Instituto de Estudios Avanzados en Desarrollo

02/2016

# Emisiones Netas de Carbono Provenientes de la Deforestación en Bolivia durante 1990-2000 y 2000-2010: Resultados de un modelo de "Contabilidad de Carbono"

Por:

Lykke E. Andersen
Anna Sophia Doyle
Susana del Granado
Juan Carlos Ledezma
Agnes Medinaceli
Montserrat Valdivia
Diana Weinhold

Serie Documentos de Trabajo sobre Desarrollo

02/2016

Marzo 2016

Las opiniones expresadas en este documento pertenecen a los autores y no necesariamente reflejan la posición oficial de las instituciones auspiciadoras ni del Instituto de Estudios Avanzados en Desarrollo. Los derechos de autor pertenecen a los autores. Los documentos solamente pueden ser descargados para uso personal.

# Emisiones Netas de Carbono Provenientes de la Deforestación en Bolivia durante 1990-2000 y 2000-2010: Resultados de un modelo de "Contabilidad de Carbono"[1]

por

Lykke E. Andersen[*], Anna Sophia Doyle[**], Susana del Granado[**], Juan Carlos Ledezma[***], Agnes Medinaceli[**], Montserrat Valdivia[**], Diana Weinhold[****]

La Paz, marzo 2016

**Resumen:**

Este documento de investigación estima las emisiones netas de carbono provenientes del cambio en el uso de tierra en Bolivia durante los periodos 1990 – 2000 y 2000 – 2010 utilizando un modelo de contabilidad de carbono que incluye deforestación, degradación de bosques, regeneración de bosques, descomposición y recomposición gradual de carbono, así como la heterogeneidad de los contenidos de carbono sobresuelo y bajo-tierra en una grilla de 10 por 10 km. El enfoque permite elaborar mapas detallados de emisiones netas por región y por tipo de vegetación. Se estima que las emisiones netas de $CO_2$ provenientes del cambio en el uso de tierra en Bolivia incrementaron de 65 millones de toneladas por año durante 1990-2000 a 93 millones de toneladas por año durante la década del 2000-2010, aproximadamente. Se encontró que las emisiones de $CO_2$ per cápita y por unidad de PIB se mantienen estables entre los periodos señalados. Sin embargo, si se considera la evidencia de un incremento de la biomasa en bosques maduros, las emisiones netas de $CO_2$ descienden hasta cerca de cero.

**Clasificación JEL:** Q23, Q24

**Palabras clave:** Deforestación, regeneración de bosques, emisiones de carbono, modelo de contabilidad de carbono, Bolivia.

---

[1] Esta investigación está parcialmente financiada por la Embajada Real de Dinamarca en Bolivia y la Iniciativa Think Tank manejada por el Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo (IDRC) de Canadá. Los autores agradecen enormemente la colaboración y los consejos recibidos de Carola Buitron, Hernan Figueredo, Mariela Flores, Emilio García, Sergio Ledezma, Rafael Paredes, Ricardo Rojas, Evelin Sirpa y Ronald Vargas. Una versión en inglés fue publicado en la revista científica internacional PLOS ONE (ver Andersen et al., 2016) y todos los datos están publicados en 3TU.Datacentrum para asegurar la posibilidad de replicación de los resultados (ver Andersen, 2015).

[*] La autora es Directora del Centro de Economía y Medioambiente (CEEMA) del Instituto de Estudios Avanzados en Desarrollo (INESAD), La Paz, Bolivia. Se la puede contactar a: landersen@inesad.edu.bo.
[**] CEEMA-INESAD, La Paz, Bolivia.
[***] Conservación International – Bolivia, La Paz, Bolivia.
[****] London School of Economics and Political Science, Londres, Reino Unido.

## 1. Introducción

Con más de 51 millones de hectáreas de bosque (MMAyA-OTCA, 2015), Bolivia ocupa el séptimo lugar en términos de extensión de bosque tropical en el mundo (FAO, 2010) y está entre los doce países con mayor biodiversidad terrestre (Ibisch y Mérida, 2003). Sin embargo, en Bolivia las tasas de deforestación se han incrementado rápidamente en las últimas tres décadas, y entre 2000-2010, cerca de 430.000 hectáreas de bosque maduro se perdieron anualmente (SERNAP, 2013), principalmente debido a la expansión de la frontera agropecuaria (Killeen et al., 2008). La deforestación a esta escala causa alrededor de cien millones de toneladas de emisiones de $CO_2$ por año, haciendo que la deforestación sea responsable de la gran mayoría del total de emisiones de $CO_2$ en Bolivia (MMAyA, 2009).

No obstante, extensas áreas que previamente fueron deforestadas están actualmente en proceso de regeneración natural y en este proceso se absorbe $CO_2$ de la atmósfera. SERNAP (2013) identificó cerca de 1,5 millones de hectáreas de bosques en regeneración el 2010. Esto significa que alrededor del 23% del área deforestada en las últimas tres décadas está en proceso de regeneración natural.

El propósito de este documento de investigación es estimar las emisiones netas provenientes de la deforestación en Bolivia durante los periodos 1990-2000 y 2000-2010, tomando en cuenta que un área significativa y creciente de bosque, previamente deforestada, actualmente experimenta un proceso natural de regeneración. Se adopta un enfoque de modelación dinámica que utiliza datos nacionales altamente desagregados, tomando en cuenta cambios en las reservas de carbono bajo-tierra (aquí definido como carbono en raíces vivas y suelo). Esta propuesta de contabilidad de carbono constituye una metodología de Nivel 3 ("Tier 3") de acuerdo a la clasificación de IPCC (2006).

Los resultados muestran que las emisiones netas de $CO_2$ provenientes del cambio en el uso de tierra en Bolivia incrementaron de aproximadamente 65 millones de toneladas por año durante 1990-2000 a 93 millones de toneladas por año durante 2000-2010. Sin embargo, las emisiones de $CO_2$ per cápita y por unidad de PIB se mantienen estables entre los periodos señalados. Si se considera la evidencia de mediciones en campo que indican que la biomasa en bosques maduros está aumentando lentamente, tenemos que las emisiones netas de $CO_2$ descienden hasta cerca de cero.

El enfoque altamente desagregado permite explorar la heterogeneidad dinámica y espacial de las emisiones de carbono a lo largo de Bolivia. Se encontró que el departamento de Santa Cruz, el centro agrícola de Bolivia, ha logrado reducir substancialmente ambas emisiones, per cápita y por unidad de PIB, durante la última década. En contraste, Pando, el departamento más alejado,

ubicado al norte del país, ha incrementado dramáticamente el total de sus emisiones, como también las emisiones por persona y por unidad de PIB.

A su vez comparamos nuestras estimaciones con las de un simple cálculo de carbono Nivel 1 ("Tier 1") basado solo en el promedio nacional de tasas de deforestación y el promedio de densidad de carbono sobresuelo para todos los bosques bolivianos (e.g. Harris et al., 2012; Achard et al., 2014). Se encontró que nuestras estimaciones de Nivel 3 son aproximadamente 10% menores a las estimaciones de Nivel 1, que son mucho más sencillas de calcular. Esto sugiere que las estimaciones totales basadas en menos datos y utilizando métodos más simples, tienden a ser relativamente confiables.

El resto del documento está organizado de la siguiente manera: la Sección 2 presenta los datos utilizados para la estimación del cambio en el uso de tierra y las emisiones de carbono. La Sección 3 describe la metodología de contabilidad de carbono aplicada y detalla los supuestos concernientes a los contenidos de carbono en los diferentes reservorios de los distintos tipos de bosques en Bolivia, así también explica los supuestos utilizados para calibrar la descomposición de carbono y las funciones de regeneración de bosques. La Sección 4 presenta las emisiones netas de carbono calculadas para nueve diferentes tipos de bosques, así como para cada uno de los nueve departamentos y 339 municipios de Bolivia. Adicionalmente, mapea las emisiones de carbono netas para cada uno de los 11.150 pixeles de 10 x 10 km dentro del territorio boliviano. La Sección 5 presenta un análisis de sensibilidad y la Sección 6 muestra las principales conclusiones.

## 2. Datos

Este estudio combina dos bases de datos oficiales sobre bosques, deforestación y regeneración de bosques en Bolivia con dos mapas globales de biomasa sobresuelo y de carbono orgánico en suelos. La primera base de datos boliviana proviene de SERNAP (2013), que analiza imágenes satelitales de NASA Geocover para los años 1990 y 2000 y de Landsat 5 TM para el 2010 para determinar el uso de tierra y el cambio en el uso de tierra entre los tres periodos. La mayoría de las imágenes se tomaron en la temporada seca (de mayo a julio) para obtener imágenes libres de nubes, sin embargo las fechas exactas varían de imagen a imagen y de año a año. Para el procedimiento inicial, se usó la Técnica de Análisis de datos Iterativos y Auto-Organizados (ISODATA) para agrupar los pixeles de acuerdo al valor promedio de cada grupo en 150 clases. Después se utilizó la herramienta de agrupación de ERDAS para clasificar las 150 clases en 16 clases de cobertura predeterminadas, como tipos de bosque, áreas deforestadas, vegetación regenerada, agua, áreas naturales sin cobertura vegetal, y áreas urbanas. Subsecuentemente, se aplicó una reclasificación manual, usando polígonos personalizados para cada pixel que

pertenecía a más de una clase, y de esta forma determinar la clase dominante. Finalmente todas las imágenes fueron digitalmente unidas en un mapa de todo el territorio boliviano, con un mapeo con una unidad mínima de 0,3 hectáreas. En la segunda etapa, se obtuvieron mapas de cambio de cobertura de tierra inducido por humanos en áreas forestales, para esto se cruzaron los mapas de vegetación para los años 1990, 2000, y 2010 utilizando la herramienta Union Matrix de ERDAS.

La Tabla 1 muestra las transiciones en el uso de tierra experimentadas sobre todas las tierras en Bolivia[2] entre 1990 y 2000 y entre 2000 y 2010 de acuerdo al SERNAP (2013).

Desde estas matrices podemos observar que la cantidad total de bosque maduro ha disminuido de 56,8 millones de hectáreas en 1990 a 55,0 millones de hectáreas en el 2000 y a 52,6 millones de hectáreas en el 2010. Esto implica una reducción de 4,2 millones de hectáreas de bosque maduro en los últimos 20 años, correspondientes a un promedio de pérdida de bosques aproximadamente de 210.000 hectáreas por año o alrededor de 0,4% por año. Por otro lado, la agricultura en tierras previamente boscosas ha incrementado de 1,9 millones de hectáreas en 1990 a 3,3 millones de hectáreas en 2000 y a 5,2 millones de hectáreas en 2010. Esto representa un incremento en la frontera agrícola de 3,3 millones de hectáreas en las dos décadas.

La diferencia entre ambos se debe principalmente a la regeneración de bosques (transiciones de áreas en agricultura a regeneración). No obstante, existe un gran área (0,8 millones de hectáreas) que pasó directamente de bosques en el 2000 a regeneración de bosques en el 2010. Esto podría suceder, por ejemplo, si el área fue deforestada para agricultura en el año 2001 o en el 2002 y se usó solo unos pocos años, y por lo tanto en el 2010 ya estaban visiblemente en el proceso de regeneración. Sin embargo, también podría deberse a la degradación de bosques causada por tala selectiva o incendios. Por ende, el área no seguiría luciendo, en las imágenes satelitales, como bosque original, sino más bien como un bosque joven en regeneración. Otra área extensa (1,3 millones de hectáreas) cambió directamente de bosque en el año 2000 a otro tipo de vegetación en el 2010. Esto pudo haber sido causado, por ejemplo, por un incendio extensivo que quemó el bosque hasta el suelo y lo convirtió en algo que ahora luce como sabana en vez de bosque en regeneración. Lo cual se ve compensado por un área aproximadamente del mismo tamaño que se convirtió directamente de otra vegetación en el 2000 a algo que parece bosque maduro en el 2010. La última transición es más difícil de entender y puede tener alguna relación con el cambio en el tipo de imágenes satelitales utilizadas en el 2000 y 2010. Afortunadamente, el área que cambió de estatus de otra vegetación a bosque es muy cercana en tamaño al área que cambió en la dirección opuesta, por lo que a un nivel agregado, no debería

[2] Los lagos y salares que no pertenecen a ningún municipio fueron excluidos del análisis. Por lo que el área total del análisis abarca 107.994.315 hectáreas.

haber emisiones significativas de este fenómeno. No obstante, resalta la incertidumbre inherente a las medidas satelitales de deforestación, ya que la vegetación natural no es binaria (con bosque/sin bosque), pero abarca un continuo de densidades de vegetación y está constantemente cambiando debido a factores naturales.

***Tabla 1: Matrices de uso de tierra y cambio en uso de tierra para Bolivia, 1990-2000 y 2000-2010***

**(a) 1990-2000 (ha)**

| 1990-2000 | *Bosque 2000* | *Agro 2000* | *Regeneración 2000* | *Otro 2000* | Total 1990 |
|---|---|---|---|---|---|
| ***Bosque 1990*** | 55.002.123 | 1.439.908 | 229.662 | 88.331 | 56.760.024 |
| ***Agro 1990*** | 2.067 | 1.756.363 | 120.472 | 362 | 1.879.264 |
| ***Regeneración 1990*** | 493 | 144.756 | 513.396 | 1.069 | 659.714 |
| ***Otro 1990*** | 13.405 | 5.629 | 1.362 | 48.706.765 | 48.695.313 |
| **Total 2000** | 55.018.088 | 3.346.656 | 864.892 | 48.764.679 | 107.994.315 |

**(b) 2000-2010 (ha)**

| 2000-2010 | *Bosque 2010* | *Agro 2010* | *Regeneración 2010* | *Otro 2010* | Total 2000 |
|---|---|---|---|---|---|
| ***Bosque 2000*** | 50.888.608 | 2.053.495 | 801.309 | 1.274.596 | 55.018.088 |
| ***Agro 2000*** | 241.390 | 2.675.745 | 339.528 | 89.993 | 3.346.656 |
| ***Regeneración 2000*** | 126.261 | 438.172 | 268.285 | 32.173 | 864.891 |
| ***Otro 2000*** | 1.326.803 | 902 | 71.598 | 47.365.377 | 48.764.680 |
| **Total 2010** | 52.583.062 | 5.168.314 | 1.480.800 | 48.762.139 | 107.994.315 |

*Fuente:* SERNAP (2013).

La segunda base de datos boliviana oficial que utilizamos es el Mapa de Bosques 2013 publicado en el estudio de MMAyA-OTCA (2015). Este mapa divide todos los bosques bolivianos en nueve categorías, sumando un área boscosa total de 51.407.000 hectáreas en el año 2013. Ésta área es ligeramente mayor que el área boscosa encontrada por SERNAP (2013), debido a que la categoría "bosque en regeneración" cuenta como bosque en la clasificación del MMAyA-OTCA (2015) en 2013. La Tabla 2 muestra cuanto de cada tipo de bosque se representó en 2013.

***Tabla 2: Extensión de Bosques en Bolivia, 2013, por tipo de bosque***

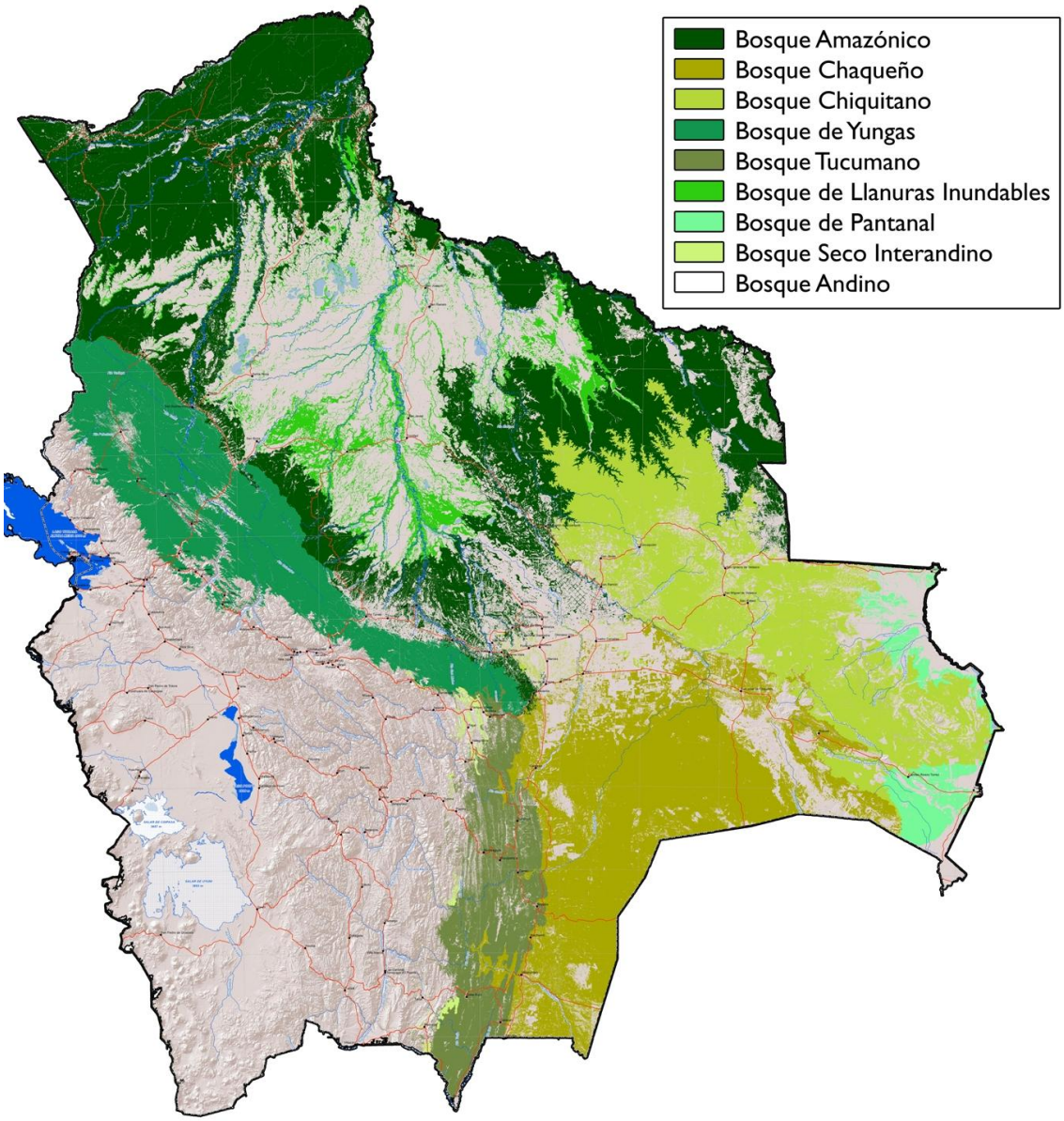
| Tipo de Bosque | Extensión de Bosque | |
|---|---|---|
| | (ha) | (%) |
| 1. Bosque Amazónico | 19.402.388 | 37,7 |
| 2. Bosque Chaqueño | 9.098.162 | 17,7 |
| 3. Bosque Chiquitano | 8.645.849 | 16,8 |
| 4. Bosque de Yungas | 6.565.994 | 12,8 |
| 5. Bosque Tucumano | 3.322.885 | 6,5 |
| 6. Bosque de Llanuras Inundables | 3.047.598 | 5,9 |
| 7. Bosque de Pantanal | 1.147.401 | 2,2 |
| 8. Bosque Seco Interandino | 172.227 | 0,3 |
| 9. Bosque Andino | 4.496 | 0,01 |
| **Total Bosques, 2013** | **51.407.000** | **100** |

*Fuente:* MMAyA-OTCA (2015).

El bosque Amazónico es claramente el tipo de bosque más importante en Bolivia, ocupando más de un tercio de los bosques bolivianos. Le sigue el bosque Chaqueño, el bosque Chiquitano y el bosque de Yungas, cada uno con cerca de un sexto de la cobertura total boscosa. A estos le siguen en importancia los bosques de Llanuras Inundables en Beni y el bosque Pantanal de Santa Cruz. Los bosques Seco Interandino y Andino juntos suman solo el 0,3% de todos los bosques bolivianos. El Mapa 1 muestra la ubicación de los diferentes tipos de bosques.

Utilizaremos esta clasificación de bosques para establecer las emisiones de carbono por tipo de bosque, un ejercicio que no se ha llevado a cabo en Bolivia hasta ahora.

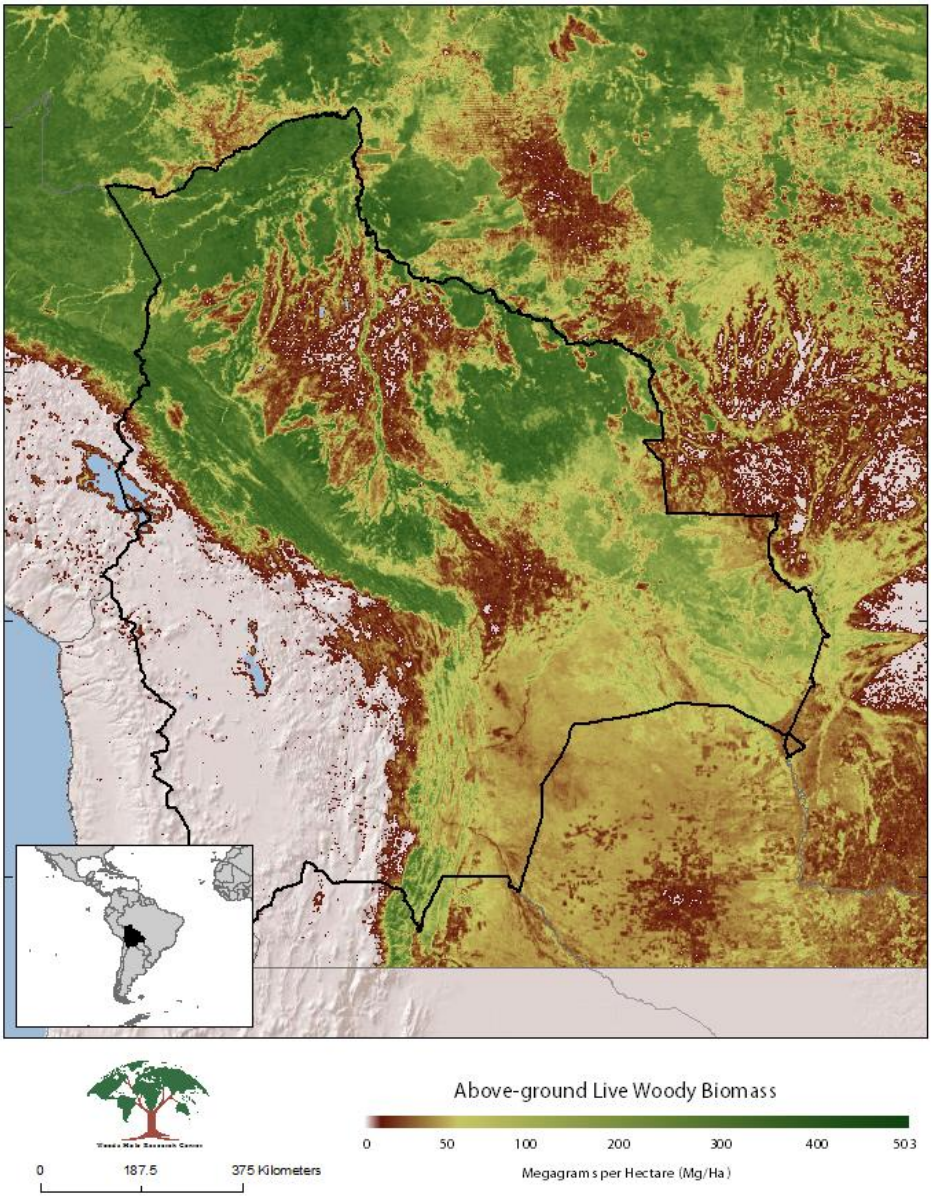
***Mapa 1: Mapa de Bosques Bolivianos, 2013***




*Fuente:* MMAyA-OTCA (2015).

Con el fin de calcular las emisiones de carbono por tipo de bosque, se necesita saber los contenidos de carbono típico en bosques intactos para cada tipo de bosque. Para este propósito se utilizó el mapa detallado de biomasa sobresuelo desarrollado por el Centro de Investigación Woods Hole (WHRC, por sus siglas en inglés), que utiliza una combinación de medidas de campo, observaciones LiDAR e imágenes grabadas del Spectro-radiómetro de Imágenes de Moderada Resolución (MODIS, por sus siglas en inglés) (Baccini et al., 2012). El Mapa 2 muestra la distribución de biomasa viva sobresuelo en Bolivia.

***Mapa 2: Mapa de la densidad de biomasa leñosa viva sobresuelo en Bolivia***



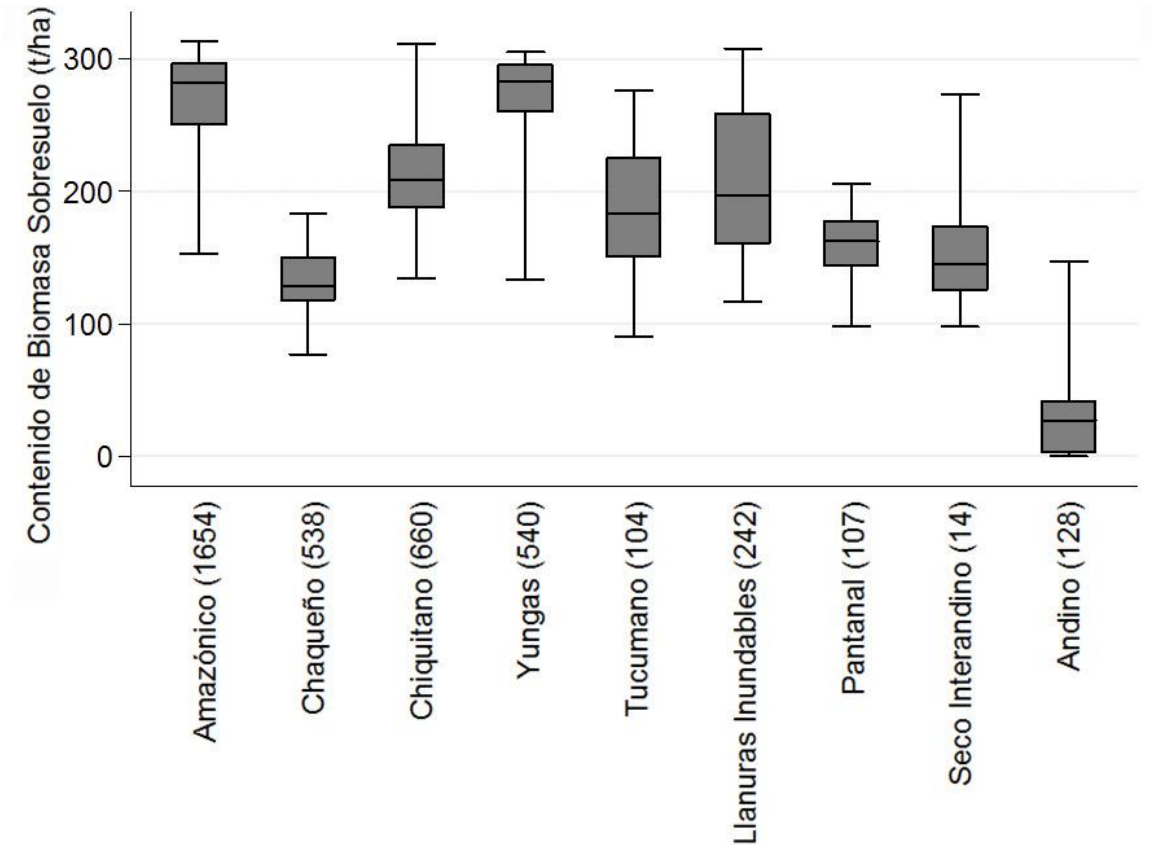

*Fuente:* Woods Hole Research Center
(http://www.whrc.org/mapping/pantropical/biomass_maps/large/Bolivia.png)

Mientras que se mostró con trabajos de campo que estos datos proveen estimaciones precisas de biomasa sobresuelo (Berenguer et al., 2015), se hacen las estimaciones después de la intervención (después de las dos décadas de deforestación y degradación que analizamos). Lo que se necesita saber, para estimar las emisiones de carbono, es la biomasa en cada pixel antes de ser perturbada, que por ahora es una cantidad desconocida. Por lo tanto, se la debe estimar. Se procede a hacerlo utilizando pixeles con bosque casi intacto como una referencia para cada

tipo de bosque. Con "bosque casi intacto" nos referimos a pixeles con menos del 1% de deforestación para 2010 y al menos 30% de cobertura de coronas de árboles.

La Figura 1 muestra la variación en el promedio de biomasa sobresuelo para pixeles de 10 por 10 km con "bosque casi intacto," para cada uno de los nueve tipos de bosques. Las barras exteriores muestran el rango de 95% de datos de biomasa, mientras que el recuadro y la línea en medio muestran los percentiles 25, 50, y 75 de los datos de biomasa. El número en paréntesis, al lado del nombre de tipo de bosque, indica cuantos pixeles de bosque casi intacto se utilizaron para calcular los percentiles de biomasa.

***Figura 1: Distribución de la biomasa sobresuelo en bosques virtualmente intactos, por tipo de bosque***




*Fuente:* Elaboración propia basada en la medición de biomasa sobresuelo de Baccini et al. (2012).

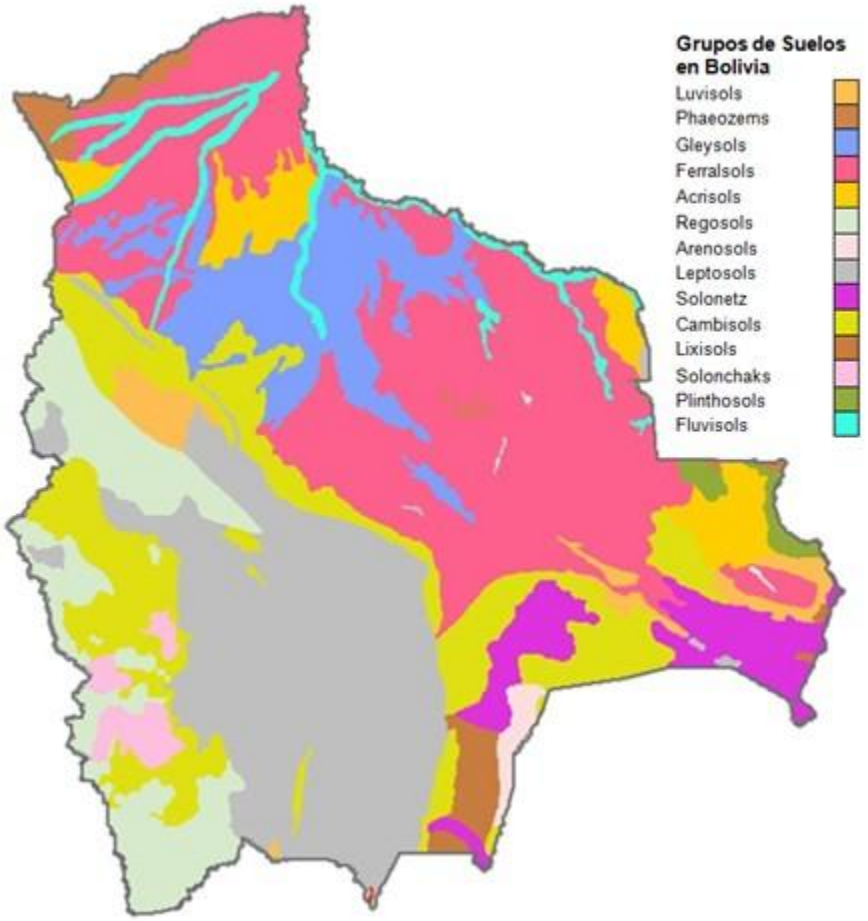
La biomasa mediana (50vo percentil) en pixeles que aún no han sido afectados por deforestación es una buena aproximación para la biomasa de los bosques intactos en cada uno de los respectivos tipos de bosque. La Figura 1 establece, sin embargo, que existe variación substancial alrededor de la mediana, incluso en ecosistemas intactos. Esto puede ser un problema, debido a

que la deforestación no necesariamente está distribuida al azar dentro de cada tipo de vegetación (Houghton, 2010). En la Amazonia brasileña, por ejemplo, se ha demostrado que las áreas que han sido deforestadas hasta ahora son menos densas que el bosque amazónico brasileño promedio (Andersen et al., 2002; Loarie et al., 2009; Song et al., 2015). Si esto fuera cierto para Bolivia también, utilizar la biomasa mediana para cada tipo de bosque conduciría a una sobre-estimación de emisiones de carbono. Para saber cuán sensibles son nuestros resultados a esta posible tendencia, en la Sección 5 se repite el análisis utilizando el percentil 25 en vez del 50vo para cada tipo de bosque.

La última base de datos que se utilizó es el Harmonized World Soil Database desarrollado por FAO et al. (2009). Esta base de datos provee un mapa de tipos de suelo basado en un gran número de perfiles de suelo extraídos alrededor del territorio boliviano (ver Mapa 3). De esta base de datos se extrajeron las cantidades de carbono orgánico en la capa superficial del suelo (0 – 30 cm) y del subsuelo (30 – 70 cm), como también su respectiva densidad aparente. Esto nos permitió calcular los contenidos de carbono totales, en toneladas por hectárea, en los 100 cm superiores de suelo, para todos los diferentes tipos de suelo presentes en Bolivia[3]. El Mapa 3 muestra los diferentes grupos de suelos dominantes encontrados en Bolivia.

[3] Todas estas observaciones de carbono orgánico fueron extraídas de la capa superficial del suelo y del subsuelo para los grupos y unidades de suelos dominantes, exceptuando los Leptosols, el único grupo de suelos que no cuenta con información para subsuelo. Este tipo de suelo se encuentra sobre todo en los bosques Andino, Seco Interandino y Tucumano (ver Mapa 3).

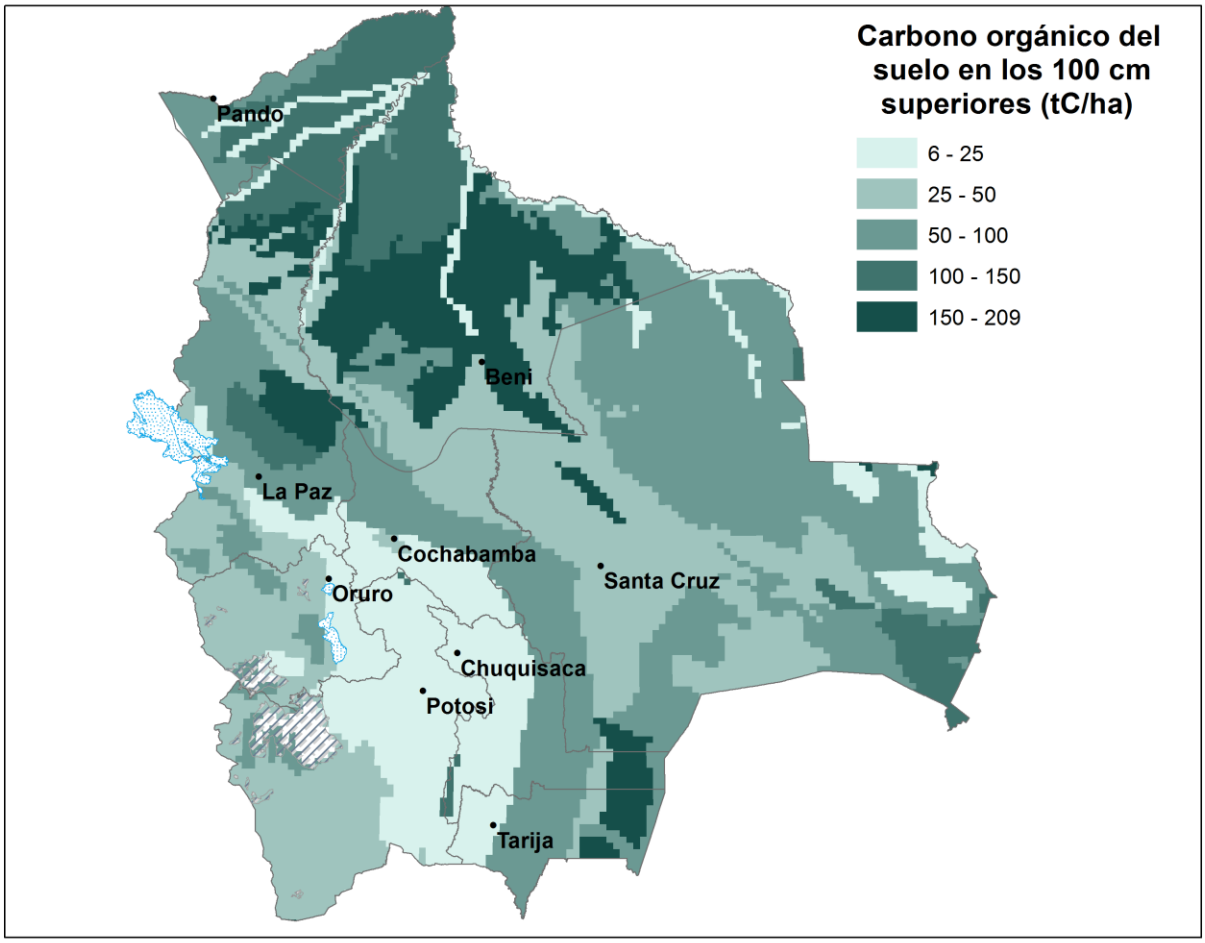
***Mapa 3: Mapa de los Grupos de Suelos Dominantes en Bolivia***




*Fuente:* Harmonized World Soil Data Base, (FAO, 2009).

El Mapa 4 muestra las variaciones en carbono orgánico en suelos en el territorio boliviano una vez que se transforma la información del contenido de carbono reflejado en el Mapa 3 a nuestra grilla de 10 por 10 km en todo el territorio nacional. Los suelos más ricos en carbono se encuentran en el bosque de Llanuras Inundables y las praderas de Beni, en el bosque de Yungas, y en el bosque Chaqueño.

***Mapa 4: Mapa de la Densidad del Contenido de Carbono Orgánico en Bolivia***




*Fuente:* Elaboración propia basada en los datos del Harmonized World Soil Database.

## 3. Metodología

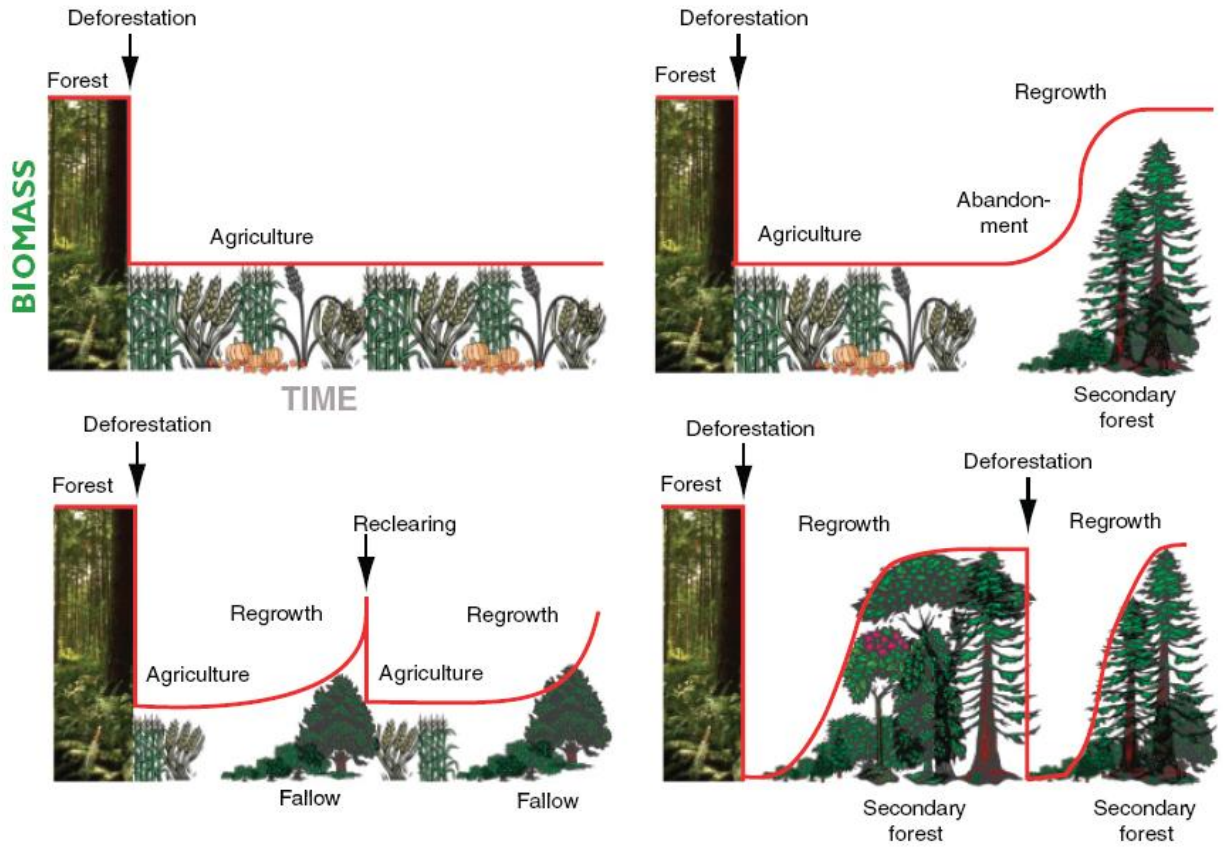
Houghton et al. (1983) desarrollaron un modelo de emisiones de carbono que hace seguimiento al carbono emitido a la atmósfera de bosques convertidos a tierras para la agricultura mediante métodos de tala y quema y también el carbono acumulado en el proceso de regeneración natural de los bosques después del abandono. El modelo, conocido como modelo de contabilidad de carbono, ha sido ampliamente empleado en la literatura (e.g. DeFries et al., 2002; Houghton, 2003; Baccini et al., 2012).

El modelo de contabilidad de carbono tiene dos partes importantes. Primero, un conjunto de valores de equilibrio para los contenidos de carbono para distintos tipos de bosques y diferentes

usos de tierra. Segundo, un conjunto de funciones de respuesta que indican cómo el carbono se descompone y recompone después de cambios en el uso de tierra.

La agricultura de tala y quema típica en Bolivia y en muchos otros lugares consiste en tres fases: i) la quema de bosques y la preparación de tierras para agricultura o ganadería; ii) el uso agro-pastoril de la tierra; iii) el agotamiento del suelo y/o infestación de hierba, abandono de tierra, y regeneración de vegetación secundaria. Sin embargo, el ciclo varía de situación en situación. La Figura 2 muestra cuatro diferentes ejemplos. En el primer panel, los bosques se convierten a agricultura, y la tierra continúa siendo utilizado para agricultura durante todo el periodo de análisis. Este tipo de situación se observa típicamente cerca de grandes ciudades, donde el valor de la tierra es alto y tiene sentido económico aplicar fertilizantes y pesticidas para seguir cultivando, en vez de dejar la tierra descansando por largos periodos de tiempo. El segundo panel muestra una situación que es más típica en países con abundante tierra como Bolivia. La tierra deforestada es usada para la agricultura por un número de años hasta que los nutrientes del suelo bajan o la infestación de hierba es muy alta para que la agricultura sea rentable en la parcela. Es entonces abandonada, lo que permite la regeneración natural del bosque. El tercer panel muestra una situación donde la tierra no se abandona, pero se deja el arado por un tiempo con la intención de volver a preparar la tierra para la agricultura cuando la fertilidad del suelo se recupere naturalmente. Finalmente, el último panel muestra una situación donde el bosque es deforestado sin convertirlo al uso de agricultura. Esto puede suceder en una situación de tala-rasa, pero esto es virtualmente inexistente en Bolivia. Podría ocurrir también si un granjero trata de establecer derechos de propiedad en el área, pero no tiene el capital o la fuerza laboral para cultivar la tierra. También puede darse por accidente, usualmente debido a incendios descontrolados.

***Figura 2: Diferentes posibles dinámicas de carbono consiguientes a la deforestación***




*Fuente:* Ramankutty et al. (2007).

El modelo de contabilidad de carbono debe hacer seguimiento a la historia del uso de la tierra en cada parcela del país en diferentes puntos en el tiempo. Para facilitar los cálculos, hemos dividido el país en pixeles de 10 por 10 km, lo que resulta en 11.150 pixeles que cubren el país en su totalidad. Se tienen los datos detallados de uso de tierra y cambio en el uso de tierra dentro de cada uno de los pixeles; no obstante se asigna un solo tipo de bosque, el predominante, para cada pixel. Todos los cálculos se elaboraron en Excel.

El resto de esta sección explica en detalle cómo se llegó a los diferentes parámetros necesarios para hacer correr el modelo de contabilidad de carbono.

### 3.1. Contenido de Carbono Sobresuelo

Solo la mitad de la biomasa viva es carbono. Por lo tanto, las toneladas de biomasa pueden ser convertidas a toneladas de carbono (tC) al dividirlas entre dos, como lo sugiere IPCC (2006).

Aplicando estos cálculos a los contenidos de biomasa mediana del sobresuelo, encontrados en la sección anterior, obtenemos una estimación central para los contenidos de carbono sobresuelo en bosques intactos como se muestra en la Tabla 3. Los contenidos promedio de carbono en el sobresuelo (ponderados por la cantidad de cada uno de los diferentes tipos de bosques presentados en la Tabla 2 arriba) son 114 tC/ha.

Considerando que las personas típicamente deforestan primero bosques menos densos (Andersen et al., 2002; Loarie et al., 2009; Song et al., 2015), en uno de los análisis de sensibilidad en la Sección 5 utilizaremos los contenidos de carbono calculados del 25$^{vo}$ percentil de biomasa, también reportados en la Tabla 3.

***Tabla 3: Contenidos de Carbono Sobresuelo para diferentes tipos de bosques intactos***

| | **Contenidos de Carbono Sobresuelo (tC/ha)** | |
|---|---|---|
| **Tipos de Bosque** | **Percentil 50$^{vo}$** | **Percentil 25$^{vo}$** |
| 1. Bosque Amazónico | 142 | 125 |
| 2. Bosque Chaqueño | 64 | 59 |
| 3. Bosque Chiquitano | 105 | 94 |
| 4. Bosque de Yungas | 142 | 130 |
| 5. Bosque Tucumano | 92 | 76 |
| 6. Bosque de Llanuras Inundables | 99 | 81 |
| 7. Bosque de Pantanal | 81 | 72 |
| 8. Bosque Seco Interandino | 73 | 63 |
| 9. Bosque Andino | 14 | 2 |
| **Promedio Ponderado** | **114** | |

*Fuente:* Elaboración propia basada en la biomasa sobresuelo medida por Baccini et al. (2012).

Los valores medianos corresponden muy bien con los valores por defecto de IPCC que son 150 tC/ha para bosques tropicales-lluviosos, 105 tC/ha para bosques tropicales secos, y 40 tC/ha para matorrales tropicales en Sud América (IPCC, 2006).

### 3.2. Contenidos de Carbono Bajo-Tierra

Además del carbono contenido en la biomasa sobresuelo, también existen grandes cantidades de carbono almacenadas bajo-tierra (en el suelo y en las raíces vivas). Ambos reservorios de

carbono se ven afectados por el cambio en el uso de la tierra. Para calcular los contenidos de carbono en el suelo, utilizamos el World Harmonized Soil Data Base (FAO et al., 2009). No se encontró ningún mapa de contenido de carbono en raíces para Bolivia y tampoco existen suficientes muestras de campo disponibles para crear uno, por ende se utilizaron las proporciones por defecto de IPCC de biomasa bajo-tierra entre biomasa sobresuelo para cada tipo de bosque. La Tabla 4 muestra los parámetros utilizados.

***Tabla 4: Contenidos promedio de carbono en raíces, por tipo de bosque***

| Tipo de Bosque | Razón de biomasa bajo-tierra entre sobresuelo (IPCC, 2006) | Contenido de carbono en raíces (tC/ha) |
|---|---|---|
| 1. Bosque Amazónico | 0,37 | 52 |
| 2. Bosque Chaqueño | 0,56 | 36 |
| 3. Bosque Chiquitano | 0,28 | 29 |
| 4. Bosque de Yungas | 0,24 | 34 |
| 5. Bosque Tucumano | 0,37 | 34 |
| 6. Bosque de Llanuras Inundables | 0,24 | 24 |
| 7. Bosque de Pantanal | 0,27 | 22 |
| 8. Bosque Seco Interandino | 0,27 | 20 |
| 9. Bosque Andino | 0,28 | 4 |

*Fuente:* Elaboración propia basada en los valores por defecto de IPCC para razones de biomasa bajo-tierra entre sobresuelo.

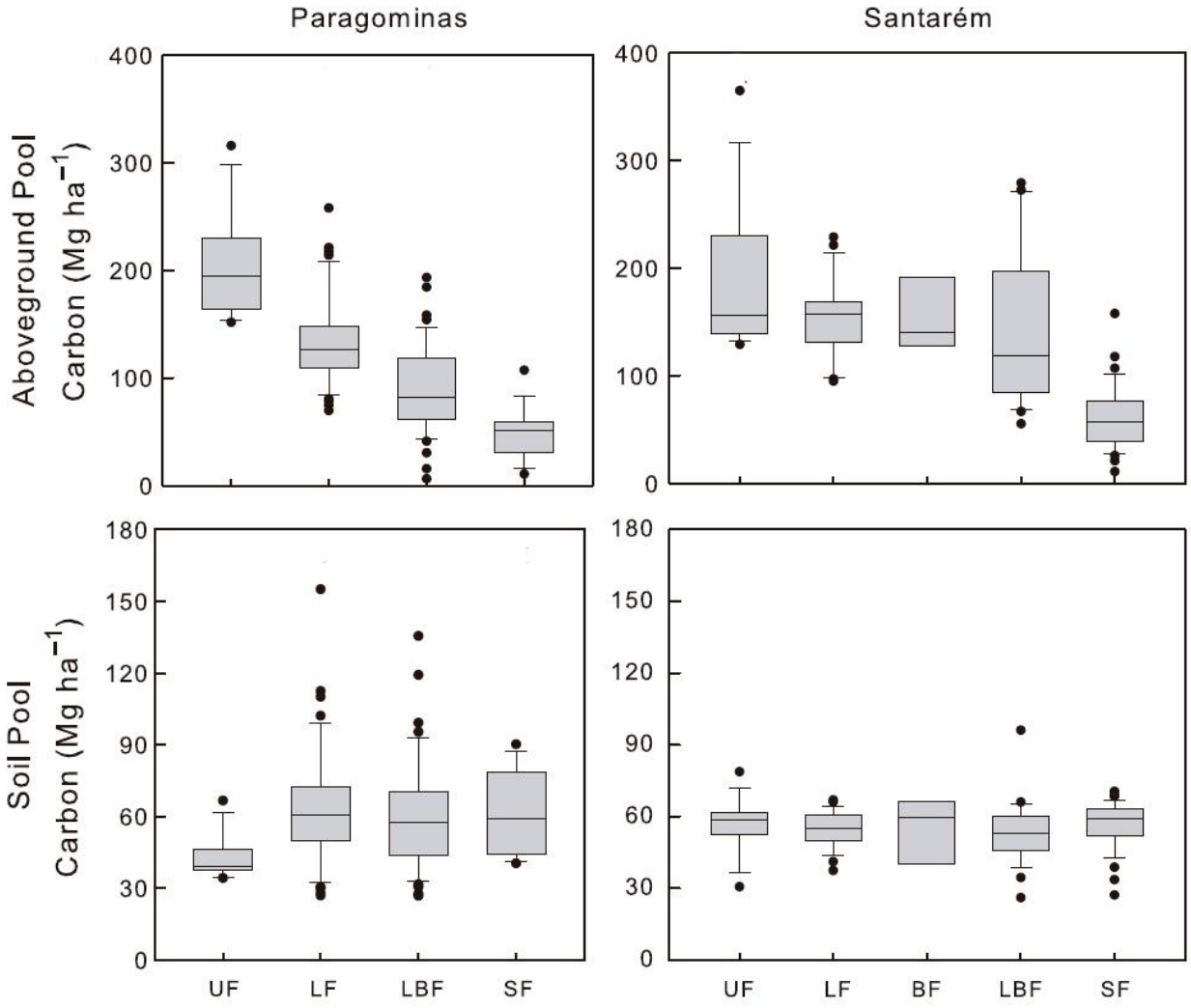
### 3.3. Curvas de descomposición de carbono

Debido a que la mayor parte de los bosques son deforestados por incendios para abrir paso a la agricultura, asumimos que los contenidos de carbono sobresuelo inmediatamente caen al nivel encontrado en la tierra cultivada o en las gramíneas (5 tC/ha según IPCC (2006)). Sin embargo, el carbono retenido bajo-tierra es liberado a la atmósfera gradualmente. Asimismo, la tasa de descomposición depende del tipo de uso de tierra subsecuente.

El estudio de campo más extensivo llevado a cabo sobre los efectos de perturbación de bosques inducidos por humanos en el carbono del suelo en la Amazonía (Berenguer et al., 2014), sugiere que el carbono retenido en los suelos es resiliente a lo que pasa encima. El equipo muestreó 225 parcelas de bosques con diferentes historiales de perturbaciones inducidas por humanos (bosques primarios, bosques talados, bosques quemados, bosques talados y quemados, y bosques secundarios de diferentes edades) y cuidadosamente midió el carbono sobresuelo, carbono en el suelo, así como el carbono en madera y otra materia muerta. Su principal resultado, con relevancia para esta investigación, muestra que mientras el carbono sobresuelo difiere tremendamente entre bosques intactos y bosques con intervención humana, este no es el

caso con el carbono del suelo, que parece mantenerse a un nivel similar entre todos los tipos de bosques (ver Figura 3).

***Figura 3: Variaciones medidas en bosques intactos y perturbados en carbono sobresuelo y suelo en dos sitios de estudio en Brasil***




*Fuente:* Adaptado de Berenguer et al. (2014), Figura 2.
*Notas:* UF: Bosques intactos; LF: Bosques talados; BF: Bosques quemados; LBF: Bosques talados y quemados; SF: Bosques secundarios (las siglas son diferentes porque están en inglés).

Berenguer et al. (2014) no midieron los contenidos de carbono en suelos utilizados para agricultura o pastizales. No obstante, otros estudios han encontrado que la conversión a pastizal tampoco afecta el carbono en el suelo (e.g. Lugo et al., 1986). De hecho, un meta-análisis llevado a cabo por Guo y Gifford (2002) encuentra que, en promedio, el cambio de bosque primario a pastizal causa un incremento de 8% en el carbono retenido en el suelo. Por lo tanto, es razonable

asumir que existirán emisiones de carbono de los suelos solo si el bosque es convertido a agricultura. Houghton y Hackler (2001), después de revisar la evidencia de experimentos alrededor del mundo, argumentan que el 25% del carbono orgánico en los 100 cm superiores del suelo se pierde en 20 años en Sud y Centro América. Adoptaremos este supuesto para el presente documento de investigación y simplemente asumiremos una curva de descomposición lineal de carbono bajo-tierra desde el año cero hasta el año veinteavo de tierra dedicada a la agricultura, y sin ningún cambio posterior.

Desafortunadamente, la base de datos de uso de tierra del SERNAP (2013) que utilizamos no distingue entre agricultura y pastizales. Sin embargo, Bolivia tiene vasta extensión de pastizales naturales, así que en general no es necesario cortar los bosques para pastizales y solo un pequeño porcentaje de bosque deforestado es convertido a pastizal. Para nuestra estimación central de emisiones de carbono, asumiremos que toda el área cortada de bosques es destinada a agricultura intensiva, que emite 25% del carbono retenido en el suelo en 20 años. En el análisis de sensibilidad en la sección 5 mostraremos lo que sucede si asumimos que el 20% es deforestado para pastizales o actividades agro-forestales, las que dejan el carbono en el suelo intacto.

### 3.4. Curvas de re-composición de carbono

Tomando Reis y Andersen (2000) como punto de partida, especificamos curvas logísticas de regeneración de carbono para la biomasa sobre suelo, ya que esta forma funcional permite la acumulación rápida de carbono al principio, cuando el crecimiento de especies pioneras pueblan el área, y la convergencia lenta hacia los contenidos originales de carbono de bosques maduros. Los contenidos de carbono sobre suelo en bosques en regeneración están dados por:

$$CAR_{v,a} = \frac{CAP_v}{1 + e^{(\alpha_v - \beta_v a)}}$$

donde $CAR_{v,a}$ es el contenido de carbono sobre suelo en regeneración en la edad $a$ para el bosque de tipo $v$, $CAP_v$ es el contenido de carbono sobre suelo en bosque maduro tipo $v$, y $\alpha_v$ y $\beta_v$ son parámetros que determinan la forma exacta de la función logística.

Usando los parámetros de Houghton y Hackler (2001), asumimos que al bosque tropical húmedo en Bolivia le toma 40 años en regenerarse hasta alcanzar los contenidos de carbono de bosques intactos, y que los bosques secos o estacionales toman 35 años en recuperar sus contenidos de carbono originales.

Se establecen dos supuestos para calcular los parámetros $\alpha_v$ y $\beta_v$. Primero, se asume que el contenido de carbono al principio de la regeneración es igual a 5 tC/ha para todos los tipos de bosque - el contenido normal en cultivos o en gramíneas de acuerdo al IPCC (2006). Segundo, la regeneración de bosques toma entre 35-40 años en alcanzar el 99% de su contenido máximo de carbono, dependiendo del tipo de bosque (ver Tabla 5).

***Tabla 5: Contenido máximo de carbono sobresuelo, y parámetros de regeneración logística***

| Tipo de Bosque | Contenidos máximos de carbono sobresuelo (tC/ha) | Años en completar la regeneración | α | B |
|---|---|---|---|---|
| 1. Bosque Amazónico | 142 | 40 | 3,3105 | 0,1976 |
| 2. Bosque Chaqueño | 64 | 35 | 2,4680 | 0,2018 |
| 3. Bosque Chiquitano | 105 | 40 | 2,9957 | 0,1898 |
| 4. Bosque de Yungas | 142 | 40 | 3,3105 | 0,1976 |
| 5. Bosque Tucumano | 92 | 35 | 2,8565 | 0,2129 |
| 6. Bosque de Llanuras Inundables | 99 | 40 | 2,9339 | 0,1882 |
| 7. Bosque de Pantanal | 81 | 40 | 2,7213 | 0,1829 |
| 8. Bosque Seco Interandino | 73 | 35 | 2,6101 | 0,2059 |
| 9. Bosque Andino | 14 | 35 | 0,5878 | 0,0771 |

*Fuente:* Elaboración propia.

Además, basados en Houghton y Hackler (2001) asumimos que toma el doble de tiempo al carbono bajo-tierra regenerarse del que le tomó para descomponerse, i.e. el carbono bajo-tierra necesita 40 años para retornar a sus niveles originales si fue utilizado para agricultura por 20 años. Esto se confirma por un meta-análisis hecho por Li et al. (2012), que concluye que aumentos significativos en el carbono del suelo solo se encuentran 30 a 50 años después de la repoblación forestal. Por ende, asumimos una curva de regeneración lineal con la mitad de la pendiente de la curva de descomposición de carbono bajo-tierra.

### 3.5. Estructura etaria de tierras para agricultura y barbecho

Nuestra base de datos del SERNAP (2013) provee una base de datos de cobertura de vegetación para los años 1990, 2000, y 2010 para todo el territorio boliviano. Con el fin de describir la historia completa del uso de tierra para cada parcela en el país, no obstante, algunos supuestos son necesarios respecto al primer periodo de observación. Específicamente, para 1990 asumimos que la regeneración observada data de solo cinco años y que antes de eso, se utilizaba

para agricultura por solo cinco años. Estos supuestos son razonables ya que la deforestación significativa en Bolivia empezó apenas a principios de la década de 1980, cuando el colapso en el sector minero creó desempleo masivo y el gobierno trató de aliviar las tensiones sociales al proporcionar a los trabajadores afectados terrenos gratuitos en los bosques de las tierras bajas bolivianas (Klein, 2003).

En los periodos subsecuentes podemos rastrear todos los cambios en el uso de la tierra. Por lo tanto, si una parcela que muestra cinco años de regeneración en el 1990 se sigue regenerando en el 2000, entonces, por lógica, en el 2000 la vegetación regenerada debe ser de 15 años de edad. Los bosques en regeneración más antiguos que se observan en la base de datos son de 25 años en el 2010, y pudo haber sido utilizada para agricultura solo por cinco años antes de esto. Esto significa, por ejemplo, que el carbono en el suelo en esta regeneración antigua tiene suficiente tiempo para recuperar totalmente hasta alcanzar su nivel original.

### 3.6. El contenido de carbono en bosques degradados

En las imágenes satelitales a veces observamos parcelas que no son ni bosques maduros ni completamente deforestados, y éstas se clasifican como bosques degradados o bosques en proceso de regeneración, en función de la historia de la parcela. Si la parcela no ha sido previamente deforestada, suponemos que se trata de un bosque degradado, por lo general debido a la tala selectiva, a incendios forestales o factores naturales como tormentas, deslizamientos de tierra, o cambios en el curso de ríos. En nuestras estimaciones centrales, suponemos que el bosque degradado tiene el mismo contenido de carbono sobresuelo que un bosque en regeneración de 25 años de edad (que tiene el 85% del contenido de carbono de un bosque maduro). Este supuesto es algo arbitrario ya que el carbono desprendido de ciertos tipos de degradación puede ser liberado en diferentes escalas de tiempo (por ejemplo, el carbono almacenado en muebles o pisos que provienen de bosques que han sufrido tala selectiva, o el carbono emitido lentamente como resultado del cambio de curso de un río), potencialmente causando pequeñas sobre o sub-estimaciones. Por ende, también elaboramos un análisis de sensibilidad en el que suponemos una degradación más severa (donde el contenido de carbono es sólo el 41% del contenido de bosques maduros). Por último, teniendo en cuenta la fuerte evidencia del trabajo de campo de Berenguer et al. (2014, 2015) en Brasil, suponemos que el carbono bajo-tierra permanece intacto en los bosques degradados.

## 4. Resultados

Utilizando los datos y supuestos presentados en las secciones previas, calculamos las emisiones de carbono para dos periodos de diez años, 1990-2000 y 2000-2010, para cada uno de los 11.150 pixeles que cubren al país entero. Para facilitar la presentación y la discusión, organizamos los resultados en los siguientes niveles:

- Nivel nacional
- Nivel departamental
- Por tipo de bosque
- Nivel municipal
- A nivel de pixeles

### 4.1. Resultados a nivel nacional

La Tabla 6 muestra que durante los últimos 20 años, Bolivia ha emitido cerca de 1,6 billones de toneladas de $CO_2$ por el cambio de uso de tierra. Las emisiones totales fueron 42% mayores durante la segunda mitad del periodo analizado, pero la población también incrementó, por lo tanto las emisiones per cápita por el cambio en uso de tierra solo incrementaron alrededor del 12%, quedándose cerca de 10 $tCO_2$/persona/año.

***Tabla 6: Estimaciones centrales de emisiones de $CO_2$ provenientes del cambio de uso de tierra en Bolivia, 1990-2000 y 2000-2010***

| | 1990-2000 | 2000-2010 |
|---|---|---|
| Emisiones totales de $CO_2$ ($tCO_2$) | 653.858.680 | 926.094.559 |
| Emisiones anuales promedio de $CO_2$ ($tCO_2$/año) | 65.385.868 | 92.609.456 |
| Población a medio-periodo | 6.987.201 | 8.873.150 |
| Emisiones anuales promedio per cápita de $CO_2$ ($tCO_2$/año/persona) | 9,4 | 10,4 |

*Fuente:* Estimaciones de los autores.

El modelo de contabilidad de carbono no permite la desagregación de emisiones netas en emisiones y absorciones para cada pixel. Sin embargo, como se verá adelante, podremos observar cuáles pixeles/municipalidades/departamentos son absorbentes netos de $CO_2$ y cuáles son emisores netos de $CO_2$. Todas las cifras reportadas abajo se refieren a emisiones netas (i.e. emisiones menos absorciones) para cada unidad analizada.

### 4.2. Resultados a nivel departamental

Las emisiones varían tremendamente por departamento. Santa Cruz es de lejos el mayor emisor de $CO_2$, pero a pesar de que sus emisiones han incrementado en el tiempo, su cuota en las emisiones nacionales totales del cambio en el uso de tierra ha disminuido de 86,5% durante el periodo 1990-2000 a 69,0% durante 2000-2010 (ver Tabla 7).

***Tabla 7: Emisiones de $CO_2$ anuales promedio, por departamento***

| Departamento | Emisiones anuales promedio de $CO_2$ ($tCO_2$/año) | | Cuota de emisiones nacionales | |
|---|---|---|---|---|
| | 1990 - 2000 | 2000 - 2010 | 1990 - 2000 | 2000 - 2010 |
| Chuquisaca | 530.278 | 2.165.248 | 0,8% | 2,3% |
| La Paz | 622.517 | 1.438.699 | 1,0% | 1,6% |
| Cochabamba | 1.589.242 | 6.292.999 | 2,4% | 6,8% |
| Oruro | 0 | 0 | 0,0% | 0,0% |
| Potosí | 32 | -23.789 | 0,0% | 0,0% |
| Tarija | 839.638 | 4.490.461 | 1,3% | 4,8% |
| Santa Cruz | 56.588.479 | 63.861.996 | 86,5% | 69,0% |
| Beni | 3.798.380 | 7.025.883 | 5,8% | 7,6% |
| Pando | 1.417.301 | 7.357.959 | 2,2% | 7,9% |
| **Total** | **65.385.868** | **92.609.456** | **100,0%** | **100,0%** |

*Fuente:* Estimaciones de los autores.

Pando es en la actualidad el segundo mayor emisor de $CO_2$, responsable del 7,9% de las emisiones totales durante 2000-2010, frente a solo 2,2% durante 1990-2000. Muy cerca sigue Beni, responsable del 7,6% de las emisiones totales durante 2000-2010. En contraste, Oruro, La Paz y Potosí tienen emisiones provenientes del cambio de uso de tierra durante el periodo 2000-2010 cercanas a cero (ver Tabla 7).

Santa Cruz, el centro agrícola del país, solía ser el mayor emisor de $CO_2$ neto tanto por persona como por unidad de PIB, no obstante ha mejorado estos indicadores en el tiempo, mientras que todos los demás departamentos parecen haber empeorado (excepto Oruro y Potosí que se mantienen neutrales en términos de emisiones por el cambio en el uso de tierra). Las emisiones netas de $CO_2$ per cápita por el cambio en el uso de tierra en Santa Cruz han bajado en 21% entre la década de 1990 y la de 2000, mientras que las emisiones por unidad de PIB también han disminuido en un 25% (ver Tabla 8).

Por otro lado, Pando, el departamento más remoto del país, ha sufrido grandes deterioros en ambos indicadores, a pesar de experimentar un rápido crecimiento tanto en población como PIB. Pando es ahora el segundo mayor emisor de $CO_2$, responsable del 7,9% del total de

emisiones durante 2000-2010, frente a solo 2,2% durante 1990-2000, y tanto las emisiones per cápita y emisiones por unidad de PIB se han triplicado (ver Tabla 8).

***Tabla 8: Emisiones de $CO_2$ anuales promedio per cápita y por unidad de PIB, por departamento ($tCO_2$/año/persona)***

| | Emisiones de $CO_2$ per cápita promedio ($tCO_2$/año/persona) | | Emisiones de $CO_2$ por unidad de PIB (kg/1990-Bs.) | |
|---|---|---|---|---|
| **Departamento** | **1990 - 2000** | **2000 - 2010** | **1990 - 2000** | **2000 - 2010** |
| Chuquisaca | 1,1 | 3,9 | 0,49 | 1,65 |
| La Paz | 0,3 | 0,6 | 0,13 | 0,23 |
| Cochabamba | 1,3 | 4,0 | 0,48 | 1,40 |
| Oruro | 0,0 | 0,0 | 0,00 | 0,00 |
| Potosí | 0,0 | 0,0 | 0,00 | -0,02 |
| Tarija | 2,6 | 10,6 | 0,87 | 1,89 |
| Santa Cruz | 36,3 | 28,5 | 10,65 | 8,01 |
| Beni | 12,6 | 18,4 | 5,49 | 7,26 |
| Pando | 33,4 | 106,9 | 9,60 | 29,39 |
| **Bolivia** | **9,4** | **10,4** | **3,51** | **3,47** |

*Fuente:* Estimaciones de los autores.
*Nota:* El Producto Interno Bruto (PIB) se medido en Bs. reales (sin inflación) de 1990, para asegurar que sean comparables en el tiempo.

### 4.3. Resultados por tipo de bosque

El bosque Amazónico es el tipo de bosque más común en Bolivia y, como se muestra en la Tabla 9, es también la fuente de la mayor parte de emisiones de $CO_2$ (53% del total de emisiones durante 2000-2010).

El bosque Chiquitano solía ser el segundo mayor emisor, representando cerca del 25% de las emisiones durante el periodo 1990-2000, pero su contribución se ha reducido a menos de la mitad, con 11% del total de las emisiones del cambio en el uso de la tierra durante 2000-2010. El bosque Chaqueño es ahora la segunda fuente de mayor importancia en cuanto a emisiones de $CO_2$ con 17% del total de emisiones. Ambos, el bosque Tucumano y el Seco Interandino, han experimentado un aumento sustancial en emisiones entre 1990-2000 y 2000-2010 (ver Tabla 9).

***Tabla 9: Emisiones promedio anuales de $CO_2$, por tipo de bosque***

| Tipo de Bosque | Emisiones promedio anuales de $CO_2$, 1990-2000 ($tCO_2$/año) | | Cuota de emisiones de $CO_2$ | |
|---|---|---|---|---|
| | 1990 - 2000 | 2000 - 2010 | 1990 - 2000 | 2000 - 2010 |
| Amazónico | 33.740.958 | 48.811.833 | 52% | 53% |
| Chaqueño | 12.160.342 | 16.136.570 | 19% | 17% |
| Chiquitano | 16.475.446 | 9.763.785 | 25% | 11% |
| Yungas | 492.880 | 2.458.961 | 1% | 3% |
| Tucumano | 1.378.524 | 8.511.637 | 2% | 9% |
| Llanuras Inundables | 285.274 | 1.708.842 | 0% | 2% |
| Pantanal | 638.545 | 2.224.873 | 1% | 2% |
| Seco Interandino | 137.020 | 2.995.070 | 0% | 3% |
| Andino | 5.372 | -5.625 | 0% | 0% |
| **Total** | **65.314.360** | **92.605.945** | **100%** | **100%** |

*Fuente:* Estimaciones de los autores.

## 4.4. Resultados a nivel municipal

Los mapas 5 y 6 muestran las emisiones de $CO_2$ per cápita promedio por municipio para los periodos 1990-2000 y 2000-2010, respectivamente. Los tonos verdes denotan emisiones netas positivas (contribuyendo al calentamiento global) y los tonos naranjas denotan emisiones netas negativas (mitigando el calentamiento global por ser sumideros de $CO_2$). Los municipios de color crema son prácticamente neutrales en términos de emisiones de $CO_2$ provenientes del cambio en uso de la tierra.

En la primera década analizada, solo 15 de 339 municipios eran sumideros significativos de $CO_2$ debido al cambio en uso de tierra[4]. Durante la segunda década analizada, este número se ha más que duplicado a 31 y las absorciones son a su vez de mayor magnitud. No obstante, ninguno de los municipios fueron sumideros significativos durante ambos periodos, por lo que el uso de tierra es claramente dinámico e impredecible.

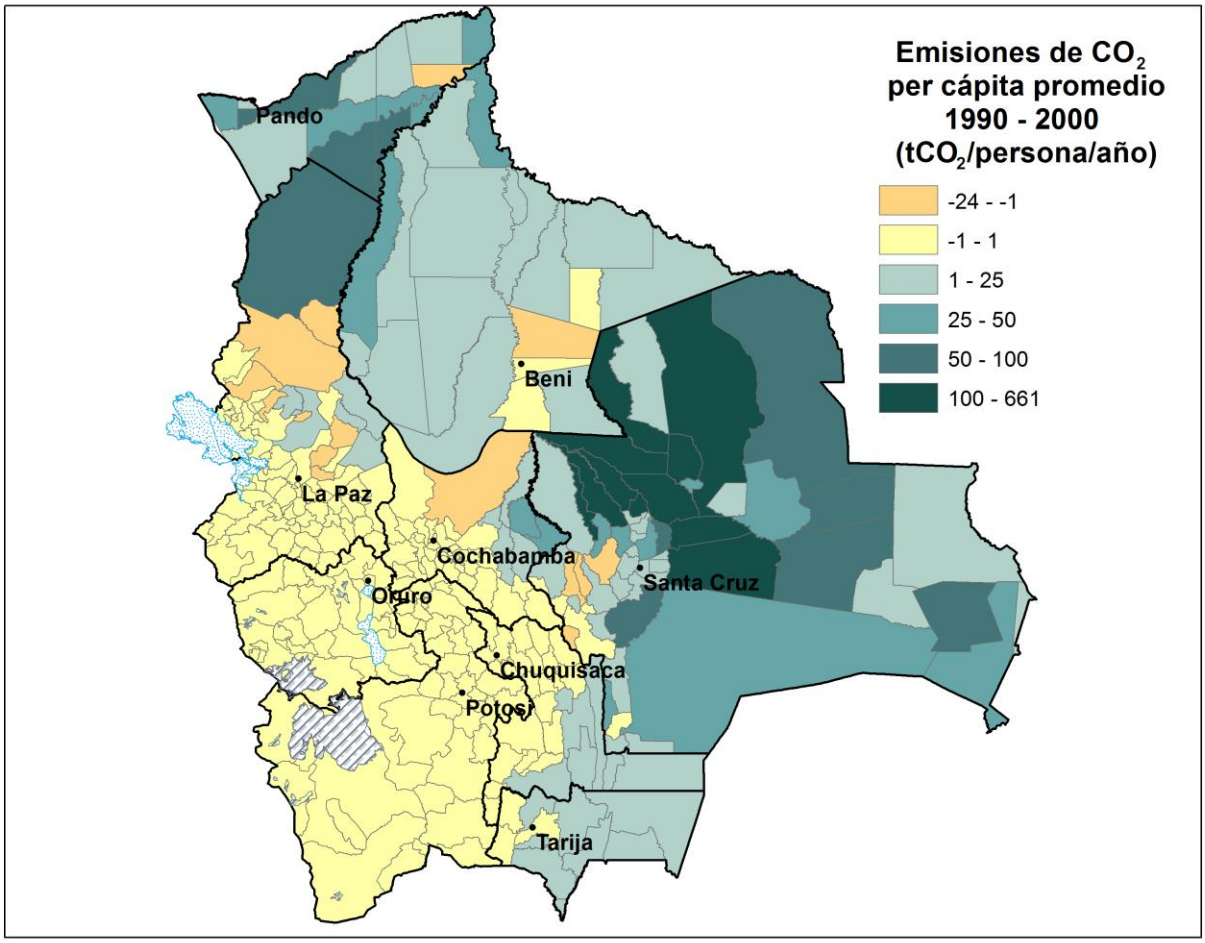
Varios municipios cambiaron de ser grandes emisores de $CO_2$ en la década de 1990 a ser sumidores significativos en la década de 2000 (especialmente San Ignacio de Velasco, San Miguel de Velasco, San Rafael de Velasco, y Roboré en el departamento de Santa Cruz; Santa Rosa, Exaltación, Puerto Siles, San Joaquín, y San Ignacio en el departamento de Beni; e Inquisivi, Irupana, Chulumani, y Cajuata en los Yungas de La Paz).

[4] Significativo aquí se refiere a que las absorciones per cápita fueron al menos 1 $tCO_2$ por persona por año.

Los municipios con las emisiones de carbono per cápita más altas durante 2000-2010 son Bella Flor (608 $tCO_2$/persona/año) en Pando, El Puente en Beni (415 $tCO_2$/persona/año), y Bolpebra en Pando (360 $tCO_2$/persona/año).

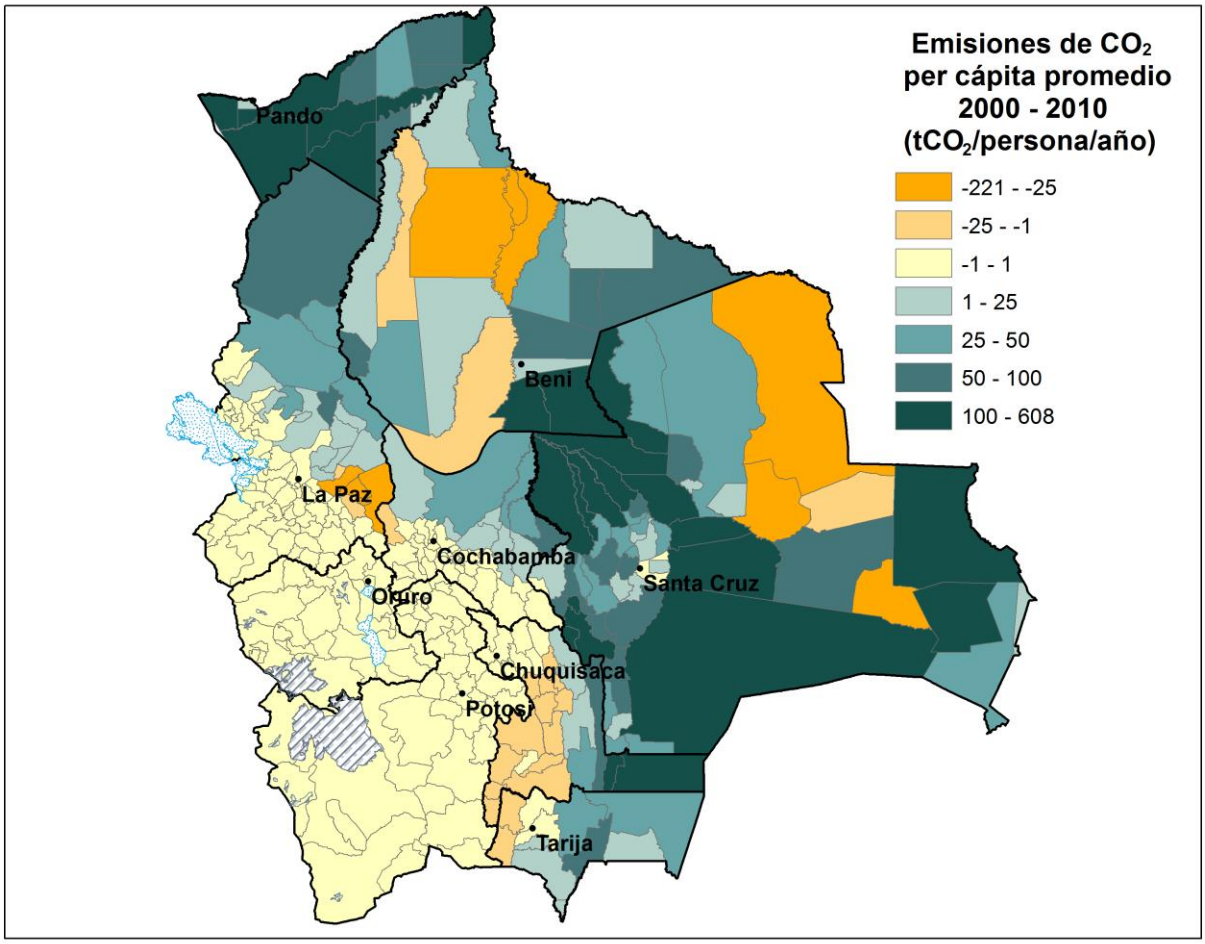
Durante el periodo 2000-2010, todos los municipios emisores netos juntos emitieron cerca de 105,3 millones de $tCO_2$/año. Estas emisiones fueron parcialmente compensadas por los 65 municipios sumideros los cuales juntos absorben alrededor de 12,7 millones de $tCO_2$/año. La mitad de estas absorciones (6,4 millones de $tCO_2$/año) vinieron de solo un municipio, San Ignacio de Velasco en el departamento de Santa Cruz.

***Mapa 5: Emisiones de $CO_2$ per cápita promedio, 1990-2000, por municipio***




*Fuente:* Elaboración de los autores.

***Mapa 6: Emisiones de $CO_2$ per cápita promedio, 2000-2010, por municipio***




*Fuente:* Elaboración de los autores.

San Ignacio de Velasco es un caso interesante, ya que fue anfitrión de uno de los primeros experimentos mundiales de REDD, el Proyecto de Acción Climática de Noel Kempff, que se puso en marcha en el año 1997. De acuerdo al sitio web del proyecto (http://www.forestcarbonportal.com/project/noel-kempff-mercado-climate-action-project), el proyecto ha certificado la reducción de emisiones de 5,8 millones de $tCO_2$ en un periodo de 30 años. No obstante, las reducciones actuales en este municipio ya han alcanzado 10 veces esa cifra, ya que San Ignacio tenía emisiones netas de 21 millones de $tCO_2$ durante 1990-2000, pero absorciones netas de 64 millones de $tCO_2$ durante 2000-2010. Entonces, si consideramos 1990-2000 como la línea base para el nivel de emisiones, encontramos que las emisiones no solo se han reducido a cero, sino que también el municipio se ha convertido en sumidero importante de $CO_2$, resultando en una reducción total de emisiones netas de 85 millones de $tCO_2$ solamente durante el periodo 2000-2010. Ya sea que el Proyecto de Acción Climática solo explica una

pequeña parte de las dramáticas absorciones de $CO_2$ de San Ignacio de Velasco, o la certificación de reducciones de emisiones subestima extremadamente los verdaderos impactos del proyecto.

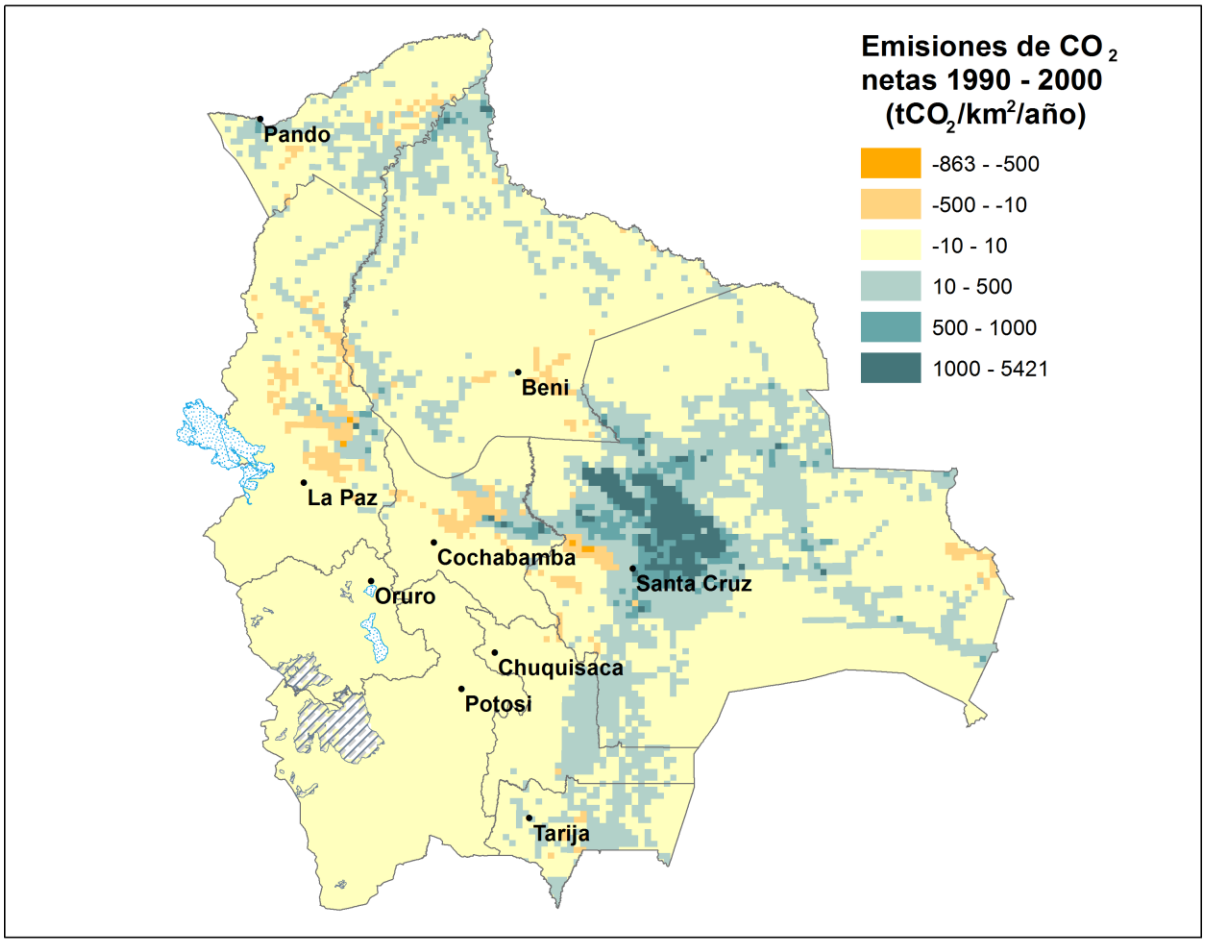
### 4.5. Resultados a nivel de pixeles

Los Mapas 7 y 8 muestran las emisiones de $CO_2$ anuales en cada pixel para las décadas de 1990-2000 y 2000-2010, respectivamente. Como en los últimos dos mapas, los tonos verdes denotan las emisiones netas de carbono, los tonos naranja la absorción neta de carbono, y los colores crema indican emisiones netas de carbono neutrales.

Durante el periodo 1990-2000, la mayoría de los pixeles (75%) del territorio boliviano muestran emisiones neutrales de carbono por cambio en el uso de tierra[5]. Los pixeles que emiten carbono (22% de todos) estaban concentrados en el departamento de Santa Cruz, mientras que un número limitado de pixeles que absorben carbono (2,8%) estaban dispersados a través del territorio nacional (ver Mapa 7).

[5] Se define neutral como aquellos municipios con emisiones netas de CO2 dentro de un rango de -10 a 10 $tCO_2$ por kilómetro cuadrado.

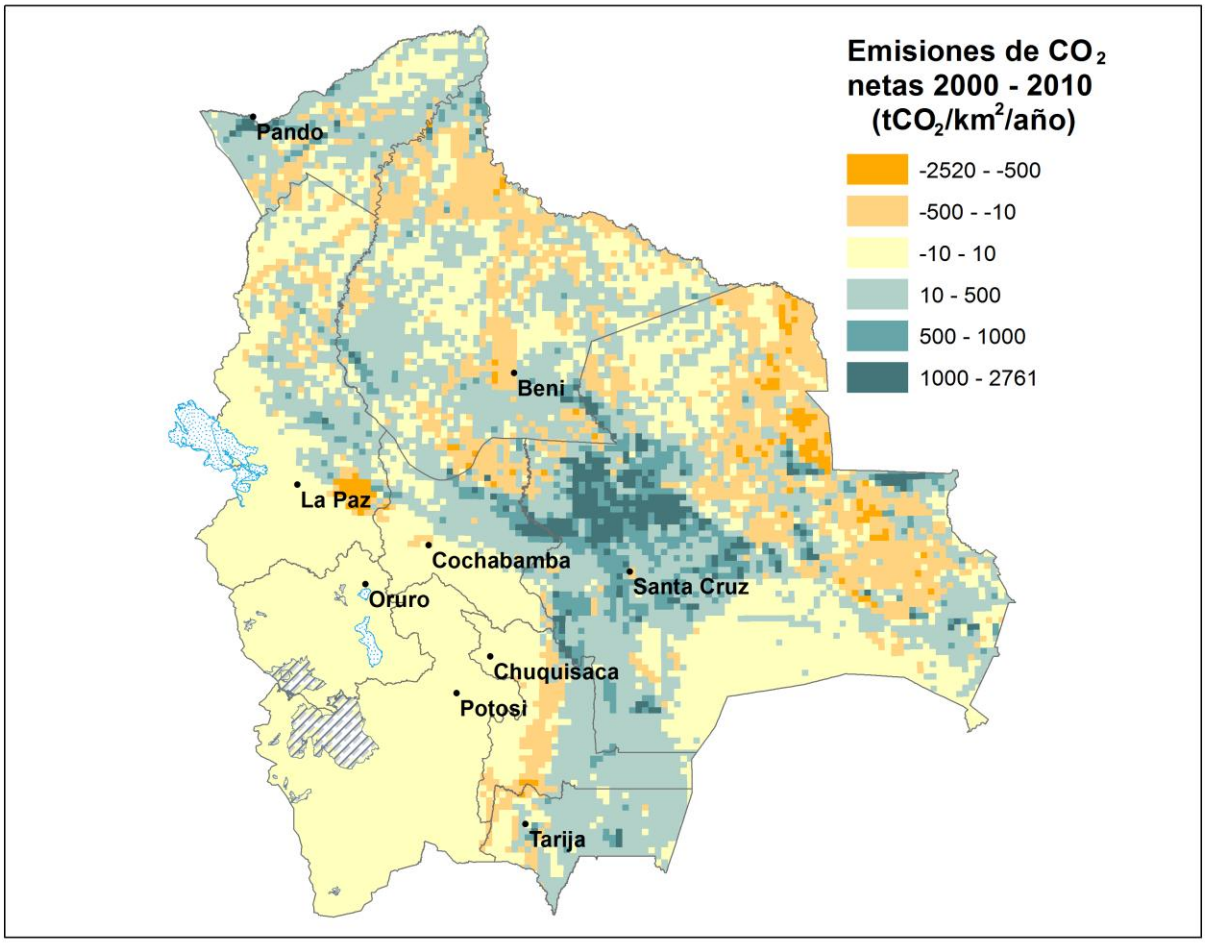
***Mapa 7: Emisiones de $CO_2$ anuales, 1990-2000 ($tCO_2/km^2/year$)***




*Fuente:* Elaboración de los autores.

El Mapa 8 muestra que durante la segunda década analizada se ha reducido el número de pixeles neutros (45% de todos los pixeles), y que se ha incrementado la cantidad de pixeles emisores netos significativos (39%) y sumideros significativos (17%) de carbono. Mientras que el centro de emisiones sigue siendo en norte de Santa Cruz de la Sierra, el patrón espacial de emisiones y absorciones se ha vuelto considerablemente más complejo, con pixeles emitiendo y absorbiendo que se encuentran a lo largo de todo el mapa.

***Mapa 8: Emisiones de $CO_2$ anuales, 2000-2010 ($tCO_2/km^2$/año)***




*Fuente:* Elaboración de los autores.

## 5. Análisis de Sensibilidad

### 5.1. Evaluando la sensibilidad de supuestos clave

En esta sección haremos una serie de análisis de sensibilidad para determinar cuán robustos son los resultados ante cambios en los supuestos clave. En principio, considerando que otros estudios han demostrado que las personas tienden a deforestar bosques menos densos primero (e.g. Andersen et al., 2002; Loarie et al., 2009; Song et al., 2015), utilizaremos el 25$^{vo}$ percentil de carbono sobresuelo de la Tabla 3 en vez del percentil 50 que se utilizó en la estimación central. La Tabla 10 muestra que este supuesto reduce las emisiones netas en cerca del 8% comparado a la estimación central.

El segundo análisis que llevamos a cabo es asumir que no todos los bosques son deforestados para la agricultura, sino que el 20% es usado para pastizales. Como se indicó en el meta análisis

llevado a cabo por Guo y Gifford (2002), cuando el bosque se convierte en pastizal, el carbono del suelo se mantiene intacto (o incluso aumenta ligeramente), entonces para 20% del bosque deforestado en cada pixel, asignamos que el carbono bajo-tierra se mantenga intacto, en vez del 25% que se asumía en el escenario central. Este supuesto conduce a una reducción de emisiones cerca del 3% (ver Tabla 10).

Prácticas de agricultura agresivas, como el arado intensivo, pueden causar pérdidas entre 40 y 50% del carbono de suelo (Schlesinger, 1985), produciendo emisiones potenciales de carbono a la atmósfera (Lal et al., 2007). En Bolivia no todas las prácticas de arado son intensivas; prácticas de labranza de conservación (no-arado) de hecho han sido implementadas de una manera sorprendentemente amplia. Por ejemplo, la soya en labranza de conservación ha incrementado de alrededor de 240.000 ha en el 2000 a 726.207 ha en el 2010 (Friedrich et al., 2009; ANAPO, 2010). Las prácticas de no-arado tienen la habilidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (UNEP, 2012). Más aún, Lal et al. (2004) encontraron que ocurre un secuestro de carbono orgánico de suelo en rangos de 0,1 a 1,0 tC/ha/año como resultado de la conversión de arado convencional a la agricultura sin labranza. No obstante, Baker et al. (2007) concluyeron que a pesar de que la agricultura sin labranza tiene sus ventajas, no existen pruebas contundentes que muestren que favorece al secuestro de carbono. Por lo tanto, la cantidad de emisiones de $CO_2$ del suelo sigue siendo incierta. Si la práctica de no-arado implementada en 82% de las áreas donde cultivan soya en Bolivia (ANAPO, 2010) realmente mantendría la mayor parte del carbono de suelo intacto, entonces el efecto sería una reducción en el total de emisiones similares en magnitud al experimento mencionado con anterioridad de 20% en pastizales en vez de cultivos. Por otro lado, si las prácticas en el resto de las tierras agrícolas son particularmente agresivas y/o afectadas fuertemente por factores climáticos (Rustad et al., 2001), las emisiones de los suelos podrían ser mayores, como sugiere Schlesinger (1985). Como un análisis de sensibilidad adicional, también se llevó a cabo un experimento donde el 35% del carbono bajo tierra se pierde después de 20 años continuos de cultivación intensiva en vez de solo 25%. Este supuesto conllevaría un incremento de 5% en las emisiones comparado con el estimado central (ver Tabla 10).

En el último análisis de sensibilidad asumimos que el bosque degradado se ve más severamente degradado que en el escenario central. En vez de asumir que el bosque degradado tiene el mismo contenido de carbono como en regeneración de 25 años, ahora asumimos que solo tiene contenidos de carbono como en regeneración de 15 años. El último corresponde a una pérdida de 59% del carbono sobresuelo en vez de solamente 15%. Esta degradación mucho más grande llevara a un aumento de 8% de emisiones netas totales de $CO_2$ (ver Tabla 10).

***Tabla 10: Análisis de Sensibilidad de emisiones de $CO_2$ provenientes del cambio en el uso de tierra en Bolivia, 2000-2010***

| | Estimado Central | Liquidación de bosque poco denso primero (1) | 20% pastizal, 80% agricultura (2) | Agricultura más agresiva (3) | Bosque severamente degradado (4) |
|---|---|---|---|---|---|
| Emisiones anuales de $CO_2$ ($tCO_2$/año) | 92.609.456 | 82.445.942 | 90.244.388 | 97.339.593 | 99.928.918 |
| Emisiones per cápita de $CO_2$ promedio anuales ($tCO_2$/persona/año) | 10,4 | 9,3 | 10,2 | 11,0 | 11,3 |

(1) Utilizamos el percentil 25 de la biomasa sobresuelo en vez del percentil 50.
(2) En vez de 100% de agricultura, asumimos que 20% son pastizales y 80% es agricultura. Sin emisiones bajo tierra de pastizales.
(3) Se asume que el 35% del carbono bajo tierra se pierde en 20 años en vez que 25%.
(4) Se asume que se pierde 59% del carbono sobresuelo en vez de 15%.

## 5.2. Evaluando la sensibilidad de la metodología

Los resultados agregados presentados anteriormente son sorprendentemente similares a una estimación mucho más sencilla de Nivel 1. La Tabla 11 muestra que si simplemente multiplicamos el promedio anual de pérdida de bosques en Bolivia por el promedio de los contenidos de carbono sobresuelo en los bosques bolivianos (114 tC/ha), sin tomar en cuenta toda la heterogeneidad y dinámica, ni cualquier cambio que ocurra bajo-tierra, obtendríamos resultados de emisiones de $CO_2$ similares (solo cerca del 10% mayores que nuestro estimado central a Nivel 3).

***Tabla 11: Estimados simples de emisiones de $CO_2$ "Nivel 1" provenientes del cambio de uso de tierra en Bolivia, 1990-2000 y 2000-2010***

| | 1990-2000 | 2000-2010 |
|---|---|---|
| Promedio anual de pérdida de bosques (ha/año) | 173.994 | 243.120 |
| Promedio de densidad de carbono sobresuelo en bosques bolivianos (tC/ha) | 114 | 114 |
| Emisiones de $CO_2$ promedio anuales ($tCO_2$/año) | 72.795.675 | 101.716.510 |
| Población a mitad de periodo | 6.987.201 | 8.873.150 |
| Emisiones de $CO_2$ per cápita promedio anuales ($tCO_2$/persona/año) | 10,4 | 11,5 |

*Fuente:* Estimaciones de los autores.

Si aplicamos una aproximación levemente más sofisticada de carbono comprometido que tome en cuenta la heterogeneidad de las densidades de carbono entre tipos de bosque, multiplicando la deforestación en cada pixel por los contenidos promedio de carbono del tipo de bosque predominante en cada pixel, se obtendría emisiones de carbono promedio anuales que son solo 7% mayores que nuestros cálculos detallados de contabilidad de carbono que toman en cuenta las dinámicas del cambio en el uso de la tierra, la descomposición del carbono, la degradación de bosques y la regeneración de bosques sobresuelo y bajo tierra.

### 5.3. Emisiones de aquellas tierras que no han cambiado su uso desde 1990

Además de las emisiones y absorciones de $CO_2$ causadas por el cambio en el uso de tierra y la degradación de bosques que ya se incluyó en el análisis, el contenido de carbono en tierras que no han alterado su uso desde 1990 pudo haber cambiado. Por ejemplo, gran parte del territorio boliviano sufre de degradación/erosión/desertificación de suelos (Gardi et al., 2015), lo que podría implicar que el carbono orgánico del suelo se libere hacía la atmósfera. Además, evidencia de parcelas de monitoreo permanente muestra que la biomasa está incrementando incluso en bosques maduros en la Amazonia (e.g. Phillips et al., 2008; Brienen et al., 2015). Ya que las áreas de los bosques maduros y las tierras degradadas son en órdenes de magnitud mayores que las áreas que han experimentado cambios en el uso de tierra, incluso cambios pequeños en reservas de carbono en estas grandes áreas pueden tener un impacto dramático en las emisiones netas de carbono del país.

Según Gardi et al. (2015), 41% del territorio boliviano sufre de degradación, cubriendo un área de más de 45 millones de hectáreas, de las cuales 22% puede ser categorizada como degradación severa. En Bolivia la degradación es causada principalmente por la erosión de suelos. El proceso de erosión compromete la mayor parte de los departamentos de Oruro, Potosí, Chuquisaca, Tarija, 32% de La Paz, 46% de Cochabamba, y 33% de Santa Cruz. Las emisiones de carbono hacía la atmósfera relacionadas con la erosión de suelos todavía no se han cuantificado, a pesar de su potencial importancia. Estudios en diferentes partes del mundo encontraron una amplia variedad de porcentajes de oxidación de carbono debido a la erosión: de 0% (Smith et al., 2001), a 50% (Oskarsson et al., n.d.), a 100% (Schlesinger, 1995). Esta variación puede ser explicada en parte por el destino del carbono durante y después del proceso de erosión que se determina por numerosos y complejos procesos interactivos, lo que hace difícil modelar y generalizar el impacto de todos estos procesos (Lal, 2002). Un reciente experimento de erosión de suelos llevado a cabo por Wang et al. (2014) muestra que grandes cantidades de carbono son transportadas de sitios en erosión hacia sitios de deposición durante eventos de lluvia fuerte,

pero que solo 1,5% del carbono transportado es oxidado en $CO_2$, mientras que el resto está estabilizado e integrado en suelos en el sitio de deposición. Algunos documentos de investigación incluso argumentan que el efecto neto de erosión de suelos puede resultar en absorción más que en emisión de $CO_2$ porque el depósito y la acumulación de carbono en el sitio de deposición puede ser más grande que la pérdida neta proveniente de la fuente de erosión si hay al menos algunas dinámicas de regeneración en la fuente del sitio y si hay un entierro significativo del carbono del suelo en el sitio de deposición (e.g. Berhe et al., 2005; Stallard, 1998).

Hasta el momento, nadie ha tratado de cuantificar las emisiones de carbono de suelos en Bolivia, pero es interesante tener una idea general acerca del orden de magnitud de este tipo de emisiones, así que como un análisis de sensibilidad adicional en nuestro estudio hicimos una simulación utilizando supuestos razonables. Inicialmente asumimos que en promedio 1% del carbono orgánico del suelo se pierde anualmente del 41% del territorio que es clasificado por Gardi et al. (2015) como suelo degradado. Ya que los suelos de las tierras altas de Bolivia han sido erosionados por siglos y que sin embargo no se han degradado por completo, este valor de 1% por año parece un límite superior. Usando los resultados experimentales de Wang et al. (2014) asumimos que 1,5% del carbono en suelos erosionados es oxidado en $CO_2$, mientras que el resto es depositado e integrado en los suelos en las partes bajas de las cuencas. Como se muestra en la Tabla 12, tomando en cuenta la erosión de suelos puede incrementar las emisiones de $CO_2$ en no más de dos por ciento.

Por otro lado, las parcelas de bosques maduros en la Amazonia permanentemente monitoreadas, incluyendo Bolivia, analizadas por Phillips et al. (2008) sugieren que los bosques maduros en la cuenca Amazónica añadieron cerca de 0,62 tC/ha/año a la biomasa sobresuelo durante las últimas décadas del siglo veinte. Esto corresponde a un incremento de cerca de 4% por década. Si tomamos en cuenta este nivel de absorción de carbono, las emisiones netas durante 2000-2010 cayeron en 92% comparadas con los estimados centrales que no toman en cuenta las emisiones o absorciones de carbono de tierras sin cambio de uso reciente.

***Tabla 12: Análisis de sensibilidad de emisiones de $CO_2$ de tierras que no tuvieron cambio en su uso, 2000-2010***

| | Estimación Central (sin emisiones de tierra sin cambio en su uso) | Con emisiones por desertificación (1) | Con absorciones de bosques maduros (2) |
|---|---|---|---|
| Emisiones de $CO_2$ promedio anuales ($tCO_2$/año) | 92.609.456 | 94.286.643 | 7.185.963 |
| Emisiones de $CO_2$ per cápita promedio anuales ($tCO_2$/persona/año) | 10,4 | 10,6 | 0,8 |

(1) Se asume que 80% de las tierras no forestadas pierden 1% del carbono orgánico del suelo por año, y que 1,5% de este carbono es oxidado y emitido como $CO_2$ a la atmósfera.
(2) Se asume que la biomasa sobresuelo en bosque maduros incrementa en 4% por década.

## 6. Conclusiones y recomendaciones

Este documento de investigación ha analizado las emisiones netas de carbono resultantes del uso de tierra y los cambios en el uso de tierra en Bolivia durante los periodos 1990 a 2000 y 2000 a 2010. Actualmente Bolivia cuenta con datos confiables tanto para cambios en el uso de tierra en el tiempo y contenidos de carbono en biomasa y suelos, permitiéndonos hacer lo que corresponde a una estimación Nivel 3 del IPCC. Nuestras estimaciones, que toman en cuenta no solo la deforestación, sino también la degradación y regeneración de bosques, indican que las cantidades de emisiones netas de $CO_2$ de este proceso llegaron a casi cien millones de toneladas por año, correspondientes a cerca de 10 toneladas por persona por año durante las últimas dos décadas.

El monto total de $CO_2$ almacenado sobre y bajo suelo en los bosques bolivianos en el 2010 es cerca de 47 billones de toneladas ($47 \times 10^{15}$ g = 47 Pg). Por lo tanto, a la tasa actual de emisiones netas provenientes del cambio en el uso de tierra, le tomará casi medio milenio en liberar todo el $CO_2$ almacenado en los bosques bolivianos hacia la atmósfera.

Nuestro análisis de sensibilidad indica que estos resultados son robustos y que varían menos del 10% en cualquier dirección, incluso con cambios importantes en los supuestos clave. El único factor que puede cambiar dramáticamente la figura de emisiones, es la inclusión del hecho que la biomasa de bosques maduros ha incrementado de una manera estable en las últimas décadas, probablemente por el efecto de fertilización de $CO_2$ (Phillips et al., 2008). Si tomamos este

proceso en cuenta, las emisiones netas de $CO_2$ del uso de tierra y el cambio en el uso de tierra en Bolivia caen a cerca de cero.

Cuando se analizan los resultados a nivel sub-nacional, vemos alta heterogeneidad entre regiones y en el tiempo. Esta variabilidad temporal y espacial de las emisiones de $CO_2$ sugiere que es casi imposible establecer un escenario de referencia confiable a nivel local. Esto confirma los hallazgos en Andersen et al. (2014), que muestran que existen grandes discrepancias entre deforestación estimada y deforestación medida a nivel municipal en Bolivia.

Además hemos encontrado que un cálculo mucho más simple de Nivel 1, que ignora toda la heterogeneidad y dinamismo de la deforestación, produce resultados en emisiones de carbono nacionales provenientes de cambio en uso de tierra que solo son 10% mayores que nuestra esmerada y cuidadosa estimación central de Nivel 3.

## Referencias


Achard, F., Beuchle, R., Mayaux, P., Stibig, H., Bodart, C., Brink, A., Carboni, S., Desclée, B., Donnay, F., Eva, H., Lupi, A., Rasi, R., Seliger, R., y Simonetti D. (2014) Determination of tropical deforestation rates and related carbon losses from 1990 to 2010. *Global Change Biology*, 20, 2540-2554.

ANAPO (2010) *Memoria Anual 2010.* Asociación de Productores de Oleaginosas y Trigo. Disponible en: http://www.anapobolivia.org/documento/doc_2011.04.28_675640.pdf [Consultado el 19 de septiembre de 2015].

Andersen, L. E., Granger, C. W., Reis, E. J., Weinhold D., y Wunder S. (2002) *The Dynamics of Deforestation and Economic Growth in the Brazilian Amazon*. Cambridge University Press, Cambridge.

Andersen, L. E., Busch, J., Curran, E., Ledezma, J. C., Mayorga J., y Ruiz, P. (2014) Impactos Socioeconómicos y ambientales de compensaciones por la reducción de emisiones de deforestación en Bolivia: resultados del modelo OSIRIS-Bolivia. *Revista Latinoamericana de Desarrollo Económico*, 22, 7-48.

Andersen, L. E. (2015). Forest related variables covering all of Bolivia in a 10x10 km grid. Instituto de Estudios Avanzados en Desarollo (INESAD), Bolivia. Dataset. http://dx.doi.org/10.4121/uuid:6b776a97-280c-43c3-a015-7509d2255330

Andersen, L. E., Doyle, A. S., del Granado, S., Ledezma, J. C., Medinaceli, A., Valdivia, M. y Weinhold, D. (2016). Net Carbon Emissions from Deforestation in Bolivia during 1990-2000 and 2000-2010: Results from a carbon bookkeeping model. *PLoS ONE,* 11(3): e0151241. doi:10.1371/journal.pone.0151241. Disponible en: http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0151241 [Consultado el 28 de marzo de 2016].

Baccini, A., Goetz, S. J., Walker, W.S., Laporte, N. T., Sun, M., Sulla-Menashe, D., Hackler, J., Beck, P.S., Dubayah, R., Friedl, M.A., Samanta S., y Houghton R. A. (2012) Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps. *Nature Climate Change*, 2, 182–185.

Baker, J. M., Ochsner, T. E., Venterea, R. T., y Griffis, T., J. (2007) Tillage and soil carbon sequestration- What do we really know? *Agriculture, Ecosystems and Environment,* 118, 1-5.

Berenguer, E., Ferreira, J., Gardner, A., Oliveira, L., de Camargo, P., Cerri, C., Durigan, M., de Oliveira, R., Guimaraes, I., y Barlow, J. (2014) A large-scale field assessment of carbon stocks in human-modified tropical forests. *Global Change Biology*, 20, 3713-3726.

Berenguer, E., Gardner, T. A., Ferreira, J., Aragao, L.E., Camargo, P. B., Cerri, C. E., Durigan, M., Oliveira, R. C., Vieira I, C., y Barlow, J. (2015) Developing Cost-Effective Field Assessments of Carbon Stocks in Human-Modified Tropical Forests. *PLOS ONE, 10 (8), e0133139*.

Berhe, A., Harden, J., Harte, J., y Torn, M. (2005) Soil Degradation and Soil Change: Role of soil erosion and deposition in carbon sequestration. University of California International and Area Studies, UC Berkeley. Disponible en: http://escholarship.org/uc/item/8xv4b77b [Consultado e 17 de agosto de 2015].

Brienen, R. J. W., Phillips, O. L., Feldpausch, T. R., Gloor, E., Baker, T. R., Lloyd, J., et al. (2015) Long-term decline of the Amazon carbon sink. *Nature*, 519, 344–348.

DeFries, R., Houghton, R., Hansen, M., Field, C., Skole, D., y Townshend, J. (2002) Carbon emissions from tropical deforestation and regrowth based on satellite observations for the 1980s and 1990s. *PNAS*, 99 (22), 14256-14261.

Derpsch, R., Friedrich, T., Kassam, A., y Hongwen, L. (2010) Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main benefits. *International Journal Agricultural & Biological Engineering,* 3 (1), 1-26.

FAO (2010) Global Forest Resources Assessment 2010. *Forestry Paper* No. 163. FAO, Rome.

FAO, International Institute for Applied Systems Analysis, International Soil Reference and Information Centre, Institute of Soil Science- Chinese Academy of Sciences, and Joint Research Centre of the European Commission (2009) *Harmonized World Database (Version 1.1).* FAO, Rome; International Institute for Applied Systems Analysis, Luxemburg.

Gardi C., Angelini, M., Barceló, S., Comerma, J., Cruz Gaistardo, C., Encina Rojas, A., Jones, A., Krasilnikov, P., Mendonça Santos, M., Montanarella, L., Muñiz Ugarte, O., Schad, P., Vara Rodriguez, M., Vargas, R., Ravina da Silva, M. (eds.) (2015) *Soil Atlas of Latin America and the Caribbean*. European Commission –Publications Office of the European Union, Luxemburg.

Guo, L. B. y Gifford, R. M. (2002) Soil Carbon Stocks and Land Use Change: A meta analysis. *Global Change Biology*, 8, 345-360.

Harris, N., Brown, S., Hagen, S., Saatchi S., Petrova S., Salas, W., Hansen, M., Potapov, P., y Lotsch A. (2012) Baseline Map of Carbon Emissions from Deforestation in Tropical Regions. *Science*, 22, 1573-1576.

Houghton, R. A. (2010) How well do we know the flux of CO2 from land-use change? *Tellus*, 62B, 337-351.

Houghton, R. A. (2003) Revised Estimates of the annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use and land management 1850-2000. *Tellus*, 55B, 378-390.

Houghton, R. A. y Hackler, J. (2001) Carbon Flux to the Atmosphere from Land-Use Changes: 1850-1990. Environmental Sciences Division, US Department of Energy.

Houghton, R. A., Hobbie, J., Melillo, J., Moore, B., Peterson, B., Shaver, G., y Woodwell, G. (1983) Changes in the carbon content of terrestrial biota and soils between 1860 and 1980: A net release of CO2 to the atmosphere. *Ecological Monographs*, 53, 235-262.

Ibisch, P. L. y Mérida, G. (2003) *Biodiversidad: La riqueza de Bolivia. Estado de conocimiento y conservación*. Editorial FAN, Santa Cruz de la Sierra.

IPCC (2006) Forest Land. In: Eggleston, S., Buendía, L., Miwa, K., Ngara, T., and Tanabe, K. (eds.) 2006. *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Japan: Institute for Global Environmental Strategies, 4.1-4.83.

Killeen, T. J., Guerra, A., Calzada, M., Correa, L., Calderon, V., Soria, L., Quezada, B. y Steininger, M. K. (2008) Total historical land-use change in eastern Bolivia: Who, where, when, and how much? *Ecology and Society*, 13 (1), 36.

Klein, H. S. (2003) *A Concise History of Bolivia*. Cambridge University Press, Cambridge.

Lal, R. (2004) Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science,* 304, 1623-1627.

Lal, R. (2002) Soil erosion and the global carbon budget. *Environment International*, 29, 437-450.

Lal, R., Reicosky, D. C., y Hanson, J. D. (2007) Evolution of the plow over 10,000 years and the rationale for no till-farming. *Soil and Tillage Research,* 93 (1), 1-12.

Li, D., Niu, S., y Luo, Y. (2012) Global patterns of the dynamics of soil carbon and nitrogen stocks following afforestation: a meta-analysis. *New Phytologist,* 195, 172-181.

Loarie, S. R., Asner, G. P. y Field, C. B. (2009) Boosted carbon emissions from Amazon deforestation. *Geophysical Research Letters*, 36: L14810. DOI: 10.1029/2009GL037526

Lugo, A.E., Sanchez, M.J., y Brown, S. (1986) Land use and organic carbon content of some subtropical soils, *Plant and Soil*, 96, 185-196.

MMAyA (2009) Segunda Comunicación Nacional del Estado Plurinacional de Bolivia ante Convención Marco de las Naciones Unidas ante el Cambio Climático. Programa Nacional de Cambio Climático. MMAyA, La Paz.

MMAyA-OTCA (2015) *Memoria Técnica mapa de Bosque 2013: Clasificación por tipo de bosque*. Ministerio de Medio Ambiente y Agua con la Sala de Observación Bolivia de la Organización del Tratado de Cooperación Amazónica. 44 pp.

Óskarsoon, H., Arnalds, Ó., Gudmunsson, J., y Gudbergsson, G. (2004) Organic carbon in Icelandic Andosols: geographical variation and impact of erosion. *Catena*, 56, 224-238.

Phillips, O. L., Lewis, S. L, Baker, T. R., Chao, K. J., y Higuchi, N. (2008) The changing Amazon forest. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 363, 1819–1827.

Ramankutty, N., Gibbs, H. K., Achard, F., Defries, R., Foley, J. A., y Houghton, R. A. (2007) Challenges to estimating carbon emissions from tropical deforestation. *Global Change Biology*, 13, 51-66.

Reis, E. y Andersen, L. (2000) *Carbon Emissions from Deforestation in the Brazilian Amazon*. Instituto de Investigaciones Socio-Económicas. Documento de Trabajo No. 02/00, March.

Rustad, L., Campbel, J., Marion, G., Norby, R., Mitchell, M., Hartley, A., Cornelissen, J., Gurevitch, J., y Gcte-News (2001) A meta-analysis of the response of soil respiration, net nitrogen mineralization, and aboveground plant growth to experimental ecosystem warming. *Oecologia*, 126 (4), 543-562.

Schlesinger, W.H. (1986) Changes in soil carbon storage and associated properties with disturbance and recovery. En: Trabalha, J.R., y Reichle, D. E., (Eds.), *The Changing Carbon Cycle: A Global Analysis*. New York, Springer-Verlag, 194-220.

Schlesinger, W. H. (1995) Soil Respiration and Changes in Soil Carbon Stocks. En: Woodwell, G. y Mackenzie F. (Eds.) *Biotic Feedbacks in the Global Climatic System: Will the Warming Feed the Warming?*, 159-169.

SERNAP (2013) *Deforestación y regeneración de bosques en Bolivia y en sus Áreas Protegidas Nacionales para los periodos 1990-2000 y 2000-2010*. Ed. Servicio Nacional de Áreas Protegidas, Museo de Historia Natural Noel Kempff Mercado y Conservación Internacional – Bolivia. SERNAP, La Paz.

Smith, S., Renwick, W., Buddmeier R., y Crossland, C. (2001) Budget of soil carbon and deposition for sediments and sedimentary organic carbon across the contiguous United States. *Global Biogeochem Cycles*, 15, 697-707.

Song, X. P., Huang, C., Saatchi, S. S., Hansen, M. C., y Townshend, J. R. (2015) Annual Carbon Emissions from Deforestation in the Amazon Basin between 2000 and 2010. *PLOS ONE* 10 (5), e0126754.

Stallard, R. (1998) Terrestrial sedimentation and the carbon cycle: Coupling weathering and erosion to carbon burial. *Global Biochemical Cycles*, 12 (2), 231-257.

UNEP (2013) *The Emissions Gap Report 2013: A UNEP Synthesis Report*. United Nations Environment Programme (UNEP), Nairobi.

Wang, X., Cammeraat, E. L. H., Romeijn, P., y Kalbitz, K. (2014) Soil Organic Carbon Redistribution by Water Erosion – The Role of $CO_2$ Emissions for the Carbon Budget. *PLOS ONE* 9 (5), e96299.

Weinhold, D., Reis, E.J. y Vale, P.M (2015) "Boom-Bust Patterns in the Brazilian Amazon" forthcoming, *Global Environmental Change*.