Universidad Nacional

Facultad de Ciencias de la Tierra y el Mar

Escuela de Ciencias Ambientales

Ingeniería en Ciencias Forestales

Inventario de emisiones-absorciones de gases de efecto invernadero en el sector forestal y uso del suelo (FOLU) del cantón de Belén para el periodo 2006-2013

Roberto Rodríguez Sánchez

San Antonio de Belén, Heredia

2014

Agradecimientos

A mi familia por brindarme el apoyo necesario para alcanzar las metas que me he establecido.

Al personal de la Unidad Ambiental de la Municipalidad de Belén por coordinar con otras unidades la entrega de material digital para la realización de este estudio y tener presente que la elaboración del inventario sería útil para la inclusión del tema de cambio climático en el accionar del gobierno local.

A Federico Alice y María del Mar Calvo por brindar asesoramiento técnico y servir de guía en la elaboración de las etapas del inventario.

A Sonia Arguedas y Vanessa Valerio por haberme brindado la oportunidad de elaborar un trabajo que llegue a servir para el mejoramiento de la calidad de vida del lugar que me vio crecer y creer en mi persona para lograrlo.

A todos mis compañeros/as por el aporte que de alguna u otra forma han brindado y hacer de este proceso más entretenido y atractivo.

A todas aquellas personas que directa e indirectamente colaboraron en la realización del presente estudio.

Y a la existencia de un estado social de derecho que me ha permitido acceder a una educación superior de calidad y culminar con éxito el presente estudio.

Tabla de Contenidos

1. Introducción ... 6
2. Justificación ... 7
3. Antecedentes ... 8
4. Marco Teórico ... 9
4.1. Emisiones y absorciones de gases de efecto invernadero ... 9
4.2. Usos de la tierra ... 10
4.3. Cambio de uso de la tierra ... 12
4.4. Reservorios de carbono ... 13
4.5. Estimación de las existencias de carbono y emisiones-absorciones de CO_2 y de no CO_2. 13
4.6. Incertidumbre ... 14
5. Objetivos ... 16
5.1. General ... 16
5.2. Específicos ... 16
6. Metodología ... 16
6.1. Descripción del sitio ... 16
6.2. Propuesta Metodológica ... 17
6.2.1. Fase 1. Determinación del cambio de uso de la tierra en el cantón de Belén para el periodo 2006-2013. ... 17
6.2.2. Fase 2. Estimación de las emisiones y absorciones de GEI del cantón de Belén para el periodo 2006-2013. ... 18
6.2.2.1. Fase 2a. Establecimiento de los niveles apropiados por reservorio de carbono de cada uso de la tierra para el periodo 2006-2013. ... 18
6.2.2.2. Fase 2b. Estimación de las absorciones y emisiones ... 20
6.2.2.3. Fase 2c. Estimación de la incertidumbre ... 23
7. Resultados ... 23
7.1. Uso y cambio de uso de la tierra ... 23
7.2. Balance de las emisiones y absorciones ... 28
7.3. Incertidumbre ... 30
8. Discusión ... 31
8.2. Incertidumbre ... 35
9. Conclusiones ... 36

10. Recomendaciones 37
11. Bibliografía 38
12. Anexos 42

Índice de Cuadros

Cuadro 1. Definición del tipo de uso de la tierra. 10
Cuadro 2. Datos seleccionados para realizar la estimación de las existencias de biomasa viva aérea y subterránea de los usos de la tierra establecidos en el presente inventario. 19
Cuadro 3. Datos seleccionados para realizar la estimación de existencias del carbono orgánico del suelo. 20
Cuadro 4. Matriz de cambio de uso de la tierra (UT_UT) para el cantón de Belén durante el periodo 2006-2013. 25
Cuadro 5. Área total y por distrito de los usos de la tierra para los años 2006 y 2013. 26
Cuadro 6. Emisiones y absorciones por uso y cambio de uso de la tierra en el cantón de Belén durante el periodo 2006-2013. 29
Cuadro 7. Incertidumbre total para el inventario y contribución a la varianza por uso de la tierra. 30

Índice de Figuras

Figura 1. Mapa de ubicación del cantón de Belén. 16
Figura 2. Área abarcada por uso de la tierra para el año 2006 y 2013.. 24
Figura 3. Superficie abarcada por cada uso de la tierra del cantón de Belén en los años 2006 y 2013. 32
Figura 4. Emisiones y absorciones de carbono por usos y cambio de uso de la tierra dado en el cantón de Belén durante el periodo 2006-2013. 33
Figura 5. Reservorios de carbono del cantón de Belén en el periodo 2006-2013. 34

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1. Cambios en las existencias anuales de carbono de un depósito dado en función de las pérdidas y las ganancias (Método pérdidas y ganancias). Fuente: IPCC 2006a. 14
Ecuación 2. Cambios en las existencias anuales de carbono de un depósito dado según la diferencia anual media entre estimaciones en dos momentos diferentes (Método diferencia de existencias). Fuente: IPCC 2006a. 14
Ecuación 3. Emisión de no CO_2 a la atmósfera. Fuente: IPCC 2006a. 14
Ecuación 4. Cambios en las existencias de carbono de un uso de la tierra específico dado como la sumatoria del carbono contenido en todos los depósitos. Fuente: IPCC 2006a. 20
Ecuación 5. Existencia de carbono en la biomasa viva aérea y subterránea de cada categoría de uso de la tierra que permanece como tal (UT_UT). Fuente: IPCC 2006a. 21
Ecuación 6. Cambio inicial en las existencias de carbono en la biomasa de tierras convertidas a otra categoría. Fuente: IPCC 2006a. 21

Ecuación 7. Cambio en las existencias de carbono orgánico en suelos minerales. Fuente: IPCC 2006a. 22
Ecuación 8. Cambios en las existencias de carbono para todo el sector FOLU estimadas como la suma de los cambios en todas las categorías de uso de la tierra. Fuente: IPCC 2006a. 22
Ecuación 9. Cambio en las existencias de carbono de los suelos. Fuente: IPCC 2006a. 48

Índice de Anexos

Anexo 1. Definiciones de los depósitos de carbono empleados en AFOLU para cada uso de la tierra. Fuente: IPCC 2006a. 42
Anexo 2. Árbol de decisiones genérico para la identificación del nivel apropiado para estimar los cambios en las existencias de carbono en materia orgánica muerta en una categoría de uso de la tierra. Fuente: IPCC 2006a 43
Anexo 3. Árbol de decisiones genérico para la identificación del nivel apropiado para estimar los cambios en las existencias de carbono en suelos minerales por categoría de uso de la tierra. Fuente: IPCC 2006a. 44
Anexo 4. Árbol de decisiones genérico para la identificación del nivel apropiado para estimar los cambios en las existencias de carbono en biomasa en una categoría de uso de la tierra. Fuente: IPCC 2006a. 45
Anexo 5. Supuestos establecidos para cada reservorio de carbono y uso de la tierra. 46
Anexo 6. Niveles asumidos por uso y cambio de uso de la tierra. 49
Anexo 7. Fórmulas empleadas para la derivación de la incertidumbre total del inventario según el método 1 sugerido por IPCC (2006b). 51
Anexo 8. Distribución espacial de los usos de la tierra del cantón de Belén en el año 2006. 52
Anexo 9. Distribución espacial de los usos de la tierra del cantón de Belén en el año 2013. 53
Anexo 10. Distribución espacial de la conversión de usos de la tierra a asentamientos en el cantón de Belén durante el periodo 2006-2013. 54
Anexo 11. Factores de emisión utilizados en la estimación de las emisiones generadas por prácticas agropecuarias. Fuente: IMN 2014. 55
Anexo 12. Ubicación de los usos de la tierra presentes en las zonas de protección de ríos y nacientes del cantón de Belén. 56
Anexo 13. Descripción de la Institución: Unidad Ambiental de la Municipalidad de Belén 57

1. Introducción

A nivel global, se reconoce al sector forestal y de uso del suelo por su papel dentro del balance de carbono, principalmente por las emisiones que ocurren producto del cambio de uso del suelo (deforestación), como por las remociones de carbono atmosférico debido al crecimiento de tierras forestales (forestación y reforestación; Le Quere et al, 2013). A nivel local (cantonal) y en un ambiente que tiende al urbanismo, este cambio de uso de la tierra es igualmente importante, y se genera a través de la conversión de tierras para satisfacer las necesidades habitacionales y económicas de las poblaciones humanas (Romero *et al* 2011). Convirtiéndose en una de las afecciones que inducen la emisión local de gases de efecto invernadero (GEI; Trusilova y Churkina 2008).

A pesar de esto, el sector forestal y de uso del suelo (FOLU) destaca porque en él se dan las transformaciones del carbono debido a procesos biológicos y físicos, se localizan los compartimientos que disminuyen la concentración atmosférica de CO_2, y es el soporte para el sustento de las necesidades nutricionales, culturales, y económicas de las poblaciones humanas (IPCC 2006a, Pete *et al* 2014). Por lo que la maximización de su potencial, tiene consecuencias positivas no solo por su capacidad de remover o evitar emisiones, sino por los muchos beneficios que brinda en forma de servicios ambientales, y que estos se perciben indistintamente del ambiente en que se generen (rural o urbano).

Por estas razones, y con tal de reducir los impactos ambientales y socioeconómicos del cambio climático, el gobierno de Costa Rica, mediante la formulación e implementación de la Estrategia Nacional de Cambio Climático, se ha propuesto como meta balancear las emisiones antropogénicas en gran parte a través de las absorciones de carbono dadas en los sumideros (Minaet 2009). Al mismo tiempo, reconociendo que el sector forestal y uso del suelo es importante a nivel ecosistémico y posee un potencial para hacer efectivas medidas tanto de mitigación como de adaptación.

Como consecuencia de iniciativas globales sobre cambio climático y en parte por esta política nacional de Carbono Neutralidad al 2021, algunos gobiernos locales de Costa Rica han iniciado su proceso de planificación, iniciando con la elaboración de inventarios cantonales de GEI. Es conocido que gran parte de las emisiones generadas a nivel nacional ocurren en áreas urbanas, y que el desarrollo urbano posee un papel determinante en el alcance de las medidas de mitigación y adaptación propuestas a nivel nacional (Dhakal 2010, Hutyra *et al* 2011, Sippel 2011). Es por esto que a través de la realización de inventarios locales, es posible generar información que sirva de insumo en la adopción, creación y ejecución de políticas y estrategias de cambio climático, que sean acordes a las necesidades y realidades locales pero que tienen también un efecto importante en el cumplimiento de metas establecidas a nivel nacional (Dhakal 2010).

Para esto, la identificación y estimación precisa de las absorciones y emisiones de GEI por cambios en el uso de la tierra en el cantón de Belén para el periodo 2006-2013, se logra mediante la elaboración de un inventario de estos gases a nivel local para el sector forestal y uso del suelo, a

partir del cual se identifican las fuentes antropogénicas, los sumideros, y las oportunidades de mitigación, reducción y estabilización de las emisiones de GEI (ICF Internacional 2012).

2. Justificación

El cantón de Belén es considerado el más competitivo del país, debido a la fuerte estructura económica con que cuenta, en donde la economía está basada en la construcción, la industria y los servicios, situación que se ha beneficiado por la cercanía respecto a la ciudad de San José y al aeropuerto Juan Santamaría (Quirós 2013), y a un importante reservorio hídrico superficial y subterráneo que emerge dentro de su territorio y es aprovechado tanto por organizaciones privadas como públicas. No obstante, el mismo crecimiento de la estructura económica local implica un incremento en el consumo de energía, en las emisiones de gases de efecto invernadero, en una mayor presión por terrenos aún sin desarrollar y en una menor calidad ambiental para sus habitantes.

La Municipalidad de Belén, preocupada tanto del impacto que ocasiona las implicaciones mencionadas en la salubridad pública de sus habitantes como del cambio climático global y como gobierno local pionero en el área ambiental, ha mostrado el interés por disminuirlo, por lo que el desarrollo de un inventario de emisiones-absorciones GEI coherente, adecuado, transparente y completo en el sector FOLU resulta prioritario para tomar acciones eficaces. Asimismo Schultz *et al.* (2014) asevera que la confección del inventario permitirá estimar las emisiones y absorciones, para entender cuál es la contribución de las actividades desarrolladas en la localidad, y dirigir los esfuerzos de mitigación y adaptación mediante la creación de estrategias pertinentes.

Por su parte, la ejecución del inventario podrá canalizar cuál es la capacidad del componente uso del suelo y forestal del cantón para acuerpar la iniciativa nacional de carbono neutralidad y potencializarlos como sumideros de carbono y removedores de gases de efecto invernadero de la atmósfera; y como medio para desarrollar estrategias adaptativas dirigidas a disminuir los efectos de los fenómenos naturales extremos cada vez más frecuentes, entre ellos las inundaciones ocasionadas por el desbordamiento del río Quebrada Seca y el decrecimiento de la calidad del aire. Destacando la importancia que llegan a representar los patios de casas con árboles, zonas de protección de ríos y manantiales, y los árboles en áreas públicas y privadas en las medidas de adaptación y mitigación.

En sí, la realización del inventario de emisiones y absorciones de GEI en el sector FOLU del cantón de Belén para el periodo 2006-2013, llega a aportar información base pertinente para la elaboración de planes de trabajo y programas integrales entre el sector público, privado y sociedad civil en general, que beneficiarán en el mediano y largo plazo a los residentes y visitantes del cantón. Además, podrá tomarse como punto de partida para evaluar cuál ha sido la efectividad del plan regulador actual y sus transitorios en el periodo establecido para el inventario, en materia de mitigación respecto al cambio de uso de la tierra.

3. Antecedentes

A partir de la ratificación y aprobación del Protocolo de Kioto en 1997, los países Partes y no Partes del Anexo 1 de dicho protocolo debieron "elaborar, actualizar periódicamente, publicar y facilitar a la Conferencia de las Partes los inventarios nacionales de las emisiones antropogénicas por fuentes y absorciones por sumideros de todos los gases de efecto invernadero no regulados por el Protocolo de Montreal" mediante el uso de metodologías establecidas por la Conferencia (SEMARNAT y INECC 2012).

Dado que gran parte de las medidas y esfuerzos adoptados se han concentrado principalmente a escala nacional, empresarial e institucional, algunos gobiernos locales han empezado a elaborar sus propios inventarios de emisiones y captura de GEI, tal es el caso de 47 entidades subnacionales de América del Norte (ICF Internacional 2012) y del carbon Cities Climate Registry el cual integra a 422 ciudades de los cinco continentes con sus propios inventarios en la etapa de inicio, intermedia y/o final (Moncuit 2014).

Los municipios de San José y San Rafael de Heredia son los únicos cantones registrados por Costa Rica en el carbon Cities Climate Registry (Moncuit 2014). El cantón de San Rafael de Heredia cuenta con un inventario de gases de efecto invernadero en el cual reporta los porcentajes de contribución correspondientes a cada sector, no obstante la contribución correspondiente al sector forestal y usos del suelo no está incluida debido a que los resultados no estaban listos en el año de publicación (Equipo investigado 2013).

Por su parte la municipalidad de Belén ha venido laborando en el tema ambiental desde 1999 a partir de la creación de la Unidad de Ambiente y mediante la ejecución del Programa Observatorio Ambiental en conjunto con el Laboratorio de Análisis Ambiental de la Universidad Nacional, el cual es "desarrollado a través de monitoreos sobre la situación ambiental del cantón realizados en forma consecutiva desde el año 2007" (Programa Observatorio Ambiental 2012). El mismo, mediante la evaluación de la calidad del aire del cantón para el año 2010 planteó la necesidad de elaborar un inventario cantonal de emisiones (Herrera *et al* 2010). Junto a la evaluación de la calidad del aire también se han gestado otros informes referentes a la calidad de las aguas superficiales y del monitoreo de las precipitaciones totales.

Cabe destacar que al nivel del uso de la tierra, la Municipalidad de Belén, mediante la promoción, discusión, y ejecución del Plan Regulador vigente, sus transitorios y actualizaciones, ha ejercido un trabajo dirigido a regular el uso de los terrenos y estructuras que asegure el mejor uso racional y ordenado en beneficio de los habitantes del cantón, promoviendo la protección de la propiedad contra el deterioro ambiental, una relación armoniosa entre los usos de la tierra, y el aseguramiento del acceso a los servicios públicos básicos para suplir las necesidades más inmediatas (Municipalidad de Belén 2013a). Por su parte, a partir del presente año inició la conformación de una Comisión de Cambio Climático con la participación de actores locales, públicos y privados, para elaborar estrategias y políticas que guíen el accionar de la municipalidad en materia de cambio climático.

4. Marco Teórico

Para efectos del presente estudio, se han considerado una serie de componentes teóricos que permiten de una forma ordenada y estructurada dar la orientación adecuada del abordaje metodológico y teórico aplicado en el desarrollo del inventario.

4.1. Emisiones y absorciones de gases de efecto invernadero

Los gases con efecto invernadero (GEI) pueden ser clasificados en directos e indirectos. Los primeros absorben calor cuando están presentes en la atmósfera y los segundos cuando se presentan en el ambiente producen reacciones con el oxígeno o con la luz dando como producto un gas de efecto directo (MINAET 2009).

Las fuentes de emisiones de GEI han sido determinadas como: aquellas procedentes de fuentes ubicadas dentro de los límites territoriales del inventario, las producidas como consecuencia del uso de electricidad, calefacción y/o enfriamiento dentro del límite de la ciudad; y las producidas fuera de los límites geográficos del inventario por actividades desarrolladas dentro de estos (Moncuit 2014). De igual modo pueden clasificarse en estacionarias, móviles y biogenéticas. Refiriéndose a las primeras como las que exceden o no un umbral mínimo (fuentes mayores y de área, respectivamente), a las segundas como todas las procedentes de los vehículos en vía y motores fuera de vía ("equipos de jardinería, vehículos recreacionales, equipos de construcción, embarcaciones comerciales, locomotoras y aeronaves") y a las terceras a las derivadas de cultivos, plantas y animales de granja (Toro *et al* 2013).

En cuanto a las absorciones de GEI, estas se logran a partir de los procesos fisiológicos desencadenados en los seres vivos, con lo cual se almacena carbono en los tejidos de estos, logrando por ende, la remoción de las emisiones de la atmósfera siempre que estos seres se mantengan en crecimiento.

Para el sector FOLU, las emisiones antropogénicas y absorciones por sumideros de gases de efecto invernadero se dan en las tierras gestionadas, siendo consideradas estas como aquellas en donde se evidencia intervención humana y se aplican acciones para lograr los fines económicos, sociales, culturales, ecológicos y espirituales de una comunidad dada (IPCC 2006a).

Las tierras gestionadas llegan a producir emisiones de gases de efecto invernadero mediante varias vías, entre ellas: los cambios de uso de la tierra que alteran la composición del suelo, las pérdidas de biomasa dadas por la recolección de leña y cosecha de madera, la deforestación, los cambios en el manejo de cultivos y pasturas que incorporan el componente arbóreo en sus tierras, la recolección de la cosecha, y las dadas en los procesos de descomposición de humedales. En cuanto a las absorciones éstas pueden deberse principalmente al aumento de la biomasa área y subterránea, el carbono del suelo y la materia orgánica muerta en asentamientos, tierras de cultivo, pastos, y tierras en abandono sometidas a regeneración natural, artificial y/o mixta.

Ante la variabilidad de usos de la tierra y los posibles focos de emisión y absorción mencionados, Moncuit (2014) aduce que la contabilidad de emisiones y absorciones de gases de efecto invernadero en el sector forestal y otros usos del suelo suele ser compleja.

4.2. Usos de la tierra

Las categorías de uso de la tierra han sido seleccionadas dada su solidez por servir como base para la estimación de las emisiones y absorciones, aplicabilidad, y la posibilidad de que la superficie terrestre de un país sea clasificada siguiendo sus determinaciones sin el inconveniente de ser duplicadas (IPCC 2006a). Asimismo, alguna de ellas puede ser considerada prioritaria debido a que su estimación es significativa en el inventario total dado su nivel absoluto, la tendencia o la incertidumbre respecto a las emisiones y absorciones, por lo que se recomienda en áreas urbanas priorizar según la siguiente secuencia: asentamientos, tierras de cultivo, tierras forestales, pastizales, humedales y otras tierras (Moncuit *et al* 2014). La definición de cada uso de la tierra según el IPCC (2006) se desglosa en el cuadro 1.

A pesar de la existencia de las definiciones genéricas, los realizadores de un inventario a nivel nacional, subnacional y/o local pueden definir sus propias categorías de uso de la tierra siempre que se adecúen a los parámetros establecidos por el IPCC y su definición sea precisa, con tal de que no haya mal interpretación en el procesamiento de la información. Dada dicha posibilidad, el presente inventario tomará en cuenta las siguientes categorías de uso de la tierra, descritas según el orden prioritario mencionado en el párrafo anterior: asentamientos, árboles de asentamientos, cultivos perennes con árboles, cultivos perennes, cultivos anuales, bosques, plantaciones forestales, pastos arbolados, pastos, humedales y otras tierras.

Cuadro 1. Definición del tipo de uso de la tierra.

Uso de la tierra	Definición
Tierra Forestal (FL)	Tierras pobladas con especies forestales arbóreas como manifestación vegetal dominante con una fracción de cabida arbórea del 20%, mínimo 2 hectáreas y una altura mínima de 3 metros. Así como aquellos sistemas de vegetación menores a los umbralos mencionados pero que se espera que lo rebase.
Tierras de cultivo (CL)	Tierra cultivada, incluyendo los campos de arroz, y los sistemas agroforestales donde la estructura de la vegetación cae por debajo de los umbrales de las tierras forestales
Pastizales (GL)	Los pastizales y tierras de pastoreo que no se consideran las tierras de cultivo y sistemas con vegetación leñosa y otra vegetación no pasto que no superen el límite de las tierras forestales
Humedales (WL)	Las áreas de extracción de turba y tierras cubiertas o saturadas de agua durante todo o parte del año
Asentamientos (SL)	La tierra desarrollada, incluidas las infraestructuras de transporte y los asentamientos humanos de cualquier tamaño, a menos que ya estén incluidos en otras categorías.
Otros usos (OL)	Incluye el suelo desnudo, roca, hielo y todas aquellas zonas que no estén incluidas en ninguna de las otras cinco categorías.

Fuente: IPCC 2006a.

Por tanto, se entiende por:

Asentamientos (SS): las mismas áreas destinadas a actividades de desarrollo mencionadas por el IPCC (2006) y aquellas dedicadas a fines recreativos, industriales, carreteras e instalaciones agropecuarias y agroindustriales.

Árboles de asentamientos (SST): todos aquellos árboles y/o parches de vegetación presentes en las orillas de las carreteras, patios de casas, áreas verdes de zonas industriales y urbanas, y dentro de áreas dedicadas a la recreación claramente legibles a escala 1:1000. Se incluyeron en esta categoría a árboles en lotes no urbanizados.

Cultivos perennes con árboles (CPT): aquellas áreas dedicadas al cultivo del café con un 30% de cobertura de copas, y/o presencia de cercas vivas legibles a escala 1:1000.

Cultivos perennes (CP): las áreas dedicadas al cultivo del café pero que no igualan o sobrepasan el 30% de cobertura de copas y no poseen cercas vivas.

Cultivos anuales (CA): áreas dedicadas al cultivo de maíz, frijol, tomate y otros cultivos anuales.

Bosques (FF): las zonas con clara presencia de vegetación arbórea nativa en toda su extensión con una cobertura mayor del 30% de copas y una altura mayor a 5 metros, y claramente identificadas en el plan regulador del cantón. Estas áreas se incluirán en el inventario por la poca extensión que comprenden dentro del cantón, y serán consideradas como tierras gestionadas por la existencia de captaciones de agua potable y manantiales no potables. Asimismo se incluyen en esta categoría los sitios que no están identificados dentro del plan regulador pero pueden llegar a ser considerados como tales en el tiempo.

Plantaciones Forestales (FP): áreas dedicadas al cultivo de madera de pocas especies arbóreas.

Pastos arbolados (GGT): sitios dedicados a la ganadería con presencia de árboles esparcidos claramente visibles en las imágenes digitales a escala 1:1000 y/o con cercas vivas, o bien charrales y sitios en abandono con árboles visibles en las imágenes satelitales a escala 1:1000.

Pastos (GG): áreas dedicadas a la ganadería, charrales, y lotes baldíos dentro de asentamientos, todos con nula presencia de árboles.

Humedales (W): sitios definidos como tales en las disposiciones del plan regulador del cantón, y con las características mencionadas por el IPCC (2006).

Cuerpos de agua (OA): áreas correspondientes al cauce de ríos, lagos y lagunas, con y/o sin vegetación suficiente para ser considerados en alguna de las clases anteriores.

Tierras descubiertas (OD): sitios con tierra desnuda, roca, arena, con y/o sin vegetación suficiente para ser considerados en alguna de las clases anteriores.

Nubes (NUBE): área de la imagen cubierta por nubes en donde no se distinguen con claridad los usos de la tierra abarcados.

4.3. Cambio de uso de la tierra

Las conversiones en el uso de la tierra del cantón de Belén en los últimos 64 años han estado influenciadas por los modelos del estado de bienestar y neoliberal, los cuales han ejercido cambios en las prácticas productivas desarrolladas en su territorio (Carmona 2010). De esta manera sitios que anteriormente fueron dedicados a la producción de café, huevos, pollo, ganado, y cultivos anuales, pasan a formar la base para la instalación de la infraestructura necesaria para el desarrollo de la actividad urbana, industrial y comercial.

La instalación de importantes firmas industriales en el cantón de interés nacional por su colaboración en la economía global del país, trajo consigo un aumento de la población residente y visitante debido a la generación de empleo, lo que desencadenó un proceso de urbanización y de presión sobre aquellos sitios no urbanizados, incluidas áreas de protección de nacientes, pozos y ríos.

Con tal de representar los cambios en el uso de la tierra mencionados, el IPCC (2006a) solicita recurrir a la implementación de tres métodos. El primero de ellos registra información del total de conversiones en el uso de la tierra por categoría individual, con la limitante de que no se registra cuánta superficie varió entre los distintos usos. El segundo expone las conversiones del uso de la tierra entre categoría de uso sin representarlas en el espacio. Y el tercero implica visualizar las conversiones del uso de la tierra en el espacio (IPCC 2006a).

Debido al alcance del presente estudio, se acudirá al empleo del tercer método, acudiéndose a las aplicaciones de sistemas de información geográfica para visualizar los cambios explícitos en el espacio.

El IPCC (2006a) recomienda un periodo de 20 años para que un área transcurra de una categoría de la tierra a otra, pretendiéndose con este valor por defecto suponer que la materia orgánica muerta y las existencia de carbono del suelo alcancen un equilibrio. No obstante, considerando que:

- En el área de estudio las principales actividades económicas giran en torno al sector comercio, servicio e industrial,
- Existe una presión sobre los usos de la tierra no considerados “asentamientos” para ser “desarrollados” mediante inversiones de capital,
- La conversión de un uso de la tierra a asentamiento no posee un retorno en el mediano y largo plazo sin una grave crisis económica y social a otro uso de la tierra,
- y Toda la materia orgánica aérea y del suelo debe ser removida al construir instalaciones propias de asentamientos humanos.

No se asumirá el periodo por defecto propuesto por IPCC (2006), si no el periodo de conversión de un uso de la tierra a otro será dado por la diferencia entre el año 2013 y 2006. La cantidad de tiempo acaecida por dicha diferencia es de 7 años.

4.4. Reservorios de carbono

Los reservorios o depósitos de carbono son los compartimientos en los cuales se almacena el carbono en su ciclo natural. Se han identificado 3 depósitos principales de carbono a saber biomasa, materia orgánica muerta y carbono del suelo, de los cuales se derivan 5. Sus definiciones se describen en el anexo 1.

El flujo del carbono en el sistema puede disminuir o bien aumentar las concentraciones de carbono de cualquier depósito. De esta manera, se pueden presentar pérdidas de C en la biomasa, la materia orgánica muerta y el suelo debidas a perturbaciones por cosecha, madereo, eventos naturales, cambio de uso de la tierra, incendios, entre otros. Por otro lado la pérdida en un reservorio puede significar el aumento en otro, situación principal por la que se genera un aumento en el C de cada reservorio.

4.5. Estimación de las existencias de carbono y emisiones-absorciones de CO_2 y de no CO_2

En la realización de un inventario de GEI para el sector FOLU es necesario la integración de los datos de la superficie de los usos de la tierra con los datos de la gestión de la tierra y la biomasa, la materia orgánica muerta y los depósitos de carbono del suelo, para estimar los cambios en las existencias de carbono y las emisiones-absorciones de CO_2 y de no CO_2 asociadas a cada uso. En la estimación se emplean el método de pérdidas y ganancias y el de diferencia de existencias para cambio en el carbono.

En el método de pérdidas y ganancias se atribuye las ganancias a la transferencia de carbono de un depósito a otro (Anexo 4) y al crecimiento de la biomasa principalmente, las pérdidas son atribuibles a las pérdidas de carbono de un depósito a otro y a las emisiones causadas por la degradación, quema, cosecha, entre otras. El método de diferencia de existencias se usa en la identificación de cambios en las existencias de carbono estimando el carbono contenido en los depósitos de dos momentos diferentes. Para la estimación de no CO2 se utiliza la determinación de la velocidad de un gas específico mediante un factor de emisión de un gas por los datos de la actividad relacionada (IPCC 2006a). La representación de los métodos mencionados se visualiza en las ecuaciones 1, 2 y 3.

Debido al alcance del presente inventario de emisiones-absorciones, no se contemplarán las fuentes agregadas y las emisiones no CO_2 de fuentes terrestres definidas por Moncuit (2014) e IPCC (2006), a saber aquellas debidas a la quema de biomasa, encalado, aplicación de urea, cosecha de productos del bosque, cultivos de arroz y las emisiones directas e indirecta de N_2O dadas por el manejo del suelo y el estiércol.

Para mejorar la exactitud y disminuir el grado de incertidumbre de la estimación de las emisiones y absorciones de CO_2 y no CO_2, es necesario recurrir al método de los tres niveles. El método al nivel 1 es de uso simplificado, emplea valores por defecto, y tiende a ser poco preciso a nivel de espacio. Al nivel 2 usa el mismo abordaje metodológico que el nivel 1 aplicando factores de emisión y de cambio en las existencias basados en datos específicos de un país o región. Y al nivel

3 se recurre a métodos que ofrecen estimaciones más certeras que los otros niveles, los cuales deben ser documentados claramente y sometidos a verificaciones de calidad, auditorías y validaciones, además implican más uso de recursos y complejidad. No obstante, puede darse una combinación de niveles (IPCC 2006a).

Ecuación 1. Cambios en las existencias anuales de carbono de un depósito dado en función de las pérdidas y las ganancias (Método pérdidas y ganancias). Fuente: IPCC 2006a.

$$\Delta C = \Delta C_G - \Delta C_L$$

Donde:
ΔC = cambio en las existencias anuales de carbono del depósito (ton C año^{-1}).
ΔC_G = ganancia anual de carbono (ton C año^{-1}).
ΔC_L = pérdida anual de carbono (ton C año^{-1}).

Ecuación 2. Cambios en las existencias anuales de carbono de un depósito dado según la diferencia anual media entre estimaciones en dos momentos diferentes (Método diferencia de existencias). Fuente: IPCC 2006a.

$$\Delta C = \frac{(C_{t2} - C_{t1})}{(t_2 - t_1)}$$

Donde:
ΔC = cambio en las existencias anuales de carbono del depósito (ton C año^{-1}).
C_{t1} = existencias de carbono del depósito en el momento t1 (ton C).
C_{t2} = existencias de carbono del depósito en el momento t2 (ton C).

Ecuación 3. Emisión de no CO_2 a la atmósfera. Fuente: IPCC 2006a.

$$Emisión = A * EF$$

Donde:
Emisión = emisiones de no CO_2 (ton gas no CO_2)
A = datos de la actividad relacionados con la fuente de emisión.
EF = factor de emisión para un gas y una categoría de fuente específicos (ton por unidad de A).

4.6. Incertidumbre

Se aduce que en todo inventario de emisiones y absorciones de gases la estimación de la incertidumbre es un elemento esencial, por lo que se han confeccionado métodos dirigidos a "determinar la incertidumbre en las variables usadas, sumar las incertidumbres del componente al inventario total, determinar la incertidumbre en la tendencia e identificar fuentes significativas". Definiéndose el análisis de la estimación de la incertidumbre como un medio para "priorizar los esfuerzos destinados a reducir la incertidumbre de los inventarios en el futuro y guiar las decisiones sobre la elección metodológica" (IPCC 2006b).

Cabe destacar que la conceptualización, los modelos, los datos de entrada y las hipótesis son fuente de incertidumbre, mientras que la falta de exhaustividad, la falta de de datos, la falta de representatividad de los datos, el error de muestreo aleatorio estadístico, el error de medición, los

datos faltantes y las clasificaciones erróneas tienden a ser causas de incertidumbre. A su vez, se han identificado siete alternativas para disminuirla: la mejora de los modelos, del estado de conocimiento y la representatividad, el uso de métodos más precisos de medición, la recopilación de más datos medidos, y la eliminación del riesgo del sesgo conocido (IPCC 2006b).

Por lo que los datos utilizados en la realización del inventario, deben ser:

Adecuados: en el sentido de que deben representar las categorías de uso de la tierra y las conversiones entre ellas, según se necesiten para estimar los cambios en las existencias de carbono y las emisiones y absorciones de gases de efecto invernadero (IPCC 2006a).

Coherentes: que representen las categorías de uso de la tierra de manera coherente a través del tiempo, sin que se vean demasiado afectados por discontinuidades artificiales en los datos de la serie temporal (IPCC 2006a).

Completos: que la tierra del territorio a inventariar debe ser incluida, estar compensados los incrementos en algunas zonas con los descensos en otras, reconocer la estratificación biofísica de la tierra si fuera necesario (y de forma que pudiera ser respaldada por los datos) para la estimación y declaración de las emisiones y absorciones de gases de efecto invernadero (IPCC 2006a).

Y Transparentes: en el sentido de que todos los datos, definiciones, métodos e hipótesis debes ser descritos con claridad (IPCC 2006a).

En sí, la estimación de la incertidumbre tanto en las categorías individuales como en todo el inventario, y en las tendencias entre un año de interés y el año de base, se fundamenta en la selección de dos métodos. El método 1 está basado en que la desviación estándar dividida por el valor medio sea menor a 0,3, que los rangos relativos de incertidumbre de los factores de emisión y actividad son iguales en el año base y año a evaluar. El método 2 se basa en la simulación de Monte Carlo y puede ser empleado cuando las incertidumbres son grandes, la distribución de los datos no es normal, los algoritmos son funciones complejas, hay correlación entre algunos conjuntos de datos de la actividad, los factores de emisión o ambos, y las incertidumbres son diferentes para los diferentes años del inventario (IPCC 2006b). En el presente inventario se empleará en la estimación de la incertidumbre el método 1 debido a que: los factores de emisión a utilizarse serán los mismos tanto en el año 2006 como en el año 2013; y la facilidad de uso y comprensión de las fórmulas usadas, así como la interpretación de los resultados.

5. Objetivos

5.1. General

Elaborar un inventario de gases de efecto invernadero en el sector forestal y uso del suelo (FOLU) del cantón de Belén durante el periodo 2006-2013 que sirva como insumo para la generación de estrategias y políticas locales de cambio climático.

5.2. Específicos

Determinar los cambios en el uso de la tierra del cantón de Belén durante el periodo 2006 -2013 para la identificación de posibles fuentes de emisión y absorción de GEI en el sector FOLU.

Estimar las emisiones y absorciones de GEI y su incertidumbre asociada en cada uso de la tierra identificado en el cantón de Belén para el periodo 2006 – 2013.

6. Metodología

La presente metodología describe brevemente el área de estudio del trabajo, y específicamente los métodos a emplear ya discutidos en el marco teórico para alcanzar los objetivos propuestos.

6.1. Descripción del sitio

Belén es el sétimo cantón de la provincia de Heredia, está ubicado entre las coordinadas geográficas medias 09º 59’ 14” latitud norte y 84º 0’ 38” longitud oeste. Se localiza al norte del río Virilla y al sur del río Segundo, limitando al este con los cantones de Heredia y Flores, al norte y al oeste con el cantón de Alajuela, al sur con los cantones de Santa Ana, Escazú y San José (Programa Observatorio Ambiental 2012) (Figura 1). Posee una extensión territorial de 12 km^2, una población de 5.651 habitantes de los cuales un 46,67% son hombres y un 51,48% mujeres y una densidad de 1.868,1 habitantes por kilómetro cuadrado (INEC 2011).

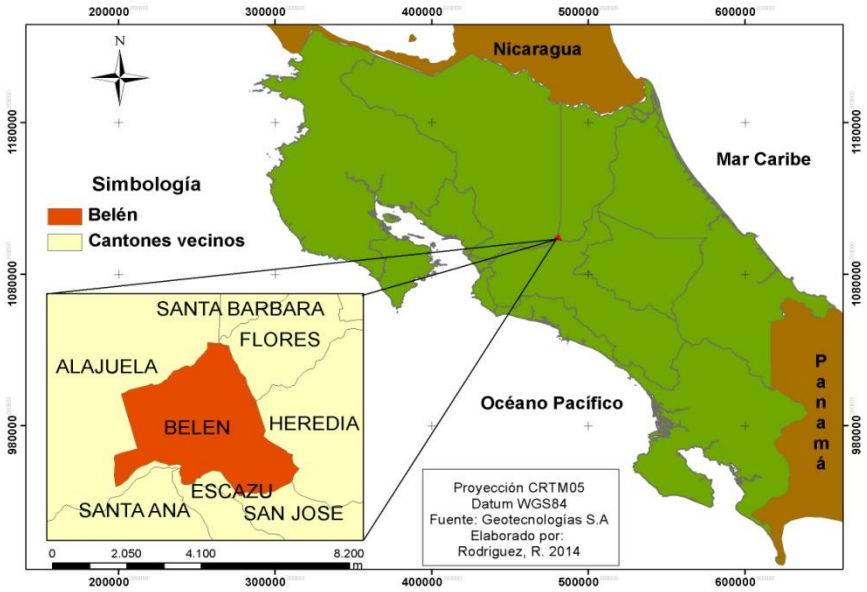


Figura 1. Mapa de ubicación del cantón de Belén.

Posee una topografía principalmente plana drenada por los ríos Bermúdez, Quebrada Seca, Segundo y Virilla, integrados dentro de la cuenca del río Grande de Tárcoles. La altitud promedio es de 915 metros sobre el nivel del mar y su formación geológica es de origen volcánico (Programa Observatorio Ambiental 2012). Asimismo, se encuentra dentro de la zona de vida bosque húmedo premontano.

La precipitación promedio anual es de 2.059 milímetros, la temperatura media anual fluctúa entre los 22,4 y 24 °C, las velocidades de los vientos fluctúan entre los 12,1 y 26,1 km/h según la influencia de los vientos alisios, y la humedad relativa va desde el 65% al 86% dependiendo de la época del año. Presenta un marcado periodo seco durante los meses de diciembre y marzo (Programa Observatorio Ambiental 2012).

El área en mención destaca por su componente hidrogeológico, debido a la convergencia de varios acuíferos, a saber Colima, Barva y el acuitardo Tiribí. Los mismos dan como resultado la aparición de manantiales de importancia nacional como los son Ojo de Agua, Puente Mulas y Sánchez, los cuales han sido captados por el AyA y la Municipalidad. Por otro lado se reportan más de 93 pozos (Programa Observatorio Ambiental 2012).

La estructura productiva del cantón está integrada en un: 62,20% por el sector comercial y servicios, 30,71% por el sector industrial, y 7,09% por el sector agropecuario. Asimismo la población del cantón tiene acceso a la mayoría de servicios públicos. (CCSS 2006 citado por UCR y CICAP 2012).

6.2. Propuesta Metodológica

El inventario de emisiones y absorciones del cantón de Belén en el sector forestal y uso del suelo (FOLU) para el periodo 2006-2013, será realizado en dos fases. La primera comprenderá el procesamiento digital de las imágenes digitales facilitadas por la municipalidad del cantón, entendiéndolas como fuentes primarias para la obtención de información. En la segunda fase se hará el establecimiento de los niveles de acuerdo al método de los tres niveles para cada reservorio de carbono por uso de la tierra, empleándose para ello las guías del IPCC 2006 y la recolección de datos nacionales y/o locales como fuentes primarias. Así como la estimación de las emisiones y absorciones y la incertidumbre asociada de los diferentes usos de la tierra identificados en la primera fase, empleándose para ello las fórmulas establecidas por el IPCC 2006 en conjunto con los datos recolectados.

6.2.1. Fase 1. Determinación del cambio de uso de la tierra en el cantón de Belén para el periodo 2006-2013.

En la determinación del cambio de uso de la tierra para el periodo 2006-2013 se utilizaron imágenes satelitales de los años 2006 y 2013 facilitadas por la Unidad de Bienes Inmuebles de la Municipalidad de Belén. El error medio cuadrático de las imágenes fue de 2,58 m y 0,63 m para la del 2013 y 2006 respectivamente. El procesamiento de las imágenes se llevó a cabo utilizando el programa ArcMap 10. Posteriormente se procedió a clasificar el área correspondiente al cantón para los dos años establecidos en asentamientos (SS), árboles de asentamientos (SST), cultivos

perennes con árboles (CPT), cultivos perennes (CP), cultivos anuales (CA), bosques (FF), plantaciones forestales (FP), pastos (GG), pastos arbolados (GGT), humedales (W), cuerpos de agua (OA), tierras desnudas (OD) y nubes (NUBE), mediante la ejecución de la extensión Editor (ESRI 2011b). Asimismo, se realizó un recorrido por el cantón para verificar la información obtenida en la imagen 2013, especialmente de aquellos sitios con poca claridad al momento de hacer la interpretación digital. Durante el recorrido se obtuvieron fotografías y observaciones de los sitios.

Para que los datos sean adecuados, coherentes y correctos y evitar la presencia de discontinuidades artificiales, la digitalización de las fotografías se sometió a un control de calidad mediante el uso de la extensión ET Geo Wizards V.10 (Tchoukanski 2011), la cual puede encontrar sitios con sobre posición de polígonos, polígonos astilla (fragmentos pequeños insertos dentro de áreas más grandes), y aperturas entre los polígonos.

Una vez designado el territorio a cada uso de la tierra por año y el correspondiente control de calidad, se calculó el área por uso de la tierra mediante la extensión XTools pro (Data East Soft 2011), y se realizó una matriz de conversión de uso de la tierra tomando como referencia el área mostrada por los componentes en los años 2006 y 2013. Por otro lado, las dos capas de datos se interceptaron ejecutando las funciones de la aplicación Intersect (ESRI 2011a), con tal de presentar en el espacio los sitios en donde se presentan cambios en el uso de la tierra.

6.2.2. Fase 2. Estimación de las emisiones y absorciones de GEI del cantón de Belén para el periodo 2006-2013.

La segunda fase está constituida de tres sub-fases: el establecimiento de los niveles apropiados por reservorio de carbono, la estimación de las emisiones y absorciones, la estimación de la incertidumbre.

6.2.2.1. Fase 2a. Establecimiento de los niveles apropiados por reservorio de carbono de cada uso de la tierra para el periodo 2006-2013.

Los niveles apropiados de cobertura de la estimación de variaciones en las reservas de carbono de los usos de la tierra fueron definidos según lo establecido por el método de los tres niveles propuesto por las Guías del IPCC (2006a). Para ello se utilizaron los árboles de decisión aportados por esta guía (Anexos 2, 3 y 4). En la elección se tomaron en cuenta los siguientes criterios: 1) la disponibilidad de la información requerida y 2) la vialidad de obtener la información necesaria para un método específico en función del tiempo asignado para este trabajo.

La descripción de los métodos escogidos y supuestos asumidos se desarrolla a través de lo dispuesto por el Anexo 5. Asimismo, se presenta una matriz con los niveles asumidos para cada uso de la tierra en el Anexo 6.

Una vez elegido el método y los supuestos para cada uso de la tierra y su respectivo depósito, se procedió a recolectar la información de fuentes secundarias requerida para su desarrollo. De las fuentes secundarias consultadas se escogieron aquellos datos de biomasa viva aérea y subterránea y carbono orgánico del suelo que mostraran la incertidumbre asociada, que fuesen

de sitios similares o cercanos al área de estudio, y que la interpretación del dato fuese claro. En los casos donde no se encontraron datos cercanos al área geográfica se optó por escoger datos del continente o bien datos por defecto. Los datos seleccionados para su posterior uso en la estimación de las absorciones y emisiones se describen en el cuadro 2 y 3.

Cuadro 2. Datos seleccionados para realizar la estimación de las existencias de biomasa viva aérea y subterránea de los usos de la tierra establecidos en el presente inventario.

UT	Valor	Unidad	SE	Fuente	Sitio	Observación
SST	63,3	Mg C ha^{-1}	0,99	Escobedo *et al*. (2009) citado por Nowak (2013)	Gainesville, FL	
FF	147,22	Mg C ha^{-1}	8,8	Cifuentes (2008)	Bosque premontano, Costa Rica.	Carbono derivado de 252,6 248 Mg d.m. ha^{-1} para un bosque de 40 años, usando una fracción de carbono de 0,47 (IPCC 2006a). El valor se multiplicó por un coeficiente de 1,24 (IPCC 2006a) para incluir el carbono correspondiente a las raíces.
CPT	32,4	Mg C ha^{-1}	0,9	Hergoualc'h *et al* (2012)	San Pedro de Barva, Costa Rica.	Carbono almacenado en un cafetal bajo sombra de *Inga densiflora*.
CP	14,1	Mg C ha^{-1}	0,8	Siles *et al* (2010) citado por Hergoualc'h *et al* (2012)	San Pedro de Barva, Costa Rica.	Carbono almacenado en un cafetal sin sombra.
GGT	31,80	Mg C ha^{-1}	10,9	Ibrahim *et al* (2007)	Esparza, Costa Rica.	Carbono almacenado en pasturas degradadas. El valor se multiplicó por un coeficiente de 1,20 (IPCC 2006a) para incluir el carbono correspondiente a la raíz.
FP	144,53	Mg C ha^{-1}	12%	Pérez y Kanninem (2003)	Costa Rica.	Carbono derivado a partir de 248 Mg d.m. ha^{-1} para plantaciones de teca maduras de Costa Rica, utilizando una fracción de carbono de 0,47 (IPCC 2006a). El valor se multiplicó por un coeficiente de 1,24 (IPCC 2006a) para incluir el carbono correspondiente a las raíces.

Entiéndase por: UT (Uso de la tierra), SE (Error estándar), SST (Árboles de asentamiento), FF (Bosque), CPT (Cultivos perennes con árboles), CP (Cultivos perennes), GGT (Pastos arbolados), y FP (Plantación forestal).

Cuadro 3. Datos seleccionados para realizar la estimación de existencias del carbono orgánico del suelo.

UT	COS_{REF} (Mg C ha^{-1})	F_{LU}	F_{MG}	F_I	Fuente
SS	65	0,8	0,8	0,8	IPCC (2006a)
CA	65	0,48 (±46%)	1,22 (±7%)	1 (ND)	
CPT-CP	65	1 (±50%)	1,22 (±7%)	1 (ND)	
GG-GGT	65	1 (ND)	0,97 (±11%)	1 (ND)	

Entiéndase por: UT (Uso del suelo), COS_{REF} (Carbono orgánico del suelo de referencia), F_{LU} (Factor de cambio asociado al uso de la tierra), F_{MG} (Factor de cambio asociado al manejo), F_I (Factor de cambio asociado al aporte de materia orgánica), SS (Asentamientos), CA (Cultivos anuales), CPT (Cultivos perennes con árboles), CP (Cultivos perennes), GG (Pastos), GGT (Pastos arbolados), FF (Bosque), y FP (Plantación forestal).

6.2.2.2. Fase 2b. Estimación de las absorciones y emisiones

Las emisiones y absorciones de CO_2 se basan en los cambios de las reservas de carbono y se estiman para cada categoría de uso de la tierra identificada, según la ecuación 4. Incluyendo aquella tierra que permanece en una categoría de uso de la tierra, así como las convertidas a otro uso (Moncuit 2014).

Ecuación 4. Cambios en las existencias de carbono de un uso de la tierra específico dado como la sumatoria del carbono contenido en todos los depósitos. Fuente: IPCC 2006a.

$$\Delta C_{UT} = C_{BVAS} + C_{MOM} + C_{COS}$$

Donde:
ΔC_{UT} = Cambio en las existencias de carbono de un uso de la tierra específico, Mg ha^{-1}.
C_{BVAS} = Carbono contenido en la biomasa viva aérea y subterránea, Mg ha^{-1}.
C_{MOM} = Carbono contenido en la materia orgánica muerta, Mg ha^{-1}.
C_{COS} = Carbono contenido en el carbono orgánico del suelo, Mg ha^{-1}.

6.2.2.2.1. Estimación de las existencias de la biomasa viva aérea y subterránea (BVAS) en usos de la tierra que permanecen como tales

El carbono de la biomasa viva aérea y subterránea de los usos de la tierra establecidos en el presente inventario se realizó siguiendo lo dispuesto por la ecuación 5.

Ecuación 5. Existencia de carbono en la biomasa viva aérea y subterránea de cada categoría de uso de la tierra que permanece como tal (UT_UT). Fuente: IPCC 2006a.

$$\Delta C_{BVAS} = C_{ref} * A_{UT}$$

Donde:
C_{BVAS}= Carbono contenido en la biomasa viva aérea y subterránea, Mg ha^{-1}.
C_{ref}= Cantidad de carbono de referencia por hectárea, Mg ha^{-1}.
A_{UT}= Área correspondiente a un uso de la tierra específico, ha.

6.2.2.2.2. Estimación de las existencias de biomasa viva aérea y subterránea (BVAS) en usos de la tierra que no permanecen como tales.

Para la estimación del cambio en las existencias de carbono en la biomasa de tierras convertidas a otra categoría de uso de la tierra se utilizó lo dispuesto por la ecuación 6.

Ecuación 6. Cambio inicial en las existencias de carbono en la biomasa de tierras convertidas a otra categoría. Fuente: IPCC 2006a.

$$\Delta C_{CONVERSIÓN} = (B_{antes} - B_{después}) * Área_{UT\_UT}$$

Donde=
$\Delta C_{conversión}$= cambio en el carbono de la biomasa por cambio de uso de tierra, MgC.
B_{antes}= existencias de biomasa antes de la conversión, MgC ha^{-1}.
$B_{después}$= existencias de biomasa después de la conversión, MgC ha^{-1}.
$Área_{UT\_UT}$= área convertida de usos de la tierra a otro uso de la tierra, ha.

$B_{después}$: se asume en 0 en los siguientes cambios:
Usos de la tierra a asentamientos (UT_SS).
Usos de la tierra a cuerpos de agua (UT_OA).
Usos de la tierra a tierra desnuda (UT_OD).
Usos de la tierra a cultivos anuales (UT_CA).
Usos de la tierra a humedales (UT_W).

Usos de la tierra a bosques (UT_FF), cultivos perennes con árboles (UT_CPT), pastos arbolados (UT_GGT) y cultivos perennes (UT_CP): se emplea el abordaje de bosques, cultivos perennes con árboles y pastos arbolados que permanecen como tales (FF_FF, CPT_CPT, y GGT_GGT). $B_{después}$ será considerado como la cantidad de biomasa presente en el momento de la conversión.

6.2.2.2.3. Estimación de las existencias del carbono orgánico del suelo (COS)

Para determinar el cambio en las existencias de carbono orgánico del suelo sólo se estimó en aquellos usos de la tierra que cambiaron a asentamiento, debido a que en la construcción de asentamientos se requiere desplazar el carbono del suelo para realizar los desarrollos planeados. Dichas existencias se estimaron a través de la aplicación de la ecuación 7.

Ecuación 7. Cambio en las existencias de carbono orgánico en suelos minerales. Fuente: IPCC 2006a.

$$\Delta C_{minerales} = (COS_0 - COS_{(0-t)})$$
$$COS = (COS_{REF} * F_{LU} * F_{MG} * F_I * A_{UT})$$

Donde:
COS_0= existencias de carbono orgánico de los suelos minerales al término del periodo de inventario, Mg C.
COS_{0-T}= existencias de carbono orgánico en el suelo al comienzo del periodo de inventario, Mg C.
T= cantidad de años de un periodo de inventario dado, año.
COS_{REF}= existencias de carbono de referencia, Mg ha^{-1}.
F_{LU}= factor de cambio de existencias para sistemas de uso de la tierra en particular.
F_{MG}= factor de cambio de existencias por el tipo de manejo o régimen de gestión.
F_I = factor de cambio de existencias para el aporte de materia orgánica.
A= Superficie designada a un uso de la tierra específico, ha.

Para usos de la tierra a asentamientos (UT_SS) se asumió para los factores de cambio de existencias F_I, F_{MG}, y F_{LU} un valor de 0,8, partiendo del hecho que la superficie se pavimentó (IPCC 2006a). Por su parte, los factores de cambio asociados a usos de la tierra que varían a asentamientos se describen en el cuadro 3.

6.2.2.2.4. Determinación del balance FOLU

Para realizar el balance general de las emisiones y absorciones GEI del sector forestal y uso del suelo para el cantón de Belén en el periodo 2006-2013 se utilizó la ecuación 8. Para representar la cantidad de CO_2 equivalente de las emisiones y absorciones, se multiplicaron los valores de carbono por un factor de conversión de 3,667.

Ecuación 8. Cambios en las existencias de carbono para todo el sector FOLU estimadas como la suma de los cambios en todas las categorías de uso de la tierra. Fuente: IPCC 2006a.

$$\Delta C_{FOLU} = \Delta C_{SS} + \Delta C_{SST} + \Delta C_{CPT} + \Delta C_{CP} + \Delta C_{CA} + \Delta C_{FF} + \Delta C_{FP} + +\Delta C_{GGT} + \Delta C_{GG} + \Delta C_W + \Delta C_{OA} + \Delta C_{OD}$$

Donde:
ΔC = Cambio en las existencias de carbono.
FOLU= Forestal y otros usos de la tierra.
SS= Asentamientos.
SST= Árboles de asentamientos.
CPT= Cultivos perennes con árboles.
CP= Cultivos perennes.
CA= Cultivos anuales.
FF= Bosques.
FP= Plantaciones forestales.
GGT= Pastos arbolados.
GG= Pastos.
W= Humedales.
OA= Cuerpos de agua.
OD= Tierras descubiertas.

6.2.2.3. Fase 2c. Estimación de la incertidumbre

La incertidumbre asociada a los factores de emisión empleados en la estimación de las emisiones y absorciones se obtuvo a partir del error estándar entre el dato promedio presentado por los autores multiplicado por cien.

La incertidumbre relacionada a la clasificación se derivó a través del índice de Kappa mostrada por la extensión de Kappa Tools del programa Arc View 3.3. Para la derivación del índice se utilizó únicamente la capa de usos de la tierra del 2013 por ser la más reciente, y 61 puntos de control relacionados con aquellos sitios con poca claridad al momento de hacer la interpretación digital. Las dos capas empleadas se utilizaron en formato vectorial.

La estimación de la incertidumbre total se obtuvo siguiendo lo dispuesto por el método 1 propuesto por IPCC (2006b) para el cálculo de incertidumbres combinadas. Las fórmulas empleadas por este método se visualizan en el Anexo 7.

7. Resultados

7.1. Uso y cambio de uso de la tierra

En el cantón de Belén durante el periodo 2006-2013 se constató que el 72,03% de la superficie cantonal se mantuvo en el 2013 en el mismo uso de la tierra registrado en el año 2006. Los asentamientos (SS) son el uso de la tierra que mantuvo la mayor proporción de esta área con 560,30 ha, seguidos de pastos (GG) y pastos arbolados (GGT) con 140,97 ha y 55,97 ha cada uno (Cuadro 4).

El uso de la tierra que posee más extensión en el cantón de Belén son los asentamientos (SS), los cuales ocupaban para el año 2006 el 50% del área del cantón. Estos sufren un incremento cercano a un 7% de su área total para el 2013, en donde abarcan casi un 60% del territorio cantonal. Dicho aumento supone una disminución en el área de otros usos de la tierra que ceden ante el desarrollo de infraestructura como construcción de áreas comerciales, industriales y residenciales, tendencia reflejada en la reducción del porcentaje correspondiente a pastos (GG), pastos arbolados (GGT), cultivos anuales (CA), cultivos perennes (CP) y cultivos perennes con árboles (CPT). No obstante, los árboles de asentamiento (SST) ostentan un incremento en su área en el periodo evaluado (Figura 2). Los Anexos 8 y 9, muestran la distribución espacial de los usos de la tierra para el año 2006 y 2013 respectivamente.

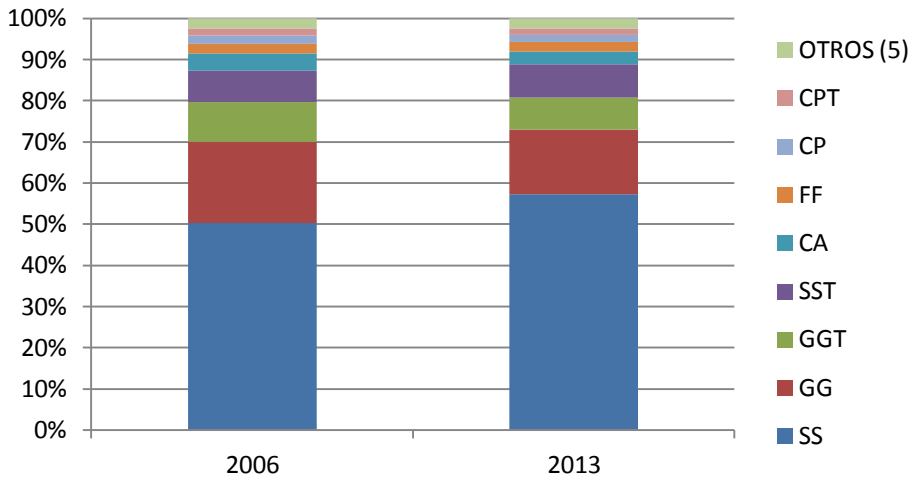


Figura 2. Área abarcada por uso de la tierra para el año 2006 y 2013. Entiéndase por: CA (Cultivos anuales), CP (Cultivos perennes), CPT (Cultivos perennes con árboles), FF (Bosques), GG (Pastos), GGT (Pastos arbolados), SS (Asentamientos), SST (Árboles de asentamiento). "OTROS (5)" incluye a: Plantaciones forestales (FP), Cuerpos de agua (OA), Tierra desnuda (OD), Humedales (W) y Nubes (NUBE).

Los usos de la tierra que cedieron más terreno al incremento de los asentamientos fueron los pastos con poco más del 40%, los árboles de asentamiento con el 28,67%, y los pastos arbolados con el 13,30% (Cuadro cambio). Tanto para el año 2006 y 2013 el distrito La Asunción es el que ostenta la mayor área destinada a asentamientos. Durante ese mismo periodo, dicho uso de la tierra sufre un incremento del 16% respecto al área del 2006 en ese distrito. No obstante, el mayor incremento del área de asentamientos respecto a la superficie distrital se da en el distrito de San Antonio, en donde el valor de La Asunción es superado en cuatro puntos porcentuales. Por su parte, el distrito de La Ribera presenta el menor incremento y se mantiene como el segundo distrito con mayor extensión de asentamientos en el periodo evaluado (Cuadro 5). La distribución espacial del cambio de usos de la tierra a asentamiento (UT_SS) se muestra en el Anexo 10.

Los pastos (GG), los cuales incluyen tanto a charrales, lotes baldíos y potreros, son el segundo uso de la tierra en extensión tanto en un año y el otro, concentrando su mayor proporción en el distrito de San Antonio (Cuadro 5). Para el año 2013, 140,51 ha de pastos se mantuvieron como tales, sin embargo fue el uso de la tierra con la mayor disminución de su superficie respecto a la del 2006 con 48,36 ha menos (Cuadro 4). Cabe destacar que la mayor reducción se dio en el distrito de La Asunción con 24,37 ha, seguido de La Ribera y San Antonio con 12,57 y 11,43 ha cada uno (Cuadro 5).

Cuadro 4. Matriz de cambio de uso de la tierra (UT_UT) para el cantón de Belén durante el periodo 2006-2013.

Belén		Uso de la tierra final (ha)														
		CA	CP	CPT	FF	FP	GG	GGT	Nube	OA	OD	SS	SST	W	Superficie inicial	Cambio neto
Uso de la tierra inicial (ha)	CA	28,24	0,56	1,31	0,05		5,41	3,99		0,02		12,62	1,07		53,28	-15,01
	CP	0,22	14,24	5,32	0,03		1,78	1,11		0,05		1,94	0,20		24,88	-5,40
	CPT	0,30	2,87	10,27	0,08		2,53	2,40		0,07		1,18	1,09		20,78	-1,23
	FF		0,26	0,16	21,94	0,27	0,31	3,19		0,84		1,06	0,86		28,90	1,44
	FP					4,09	0,08	0,09				0,23	0,08		4,56	0,28
	GG	6,77	1,03	0,06	0,73	0,13	140,21	19,21		1,16	4,80	63,56	5,32	0,16	243,14	-48,36
	GGT	0,90	0,15	0,66	4,05	0,15	26,94	55,97		3,63	0,74	19,66	7,00	0,03	119,88	-24,14
	NUBE	0,17			0,42		0,03	0,56		0,04		0,42	0,04		1,69	-1,69
	OA		0,00	0,04	0,54	0,01	1,34	1,48		2,28	0,54	0,74	0,67		7,64	1,79
	OD						1,63	0,52		0,09	8,47	3,99			14,71	0,61
	SS	1,31	0,24	1,13	1,84	0,18	11,12	5,21		0,82	0,77	560,34	39,62	0,04	622,62	85,61
	SST	0,35	0,12	0,60	0,66	0,01	3,42	1,89		0,42		42,40	44,29	0,00	94,17	6,08
	W	0,00						0,14				0,08	0,00	1,08	1,30	0,01
	Superficie final	38,26	19,47	19,55	30,34	4,85	194,78	95,75	0,00	9,43	15,32	708,23	100,26	1,31	1237,55	

Entiéndase por: UT (Uso de la tierra), CA (Cultivos anuales), CP (Cultivos perennes), CPT (Cultivos perennes con árboles), FF (Bosques), FP (Plantaciones forestales), GG (Pastos), GGT (Pastos arbolados), Nube (nube), OA (Cuerpos de agua), OD (Tierra desnuda), SS (Asentamientos), SST (Árboles de asentamiento) y W (Humedales).

Cuadro 5. Área total y por distrito de los usos de la tierra para los años 2006 y 2013.

Uso de la Tierra	2006 (ha)				2013 (ha)			
	La Asunción	La Ribera	San Antonio	Total	La Asunción	La Ribera	San Antonio	Total
CA	27,08	17,15	9,05	53,28	23,54	11,29	3,44	38,26
CP	0,00	16,66	8,21	24,88	0,00	13,83	5,65	19,47
CPT	0,29	13,55	6,94	20,78	0,00	10,28	9,27	19,55
FF	10,06	17,25	1,58	28,90	12,42	16,66	1,27	30,34
FP	0,00	4,56	0,00	4,56	0,00	4,85	0,00	4,85
GG	93,28	54,67	95,19	243,14	68,92	42,11	83,76	194,78
GGT	39,88	37,11	42,90	119,88	29,29	39,82	26,63	95,75
NUBE	0,68	1,01	0,00	1,69	0,00	0,00	0,00	0,00
OA	2,23	1,31	4,10	7,64	3,57	1,24	4,61	9,43
OD	2,22	0,00	12,49	14,71	2,12	0,00	13,20	15,32
SS	237,11	228,61	156,89	622,62	275,70	244,87	187,66	708,23
SST	42,48	32,94	18,76	94,17	39,59	40,16	20,51	100,26
W	0,00	1,30	0,00	1,30	0,00	1,31	0,00	1,31
Total	455,31	426,13	356,11	1237,55	455,15	426,40	355,99	1237,55

Entiéndase por: CA (Cultivos anuales), CP (Cultivos perennes), CPT (Cultivos perennes con árboles), FF (Bosques), FP (Plantaciones forestales), GG (Pastos), GGT (Pastos arbolados), Nube (nube), OA (Cuerpos de agua), OD (Tierra desnuda), SS (Asentamientos), SST (Árboles de asentamiento) y W (Humedal).

Durante el 2006 San Antonio mantenía la superficie más extensa de pastos arbolados, pero para el 2013 fue el distrito con la menor extensión de dicho uso de la tierra, lo cual implicó una reducción cercana al 38% del área inicial. La Ribera presentó, en cambio, un aumento de 2,71 ha (Cuadro 5). La localización de este uso de la tierra es dispersa por todo el cantón (Anexos 8 y 9), aunque cabe señalar que parte de esta área se encuentra en los bordes de los ríos Bermúdez (distritos La Asunción y San Antonio) y Quebrada Seca (distrito La Asunción), y en colindancia con las áreas de captación de agua potable de Puente Mulas (distrito San Antonio) y Ojo de Agua (distrito La Ribera). Asimismo, en el 2013 los pastos arbolados presentaron 55,97 ha que se mantuvieron como tales y una reducción de 24,14 ha respecto al área reportada para el 2006 (Cuadro 4).

Los árboles de asentamiento (SST) aumentaron su superficie en al año 2013, pasando a ser el tercer uso de la tierra más extenso del cantón de Belén, siendo los asentamientos, a pesar de su incremento en área, el uso de la tierra que cedió más superficie con 36,62 ha. Dicho aumento significó un incremento de 6,08 ha concentradas principalmente en el distrito de La Ribera (Cuadro 4 y 5). Este fenómeno no se presentó en La Asunción, en donde se evidencia una pérdida de 2,89 ha. La Asunción muestra los valores más altos en el año 2006 y La Ribera en el 2013, mientras que San Antonio, a pesar de ostentar un ligero aumento, posee los valores más bajos en los dos años evaluados (Cuadro 5).

De las actividades agrícolas aún persistentes, los cultivos anuales muestran la mayor proporción de área cultivada, seguidos del cultivo de café bajo y sin sombra. La Asunción presenta la mayor área de cultivos anuales del cantón, representada principalmente por cultivos de tomate. La

Ribera, tradicionalmente con las zonas más extensas de café en todo el cantón (Carmona 2010), es el distrito con mayor presencia de áreas destinadas a los cultivos perennes y perennes con árboles (CPT y CP) (Cuadro 5). Todas las actividades agrícolas mencionadas presentaron, en su conjunto, una disminución de 21,65 ha en el área del 2013 respecto a la del 2006, siendo los cultivos anuales los que más se ven afectados (Cuadro 4).

Los usos de la tierra con cobertura forestal ocupan sólo el 2,7% de la superficie en los dos años, sin sufrir cambios significativos al final del inventario (Cuadro 4). La ubicación de estos usos en el distrito La Asunción está relacionada a la presencia de los manantiales "San Antonio", "La Gruta", y "La Negra" (Municipalidad de Belén 2014), y a pequeños fragmentos creciendo a las orillas del río Bermúdez y en las peñas del río Virilla. En La Ribera está relacionado a la presencia del área de protección de la naciente "Los Sánchez", al pozo concesionado a la Cervecería de Costa Rica (Municipalidad de Belén 2014), a fragmentos localizados en las veredas del río Segundo, y a plantaciones forestales. San Antonio, en cambio, no sobrepasa las 1,5 ha de bosques en los dos años, constituyéndose el distrito con la menor área de bosques, la cual está ligada a masas boscosas creciendo a las orillas del río Bermúdez y en la peña del río Virilla (Cuadro 5 y Anexos 8 y 9). Cabe destacar que a pesar de que en San Antonio se encuentra el área de captación de Puente Mulas, esta naciente no posee un área de protección con cobertura vegetal establecida como sí la tienen los manantiales mencionados en los distritos La Ribera y La Asunción.

Las tierras desnudas no comprenden el 1% del cantón de Belén para los dos años y no presentan cambios significativos en su área (Cuadro 4). San Antonio es el distrito que cuenta con la mayor extensión de este uso de la tierra con 13 ha en promedio para los años evaluados, mientras que la Asunción apenas presenta dos hectáreas (Cuadro 5).

Los cuerpos de agua son representados por 7,64 y 9,43 ha en los años 2006 y 2013 respectivamente (Cuadro 4). Estos incluyen los cursos de agua y estanques artificiales presentes dentro del cantón. En La Ribera este uso de la tierra está compuesto principalmente por la laguna del centro recreativo Ojo de Agua y el lago Lehmann. En La Asunción, la superficie de cuerpos de agua está integrada por las lagunas de las canchas de golf del Hotel Double Tree Cariari y los cursos de agua de los ríos Bermúdez, Quebrada Seca y Virilla. San Antonio es el distrito con mayor extensión de cuerpos de agua (Cuadro 5), resultado de la extensión de los cursos fluviales mencionados para el distrito La Asunción.

Si bien es cierto los cuerpos de agua a los que se hace referencia en el presente estudio pueden ser considerados humedales por la legislación nacional vigente, sólo se consideró humedal como tal a un área con características lacustrinas localizada en el distrito La Ribera y que es contemplada por la propuesta de zonificación de uso para la actualización del plan regulador (Municipalidad de Belén 2013b). El mismo cubre un área aproximada de 1,31 ha, en la que se incluyen únicamente el área que compone al humedal como tal y las zonas de protección que no están bajo otros usos de la tierra. Durante el periodo evaluado, este uso de la tierra se mantuvo con la misma área (Cuadro 4 y 5).

7.2. Balance de las emisiones y absorciones

El balance general de las emisiones y absorciones registrado para el sector forestal y uso de la tierra del cantón durante el periodo 2006-2013 es de 8181,39 $MgCO_2$-eq. A nivel de uso de la tierra, los cultivos anuales, pastos, cuerpos de agua, tierras desnudas y asentamientos presentan balances positivos. Mientras que los cultivos perennes, perennes con árboles, bosques, plantaciones forestales, pastos arbolados y árboles de asentamiento muestran balances negativos (Cuadro 6).

El total de emisiones por cambio de uso de la tierra es de 30900,37 $MgCO_2$-eq. Las principales emisiones generadas en el periodo 2006-2013 en el sector FOLU del cantón de Belén se atribuyen a la conversión de usos de la tierra a asentamientos con 22885,73 $MgCO_2$-eq (Cuadro 6). Este uso acapara el 74,4% del total de emisiones generadas por cambio de uso. El 43,23% de las emisiones por cambio de uso a asentamiento se atribuyen a la remoción del carbono del suelo y el restante a la remoción de la biomasa viva aérea y subterránea.

Los pastos son el segundo uso de la tierra con mayores emisiones debidas al cambio de uso de la tierra con 4536,65 $MgCO_2$-eq. Dichas emisiones comprenden el 15% del total de emisiones registradas. La conversión de pastos arbolados a pastos contribuyó en un 68% de las emisiones registradas en pastos (Cuadro 6).

Los pastos arbolados y los cuerpos de agua ostentan 1391,06 $MgCO_2$-eq y 984,57 $MgCO_2$-eq de emisiones, correspondientes al 4% y 3% de las emisiones totales. La conversión de bosques y pastos arbolados a cuerpos de agua fueron los principales cambios de uso que contribuyeron en un 47% y 41%, respectivamente, de las emisiones registradas en los cuerpos de agua (Cuadro 6).

El total de absorciones registradas para el año 2013 fue de -22718,98 $MgCO_2$-eq. Los árboles de asentamiento y los bosques son los que poseen la mayor cantidad de absorciones, abarcando el 64% y 17% de las absorciones para ese año. Les siguen los pastos arbolados, las plantaciones forestales y los cultivos perennes con árboles y sin ellos. (Cuadro 6).

Cuadro 6. Emisiones y absorciones por uso y cambio de uso de la tierra en el cantón de Belén durante el periodo 2006-2013.

Belén		Uso de la tierra final (Mg CO_2-eq)													
		CA	**CP**	**CPT**	**FF**	**FP**	**GG**	**GGT**	**NUBE**	**OA**	**OD**	**SS**	**SST**	**W**	
Uso de la tierra inicial (Mg CO_2-eq)	**CA**	0,00	-28,94	-13,81	-28,42		0,00	-465,70		0,00		221,32	-2928,48		
	CP	11,32	-736,23	-356,83	-25,69		91,83	-71,75		2,61		427,99	-22,39		
	CPT	35,54	192,54	-1220,27	-33,02		300,29	5,28		7,78		325,59	-123,22		
	FF		126,61	67,74	-11844,67	2,67	169,02	1348,06		454,18		573,03	264,87		
	FP					-2169,67	41,42	37,71				119,36	23,04		
	GG	0,00	-53,26	-6,85	-393,73	-68,15	0,00	-2240,09		0,00	0,00	6938,53	-1234,96	0,00	
	GGT	105,44	9,60	-1,45	-1712,58	-62,52	3140,85	-6525,62		423,40	86,69	4439,41	-809,03	3,16	
	NUBE	0,00			-226,89		0,00	-65,06		0,00		0,00	-10,29		
	OA		0,00	-4,50	-292,32	-5,80	0,00	-172,18		0,00	0,00	0,00	-156,44		
	OD						0,00	-60,67		0,00	0,00	0,00			
	SS	0,00	-12,47	-134,14	-994,17	-93,41	0,00	-607,43		0,00	0,00	0,00	-9196,30	0,00	
	SST	81,93	22,50	68,27	-203,41	-4,38	793,24	218,23		96,61	0,00	9840,49	-10280,81	0,46	
	W	0,00						-16,38				0,00	-0,09	0,00	**Total**
Emisiones		234,22	351,24	136,01	0,00	2,67	4536,65	1391,06	0,00	984,57	86,69	22885,73	287,91	3,62	30900,37
Absorciones		0,00	-94,67	-517,59	-3910,22	-234,27	0,00	-3481,04	0,00	0,00	0,00	0,00	-14481,20	0,00	-22718,98
Balance		234,22	256,57	-381,58	-3910,22	-231,59	4536,65	-2089,98	0,00	984,57	86,69	22885,73	-14193,30	3,62	8181,39

Entiéndase por: CA (Cultivos anuales), CP (Cultivos perennes), CPT (Cultivos perennes con árboles), FF (Bosques), FP (Plantaciones forestales), GG (Pastos), GGT (Pastos arbolados), Nube (nube), OA (Cuerpos de agua), OD (Tierra desnuda), SS (Asentamientos), SST (Árboles de asentamiento) y W (Humedales).

7.3. Incertidumbre

El porcentaje de concordancia entre la clasificación del año 2013 y los 61 puntos de control fue de 63,06%. Obteniéndose una incertidumbre asociada a la clasificación del 36,94%. La incertidumbre total del inventario fue del 3,62%. Las emisiones derivadas de la conversión de usos de la tierra a asentamientos ostentaron la mayor contribución a la varianza (Cuadro 7).

Cuadro 7. Incertidumbre total para el inventario y contribución a la varianza por uso de la tierra.

Uso de la tierra	Gas	Emisiones y absorciones del 2013 ($MgCO_2$-eq)	Incertidumbre de los datos de la actividad (%)	Incertidumbre del factor de emisión (%)	Incertidumbre combinada	Contribución a la varianza por la categoría en el año 2013
CA	CO_2	234,22	36,94	0	36,94	0,000112
CP	CO_2	256,57	36,94	5,67	37,38	0,000137
CPT	CO_2	-381,58	36,94	2,78	37,05	0,000299
FF	CO_2	-3910,22	36,94	5,98	37,42	0,031992
FP	CO_2	-231,59	36,94	12,00	38,84	0,000121
GG	CO_2	4536,65	36,94	0	36,94	0,041965
GGT	CO_2	-2089,98	36,94	34,28	50,40	0,016573
NUBE	CO_2	0,00	36,94	0	36,94	0,000000
OA	CO_2	984,57	36,94	0	36,94	0,001977
OD	CO_2	86,69	36,94	0	36,94	0,000015
SS	CO_2	22885,73	36,94	121	126,51	12,524284
SST	CO_2	-14193,30	36,94	12,00	38,84	0,454096
W	CO_2	3,62	36,94	0	36,94	0,000000
	∑D	8181,39			∑H	13,07
					Incertidumbre total (%)	3,62

8. Discusión

8.1. Emisiones y absorciones por cambio de uso de la tierra.

El incremento del área de asentamientos y las emisiones que de ello se derivan (+7%; Figuras 3 y 4), es el reflejo de que en el periodo ha persistido una presión por parte de los inversionistas por acaparar tierras para el desarrollo de infraestructura a pesar que desde el 2005 se aplicaba un transitorio del plan regulador que limitaba los desarrollos urbanísticos[1]. El escenario mencionado podría incrementarse en los años venideros, dada la aprobación de proyectos por la Municipalidad de Belén en el plazo 2013-2014 (Brenes 2014). No obstante, debido al desarrollo en infraestructura presentado por el cantón en los últimos 64 años (Carmona 2010), cada vez es menos la proporción de tierras con aptitud para ese tipo de actividades debido a que hay un agotamiento de las mismas, y al aumento de las restricciones legales y ambientales contempladas en el plan regulador local[1]. Este aumento en las tierras de asentamiento altera las concentraciones de carbono en los tres reservorios (biomasa viva aérea y subterránea, materia orgánica muerta y carbono orgánico del suelo) y los ciclos de este elemento, causando la liberación de carbono a la atmósfera, variaciones en la composición de la flora, y la compactación y cubierta posterior del suelo (Andrews 2008, Zhao *et al* 2010, Brandeis *et al* 2009, Hutyra *et al* (2011), Hagan *et al* 2012 citados por Timilsina *et al* 2014).

El 73,52% de las emisiones generadas por cambio de uso de la tierra en el cantón de Belén se compensó mediante la captura de carbono de los sumideros (Figura 4). Si se le agregan 652,99 $MgCO_2$-eq emisiones provenientes de la gestión de las áreas agrícolas y pecuarias del cantón al total de emisiones registradas (Anexo 10; IMN 2014), el porcentaje de compensación ostentado por los sumideros se reduce en un 1,72%. Evidenciándose el poco impacto que poseen estas prácticas en el balance general de emisiones y absorciones. Situación similar se da en ciudades alemanas las cuales no reportan las emisiones de esta actividad productiva debido a la poca actividad agrícola desarrollada dentro de sus límites (Sippel 2011). Aunque serán necesarias estimaciones más rigurosas para conocer cuál es el impacto real de las prácticas agropecuarias existentes en el cantón de Belén, ya que estas abarcaban solo el 6,24% de la superficie del cantón en el 2013 luego de un proceso de cambio en las prácticas productivas percibido desde finales de los años 60 (Carmona 2010).

La permanencia de los cultivos anuales en el cantón ha estado ligada en el distrito La Asunción a que el área de estos está catalogada como parcela agrícola lo cual ha impedido a los propietarios hacer cambio de uso por el trámite y el reacomodo espacial que deben realizar[2], y en La Ribera a que están ubicados en la zona de protección intermedia relacionada a la naciente Ojo de Agua por la actualización del plan regulador (Municipalidad de Belén 2013b). A diferencia de los dos distritos mencionados, la presencia de cultivos anuales en el distrito San Antonio no ha respondido a limitaciones en el uso del suelo, sino más bien a la remanencia de áreas cultivadas que aún no

[1] Jiménez Epinoza, D. 2014. Actualización y transitorios del plan regulador del cantón de Belén (comunicación personal). San Antonio de Belén. Municipalidad de Belén.
[2] Franco García, L. 2014. Zonificación del plan regulador del cantón de Belén (comunicación personal). San Antonio de Belén. Municipalidad de Belén.

han sido sometidas a la urbanización, siendo estas las que están con mayor grado de sufrir un cambio de uso debido a que se localizan en la zona residencial de alta densidad y zona mixta residencial comercial dispuestas por la actualización del plan regulador (Municipalidad de Belén 2013b).

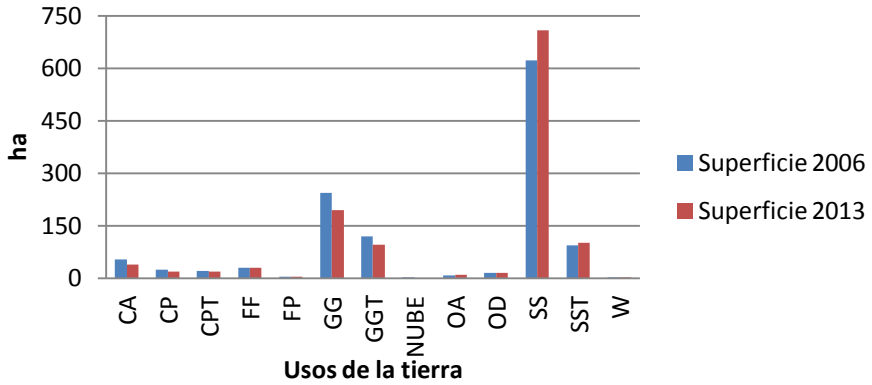


Figura 3. Superficie abarcada por cada uso de la tierra del cantón de Belén en los años 2006 y 2013. Entiéndase por: CA (Cultivos anuales), CP (Cultivos perennes), CPT (Cultivos perennes con árboles), FF (Bosques), FP (Plantaciones forestales), GG (Pastos), GGT (Pastos arbolados), Nube (nube), OA (Cuerpos de agua), OD (Tierra desnuda), SS (Asentamientos), SST (Árboles de asentamiento) y W (Humedal).

A pesar de que en el inventario nacional de emisiones GEI y de absorciones de carbono de Costa Rica se asume el carbono de los asentamientos en equilibrio (Chacón *et al* 2009) debido a que los servicios de los ecosistemas urbanos aún no se han cuantificado o no se conocen (Churkina 2010 citado por Hutyra et al 2011, Nowak *et al* 2013), los árboles de asentamiento representaron el principal sumidero de carbono del cantón de Belén con el 64% de las compensaciones locales (Figura 4). Reflejando que ante el crecimiento de las ciudades, la vegetación arbórea presente dentro de esas áreas representan sumideros importantes para compensar moderadamente las emisiones de gases de efecto invernadero locales y ser incluidas dentro los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero (Zhao *et al* 2010, Escobedo *et al* 2010 y Nowak *et al* 2013).

El crecimiento natural de las masas vegetales de los asentamientos, así como la reforestación urbana acaecida en sitios privados y públicos, la remanencia de individuos provenientes de sitios que anteriormente eran destinados a la producción cafetalera o ganadera para darle valor escénico al componente arquitectónico construido, y el registro de áreas arboladas en lotes baldíos en los que hace 7 años no se registró vegetación influyeron en el incremento de la cobertura de copa (Figuras 3), en la consolidación de los árboles de asentamiento como principales sumideros del cantón (Figura 4), y en el aumento de los beneficios asociados a este tipo de vegetación (Roy *et al* 2012) percibidos por la población residente y visitante.

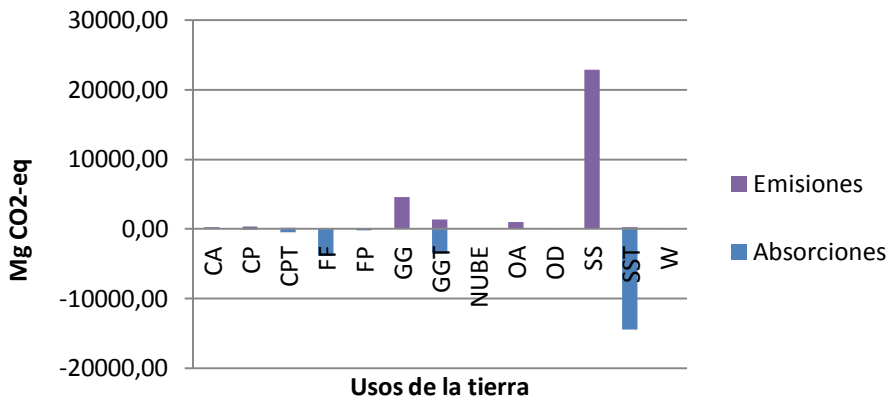


Figura 4. Emisiones y absorciones de carbono por usos y cambio de uso de la tierra dado en el cantón de Belén durante el periodo 2006-2013. Entiéndase por: CA (Cultivos anuales), CP (Cultivos perennes), CPT (Cultivos perennes con árboles), FF (Bosques), FP (Plantaciones forestales), GG (Pastos), GGT (Pastos arbolados), Nube (nube), OA (Cuerpos de agua), OD (Tierra desnuda), SS (Asentamientos), SST (Árboles de asentamiento) y W (Humedal).

En cuanto a la precisión con la que se estimó este componente, Timilsina *et al* (2014) aducen que la composición y el área basal de estos árboles son más importantes en la predicción del carbono almacenado ya que la estimación de carbono a partir de datos de teledetección (tal y como se realizó en este trabajo) suele ser imprecisa. Sin embargo, debido a la cantidad de propiedades privadas presentes dentro del cantón, la poca colaboración de sus propietarios/as y los trámites que conllevan las negociaciones entre los entes públicos y privados, es más efectivo y barato estimar el carbono a partir de la cobertura de copa de los árboles proyectada en las imágenes satelitales. Reconociéndose que el método de estimación puede tener un efecto en los resultados, sin embargo, debido a que estos permiten determinar con certeza el efecto de este componente sobre el inventario, lejos de menospreciar el resultado, este justifica la consideración de otros métodos de estimación (e.g. estableciendo un sistema de monitoreo) para futuros inventarios.

A nivel de distrito, las variaciones en la cobertura de copa se deben a los arreglos especiales producidos por la selección antropogénica de las especies, las plantaciones, la remoción de la vegetación urbana (Timilsina *et al* 2014) y los regímenes de manejo (Dobss *et al* 2011), los cuales llegan a tener influencia en la composición, riqueza y la diversidad del componente vegetal urbano. Por su parte, el hecho de que el distrito San Antonio muestre las menores superficies y las concentraciones de carbono más bajas de árboles de asentamiento, puede deberse a que desde 1978 parte del distrito fuese catalogado como zona residencial de alta densidad (Carmona 2010), y a que en él se ha desarrollado gran parte de la actividad comercial del cantón. Demostrándose la correlación existente entre el grado de urbanización y los patrones de biomasa arriba del suelo mencionados por Dobbs *et al* (2011) y Hutyra *et al* (2011), los cuales establecen que en cuanto se incrementa la densidad poblacional de las áreas urbanas se disminuye el componente vegetal del sitio.

Si bien es cierto los bosques son importantes como sumideros de carbono (Naaburs *et al* 1997 citado por Rapaport y Lind 2003, Hutyra *et al* 2011), el aporte de estos al balance es bajo por el

hecho de que no presentan cambios significativos en sus áreas durante el periodo del inventario (Figura 3 y 4). La presencia de este tipo de cobertura forestal en un cantón de aptitudes productivas y económicas totalmente desligadas del sector forestal primario y secundario, se debe a fragmentos boscosos ligados a zonas de protección de ríos y nacientes de interés nacional y local delimitadas por la legislación ambiental nacional, que sobrevivieron a la deforestación llevada a cabo por la implementación de las actividades productivas impulsadas por los modelos económico-políticos mencionados por Carmona (2010).

El leve incremento presentado por las masas boscosas se debió a la sucesión ecológica acaecida en los pastos y pastos arbolados que se convirtieron en bosques y que están localizados cerca de las riberas de los ríos, como al incremento de la cobertura de copa de los árboles del borde de los bosques que de un año a otro proyectan áreas diferentes. Además, el abandono de prácticas productivas relacionadas a la recreación y los servicios podría estar propiciando que áreas de asentamiento pasaran a formar parte de las masas boscosas del cantón, siendo reflejo de ello el abandono al que está siendo sometido el complejo recreativo Waterland (Distrito La Asunción), ya que este está aledaño a las masas boscosas ligadas al manantial de "La Gruta". No obstante, las 994,17 $MgCO_2$-eq de absorciones derivadas de la conversión de asentamientos a bosques serán revertidas cuando las actividades productivas se reanuden.

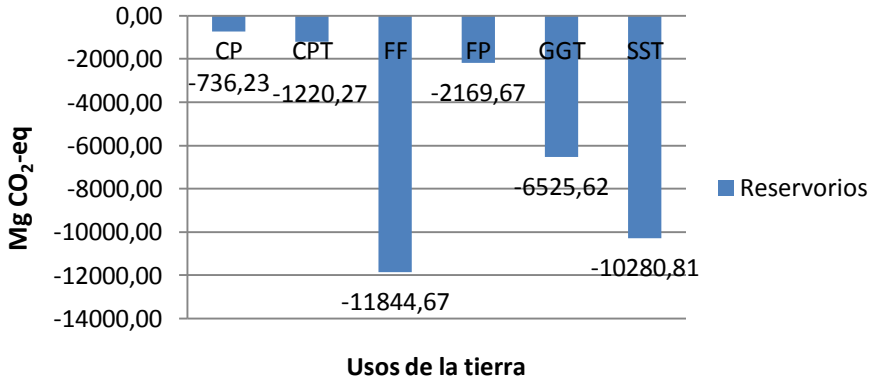


Figura 5. Reservorios de carbono del cantón de Belén en el periodo 2006-2013. Entiéndase por: CP (Cultivos perennes), CPT (Cultivos perennes con árboles), FF (Bosques), FP (Plantaciones forestales), GGT (Pastos arbolados), y SST (Árboles de asentamiento).

Al tomar en cuenta la coyuntura social, económica y política actual de este municipio, el aumento de las capacidades de captura y reserva de carbono de los cultivos perennes (CP y CPT) y las plantaciones forestales (FP) es cada vez menor por la conversión de estos usos de la tierra a otros, y la desestimulación de estas actividades en el área de estudio como mecanismos para producir madera y leña, generar belleza escénica y contener el viento[3]. Por lo que el aporte de estos al balance general de emisiones y absorciones es bajo (Figuras 4 y 5).

[3] Sánchez Zumbado, H. 2014. Plantaciones forestales de la Corporación PIPASA (comunicación personal). San Antonio de Belén. Corporación PIPASA.

El porcentaje de compensación registrado por todos los sumideros del cantón de Belén es alto (73,5%) al compararlo con el correspondiente porcentaje de las áreas verdes urbanas de la Municipalidad de Florencia (6,2%), Gainesville (3,4%), Miami-Dade (1,8%), East Brunswick (2%), New Jersey (7%), Neptune (3%), Montclair (2%), Highland Park (1%), Hoboken (1%) y Cherry Hill (1%) (Escobedo *et al* 2010, Primo *et al* 2013, Andrews 2008). Sin embargo, es importante mencionar que el porcentaje reportado por estos estudios consideran las emisiones totales de CO_2 dadas en sus territorios, las cuales aún están en proceso de elaboración para este cantón. Las absorciones registradas en este estudio son similares a las reportadas para las municipalidades East Brunswick y Cherry Hill (Andrews 2008), aunque deben considerarse las variaciones relacionadas al clima, la demografía y el gradiente urbano de los sitios.

El restante 27,99% de las emisiones por cambio de uso de la tierra deberán compensarse mediante el aumento de las capacidades de los actuales sumideros, aunque la conversión de zonas no arboladas a zonas arboladas no aumentaría sustancialmente las reducciones globales de emisiones de CO_2 del cantón de Belén, debido a que se requieren esfuerzos integrales entre los distintos sectores para lograr las reducciones de emisiones establecidas (Escobedo *et al* 2010, Hutyra *et al* 2011). Asimismo el aumento de los sumideros del cantón de Belén estaría limitado por la poca extensión territorial de este y el acaparamiento de tierras para el desarrollo de asentamientos. Similar escenario fue reportado para el estado de Nueva Jersey, en donde las estrategias de secuestro de carbono basadas en bosques son limitadas por la extensión y la densidad poblacional ostentada por dicho estado (Andrews 2008).

Considerando la zonificación del plan regulador donde se ubican los cultivos perennes, perennes con árboles, pastos arbolados y plantaciones forestales (Zonas residenciales de alta y mediana densidad, de proyectos especiales; Municipalidad de Belén 2013b), y que existen intensiones por desarrollar proyectos inmobiliarios en esos sitios[2], parte de las 32777,26 $MgCO_2$-eq almacenado por los reservorios será liberado. El porcentaje de carbono liberado dependerá de la forma, el diseño y la densidad de la urbanización (Trusilova y Churkina 2008, Strohbach y Haase 2012) y de los porcentajes de cobertura establecidos por la actualización del plan regulador (Municipalidad de Belén 2013a). Ante ello, los bosques es el reservorio de carbono con menor presión a ser convertido, dada su ubicación en áreas de protección establecidas por la legislación nacional. Por lo que un mejor entendimiento de la dinámica de los ecosistemas del cantón de Belén permitirá, de acuerdo Timilsina *et al* (2014) y Hutyra *et al* (2011), elaborar mejores estrategias de diseño y planes de desarrollo, las cuales podrán optimizar el secuestro de carbono por unidad de superficie de la tierra.

8.2. Incertidumbre

El índice de Kappa encontrado en el presente estudio (63,03%) es alto al compararlo con los mostrados por Fonseca *et al* (*s.f.*) (38%) y Segura y Trincado (2003) (45%), no obstantes, las metodologías empleadas en estos dos para realizar la clasificación de las tierras difieren respecto a la empleada por el presente estudio, debido a que utilizaron la clasificación supervisada, en donde se seleccionan los píxeles que representan los patrones espectrales de los tipos de uso de la tierra que fueron identificados mediante el uso de imágenes Lansat TM. Por otro lado, la fuerza de

concordancia presentada por el índice de Kappa de la clasificación del año 2013 es buena según la valoración del mismo índice propuesta por López y Pita (2001).

9. Conclusiones

Durante la vigencia del transitorio del plan regulador se emitieron 22883 $MgCO_2$-eq por concepto de cambio de uso de la tierra a asentamiento, dado el aval para el desarrollo de 85,61 ha de infraestructura.

La capacidad del cantón de Belén para alcanzar la neutralidad en carbono utilizando la compensación de emisiones a través de los sumideros del sector forestal y uso del suelo es limitada, ya que el cantón no cuenta con grandes extensiones de tierra para ser dedicadas a la captura de carbono, y el sector forestal y uso del suelo no está funcionando como sumidero sino como emisor de gases de efecto invernadero.

Se reconoce la importancia de los árboles de asentamientos como mecanismo para compensar parcialmente las pérdidas de carbono que ocurren dentro de este sector (45% de las absorciones), y la posibilidad de que a través de una planificación adecuada estos puedan incluso llegar neutralizar estas pérdidas.

El conocimiento de los sumideros y reservorios de carbono del cantón dan sustento técnico para: 1) acuerpar las medidas ejecutadas a través de la implementación del plan regulador urbano local, y 2) incidir en la inclusión de variables de cambio climático de dicho instrumento.

Se deberán de explorar otras alternativas para compensar las emisiones generadas por el sector forestal y uso del suelo y otras fuentes antropogénicas de GEI.

Dada la coyuntura actual del cantón y los intereses de inversionistas, aún persiste presión sobre aquellos terrenos sin desarrollar, con lo cual se dejará de almacenar el carbono presente en los reservorios identificados.

10. Recomendaciones

Contemplar la planeación y ejecución de estrategias dirigidas a empoderar y sensibilizar a las comunidades dentro del programa de arborización urbana de la Municipalidad de Belén para incrementar la sobrevivencia de los árboles de asentamiento y con ello asegurar mejores rendimientos de absorción de GEI, ya que estos son el principal sumidero en el cantón.

Dirigir programas de reforestación en las áreas de protección de ríos y manantiales que lo necesiten con tal de incentivar la regeneración de áreas sin o con escasa cobertura arbórea y potencializarlos como removedores de gases de efecto invernadero. La ubicación de los usos de la tierra presentes en la zona de protección se visualiza en el anexo 11.

Considerar las disposiciones previstas por la actualización del plan regulador en cuanto a la cobertura urbana permitida por cada zonificación de uso del suelo con tal de determinar el carbono máximo almacenado por los sumideros y reservorios del cantón de Belén y las emisiones generadas por futuros cambios de uso de la tierra permitidos.

Considerar las oportunidades de fomentar un PPP (Partenariado Público Privado) para acuerpar las iniciativas privadas dentro del mercado doméstico de carbono a través de incentivos para la incursión de los gobiernos locales en dichas iniciativas.

Persistir con el cobro del canon en el recibo del agua para la utilización de esos fondos en la compra de terrenos de importancia hídrica y ambiental en el cantón, los cuales se convertirán en nuevos focos de absorción de GEI.

Valorar la posibilidad de implementar un pago diferenciado a nivel cantonal para: 1) incidir en la protección y el mantenimiento del componente forestal y las zonas de protección asociadas, 2) asegurar la consolidación de sumideros y la permanencia de los reservorios ya existentes, 3) revalorizar las áreas que en la actualidad se consideran desvalorizadas por su cercanía o estar dentro de áreas de protección, 4) e incentivar la arborización y el cultivo de madera en áreas privadas.

11. Bibliografía

Andrews, CJ. 2008. Greenhouse gas emissions along the rural-urban gradient. Journal of Environmental Planning and Management. 51(6): 847–870.

Brenes Quirós, C. 2014. Nuevo centro comercial Plaza Belén llegaría a Heredia en el 2015: Tendrá 29 locales comerciales y de servicios. (en línea). El financiero. Consultado 24 oct 2014. Disponible en http://www.elfinancierocr.com/negocios/Nuevo-comercial-planea-Belen-Heredia_0_491950804.html

Carmona Alvarado, C. 2010. Análisis histórico geográfico del cantón de Belén para comprender la reducción del paisaje natural y agrario de 1950 al 2009. San Antonio de Belén, CR. Proyecto de graduación. Escuela de Historia. Universidad Nacional. 125 p.

Chacón Araya, AR; Montenegro Ballestero, J; Sasa Marín, J. 2009. Inventario nacional de emisiones de gases de efecto invernadero y absorción de carbono de Costa Rica. San José, CR. MINAET-IMN. 78p.

Cifuentes Jara, M. 2008. Aboveground Biomass and Ecosystem Carbon Pools in Tropical Secondary Forests Growing in Six Life Zones of Costa Rica. Ph. D. Tesis. Oregon, EU. Oregon State University. 195 p.

Data East Soft. 2011. XTools pro. New Yok, US.

Dobss, C; Escobedo, F; Zipperer, WC. 2011. A framework for developing urban forest ecosystem services and goods indicators. Landscape and Urban Planning. 99: 196–206.

Equipo investigador. 2013. Estrategia participativa de cambio climático para el cantón de San Rafael de Heredia. San Rafael de Heredia, CR. Escuela de Ciencias Ambientales-Comisión de Cambio Climático de San Rafael de Heredia. 25 p.

Escobedo, F; Varela, S; Zhao, M; Wagner, JE; Zipperer, W. 2010. Analyzing the efficacy of subtropical urban forests in offsetting carbon emissions from cities. Environmental Science & Policy. 1 3: 3 6 2 – 3 7 2.

ESRI. 2011a. Intersect. New Yok, US.

ESRI. 2011b. Editor. New York, US.

Fonseca, W*; et al*. S.f. Cambios en la cobertura del suelo y áreas prioritarias para la restauración forestal en el Caribe de Costa Rica. Recursos Naturales y Ambiente. 59-60: 99-107.

Hergoualc'h, K; *et al*. 2012. Changes in carbon stock and greenhouse gas balance in a coffee (Coffea arabica) monoculture versus an agroforestry system with Inga densiflora, in Costa Rica. Agriculture, Ecosystems and Environment. 148: 102– 110

Herrera Murillo, J; et al. 2010. La calidad del aire en Belén: Informe 2010 de estado y tendencias. Heredia, CR. Programa Observatorio Ambiental. Municipalidad de Belén-UNA. 32 p.

Hutyra, LR; Yoon, B; Alberti, M. 2011. Terrestrial carbon stocks across a gradient of urbanization: a study of the Seattle, WA region. Global Change Biology. 17: 783–797.

Ibrahim, M; *et al*. 2007. Almacenamiento de carbono en el suelo y la biomasa arbórea en sistemas de usos de la tierra en paisajes ganaderos de Colombia, Costa Rica y Nicaragua. Agroforestería en las Américas. 45: 27-36.

ICF Internacional. 2012. Evaluación de la comparabilidad de los inventarios de emisiones de gases de efecto invernadero y carbono negro en Norteamérica. Montreal, CA. Comisión para la Cooperación Ambiental. 136 p.

INEC (Instituto Nacional de Estadística y Censo). 2011. Censo 2011: Población total por zona y sexo, según provincia, cantón y distrito. (en línea). San José, CR. Consultado 28 jul 2014. Disponible en http://www.inec.go.cr/Web/Home/GeneradorPagina.aspx

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2006a. Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero: Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra. EDs. S Eggleston; L Buendía; K Miwa; T Ngara; K Tanabe. Hayama, JP. Instituto para las Estrategias Ambientales Globales (IGES). Vol 4.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2006b. Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero: Orientación general y generación de informes. SI. Instituto para las Estrategias Ambientales Globales (IGES). Vol 1.

López de Ulibarri Galparoso, I; Pita Fernández, S. 2001. Medidas de concordancia: el índice de Kappa. A Coruña, ES. Atención primaria en la red. 5 p.

MINAET (Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones). 2009. Estrategia Nacional de Cambio Climático. San José, CR. Calderón y Alvarado S.A. 107 p.

Moncuit, L. 2014. carbon Cities Climate Registry 2013 Annual Report: Local response to measurable, reportable, verifiable global climate action. Sl. Eds. Y Arikan, M van Staden. ICLEI. 34 P.

Municipalidad de Belén. 2009. Desarrollo Ambiental: Unidad de Ambiente. (en línea). San Antonio de Belén, CR. Consultado 25 jun 2014. Disponible en http://www.belen.go.cr/index.php/desarrollo-ambiental.html

Municipalidad de Belén. 2013a. Plan Regulador para el Cantón de Belén. San Antonio de Belén, Costa Rica. 32 p.

Municipalidad de Belén. 2013b. Índices de fragilidad ambiental: propuesta de zonificación de uso. San Antonio de Belén, CR. (Archivo jpg comprimido)

Municipalidad de Belén. 2014. Afectaciones de pozos, nacientes y vulnerabilidad a la contaminación del agua según legislación vigente y de amenazas naturales potenciales según la comisión nacional de emergencias. San Antonio de Belén, CR. (Archivo pdf comprimido).

Nowak, JD; *et al.* 2013. Carbon storage and sequestration by trees in urban and community areas of the United States. Environmental pollution. 178: 229-236.

Pérez Cordero, LD; Kanninen, M. 2003. Aboveground biomass of *Tectona grandis* plantations in Costa Rica. Journal of tropical forest science. 15(1): 199-213.

Pete Smith, MB; *et al*. 2014. Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU). Sl. IPCC. 181 p.

PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente). 2007. Perspectiva del medio ambiente mundial: GEO4 medio ambiente para el desarrollo. Nairobi, KE. PNUMA. 574 p.

Primo Vaccari, F; Gioli, B; Toscano, P; Perrone, C. 2013. Carbon dioxide balance assessment of the city of Florence (Italy), and implications for urban planning. Landscape and Urban Planning. 120: 138– 146.

Programa Observatorio Ambiental. 2012. Programa para mejorar la calidad de las aguas superficiales del cantón de Belén 2012-2017. San Antonio de Belén, CR. Municipalidad de Belén-Laboratorio de Análisis Ambiental de la Universidad Nacional. 29 p.

Quirós, LD. 2013. Belén: pequeño gigante en crecimiento. (en línea). Revista Summa. Consultado 28 jul 2013. Disponible en http://www.revistasumma.com/especiales/las-mejores-ciudades-en-la-region/40445-belen-pequeno-gigante-en-crecimiento.html

Rapaport, E; Lind, T. 2003. Steps Towards Integrating Carbon Dioxide Sources and Sinks into Local Environmental Planning. Journal of Environmental Planning and Management, 46(6): 803–816.

Roy, S; Byrne, J; Pickering, C. 2012. A systematic quantitative review of urban tree benefits, costs, and assessment methods across cities in different climatic zones. Urban Forestry & Urban Greening. 11: 351– 363

Schultz, S; et al. 2014. Global Protocol for community-scale greenhouse gas emission inventories GPC: Draf Version 2.0. (en línea). Sl. cCCR (carbon Cities Climate Registry). Consultado 26 jul 2014. Disponible en http://iclei.org/fileadmin/user_upload/ICLEI_WS/Documents/Climate/GPC_Draft_2.0_for_public_comment.pdf

Segura M, R; Tincado V, G. 2003. Cartografía digital de la Reserva Nacional Valdivia a partir de imágenes satelitales Landsat TM. Bosque. 24(2):43-52.

SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales); INECC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático). 2012. México: Quinta comunicación nacional anta la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. (en línea). México D.F. Mx. Grupo Comunicares. 441 p. Consultado 3 ago 2013. Disponible en http://unfccc.int/resource/docs/natc/mexnc5s.pdf

Sippel, M. 2011. Urban GHG inventories, target setting and mitigation achievements: how German cities fail to outperform their country. Greenhouse Gas Measurement & Management. 1:55–63

Strohbach, MW; Haase, D. 2012. Above-ground carbon storage by urban trees in Leipzig, Germany: Analysis of patterns in a European city. Landscape and Urban Planning. 104: 95– 104.

Tchoukanski. 2011. ET Geo Wizards V.10. Sl. Environmental Systems Research Institute, Inc.

Timilsina, N; *et al*. 2014. Analyzing the causal factors of carbon stores in a subtropical urban forest. Ecological Complexity. 20: 23–32.

Toro Gómez, MV. 2013. Inventario de Emisiones del Valle de Aburrá, año base 2011. Cl. Área Metropolitana del Valle de Aburrá. 164 p.

Trusilova, K; Churkina, G. 2008. The response of the terrestrial biosphere to urbanization: land cover conversion, climate, and urban pollution. Biogeosciences. 5: 1505–1515.

UCR (Universidad de Costa Rica); CICAP (Centro de Investigación y Capacitación en Administración Pública). 2012. Municipalidad de Belén: Plan de desarrollo estratégico municipal. San Pedro, CR. CICAP. 205 p.

Zhao, M; *et al*. 2010. Impacts of urban forests on offsetting carbon emissions from industrial energy use in Hangzhou, China. Journal of Environmental Management. 91: 807–813.

12. Anexos

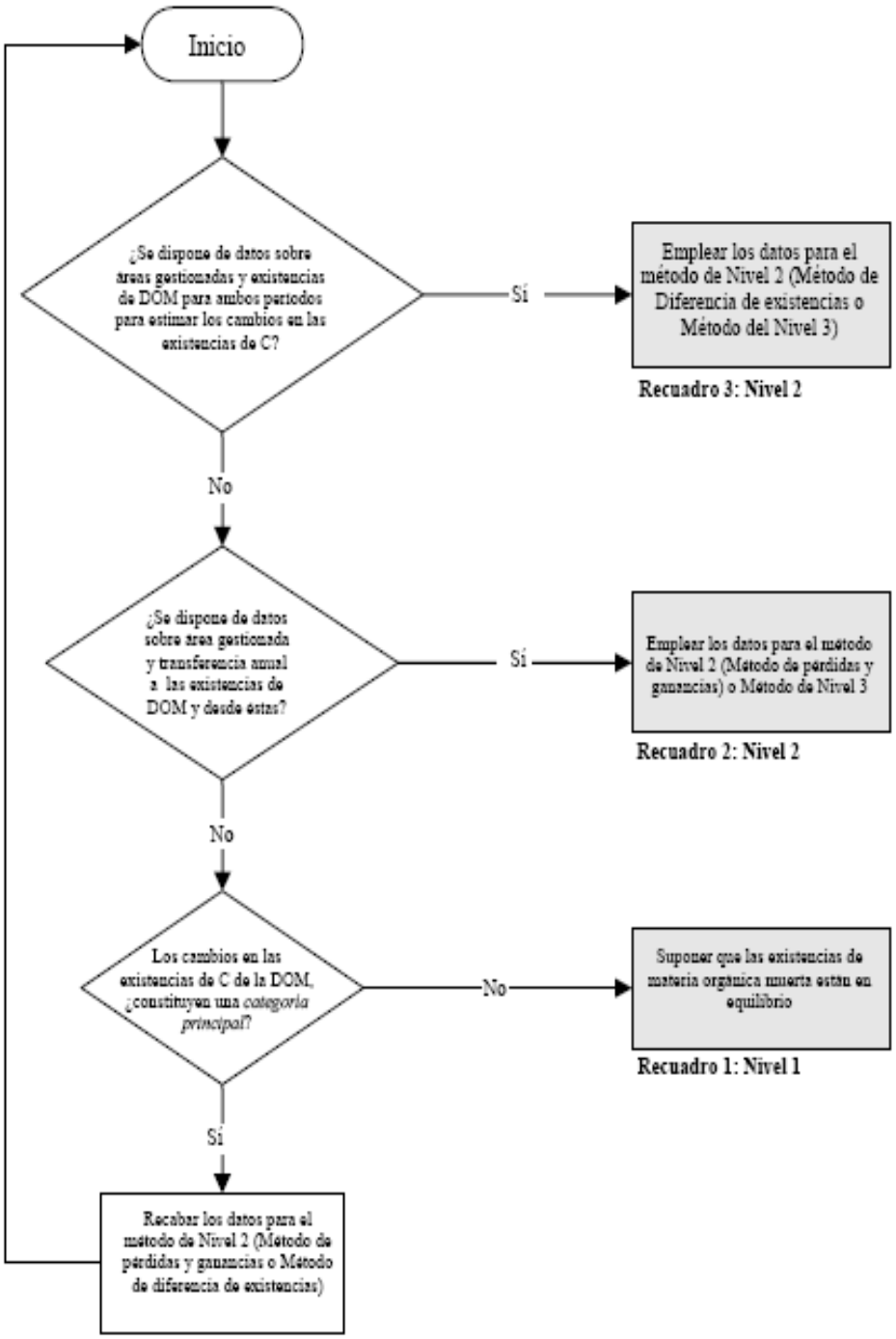
Anexo 1. Definiciones de los depósitos de carbono empleados en AFOLU para cada uso de la tierra. Fuente: IPCC 2006a.

Depósito		Descripción
Biomasa	Biomasa aérea	Toda la biomasa de la vegetación viva, tanto maderera como herbácea, que se halla por encima del suelo, incluidos tallos, cepas, ramas, corteza, semillas y follaje. Nota: En los casos en los que el sotobosque sea un componente menor del depósito de carbono de la biomasa aérea, es aceptable que se lo excluya para las metodologías y los datos asociados que se utilizan en ciertos niveles, siempre que éstos se empleen de manera coherente a lo largo de toda la serie temporal del inventario.
	Biomasa subterránea	Toda la biomasa de las raíces vivas. A menudo, las raíces finas, de menos de 2 mm de diámetro (sugerido), se excluyen porque, empíricamente, no se las puede distinguir de la materia orgánica del suelo o de la hojarasca.
Materia orgánica muerta	Madera muerta	Incluye toda la biomasa leñosa no viviente que no está contenida en la hojarasca, ya sea en pie, tendida en el suelo o enterrada. La madera muerta incluye la madera tendida en la superficie, las raíces muertas y las cepas de 10 cm de diámetro o más (o del diámetro especificado por el país).
	Hojarasca	Incluye toda la biomasa no viva con un tamaño mayor que el límite establecido para la materia orgánica del suelo (sugerido 2 mm) y menor que el diámetro mínimo elegido para la madera muerta (p. ej. 10 cm), que yace muerta, en diversos estados de descomposición por encima o dentro del suelo mineral u orgánico. Incluye la capa de hojarasca como se la define habitualmente en las tipologías de suelos. Las raíces vivas finas por encima del suelo mineral u orgánico (por debajo del diámetro mínimo límite elegido para la biomasa subterránea) se incluyen con la hojarasca cuando no se las puede distinguir de esta última empíricamente.
Suelos	Materia orgánica del suelo[1]	Incluye el carbono orgánico contenido en suelos minerales hasta una profundidad dada, elegida por el país y aplicada coherentemente a lo largo de la serie temporal[2]. Las raíces finas vivas y muertas y la DOM que se encuentran dentro del suelo y que miden menos que el límite de diámetro mínimo (sugerido 2 mm) para raíces y DOM se incluyen con la materia orgánica del suelo cuando no se las puede distinguir de esta última empíricamente. El valor por defecto para la profundidad del suelo es de 30 cm y la orientación sobre cómo determinar las profundidades específicas para cada país se incluyen en el Capítulo 2.3.3.1.

[1] Incluye la materia orgánica (viva y no viva) que se encuentra dentro de la matriz del suelo, operativamente definida como una fracción de un tamaño específico (p. ej. toda la materia que pasa a través de un cedazo de 2 mm). Las estimaciones de las existencias de C en el suelo pueden incluir también C inorgánico del suelo si se emplea un método del Nivel 3. Las emisiones de CO_2 producidas en los suelos por aplicación de encalado y urea se estiman como flujos empleando el método de Nivel 1 o 2.

[2] Las existencias de carbono en suelos orgánicos no se calculan explícitamente empleando el método de Nivel 1 o 2 (que estiman solamente el flujo anual de C de los suelos orgánicos), sino que se los puede estimar utilizando un método del Nivel 3. La definición de los suelos orgánicos a los fines de su clasificación se suministra en el Capítulo 3.

Anexo 2. Árbol de decisiones genérico para la identificación del nivel apropiado para estimar los cambios en las existencias de carbono en materia orgánica muerta en una categoría de uso de la tierra. Fuente: IPCC 2006a

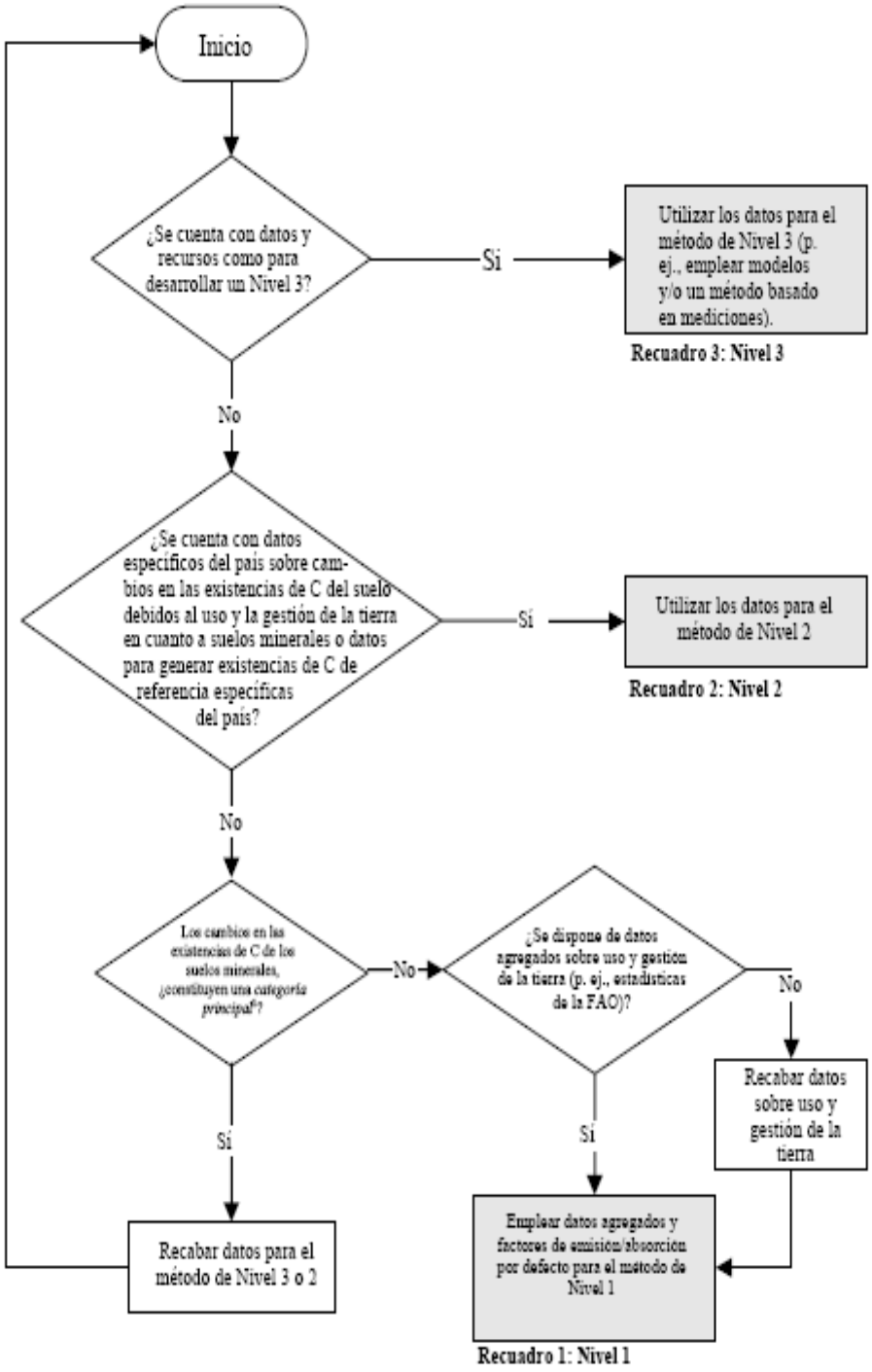


Nota:

1Véase el Volumen 1, Capítulo 4, «Opción metodológica e identificación de categorías principales» (principalmente la sección 4.1.2 relativa a los recursos limitados) para el análisis de las *categorías principales* y el uso de los árboles de decisión.

2: Los dos métodos se definen en las Ecuaciones 2.18 y 2.19, respectivamente.

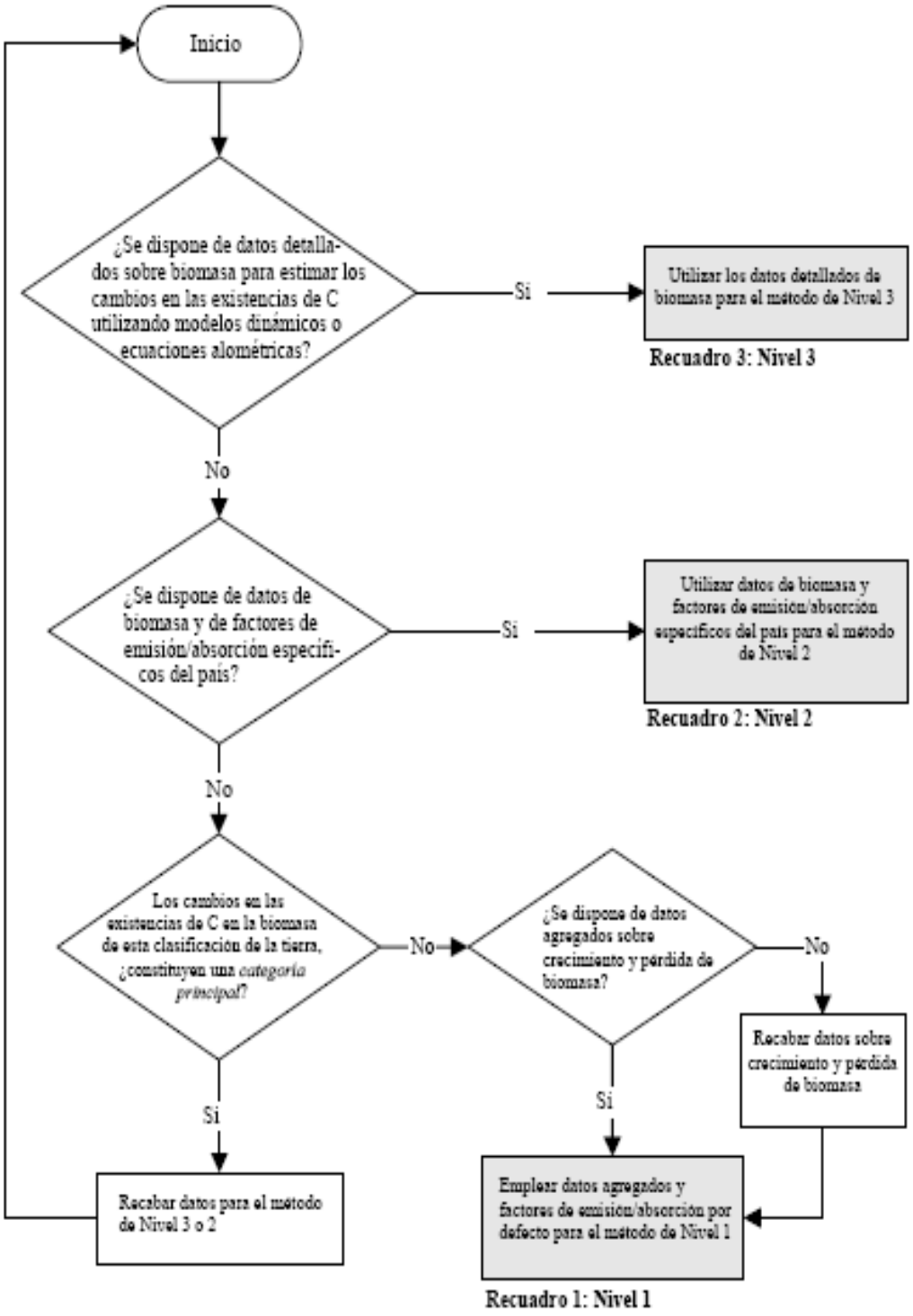
Anexo 3. Árbol de decisiones genérico para la identificación del nivel apropiado para estimar los cambios en las existencias de carbono en suelos minerales por categoría de uso de la tierra. Fuente: IPCC 2006a.



Nota:

1: Véase el Volumen 1, Capítulo 4, «Opción metodológica e identificación de categorías principales» (principalmente la sección 4.1.2 relativa a los recursos limitados) para el análisis de las *categorías principales* y el uso de los árboles de decisión.

Anexo 4. Árbol de decisiones genérico para la identificación del nivel apropiado para estimar los cambios en las existencias de carbono en biomasa en una categoría de uso de la tierra. Fuente: IPCC 2006a.



Anexo 5. Supuestos establecidos para cada reservorio de carbono y uso de la tierra.

Biomasa aérea y subterránea (BVAS)

Asentamientos que permanecen como tales (SS_SS)

En el cálculo de la biomasa se asume que los árboles son mayores a 20 años, y se considera al componente herbáceo y arbustivo en equilibrio por las podas y las pérdidas naturales de biomasa.

Cuerpos de agua y Tierra desnuda que permanecen como tales (OA_OA y OD_OD)

Las existencias de carbono en biomasa aérea y subterránea se mantienen en equilibrio debido a que el componente vegetal es mínimo.

Humedales que permanecen como tales (W_W)

La estimación de la biomasa presente en humedales no se contabiliza ya que para el tipo de humedal presente en el cantón de Belén el IPCC 2006 no ha adoptado metodologías específicas.

Bosques, Plantaciones forestales, Cultivos perennes con árboles y pastos arboladas que permanecen como tales (FF_FF, FP_FP, CPT_CPT, y GGT_GGT)

La existencias de carbono en las biomasa viva aérea y subterránea de los usos de la tierra mencionados no tendrán cambios en sus existencias, siempre y cuando se mantengan como tales.

Las pérdidas de carbono en biomasa debida a la recogida de madera para leña y cosecha no se toman en cuenta debido a que en el cantón la producción forestal no se desarrolla como una actividad productiva significante en los últimos 64 años.

Para el bosque que permanece como tal (FF_FF), se asume que las prácticas de perturbación se dan por procesos de senescencia natural, o bien por las prácticas de mantenimiento gestado por la administración de los acueductos. Dado que no se cuenta con información de las pérdidas debido a los procesos mencionados, se asumirán el cambio en las pérdidas de carbono en biomasa (ΔC_L) en 0.

En cuanto a plantaciones forestales (FP_FP), cultivos perennes con árboles (CPT_CPT) y pastos arbolados (GGT_GGT) que permanecen como tales, es necesaria información de raleos y podas para efectuar la pérdida de biomasa, no obstante por carencias de la información se asumirán las pérdidas en 0.

En los pastos arbolados que permanecen como tales (GGT_GGT) el componente herbáceo se considera en balance debido al supuesto empleado en pastos que permanecen como tales (GG_GG).

Cultivos perennes que permanecen como tales (CP_CP)

Se emplea el abordaje de bosques, plantaciones forestales y cultivos perennes con árboles para el cálculo de la biomasa del café.

Cultivos anuales que permanecen como tales (CA_CA)

El incremento en la biomasa es igual a la pérdida por cosecha y mortalidad en un año, considerándose el cambio en el carbono de la biomasa aérea y subterránea en equilibrio.

Pastos que permanecen como tales (GG_GG)

Se asume las existencias en equilibrio debido a que las ganancias en un año se compensan con la muerte de la biomasa herbácea en el mismo año.

Usos de la tierra a usos de la tierra (UT_UT)

A los usos de la tierra que no permanezcan como tales se les consideró el cambio en las existencias de biomasa (BVAS), con tal de representar la variación de las emisiones y absorciones dadas por el cambio de uso de la tierra.

Materia orgánica muerta (MOM)

Para todos los usos de la tierra que permanecen como tales, la madera muerta y la hojarasca se mantienen en equilibrio.

Usos de la tierra a otros usos de la tierra (UT_UT)

Dado que en todos los usos de la tierra que permanecen como tales la materia orgánica muerta se considera en balance, el cálculo del cambio en las existencias de carbono de la materia orgánica muerta dado en las conversiones de un uso de la tierra a otra se asumirá también en cero.

Por su parte, en la conversión de usos de la tierra a bosques (UT_FF) no se tomará en cuenta la materia orgánica muerta ya que el lapso de 7 años es poco tiempo para que se establezca la hojarasca y la madera muerta. Asimismo podría sobreestimarse la acumulación de carbono y con ello aumentar la incertidumbre del inventario.

Carbono del suelo (COS)

Asentamientos, tierras desnudas, cuerpos de agua, cultivos anuales, cultivos perennes, cultivos perennes con árboles, pastos y pastos arbolados que permanecen como tales (SS_SS, OD_OD, OA_OA CA_CA, CP_CP, CPT_CPT, GG_GG, y GGT_GGT)

El cambio en las existencias de carbono del suelo se asume en balance neutro ya que se considera que las entradas son equivalentes a las salidas.

Bosques y plantaciones forestales que permanecen como tales (FF_FF y FP_FP)

Se considera que las existencias de carbono del suelo no se modifican por la gestión, asumiéndose el cambio en el carbono del suelo en 0.

Usos de la tierra a otros usos de la tierra (UT_UT)

En el caso de las conversiones de usos de la tierra a otros usos sí se considera el depósito de carbono del suelo como fuente de emisiones debido a la remoción que se debe hacer de este en aquellos sitios a urbanizar. Para estimar el cambio en el carbono se recurre a la siguiente ecuación.

Ecuación 9. Cambio en las existencias de carbono de los suelos. Fuente: IPCC 2006a.

$$\Delta C_{suelos} = \Delta C_{minerales} - L_{orgánicos} + \Delta C_{inorgánico}$$

Donde:

ΔC_{suelos}= cambio anual en las existencias de carbono de los suelos, ton C año-1.

$\Delta C_{minerales}$ = cambio anual en las existencias de carbono orgánico de los suelos minerales, ton C año-1.

$L_{orgánicos}$ = pérdida anual de carbono de suelos orgánicos drenados, ton C año-1.

$\Delta C_{inorgánicos}$ = cambio anual en las existencias de carbono inorgánico de los suelos, ton C año-1.

El cambio en el carbono de suelos orgánicos no se calculará debido a que en el cantón de Belén no se recurre a la práctica de drenajes ya que la existencia de suelos orgánicos es mínima. El cálculo del carbono inorgánico del suelo no se asume debido a que el alcance del presente trabajo no lo contempla y no se poseen datos de dicha actividad. Considerando que el cambio en las existencias de carbono en el suelo será igual al cambio del carbono de suelos minerales.

Anexo 6. Niveles asumidos por uso y cambio de uso de la tierra.

		Uso de la tierra final																																			
		CA			CP			CPT			FF			FP			GG			GGT			OA			OD			SS			SST			W		
		ME	VA	FE	ME	VA	FE	ME	VA	FE	ME	VA	FE	ME	VA	FE	ME	VA	FE	ME	VA	FE	ME	VA	FE	ME	VA	FE	ME	VA	FE	ME	VA	FE	ME	VA	FE
Uso de la tierra inicial CA	BVAS		BN		N2	ES	VP	N2	ES	VP	N2	ES	VP				N2	ES	VP	N2	ES	VP								BN		N2	ES	VP			
CA	MOM		BN			BN			BN			BN			NO			BN			BN			NO			NO			BN			BN			NO	
CA	COS		BN			BN			BN			BN						BN			BN								N1	ES	VD		BN				
CP	BVAS	N2	ES	VP	N2	ES	VP	N2	ES	VP	N2	ES	VP				N2	ES	VP	N2	ES	VP	N2	ES	VP				N2	ES	VP	N2	ES	VP			
CP	MOM		BN			BN			BN			BN			NO			BN			BN			BN			NO			BN			BN			NO	
CP	COS		BN			BN			BN			BN						BN			BN			BN					N1	ES	VD		BN				
CPT	BVAS	N2	ES	VP	N2	ES	VP	N2	ES	VP	N2	ES	VP				N2	ES	VP	N2	ES	VP	N2	ES	VP				N2	ES	VP	N2	ES	VP			
CPT	MOM		BN			BN			BN			BN			NO			BN			BN			BN			NO			BN			BN			NO	
CPT	COS		BN			BN			BN			BN						BN			BN			BN					N1	ES	VD		BN				
FF	BVAS				N2	ES	VP	N2	ES	VP	N2	ES	VP	N2	ES	VP	N2	ES	VP	N2	ES	VP	N2	ES	VP				N2	ES	VP	N2	ES	VP			
FF	MOM		NO			BN			BN			BN			BN			BN			BN			BN			NO			BN			BN			NO	
FF	COS					BN			BN			BN			BN			BN			BN			BN						NE (NF)			BN				
FP	BVAS													N2	ES	VP	N2	ES	VP	N2	ES	VP							N2	ES	VP	N2	ES	VP			
FP	MOM		NO			NO			NO			NO			BN			BN			BN			NO			NO			BN			BN			NO	
FP	COS														BN			BN			BN									NE (NF)			BN				
GG	BVAS		BN		N2	ES	VP	N2	ES	VP	N2	ES	VP	N2	ES	VP		BN		N2	ES	VP		BN			BN			BN		N2	ES	VP			
GG	MOM		BN			BN			BN			BN			BN			BN			BN			BN			BN			BN			BN			NE (NM)	
GG	COS		BN			BN			BN			BN			BN			BN			BN			BN			BN		N1	ES	VD		BN				
GGT	BVAS	N2	ES	VP	N2	ES	VP	N2	ES	VP	N2	ES	VP	N2	ES	VP	N2	ES	VP	N2	ES	VP	N2	ES	VP	N2	ES	VP	N2	ES	VP	N2	ES	VP		NE (NM)	
GGT	MOM		BN			BN			BN			BN			BN			BN			BN			BN			BN			BN			BN				

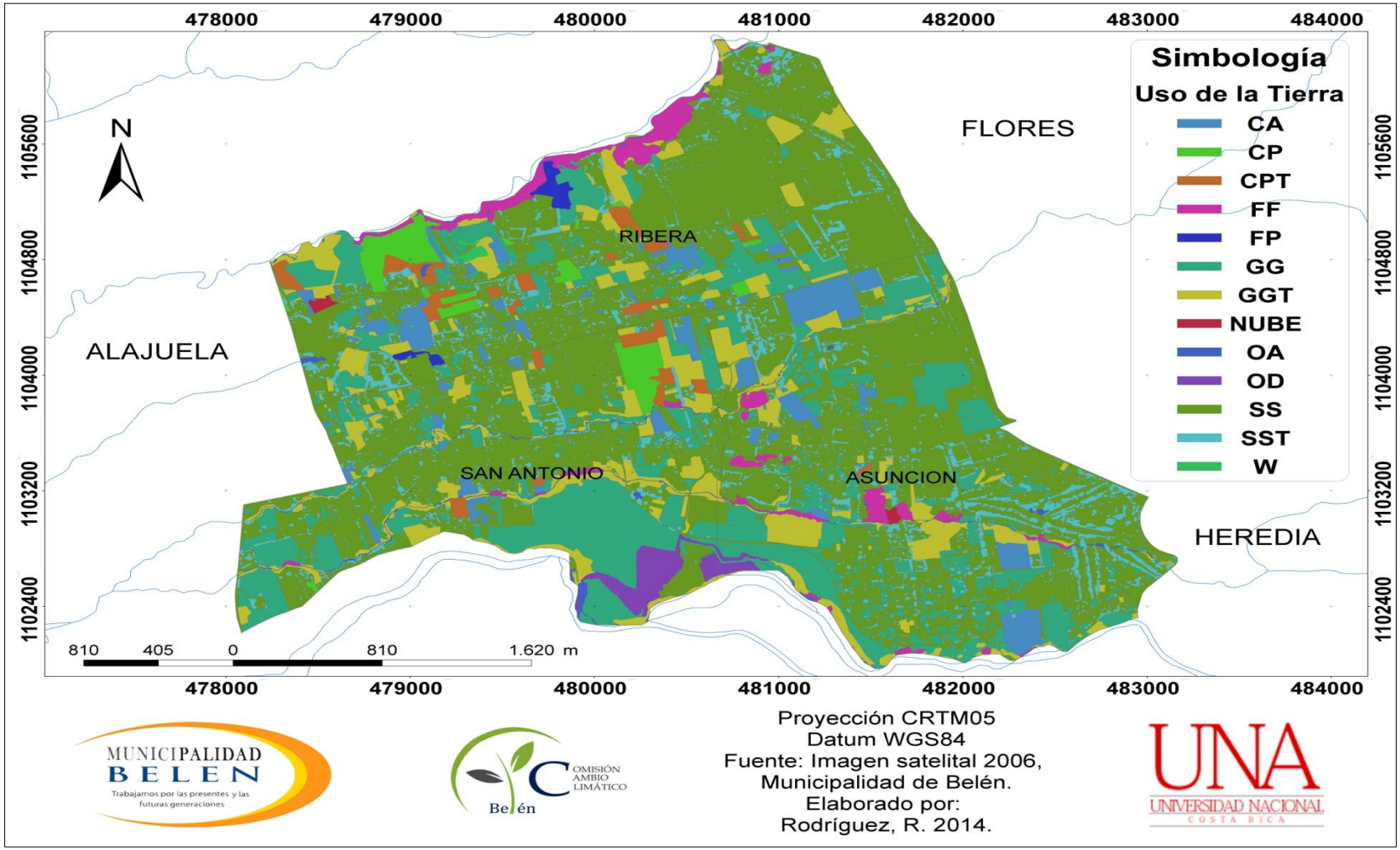
		COS	BN	BN	BN	BN	BN	BN	BN	BN	BN	N1 ES VD	BN	
	OA	BVAS	NO	N2 ES VP	N2 ES VP	N2 ES VP	N2 ES VP	N2 ES VP	N2 ES VP	BN	BN	BN	N2 ES VP	NO
		MOM		BN	BN	BN	BN	BN	BN	BN	BN	BN	BN	
		COS		BN	BN	BN	BN	BN	BN	BN	BN	BN	BN	
	OD	BVAS	NO	NO	NO	NO	NO	BN	N2 ES VP	BN	BN	BN	NO	NO
		MOM						BN	BN	BN	BN	BN		
		COS						BN	BN	BN	BN	BN		
	SS	BVAS	BN	N2 ES VP	N2 ES VP	N2 ES VP	N2 ES VP	BN	N2 ES VP	BN	BN	BN	N2 ES VP	NE (NM)
		MOM	BN	BN	BN	BN	BN	BN	BN	BN	BN	BN	BN	
		COS	BN	BN	BN	BN	BN	BN	BN	BN	BN	BN	BN	
	SST	BVAS	N2 ES VP	N2 ES VP	N2 ES VP	N2 ES VP	N2 ES VP	N2 ES VP	N2 ES VP	N2 ES VP	NO	N2 ES VP	N2 ES VP	NE (NM)
		MOM	BN	BN	BN	BN	BN	BN	BN	BN		BN	BN	
		COS	BN	BN	BN	BN	BN	BN	BN	BN		BN	BN	
	W	BVAS	BN	NO	NO	NO	NO	NO	N2 ES VP	NO	NO	BN	N2 ES VP	NE (NM)
		MOM	NE (NM)						NE (NM)			NE (NM)	NE (NM)	
		COS												

Entiéndase por: CA (Cultivos anuales), CP (Cultivos perennes), CPT (Cultivos perennes con árboles), FF (Bosques), FP (Plantaciones forestales), GG (Pastos), GGT (Pastos arbolados), Nube (nube), OA (Cuerpos de agua), OD (Tierra desnuda), SS (Asentamientos), SST (Árboles de asentamiento) y W (Humedales). BVAS (Biomasa viva aérea y subterránea), MOM (Materia orgánica muerta), COS (Carbono orgánico del suelo). ME (Método), VA (Área del uso y cambio de uso de la tierra) y FE (Factor de emisión). N1 (Nivel 1), N2 (Nivel 2). ES (Específica del sitio), VD (Valor por defecto IPCC 2006) y VP (Valor no defecto). BN (Balance neutro), NO (Cambio de uso del tierra no presentado), NE(NF) (Depósito no considerado) y NE(NM) (Método no adoptado por el IPCC 2006).

Anexo 7. Fórmulas empleadas para la derivación de la incertidumbre total del inventario según el método 1 sugerido por IPCC (2006b).

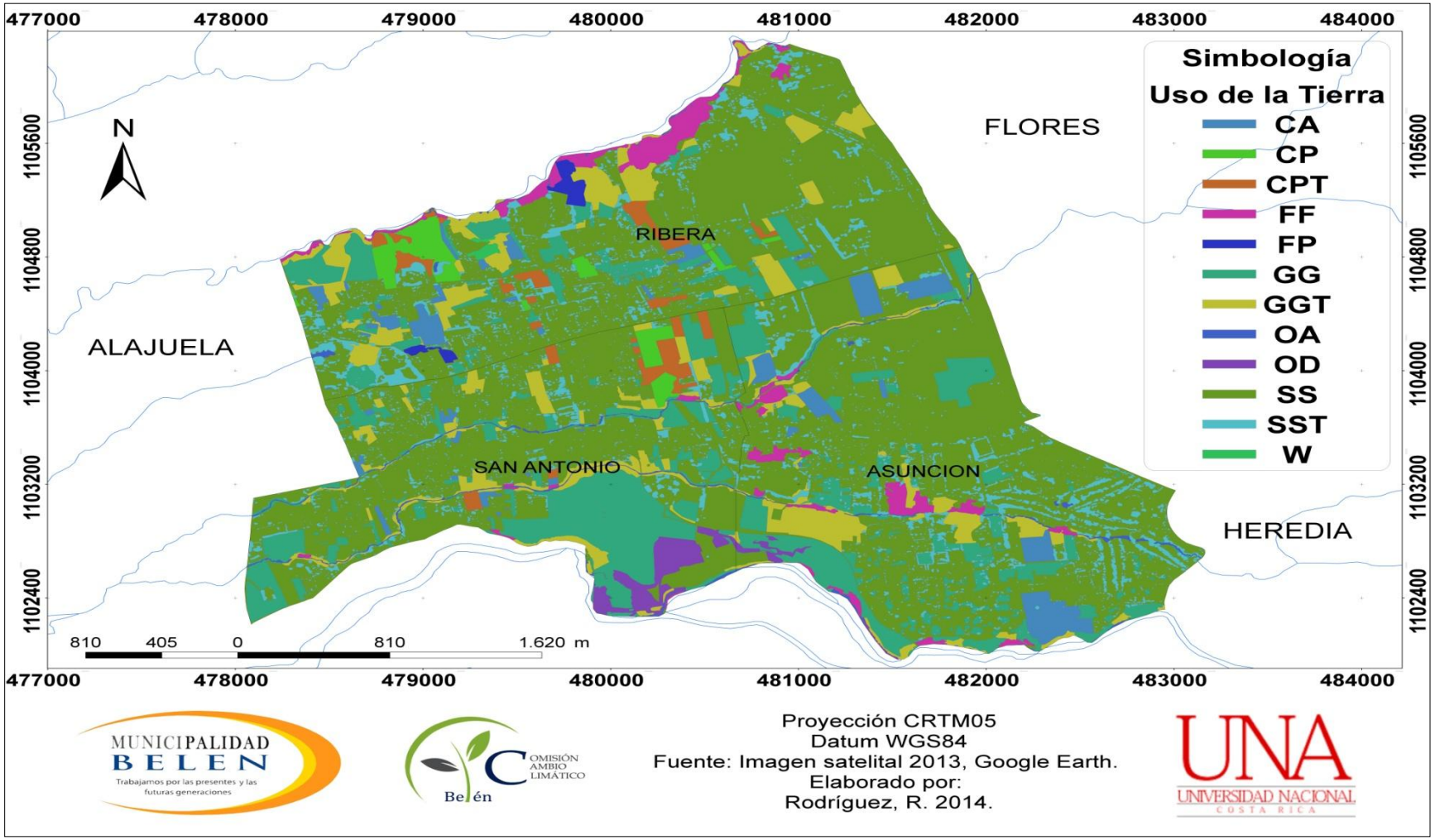
Uso de la tierra (A)	Gas (B)	Emisiones-absorciones del 2013 (D)	Incertidumbre de los datos de la actividad (E)	Incertidumbre del factor de emisión de estimación (F)	Incertidumbre combinada (G)	Contribución a la varianza por categoría en el año 2013 (H)
		Equivalente de Mg de CO_2	%	%	$\sqrt{(E^2+F^2)}$	$(G*D)^2*(\sum D)^{-2}$

Anexo 8. Distribución espacial de los usos de la tierra del cantón de Belén en el año 2006.



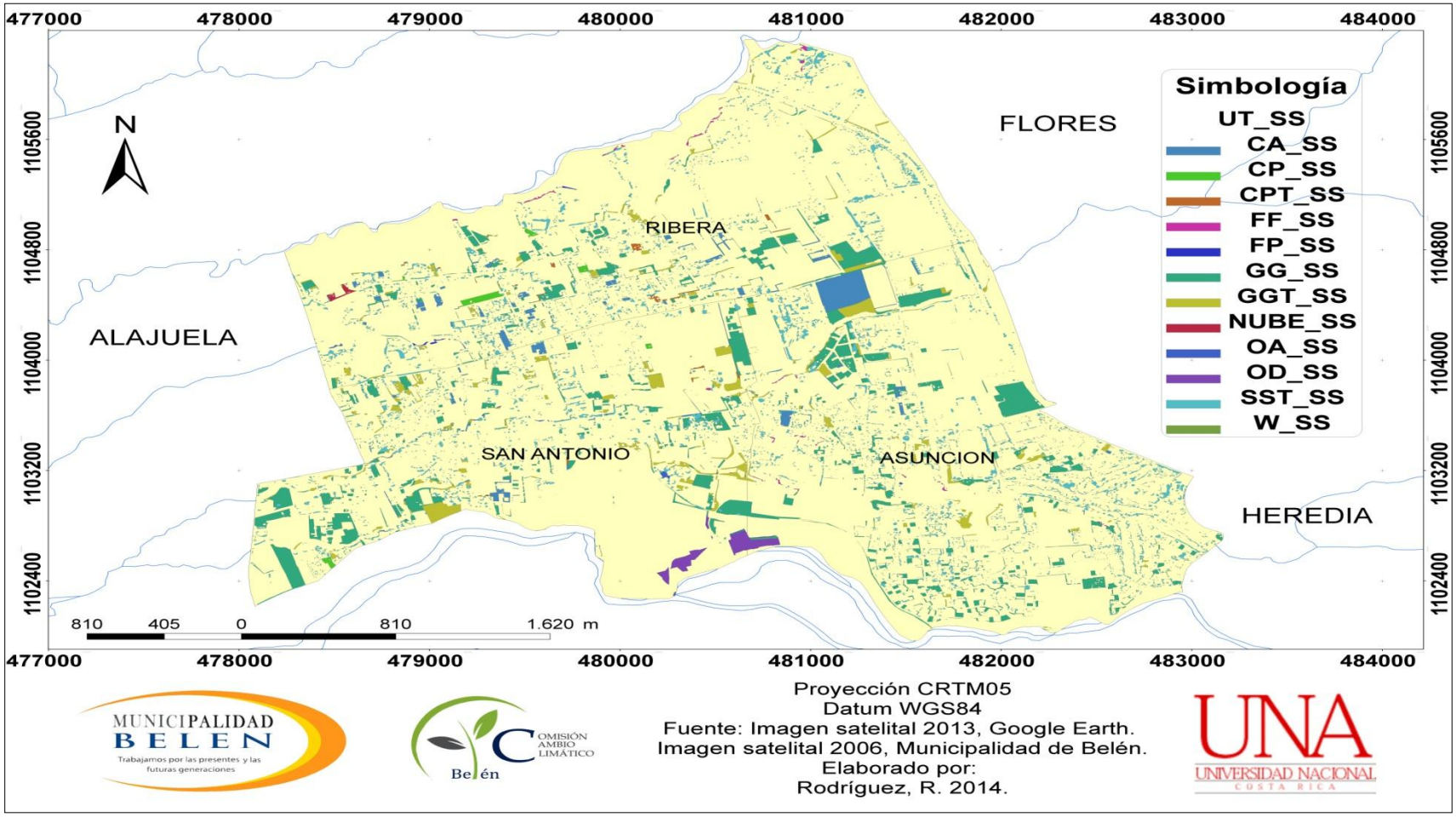
Entiéndase por: CA (Cultivos anuales), CP (Cultivos perennes), CPT (Cultivos perennes con árboles), FF (Bosques), FP (Plantaciones forestales), GG (Pastos), GGT (Pastos arbolados), Nube (nube), OA (Cuerpos de agua), OD (Tierra desnuda), SS (Asentamientos), SST (Árboles de asentamiento) y W (Humedales).

Anexo 9. Distribución espacial de los usos de la tierra del cantón de Belén en el año 2013.



Entiéndase por: CA (Cultivos anuales), CP (Cultivos perennes), CPT (Cultivos perennes con árboles), FF (Bosques), FP (Plantaciones forestales), GG (Pastos), GGT (Pastos arbolados), Nube (nube), OA (Cuerpos de agua), OD (Tierra desnuda), SS (Asentamientos), SST (Árboles de asentamiento) y W (Humedales).

Anexo 10. Distribución espacial de la conversión de usos de la tierra a asentamientos en el cantón de Belén durante el periodo 2006-2013.



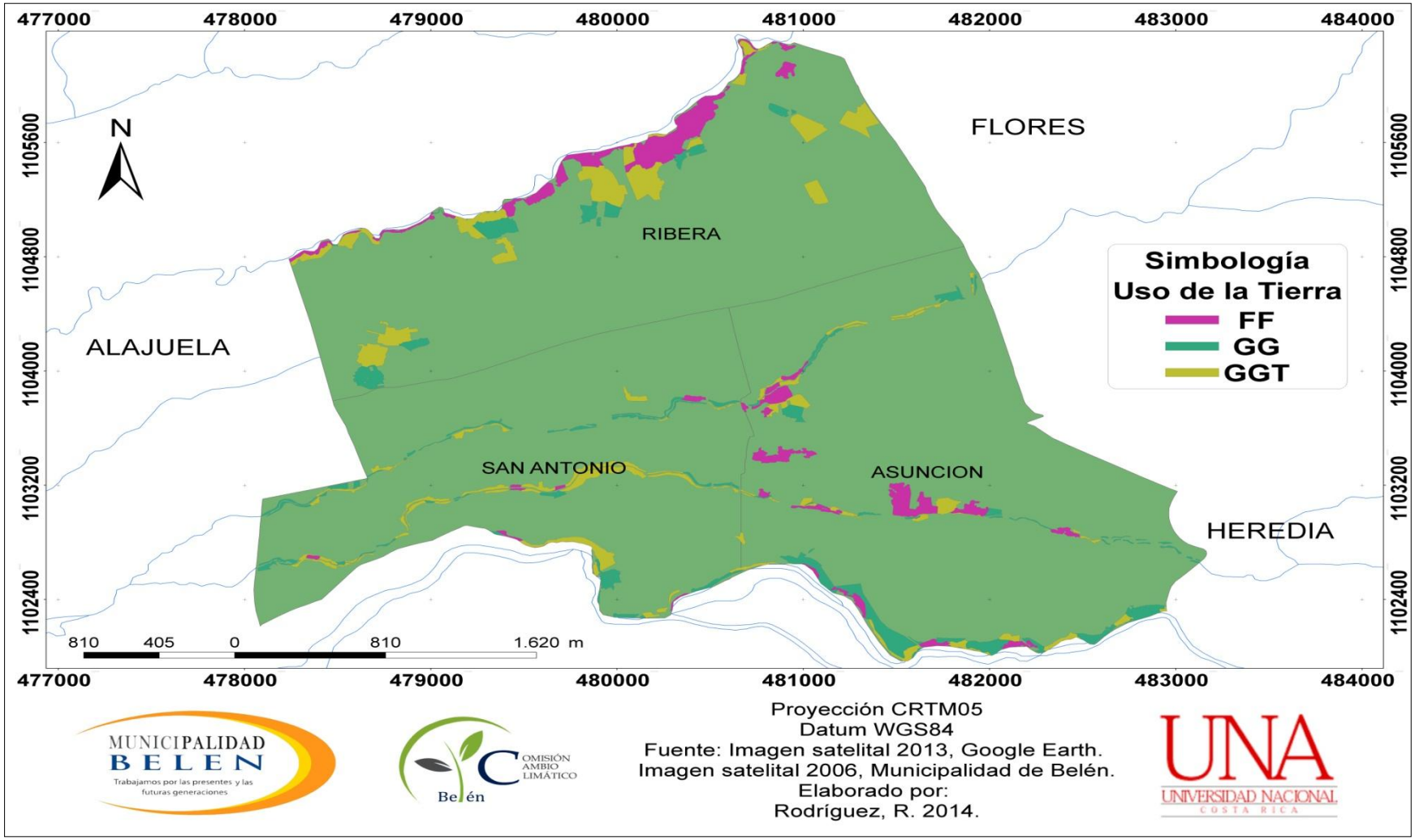
Entiéndase por: UT (Uso de la tierra), CA (Cultivos anuales), CP (Cultivos perennes), CPT (Cultivos perennes con árboles), FF (Bosques), FP (Plantaciones forestales), GG (Pastos), GGT (Pastos arbolados), Nube (nube), OA (Cuerpos de agua), OD (Tierra desnuda), SS (Asentamientos), SST (Árboles de asentamiento) y W (Humedales).

Anexo 11. Factores de emisión utilizados en la estimación de las emisiones generadas por prácticas agropecuarias. Fuente: IMN 2014.

Actividad	FE	Unidades	Supuestos	Fuente	PCG (IPCC 2013)	
Pastos	66,25	kg CH_4	Ganadería de carne, machos	IMN, 2014	28	2
	4.94	kg N_2O/ha/año	Estrella africana	IMN, 2014	265	13.091
Cultivos						
CA	0,01		kg N_2O/ha/año	IMN, 2014	265	0,0027
CP	2.92	kg N_2O/ha/año	Café sin sombra (200 kg N/ha); ± 0,13	IMN, 2014	265	0.7738
CPT	7.78	kg N_2O/ha/año	Café con sombra	IMN, 2014	265	20.617

Entiéndase por: FE (Factor de emisión), CA (Cultivos anuales), CP (Cultivos perennes), CPT (Cultivos perennes con árboles, y PCG (Potencial de calentamiento global).

Anexo 12. Ubicación de los usos de la tierra presentes en las zonas de protección de ríos y nacientes del cantón de Belén.



Entiéndase por: FF (Bosques), GG (Pastos), GGT (Pastos arbolados).

Anexo 13. Descripción de la Institución: Unidad Ambiental de la Municipalidad de Belén

La Unidad Ambiental fue fundada en 1999 y se consolidó como la primera unidad de este tipo en conformarse a nivel de los gobiernos municipales. Posee como objetivo "promover un desarrollo socioeconómico en equilibrio con el ambiente, garantizando una gestión adecuada de los recursos naturales, y brindando soluciones a las necesidades ambientales que tiene el cantón de Belén" (Municipalidad de Belén 2009).

La Unidad está encargada de ejecutar los diferentes "proyectos relacionados con la educación ambiental, manejo de residuos sólidos, monitoreo de las condiciones ambientales del cantón, programas de arborización, y mejoramiento ambiental, entre otros" (Municipalidad de Belén 2009). Actualmente se encuentran en ejecución los siguientes programas:

- Arborización y mejoramiento ambiental: "pretende fortalecer las áreas de protección de ríos y manantiales, en zonas sensibles dada la baja representación paisajística y la importancia de mantener el hábitat de las especies de la zona" (Municipalidad de Belén 2009).
- Alfabetización ambiental: "persigue lograr una participación consiente de la sociedad en la prevención y solución de los problemas ambientales, a través de un conocimiento y sensibilización ante los problemas socioambientales" (Municipalidad de Belén 2009).
- Residuos sólidos: consiste en un programa de recolección de residuos que se concretó con la aprobación y publicación del Plan Municipal de Gestión de Residuos Sólidos (PMGIRS) (Municipalidad de Belén 2009).
- Comportamiento Ambiental: "pretende desarrollar un sistema de monitoreo del estado de la calidad ambiental en el Cantón de Belén, el cual ha contemplado la ejecución de los programas de monitoreo y vigilancia de la calidad del aire y de los cauces de los ríos Quebrada Seca, Segundo y Bermúdez" (Municipalidad de Belén 2009).
- Comisión de Cambio Climático: la Municipalidad de Belén mediante la Unidad de Ambiente como ente ejecutor y en conjunto con la Escuela de Ciencias Ambientales como ente facilitador, iniciaron la conformación de una Comisión de Cambio Climático de carácter integral en donde se ha llamado a representantes de la empresa privada, instituciones públicas del cantón y sociedad civil en general a ser partícipe de dicha comisión, con el fin de plantear las rutas necesarias para crear e implementar políticas y estrategias de cambio climático locales.