valores extraños producto de interferencias en el procesamiento y corrección de las imágenes satelitales que pueden provocar errores futuros en las estimaciones se excluyeron los píxeles con valores fuera del rango entre 0 y el máximo de acuerdo a la aplicación del modelo, 31.

Preparación de cartografía base

Contar con cartografía base que se ajuste a la resolución espacial de los raster utilizados en la aplicación del modelo y cuyos criterios de clasificación estén vinculados al contenido o variación de carbono de la vegetación, es clave para que los resultados del análisis sean representativos y explicativos de la realidad.

Teniendo en cuenta que el modelo fue aplicado sobre imágenes Landsat con una resolución espacial de 30m se considera que la unidad mínima de la cartografía base debería ser de 1 ha.

Por otro lado, las existencias de carbono de la vegetación se explica, principalmente por la composición de especies, su estado de desarrollo y la densidad de la población; en este sentido registrar unidades

cartográficas que se delimiten por áreas homogéneas permitirá la agregación de los valores por píxel de forma coherente, minimizando la variabilidad de sus valores en términos de existencias de carbono.

De forma paralela, durante la ejecución del presente estudio, en el marco del desarrollo del Proyecto GEF Montaña, se finalizó la elaboración de la cobertura de “Biotopos Naturales” que permite tener antecedentes actualizados y ajustados de la cobertura natural en el área de estudio, por lo que se decidió utilizar esta cobertura como cartografía base para la totalidad de la serie temporal en la que se analiza el contenido y la variación de carbono (2001 y 2013).

Intersección de modelo e información vectorial

Las coberturas espaciales en formato ráster generadas en el paso anterior fueron intersectadas con la cobertura vectorial de Biotopos Naturales, permitiendo generar una base de datos relacional en la que cada polígono de la cobertura Biotopos Naturales contenga información correspondiente a la suma del valor de CO₂eq del conjunto de píxeles que se superponen a dicho polígono, para el año 2001 y 2013.

En este proceso se tuvo en consideración los píxeles contenidos de forma incompleta, es decir aquellos píxeles que forman parte de más de un polígono o que forman parte de un polígono de forma parcial y no en su totalidad. Para ello se extrajeron las estadísticas correspondientes a la suma del valor de carbono de cada píxel incluido en cada polígono, el número de píxeles considerados y la superficie del polígono, para posteriormente realizar un ajuste del valor total de carbono de cada polígono.

De esta forma, se generó una base de datos con la información para cada polígono correspondiente a:

- Código de Biotopo
- Nombre de Biotopo Natural
- Superficie en hectáreas
- Uso-Cobertura: Bosque; Matorral; Pradera
- Valor de toneladas CO₂eq por hectárea en 2001
- Valor de toneladas CO₂eq total en 2001
- Valor de toneladas CO₂eq por hectárea en 2013
- Valor de toneladas CO₂eq total en 2013

Estimación de contenido y variación de carbono

La base de datos fue convertida en un archivo Excel sobre el cual se desarrolló una herramienta de cálculo para realizar las estimaciones de contenido y variación de carbono de acuerdo con una serie de reglas establecidas de forma consensuada con el equipo técnico del proyecto.

En este sentido se establecieron los siguientes supuestos:

- Umbral de degradación: se acordó el uso de un umbral de degradación de forma coherente con la decisión aplicada en el estudio de CONAF del año 2016, así como, parcialmente, de la definición operativa de degradación forestal aplicada en el NREF/NRF de Chile.
- El umbral de degradación establece el volumen de carbono que determina que un bosque se encuentre en proceso de degradación. Se considera que las emisiones o capturas que suceden por encima de ese rango pueden ser:
 - consecuencia de una variación natural de carbono,
 - variaciones anómalas producto de las limitaciones de los modelos basados en imágenes satelitales para la estimación precisa en bosques de alta densidad y contenido de carbono.
- Para establecer este umbral se utilizaron los parámetros aplicados en el estudio de OTERRA, donde se propuso como umbral consensuado por los autores el 66% de las existencias de carbono por

hectárea para un bosque intacto del tipo esclerófilo. El volumen de carbono de la biomasa aérea y subterránea en un bosque esclerófilo intacto fue estimado en 249 t CO₂e/ha.

- Considerando que, en el caso del presente estudio, la biomasa subterránea no ha sido cuantificada, el valor máximo de existencias de carbono fue ajustado al valor de biomasa aérea, obteniendo como resultado 199.2 t CO₂eq/ha. El umbral de degradación, situado en el 66%, se establece en 131.5 t CO₂eq/ha.
- Este umbral fue aplicado tanto para las zonas de bosque nativo y de matorrales, según la clasificación establecida por la cobertura de “Biotopos Naturales”. Esta decisión fue tomada de forma consensuada, sustentada en el supuesto de que un gran parte de las zonas clasificadas como matorrales pueden representar una situación de bosque mediterráneo en etapas de degradación muy avanzadas, debido a la intervención de forma continua e intensa. Si bien, estas áreas no fueron consideradas en la clasificación de Biotopos Naturales como bosque nativo de acuerdo con sus características de desarrollo y estado actual, podrían haberlo conformado en el pasado.

En base a estos supuestos se determinó la estimación de los siguientes parámetros, tanto a nivel comunal como para el total de área de estudio.

- Existencias de carbono para cada año y tipo de cobertura
- Estimación de forma desagregada de las emisiones y capturas de CO₂eq para los bosques nativos y los matorrales, incluyendo:
 - Emisión total: suma de las emisiones de CO₂eq en todos los polígonos cuyo contenido de carbono en el segundo año del periodo (t_2) fue inferior al contenido de carbono en el primer año del periodo (t_1).
 - Captura total: suma de las capturas de CO₂eq en todos los polígonos cuyo contenido de carbono en t_2 fue superior al contenido de carbono en t_1 .
 - Emisiones por degradación: suma de las emisiones de CO₂eq en los polígonos cuyo contenido de carbono en t_2 fue inferior al contenido de carbono en t_1 , y que además se encuentra por debajo del umbral de degradación en t_2 .
 - Capturas por aumento de existencias: suma de las capturas de CO₂eq en los polígonos cuyo contenido de carbono en t_2 fue superior al contenido de carbono en t_1 , y que además se encuentra por debajo del umbral de degradación en t_1 .

Todos los resultados fueron estimados en hojas de cálculo y posteriormente la base de datos fue asociada a los archivos vectoriales correspondientes para disponer de la información en formato espacial.

Resultados

A continuación se presentan los resultados obtenidos de forma desagregada a nivel de área de proyecto y a nivel comunal.

Resultados a nivel de área de proyecto

La superficie total de análisis, correspondiente al área determinada como vegetación natural por la cobertura utilizada como cartografía base, abarca 988.668,89 hectáreas, dominada principalmente por matorral, con un 68,2% del total de la superficie de análisis.

Tabla 1. Superficie por tipo de cobertura

Tipo de cobertura	Superficie (ha)	Superficie (%)
Bosque	240.115,26	24,3%
Matorral	673.955,35	68,2%
Praderas	74.598,28	7,5%
TOTAL	988.668,89	100%

La distribución de los tipos de coberturas identificadas y categorizadas a través de “Biotopos Naturales” puede ser visualizada en la Figura 3.

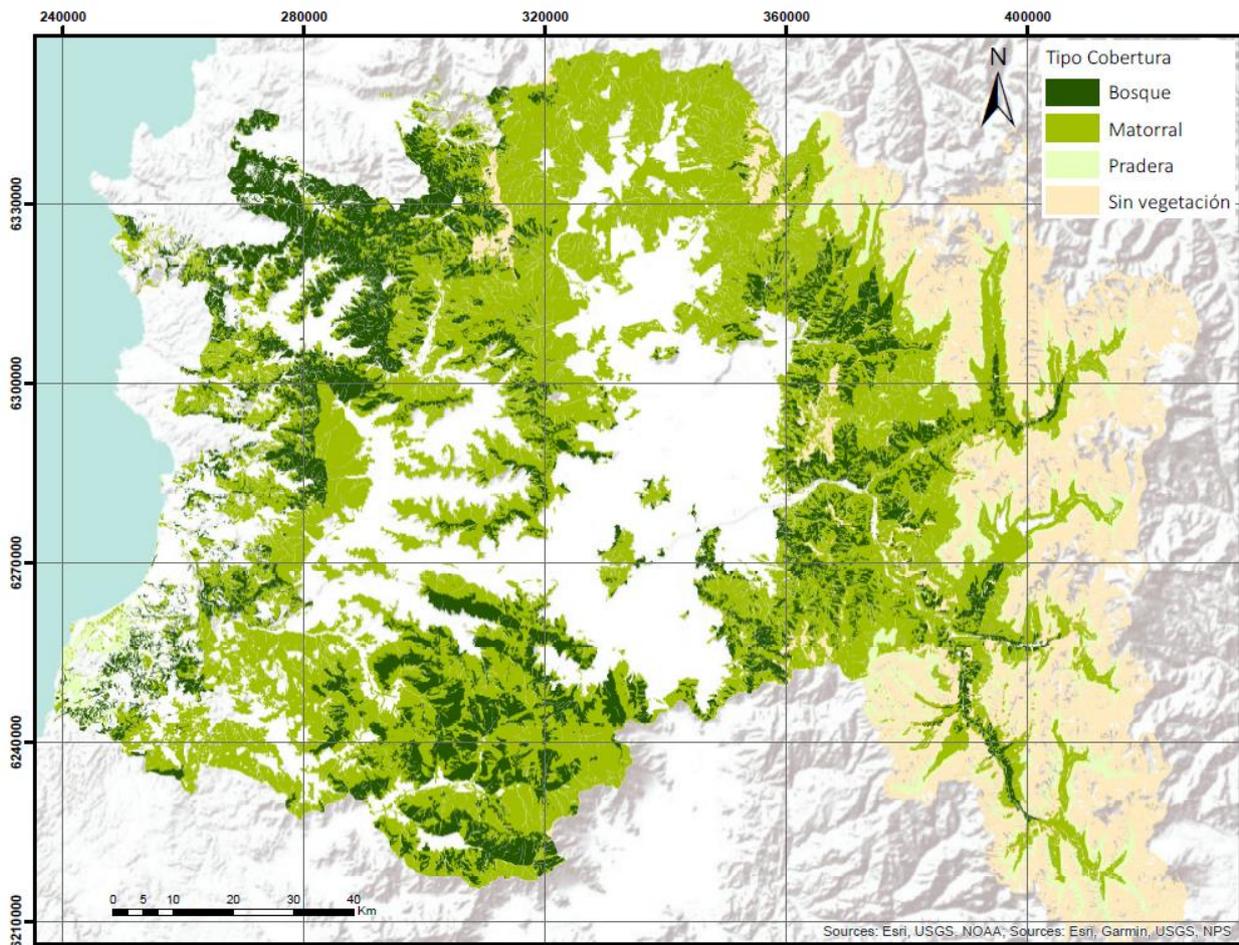


Figura 3. Mapa de tipo de cobertura en el área del Proyecto GEF Corredores Biológicos de Montaña.

Existencias de carbono

La aplicación del modelo permite la estimación de las existencias de carbono en cada año, de forma agregada como por tipo de cobertura. Los resultados indican que existe un ligero descenso entre las existencias totales para bosque y matorrales (Tabla 2).

Tabla 2. Existencias de carbono por tipo de cobertura y año.

Tipo de cobertura	Unidad	2001	2013
Bosque	t C	7.091.145,76	6.961.486,60
Matorral	t C	14.788.306,46	13.069.415,48
Praderas	t C	56.097,90	56.097,90
TOTAL	t C	21.935.550,13	20.086.999,98

En cuanto a las existencias por hectárea se identifica como los bosques tienen, en promedio, un contenido de carbono superior a los matorrales. Sin embargo la diferencia en existencias es relativamente baja, lo cual refuerza la idea descrita anteriormente, de que muchas de las zonas clasificadas como matorral están compuestas por bosque nativo con un alto nivel de degradación (Tabla 3).

Tabla 3. Existencias por hectárea por tipo de cobertura y año.

Tipo de cobertura	Unidad	2001	2013
Bosque	t C/ha	29,53	28,99
Matorral	t C/ha	21,94	19,39
Praderas	t C/ha	0,75	0,75
TOTAL	t C/ha	22,19	20,32

Emisiones y capturas de CO₂eq

La variación neta de carbono, donde se considera la totalidad de emisiones y capturas, muestra que durante el periodo 2001-2013 se produjeron emisiones anuales superiores a las 560.000 t CO₂eq a la atmósfera.

Tabla 4. Emisiones netas por periodo y tipo de cobertura

Tipo de cobertura	Unidad	2001-2013
Bosque	t CO ₂ eq/año	- 39.546,04
Matorral	t CO ₂ eq/año	- 524.261,75
TOTAL	t CO ₂ eq/año	- 563.807,79

A continuación se presentan los resultados de la estimación de emisiones por degradación y captura por aumento de existencias de acuerdo a las definiciones operativas aplicadas, que excluyen las variaciones producidas sobre el umbral de degradación consensuado (Tabla 5, Tabla 6)

Tabla 5. Emisiones por degradación y tipo de cobertura

Tipo de cobertura	Unidad	2001-2013
Bosque	t CO ₂ eq/año	- 132.162,72
Matorral	t CO ₂ eq/año	- 616.330,61
TOTAL	t CO ₂ eq/año	- 748.493,33

Tabla 6. Capturas por aumento de existencias y tipo de cobertura

Tipo de cobertura	Unidad	2001-2013
Bosque	t CO ₂ eq/año	74.101,84
Matorral	t CO ₂ eq/año	88.845,99
TOTAL	t CO ₂ eq/año	162.947,83

Tabla 7. Variación de emisiones/capturas por degradación/aumento de existencias y tipo de cobertura

Tipo de cobertura	Unidad	2001-2013
Bosque	t CO ₂ eq/año	-58.060,88
Matorral	t CO ₂ eq/año	-527.484,62
TOTAL	t CO ₂ eq/año	-585.545,50

En la Figura 4, correspondiente el periodo 2001-13 se puede identificar la distribución de las áreas afectadas por degradación, aquellas que se encuentran en un proceso de aumento de existencias y los sectores con flujo natural, en los que en ambos años de la estimación el contenido de carbono se encuentra sobre el umbral de degradación.

Se puede identificar como la superficie bajo degradación es sustancialmente superior a la superficie de aumento de existencias. En la zona de la Precordillera de los Andes, la tendencia de degradación es continua, mientras que las zonas con flujo natural se concentran en el sector sur, en la zona norte de la cordillera de la costa.

En la Figura 5 se representa la intensidad de las emisiones. Los resultados muestran como en el periodo 2001-2013 las emisiones fueron más intensas especialmente en la zona central. También se puede comprobar como la mayor intensidad de captura se produce al oeste de la Cordillera de la Costa y en zonas como Cantillana y Rio Clarillo.

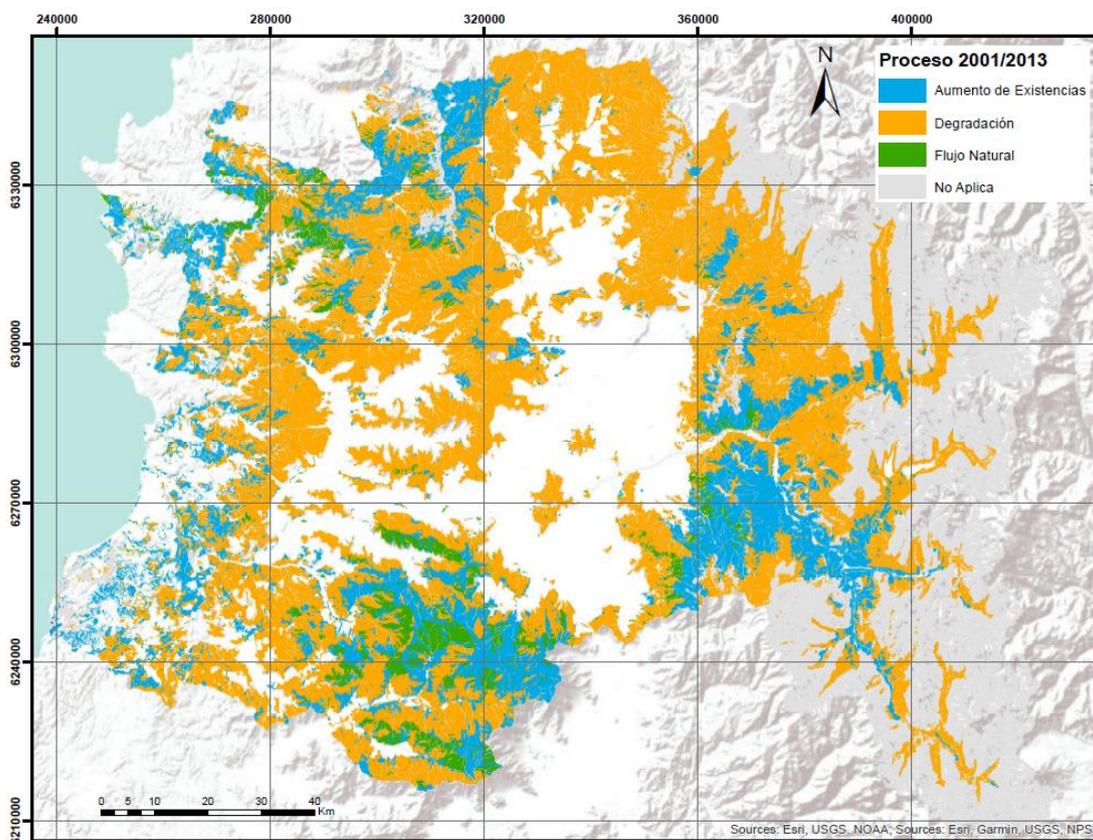


Figura 4. Superficie bajo degradación, aumento de existencias o flujo natural en el periodo 2001/2013.

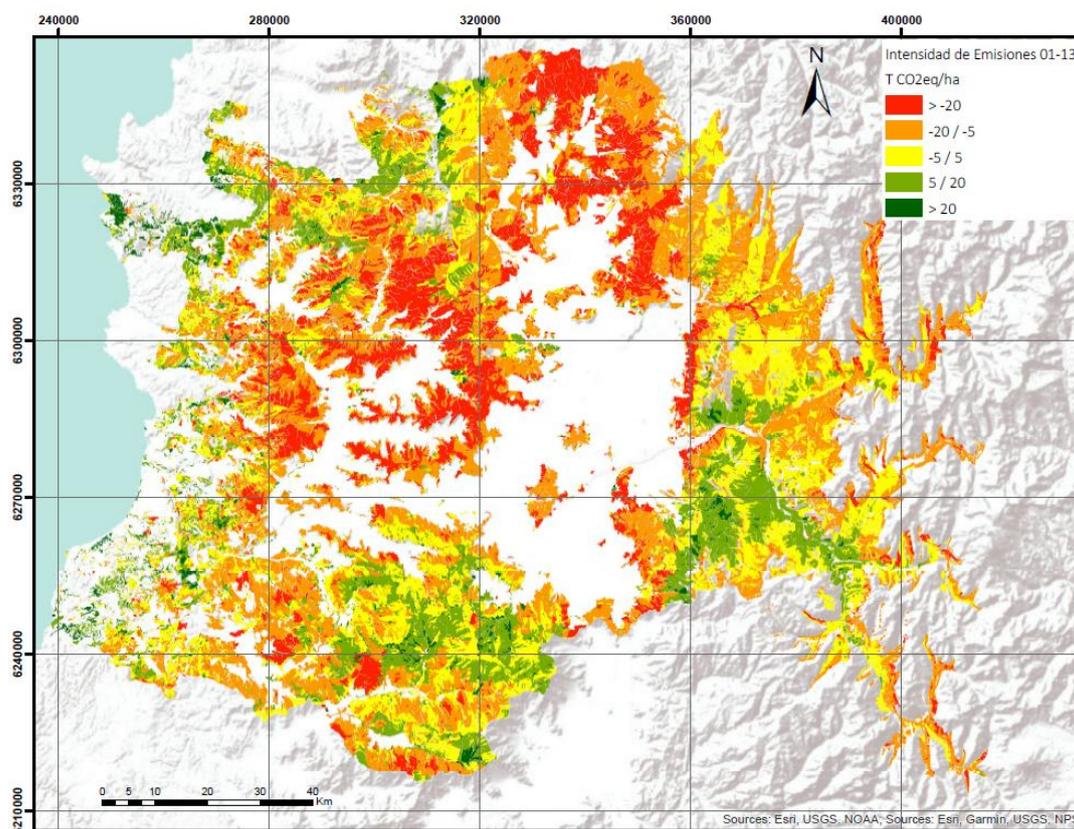


Figura 5. Intensidad de emisiones/capturas. Periodo 2001-2013

Resultados a nivel comuna

A continuación se presentan los resultados obtenidos a nivel individual para las 36 comunas que integran el área del Proyecto GEF Montaña.

Existencias de carbono

Los mayores volúmenes en término de existencias totales se localizan en las comunas de mayor superficie, tales como San José de Maipo, Alhué, Melipilla, Casablanca y Lo Barnechea. Mientras, las comunas de La Reina, Calera de Tango, Peñafor y Vitacura son las que cuentan con menores existencias de carbono total (Tabla 8).

Tabla 8. Existencias totales por año y comuna

COMUNA	Superficie agregada Boque y matorral (ha)	Existencias 2001 (t C)	Existencias 2013 (t C)
ALHUE	75.223,8	2.229.099,6	2.202.979,9
BUIN	2.694,8	71.498,3	57.648,1
CALERA DE TANGO	865,4	17.196,4	12.947,1
CARTAGENA	14.956,8	285.621,0	241.950,8
CASABLANCA	56.749,7	1.313.623,4	1.280.116,2
COLINA	64.535,3	1.465.994,6	1.146.319,1
CURACAVI	52.517,9	1.282.787,0	1.007.613,6
EL MONTE	3.555,1	99.933,9	84.267,1
HUECHURABA	2.420,6	57.595,8	46.067,2

ISLA DE MAIPO	6.724,9	163.918,8	147.963,5
LA FLORIDA	2.679,4	72.909,7	64.820,2
LA REINA	469,9	12.730,6	10.106,3
LAMPA	25.370,5	559.946,6	475.528,9
LAS CONDES	4.906,6	127.980,3	111.839,9
LO BARNECHEA	60.710,5	1.472.973,9	1.353.452,6
MAIPU	3.614,4	65.156,6	46.486,3
MARIA PINTO	22.261,2	513.835,1	406.733,1
MELIPILLA	75.783,6	1.808.285,1	1.647.701,1
OLMUE	10.844,5	238.867,9	224.266,5
PADRE HURTADO	1.961,6	40.328,1	27.582,1
PAINÉ	40.153,4	1.173.537,3	1.139.750,8
PEÑAFLORES	1.192,2	22.919,3	17.528,8
PEÑALOÉN	1.849,3	52.097,8	44.434,4
PIRQUE	30.224,0	850.225,6	865.449,6
PUDAHUEL	10.819,9	203.822,3	169.873,0
PUENTE ALTO	1.967,2	59.568,0	52.429,8
QUILICURA	2.468,9	58.158,2	47.886,0
QUILPUE	41.631,0	1.083.616,1	1.051.403,5
SAN ANTONIO	20.106,3	307.967,1	294.979,3
SAN BERNARDO	2.543,8	51.418,6	38.715,5
SAN JOSÉ DE MAIPO	152.038,2	3.801.529,4	3.629.538,1
SAN PEDRO	52.143,2	893.783,8	798.386,2
SANTO DOMINGO	15.391,0	331.056,0	353.230,9
TALAGANTE	2.084,3	40.047,7	29.195,5
TILTIL	49.909,5	1.084.427,5	939.323,6
VITACURA	623,1	19.108,4	16.527,6

En cuanto a existencias por hectárea el rango varía entre 12,9 y 29,6 t C/ha. los mayores valores en el año 2013 se encuentran en Alhué, Vitacura, Puente Alto, Pirque y Paine. En el otro extremo las comunas con menores existencias por hectárea son Talagante, San Antonio, Peñaflores, Calera de Tango, Padre Hurtado y Maipú (Tabla 9).

Tabla 9. Existencias por hectárea y comuna

COMUNA	2001 (t C/ha)	2013 (t C/ha)
ALHUE	29,6	29,3
BUIN	26,5	21,4
CALERA DE TANGO	19,9	15,0
CARTAGENA	19,1	16,2
CASABLANCA	23,1	22,6
COLINA	22,7	17,8
CURACAVI	24,4	19,2
EL MONTE	28,1	23,7
HUECHURABA	23,8	19,0
ISLA DE MAIPO	24,4	22,0
LA FLORIDA	27,2	24,2
LA REINA	27,1	21,5
LAMPA	22,1	18,7
LAS CONDES	26,1	22,8
LO BARNECHEA	24,3	22,3

MAIPU	18,0	12,9
MARIA PINTO	23,1	18,3
MELIPILLA	23,9	21,7
OLMUE	22,0	20,7
PADRE HURTADO	20,6	14,1
PAINE	29,2	28,4
PEÑAFLORES	19,2	14,7
PEÑALOÉN	28,2	24,0
PIRQUE	28,1	28,6
PUDAHUEL	18,8	15,7
PUENTE ALTO	30,3	26,7
QUILICURA	23,6	19,4
QUILPUE	26,0	25,3
SAN ANTONIO	15,3	14,7
SAN BERNARDO	20,2	15,2
SAN JOSE DE MAIPO	25,0	23,9
SAN PEDRO	17,1	15,3
SANTO DOMINGO	21,5	23,0
TALAGANTE	19,2	14,0
TILTIL	21,7	18,8
VITACURA	30,7	26,5

Emisiones y capturas de CO₂eq

Los resultados de la estimación de emisiones netas por comuna indican que las comunas con mayores emisiones en el periodo 2001-2013 fueron Colina, Curacaví, San José de Maipo y Melipilla, y las que tuvieron menores emisiones fueron Vitacura, La Reina y Calera de Tango. En términos relativos, por unidad de superficie, las mayor intensidad de emisiones en el periodo 2001-2013 se registro en Padre Hurtado, La Reina, Curacaví y Maipú, y las menores en Pirque, San Antonio, Casablanca y Quilpué. (Tabla 10, Figura 6)

Tabla 10. Emisiones netas por periodo y comuna

COMUNA	2001-2013 (t Co2eq)	2001-2013 (t Co2eq/ha)
ALHUE	-26.119,7	-0,3
BUIN	-13.850,2	-5,1
CALERA DE TANGO	-4.249,3	-4,9
CARTAGENA	-43.670,2	-2,9
CASABLANCA	-33.507,2	-0,6
COLINA	-319.675,6	-5,0
CURACAVI	-275.173,4	-5,2
EL MONTE	-15.666,8	-4,4
HUECHURABA	-11.528,6	-4,8
ISLA DE MAIPO	-15.955,3	-2,4
LA FLORIDA	-8.089,6	-3,0
LA REINA	-2.624,3	-5,6
LAMPA	-84.417,7	-3,3
LAS CONDES	-16.140,5	-3,3
LO BARNECHEA	-119.521,3	-2,0
MAIPU	-18.670,3	-5,2
MARIA PINTO	-107.102,0	-4,8
MELIPILLA	-160.584,0	-2,1
OLMUE	-14.601,4	-1,3
PADRE HURTADO	-12.745,9	-6,5

PAINÉ	-33.786,5	-0,8
PEÑAFLORES	-5.390,5	-4,5
PEÑALOÉN	-7.663,3	-4,1
PIRQUE	15.224,0	0,5
PUDAHUEL	-33.949,3	-3,1
PUENTE ALTO	-7.138,2	-3,6
QUILICURA	-10.272,2	-4,2
QUILPUE	-32.212,6	-0,8
SAN ANTONIO	-12.987,8	-0,6
SAN BERNARDO	-12.703,1	-5,0
SAN JOSÉ DE MAIPO	-171.991,3	-1,1
SAN PEDRO	-95.397,7	-1,8
SANTO DOMINGO	22.174,8	1,4
TALAGANTE	-10.852,2	-5,2
TILTIL	-145.103,9	-2,9
VITACURA	-2.580,8	-4,1

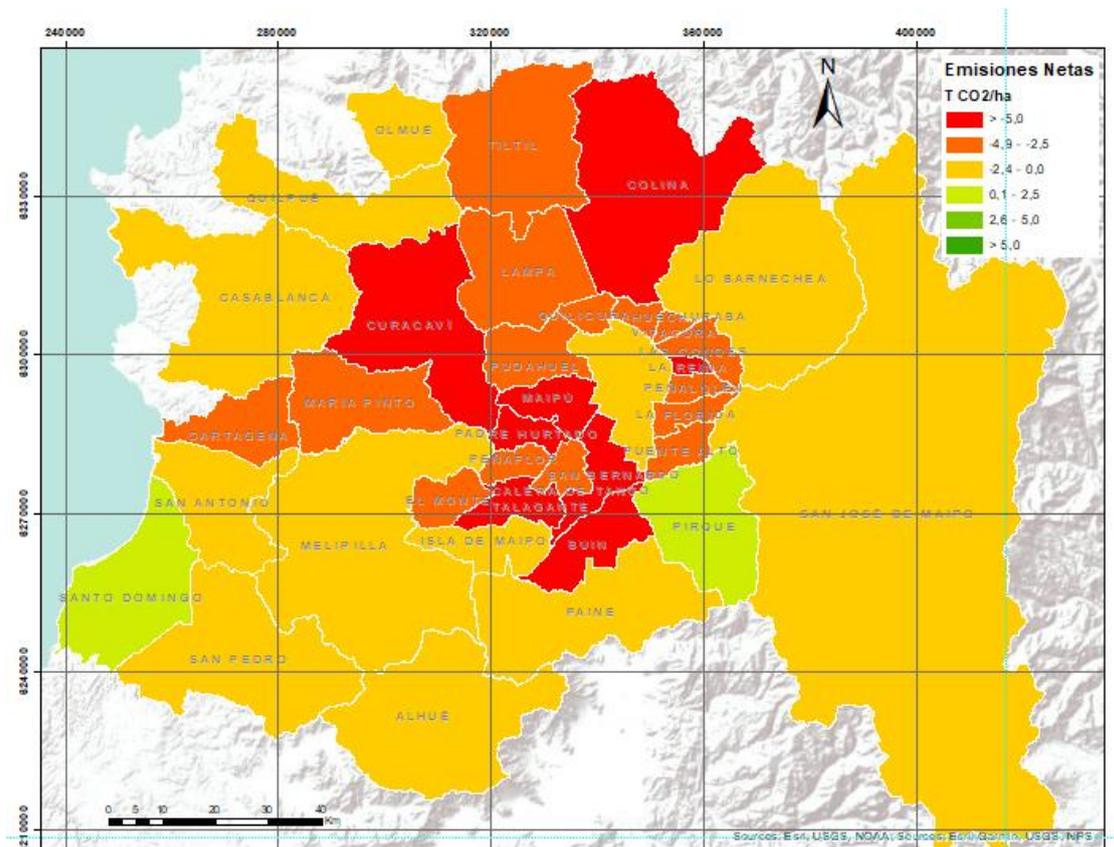


Figura 6. Emisiones netas por hectárea 2001-2013

Las mismas tendencias se repiten para la estimación de las variaciones de carbono por degradación y por aumento de existencias de carbono. Las comunas con mayor volumen de emisiones por degradación son en el periodo 2001-2013 Colina, San José de Maipo, Curacaví, Melipilla y Til-Til. Las que más volumen de CO₂ capturan entre 2001 y 2013 son San José de Maipo, Casablanca y Alhué (Tabla 11).

Tabla 11 . Emisiones por degradación y captura por aumento de existencias por periodo y comuna

COMUNA	Emisiones por Degradación 2001-2013 (t CO2eq/año)	Capturas por Aumento de existencias 2001-2013 (t CO2eq/año)
ALHUE	-34.983,4	16.963,4
BUIN	-4.487,3	253,4
CALERA DE TANGO	-1.372,5	76,5
CARTAGENA	-15.596,7	2.296,8
CASABLANCA	-36.833,9	22.240,5
COLINA	-98.107,4	640,9
CURACAVI	-86.472,0	3.426,1
EL MONTE	-4.741,2	142,3
HUECHURABA	-3.659,9	143,6
ISLA DE MAIPO	-5.251,3	394,9
LA FLORIDA	-2.740,3	272,5
LA REINA	-800,4	0,0
LAMPA	-27.970,4	2.059,6
LAS CONDES	-5.122,3	199,4
LO BARNECHEA	-38.581,8	2.057,8
MAIPU	-5.771,5	77,0
MARIA PINTO	-33.823,4	1.090,9
MELIPILLA	-59.941,6	10.289,6
OLMUE	-6.679,5	2.129,0
PADRE HURTADO	-3.888,5	0,0
PAINE	-22.314,0	10.338,4
PEÑAFLORES	-1.645,8	1,8
PEÑALOÉN	-2.470,2	166,8
PIRQUE	-11.409,8	14.754,6
PUDAHUEL	-11.797,2	1.484,2
PUENTE ALTO	-2.302,5	204,2
QUILICURA	-3.255,8	122,8
QUILPUE	-23.472,3	11.358,2
SAN ANTONIO	-10.814,8	6.930,4
SAN BERNARDO	-3.955,8	79,4
SAN JOSE DE MAIPO	-80.281,7	26.561,2
SAN PEDRO	-37.448,7	7.524,3
SANTO DOMINGO	-4.569,9	11.291,6
TALAGANTE	-3.308,7	29,5
TILTIL	-51.792,9	7.314,6
VITACURA	-784,5	1,7

Conclusiones

Los resultados presentados representan una porción de la información contenida en los mapas de carbono desarrollados, los cuales tienen un alto potencial como herramienta para la toma de decisiones y la gestión del territorio.

A modo general, los resultados obtenidos sugieren el deterioro al que se ha visto afectado la vegetación esclerófila en el área del Proyecto GEF Montaña. Ya que, si bien, estos resultados muestran que, en el periodo 2001 a 2013 en esta área de estudio, bosques y matorrales en algunas áreas capturaron carbono por aumento de existencias, también indican que, en el mismo periodo, existe un descenso en las existencias de carbono generales correspondientes para bosque y matorrales. Siguiendo la misma línea, los resultados muestran como en este periodo la superficie bajo procesos de degradación es mayor a la superficie con aumento de existencias, centrandose esta última en zonas de bosques como Cantillana y Río Clarillo.

Se debe destacar que si bien esta situación de degradación es probable sea causada por diversos efectos tales como la corta de leña, cambio de usos de suelos naturales a usos agrícolas o urbanas o incendios, esta situación también podría estar vinculada, en los últimos años de análisis, a la “megasequía” que afecta la zona central de Chile, donde se ha experimentado un déficit de precipitaciones cercano al 30% entre 2010 y 2019³.

Adicionalmente, cabe resaltar el buen ajuste entre la cartografía base utilizada, “Biotopos Naturales” y el modelo de carbono. El promedio de la desviación estándar del carbono estimado por polígono es del 24% en el año 2013, el más próximo a la elaboración de la cartografía base. Este resultado indica que la variación entre estimaciones para un mismo polígono es baja y, por lo tanto, los polígonos registran valores de contenido de carbono homogéneos en toda su extensión.

³ <http://www.cr2.cl/megasequia/>

Bibliografía

- Cano, J., Sartori, A., Quintanilla, O., Oyarzún, V., Gayoso, J., Sandoval, V., & Almonacid, N. (2016). *Nivel de Referencia de Emisiones Forestales / Nivel de Referencia Forestal del Bosque Nativo de Chile*.
- CONAF. (2016). "Análisis de Emisiones y Absorciones de Carbono Forestal en el Bosque Mediterráneo de Chile." *Nota Informativa de La ENCCRV*, 3. <https://www.enccrv.cl/nota-informativa-3>
- GAYOSO A, J., & GUERRA C, J. (2005). Contenido de carbono en la biomasa aérea de bosques nativos en Chile. *Bosque (Valdivia)*, 26(2). <https://doi.org/10.4067/s0717-92002005000200005>
- IPCC. (2006). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*.
- NASA. (n.d.). *Landsat Science*. 2020. Retrieved May 15, 2020, from <https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat>
- TERCER INFORME BIENAL DE ACTUALIZACIÓN DE CHILE SOBRE CAMBIO CLIMÁTICO 2018*. (n.d.). Retrieved May 15, 2020, from www.theGEF.org
- USGS. (2019). Landsat Missions. In *Fact Sheet*. <https://doi.org/10.3133/fs20193008>