

HONDURAS

SISTEMA ESTADÍSTICO Y GEOGRÁFICO PARA LA EVALUACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DE LOS RECURSOS BIOMÁSICOS EN LOS PAISES DEL SISTEMA DE INTEGRACIÓN CENTROAMERICANA

<http://www.wegp.unam.mx/sicabioenergy/Honduras>

Documento preparado por Raúl Tauro, José Luis Caballero y Adrián Ghilardi*

* Favor de dirigir toda correspondencia a este autor utilizando los datos de contacto proporcionados al pie de página.

PREFACIO

La Sede Subregional en México de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), en colaboración con la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), se encuentran elaborando un Sistema Estadístico y Geográfico para la Evaluación del Potencial Energético de los Recursos Biomásicos en los países del Sistema de la Integración Centroamericana (SICA) . El objetivo de la plataforma, actualmente en procesos de construcción (<http://www.wegp.unam.mx/sicabioenergy>), es que usuarios finales sin conocimientos técnicos puedan desplegar y consultar los potenciales de la bioenergía en los países del SICA, seleccionando 1) zonas geográficas de interés, 2) materias primas, 3) criterios de sustentabilidad, 4) tecnologías de transformación en calor, electricidad y/o combustibles, y 5) usuarios finales potenciales. A estas cinco funcionalidades, hemos agregado de manera emergente la capacidad de 6) optimizar la localización de centrales eléctricas a biomasa, y 7) la simulación espacio-temporal de la oferta y demanda de biomasa “tradicional” (i.e. leña y carbón vegetal para fines residenciales).

Los recursos biomásicos se organizaron en: 1) Forestal: a) subproductos del aprovechamiento y la industria forestal, b) plantaciones forestales dedicadas y c) aprovechamiento de bosques nativos, 2) Agropecuario: subproductos agrícolas, pecuarios y agroindustriales, 3) Cultivos dedicados, y 4) Residuos urbanos.

Luego de la reunión llevada a cabo en El Salvador en Mayo de 2018, se decidió separar los potenciales para calor y electricidad, llamados algunas veces “modernos” de la demanda y disponibilidad actual y futura de leña y carbón vegetal “tradicional”. Son tres los motivos que nos llevaron a esta nueva configuración del informe: Primero, el uso extendido de biomasa residencial “tradicional” en los países del SICA, y el interés explícito de los funcionarios de esos países en que se considere como un tema prioritario. Segundo, el desarrollo previo por parte de la UNAM de métodos de modelación espacial prospectiva de la oferta y demanda de leña y carbón vegetal para usos residenciales o de pequeñas industrias, lo que abre la puerta a explorar no sólo potenciales técnicos de la bioenergía, sino a integrar el componente social de acceso a la energía; lo que se liga naturalmente con los objetivos de desarrollo sostenible y la agenda 2030. Tercero, la capacidad del modelo de simulación desarrollado por la UNAM de proyectar escenarios de oferta y demanda de leña al año 2030 y 2050 incorporado simultáneamente varios *drivers* de cambio de cobertura y uso del suelo, y la incertidumbre de los datos de entrada. En otras palabras, son los análisis de biomasa tradicional los que permiten construir escenarios espaciales robustos y con cierto grado de validación, mientras que los análisis de bioenergía “moderna” requerirían de un esfuerzo de investigación similar y recurso por recurso que excede con creces los productos del presente estudio.

Por último, es primordial mencionar que la fuente original de la información proporcionada será citada en extenso en los metadatos de cada capa, tanto para la información original como para la procesada en potenciales bioenergéticos. Los metadatos son fácilmente accesibles en la plataforma mediante el símbolo de “i” al lado de cada capa o grupo de capas. Así mismo, el código web de la plataforma estará abierto para los fines que cada ministerio o secretaría participante requiera. La UNAM se compromete a albergar en equipos propios y dar mantenimiento a la plataforma hasta Diciembre de 2020 por lo menos; comprometiéndose también a colaborar en la migración de la plataforma a otro equipo, si esto fuera eventualmente necesario y a pedido de las dependencias nacionales interesadas.

CONTENIDO

Prefacio	2
Índice de Figuras	5
Índice de Tablas	5
Introducción.....	6
Inventario de la biomasa	8
Biomasa forestal	9
Subproductos del aprovechamiento y la industria forestal	9
Fuentes de producción	9
Consumo actual.....	10
Plantaciones forestales dedicadas.....	10
Fuentes de producción	10
Aprovechamiento de bosques nativos.....	12
Fuentes de producción	12
Consumo actual.....	16
Biomasa de residuos agrícolas.....	17
Subproductos agrícolas, pecuarios y agroindustriales	17
Consumo actual.....	17
Cultivos dedicados	17
Fuente	17
Metodología	20
Línea de base	20
Selección de la base espacial.....	21
Módulo de demanda	21
Módulo de oferta	23
Subproductos del aprovechamiento y la industria forestal	24
Plantaciones forestales dedicadas.....	24
Aprovechamiento de bosques nativos.....	24
Biomasa de residuos agrícolas.....	25
Subproductos agrícolas, pecuarios y agroindustriales	25
Cultivos dedicados	25

Residuos urbanos	25
Módulo de integración	26
Análisis del consumo actual	26
Oferta potencial para calor y electricidad.....	27
Uso de leña y carbón vegetal: biomasa "tradicional"	28
Introducción a Mofuss.....	29
Modulo de demanda	30
Módulo de oferta	31
Módulo de oferta vs demanda: simulación dinámica de eventos de cosecha y revegetación del paisaje por crecimiento natural.....	32
Direcciones futuras de trabajo.....	33
Análisis prospectivo (escenario pesimista, tendencial y optimista) hacia 2030	35
Conclusiones genereales del estudio de caso	38
Bibliografía	38

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Consumo total de energía en Honduras, BID (2017).	7
Figura 2. Áreas con potencial para plantaciones forestales para energía	12
Figura 3. Distribución espacial de accesibilidad de biomasa proveniente de bosques.	14
Figura 4. Distribución espacial de accesibilidad de biomasa proveniente de matorrales.	15
Figura 5. Distribución espacial de accesibilidad de biomasa proveniente de manglares.	16
Figura 6. Área potencial para el cultivo de caña de azúcar.....	18
Figura 7. Área potencial para el cultivo de palma de aceite.....	19
Figura 8. Comportamiento de AGB, NRB, fNRB y uso total de leña.....	36
Figura 9. Comportamiento espacial de AGB, NRB, fNRB, leña procedente de la deforestación y uso total de leña en el escenario BaU.....	37

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Potencial energético de subproductos de la extracción forestal y la industria maderera	10
Tabla 2. Potencial teórico para la producción de madera para energía a partir de plantaciones forestales.	11
Tabla 3. Existencias y productividad de combustibles de madera provenientes de bosques naturales (potencial teórico).....	13
Tabla 4. Ejemplo del potencial técnico de biomasa proveniente de bosques naturales	13
Tabla 5. Potencial técnico para la producción de etanol y biodiesel.....	20
Tabla 6. Coeficientes preliminares para el uso de diferentes recursos biomásicos.....	22
Tabla 7. Demanda actual de biomasa en el sector eléctrico de Honduras	26
Tabla 8. Potencial técnico total de recursos biomásicos para uso energético	27

INTRODUCCIÓN

Evaluar la magnitud absoluta y la disponibilidad efectiva de los recursos de bioenergía es una tarea compleja debido a su amplia y dispersa distribución en el espacio geográfico, la producción estacional y el carácter más o menos perecedero de los mismos. Para lograrlo, es necesario desarrollar sistemas de información capaces de evaluar la disponibilidad de estos recursos, su localización geográfica, su régimen de propiedad y sus limitaciones de uso (por accesibilidad, condiciones legales o económicas). Por ello, se reconoce en general que el desarrollo de metodologías capaces de estimar las existencias reales y el potencial de producción es una primera prioridad en todo esfuerzo serio para promover el aprovechamiento sustentable de los recursos bioenergéticos.

La bioenergía es la principal fuente de energía renovable, se prevé que suministrará 60 EJ en el 2015 ([REN21, 2016](#)). La mayor parte de la bioenergía proviene de la biomasa sólida, donde el 65% se usa en el sector residencial para usos tradicionales (cocción de alimentos con leña en zonas rurales y periurbanas). Alrededor del 35% restante se utiliza con tecnologías modernas, principalmente para la producción de calor y, en menor medida, para generar energía eléctrica ([REN21, 2017](#)). La [IEA \(2012\)](#) predice un aumento en el uso de biocombustibles sólidos (BCS) a nivel mundial de 160 EJ para el 2050, de los cuales 100 EJ serían para generación de calor y electricidad; cubriendo de esta forma el 7.5% de la producción mundial de energía, el 15% de la demanda de calor industrial y el 20% de la calefacción residencial.

En Centroamérica y el Caribe la biomasa se emplea principalmente en tecnologías tradicionales para la cocción de alimentos y para calentar agua. En Haití, el 92% de la población depende del uso de biomasa en dispositivos tradicionales para estas tareas, mientras que en Honduras, Guatemala y Nicaragua, más del 50% de la población utiliza estas tecnologías ([REN21, 2017](#)). En Belice, el uso de bioenergía está conformado principalmente por el uso de leña en el sector residencial y en pequeñas industrias para la producción de tortillas y cal. De acuerdo con la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), en 2007 el 30,4% del consumo de combustible para cocinar en Guatemala, El Salvador, Honduras, Nicaragua y Panamá correspondía a leña, principalmente en zonas rurales (sólo superado por el GLP, que representa casi 65% del consumo de combustible para cocinar). Son muy pocos países los que consideran proyectos para producción de electricidad con biomasa, y para uso de biogás y biocombustibles líquidos, tal es el caso de Guatemala, República Dominicana y Nicaragua ([LCMEXL, 2017](#)).

En Honduras, la leña ocupa un porcentaje muy importante en la matriz energética nacional, con un consumo aproximado a 1.57 barriles equivalentes de petróleo (BEP) por cápita, comparado con el consumo promedio de 0.6 BEP en América Latina y el Caribe ([Flores et al., 2010](#)). El 44% del consumo total de energía en el país para el año 2013 provino de energías renovables (figura 1), de las cuales, el 90% fue suministrado por leña y otros desechos ([BID, 2017](#)), el resto se repartió entre energía hidráulica, solar y eólica. La mayor demanda de leña es para cubrir las necesidades del sector residencial. Otra menor parte de biomasa se utiliza en el sector industrial y eléctrico, donde predomina el uso de residuos de caña de azúcar.

Respecto a la enorme dependencia de los recursos biomásicos para cubrir las necesidades energéticas del país, existen pocos estudios que evalúen el potencial de bioenergía en Honduras, y menos aún, estudios de potencial que utilizan Sistema de Información Geográfico (SIG) como herramienta de análisis. Entre los trabajos más destacados se pueden destacar los siguientes:

- [\(Flores et al., 2010\)](#) evaluaron el potencial de bioenergía para incrementar su participación en la matriz energética. Estimaron un potencial teórico para producción de electricidad con bagazo de caña de azúcar que podría alcanzar los 163 MWe. Estiman que se necesitan 540,000 ha de cultivo de palma y 426,000 ha de jatropha para cubrir el total de la demanda nacional de diésel. Si se aprovecharan los residuos generados de la producción de café, se podrían generar 16 MWe de electricidad.
- [\(Drigo et al., 2015\)](#) utilizan el modelo de WISDOM para estimar espacialmente la oferta y demanda sustentable de leña en Honduras.
- [\(Checo y de Frías, 2017\)](#), utilizaron ARC-GIS y otras herramientas de SIG para analizar y combinar variables edafológicas, climáticas y de uso actual de suelos de la Honduras, para ubicar, identificar y cuantificar las mejores superficies del país para producción a gran escala de gramíneas y de especies arbóreas de rápido crecimiento para producir biomasa para energía.

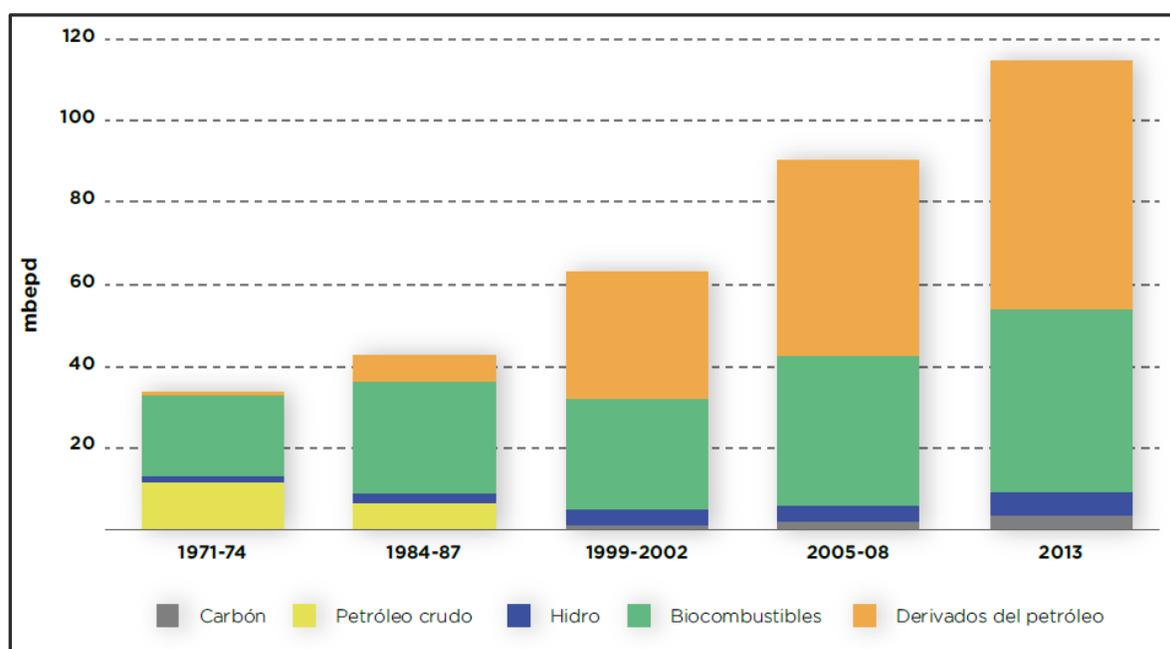


Figura 1. Consumo total de energía en Honduras, [BID \(2017\)](#).

Son pocos los estudios que hasta el momento utilizan SIG para el análisis espacial de la oferta y demanda de biomasa en Honduras. Sin embargo, no existen estudios espacialmente explícitos y con proyección a futuro, que integren la oferta de los recursos biomásicos más importantes para la producción de energía con la demanda anual de bioenergía en el país.

El principal objetivo de este proyecto es generar estimaciones estadísticamente robustas, espacialmente explícitas, y con proyección a futuro, del potencial técnico de una serie de recursos biomásicos disponibles en Honduras para la generación de calor y electricidad. Los recursos biomásicos a evaluar son: 1) Forestal: a) subproductos del aprovechamiento y la industria forestal, b) plantaciones forestales dedicadas y c) aprovechamiento de bosques nativos, 2) Agropecuario: subproductos agrícolas, pecuarios y agroindustriales, 3) Cultivos dedicados, y 4) Residuos sólidos urbanos.

Algunos de estos recursos ya se utilizan con fines energéticos (e.g. leña por el sector residencial, carbón vegetal por el sector comercial, bagazo de caña en ingenios azucareros); y para otros usos no energéticos como alimento para ganado, abono para suelos, entre otros. Por esta razón, contemplará la demanda actual de los recursos biomásicos, con el propósito de compararla y/o descontarla de los recursos disponibles. Una parte de los productos son modelos de simulación espaciotemporal que permitan comparar escenarios alternativos en cuanto a disponibilidad de recursos biomásico, su procesamiento, y posterior transformación en energía y uso final. En términos teórico-conceptuales se harán aportes en las áreas de manejo sustentable de recursos biomásicos, mitigación del cambio climático y modelado espacio-temporal. Un compromiso esencial de este proyecto es la formación de recursos humanos para que los puntos de enlace de los países del SICA tomen la mayor independencia posible en cuanto al mantenimiento y actualización del sistema estadístico y geográfico.

Además del desarrollo de metodologías que nos permitan conocer cuáles son las existencias reales de los recursos bioenergéticos y su potencial de producción a escala de país, existe otra rama de investigación orientada a optimizar la oferta de biomasa. Básicamente se busca mejorar: 1) las prácticas de manejo de los sistemas de producción, recolección y distribución de la biomasa, y 2) las tecnologías de conversión de la biomasa en energía. Estos dos puntos incluyen una colección de “subtemas” de investigación tan variados como el desarrollo de sistemas de manejo multipropósito (principalmente agrícolas y forestales), la búsqueda de especies forestales promisorias o el desarrollo de tecnologías eficientes de conversión de la biomasa en energía. Aunque se reconoce la importancia de este tipo de estudios en una evaluación integral de los recursos bioenergéticos de Honduras, no se han considerado en el presente estudio aspectos relacionados con este tema.

En este trabajo se realiza un análisis de las existencias actuales de recursos bioenergéticos en Honduras. Se explora, además, el potencial técnico de las plantaciones forestales para energía. Es necesario resaltar que las estimaciones del equivalente de energía primaria de las diferentes fuentes de biomasa (potencial técnico) no contemplan ni los costos de producción (recolección, tratamiento, procesamiento, eficiencia de generación de energía, etc.) ni la competencia por usos ajenos a la producción de combustibles como, por ejemplo, la producción de alimentos u otros usos alternativos del suelo para el caso de las plantaciones forestales. La estimación del potencial real debe considerar tanto los costos de producción como el uso del suelo y los recursos para fines prioritarios con respecto a la producción de combustibles.

INVENTARIO DE LA BIOMASA – MEDIANA Y GRAN POTENCIA

Los recursos de biomasa para energía comprenden una variada gama de fuentes primarias –es decir, aquellas en que la biomasa para energía se obtiene directamente con este fin- y secundarias –aquellas fuentes en las que la biomasa para energía es un sub-producto de otras actividades económicas-. Entre las fuentes primarias destacan los bosques y selvas nativos, y las plantaciones o cultivos para energía. Entre las fuentes secundarias están los residuos del aprovechamiento y la industrialización de la madera, los residuos de cultivos agrícolas y los residuos agroindustriales, entre otros.

A nivel nacional, el principal recurso biomásico utilizado para fines energéticos proviene del sector forestal, principalmente de actividades de aprovechamiento forestal (fuentes primarias) y de centros de transformación primario de la madera (fuentes secundarias). En el sector agrícola, los residuos agrícolas y los agroindustriales (secundarios) se utilizan en las mismas agroindustrias sustituyendo combustibles fósiles para generación eléctrica o para cogeneración. Los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) son otro recurso biomásico que podría ser utilizado para la producción de energía eléctrica en ciudades como solución al problema que ocasiona el manejo y la disposición final de los mismos.

Aunque actualmente no se cuenta con información oficial sobre el consumo de biocombustibles líquidos en el sector transporte, existen en el país tierras que podrían ser aptas para la producción de cultivos dedicados, como por ejemplo, la caña de azúcar para la producción de bioetanol o la palma para la producción de biodiesel. De esta forma, se podría ampliar la oferta actual de biocombustibles líquidos, para ser utilizados en el mercado interno o como alternativa para exportación.

BIOMASA FORESTAL

De acuerdo con el Anuario Estadístico Forestal de Honduras ([AEFH, 2015](#)), la cobertura forestal alcanza los 5,4 millones de hectáreas en el país, donde predomina el bosque latifoliado (57%) seguido de los bosques de coníferas (36.7%). La producción maderable ha sido perjudicada en los últimos años por el ataque de plagas, principalmente en los bosques de pino. Además, los bosques son vulnerables a los incendios forestales que anualmente afectan a miles de hectáreas. Estos fenómenos necesitan un control y manejo adecuado, que resultaría en importantes cantidades de biomasa disponible para fines energéticos.

SUBPRODUCTOS DEL APROVECHAMIENTO Y LA INDUSTRIA FORESTAL

FUENTES DE PRODUCCIÓN

Se consideraron dos categorías generales: a) subproductos de la extracción forestal, que corresponden a los subproductos que se generan durante las prácticas de extracción de la madera comercial (en rollo), y está conformado por ramas, puntas y árboles con diámetros no comerciales, y b) subproductos de la industria maderera, que corresponden a los residuos que se generan principalmente en los aserraderos, principalmente aserrín, costeros, corteza, puntas y recortes.

El potencial técnico total de subproductos forestales se estimó en 3.5 PJ/año (Tabla 1). Aunque los residuos de la industria maderera son la mitad de los provenientes del monte, es importante notar que los primeros, tienen una dispersión espacial mucho menor que los provenientes de bosques nativos. Esta diferencia debe ser considerada al plantear opciones de aprovechamiento energético y para evaluar las cadenas logísticas apropiadas para su uso final.

Tabla 1. Potencial energético de subproductos de la extracción forestal y la industria maderera

Tipo de recurso	Volumen de la producción forestal maderable o aserrada (Millones de m ³ r)	Coefficiente de generación de residuos (%)	Disponibilidad de residuos (Millones tMS/año)	Equivalente en energía primaria (PJ/año)
Subproductos de la extracción forestal	0.52	0.5	0.13	2.3
Subproductos de la industria maderera	0.28	0.5	0.07	1.2
TOTAL				3.5

CONSUMO ACTUAL

Los principales productos no maderables que se aprovechan en los planes de manejo son la leña, el carbón y las astillas de ocote, destinadas principalmente al sector residencial. No existen datos de la demanda actual de biocombustibles sólidos procesados (ejemplo, pellets o astillas) en tecnologías de pequeña o gran escala.

PLANTACIONES FORESTALES DEDICADAS

FUENTES DE PRODUCCIÓN

Para la estimación del potencial de plantaciones energéticas se incluyeron solamente las áreas de vocación forestal con vegetación secundaria, considerando que no es recomendable establecer plantaciones donde existen actualmente bosques, selvas u otros usos productivos del suelo. La metodología se basa en la clasificación de áreas según su aptitud de calidad para la producción de madera para energía.

De acuerdo con las superficies obtenidas de los mapas a través de la plataforma web, se calcula la disponibilidad de madera para fines energéticos, obteniéndose un potencial teórico, que puede o no desarrollarse, a diferencia del potencial energético estimado para la industria forestal y los bosques nativos, que considera la existencia actual de los recursos y se entiende como un potencial técnico de disponibilidad inmediata.

En la Tabla 2 se muestra la diferencia entre los distintos potenciales energéticos que se pueden obtener por medio de la plataforma web, que considera al Eucalipto como plantación dedicada. En la primera fila se puede observar el potencial teórico máximo existente para todo el país (1,878 PJ/año), sin contemplar restricciones físicas de acceso a las plantaciones y sin considerar las áreas naturales protegidas. Para llevar estos potenciales a valores reales, la plataforma permite restringir la oferta de biomasa seleccionando ciertos criterios de accesibilidad. Por ejemplo, si consideramos que la infraestructura es adecuada como para aprovechar el recurso biomásico que se encuentra en radios

menores a 10 km de las localidades y a 3 km de las carreteras, obtenemos un potencial mayor a 1,123 PJ/año (véase segunda fila Tabla 2). Por lo contrario, al excluir las ANP y las pendientes mayores a 10° en la plataforma, y seleccionando los criterios de accesibilidad mínima, obtenemos el potencial mínimo mostrado en la última fila de la Tabla.

Tabla 2. Potencial teórico para la producción de madera para energía a partir de plantaciones forestales.

Potenciales	Superficie (Millones de ha)	Disponibilidad de madera para energía (Millones de tMS/año)	Equivalente en energía primaria (PJ/año)	Potencia eléctrica instalada (GWe)
Potencial máximo	10.9	104.3	1,878	14.0
Potencial con accesibilidad máxima	6.5	62.4	1,123	8.4
Potencial mínimo	0.1	1.3	24	0.2

La disponibilidad de madera estimada en la Tabla anterior puede ser convertida en energía térmica o eléctrica mediante el uso de las cadenas logísticas de la plataforma. A modo de ejemplo, si consideramos el potencial mínimo (1.3 millones de tMS/año), podemos obtener una potencia eléctrica instalada de **177 MWe (0.2 GWe)**. Para llegar a este valor se consideró la transformación de la plantación en astillas, con un contenido de humedad del 35% y un coeficiente de aprovechamiento del recurso del 90%. Para la conversión energética se utilizó una eficiencia de planta del 30%, conversión energética del recurso de 5 MWh/tMS y factor de disponibilidad del 80%. Para más información ver la Tabla 6 de la sección de metodología.

En la Figura 2 se puede observar la representación del potencial teórico máximo en todo el país. Como se explicó anteriormente, el área seleccionada no contempla ninguna restricción física de acceso al recurso ni tampoco considera restricciones por uso de suelos. Se pueden ver tres categorías de productividades de acuerdo a los índices de aptitud del sitio (ver detalles en sección de Metodología), que van desde 6.7 hasta 2.1 tMS/ha/año. La suma de las superficies para cada índice de aptitud da el total de 11 millones de ha, como la correspondiente al potencial máximo estimado en la Tabla 2.

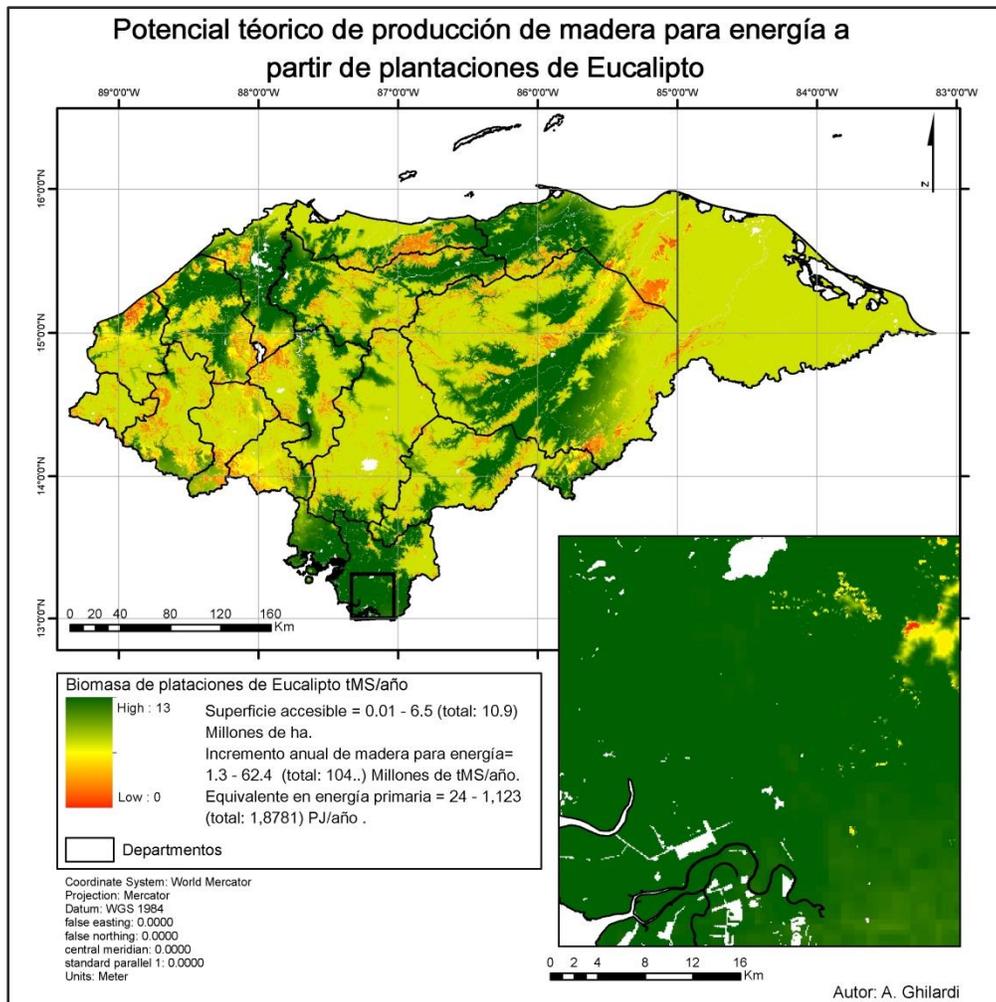


Figura 2. Áreas con potencial para plantaciones forestales para energía

CONSUMO ACTUAL

Existe poca información disponible sobre la demanda energética de las plantaciones forestales en Honduras.

APROVECHAMIENTO DE BOSQUES NATIVOS

FUENTES DE PRODUCCIÓN

Las fuentes de recursos actualmente incluyen a la biomasa leñosa (viva o muerta) directamente extraída de árboles y arbustos que crecen en bosques naturales y otras coberturas leñosas (por ejemplo, matorrales). Se excluyen las partes de los árboles y arbustos que se destinan a usos no energéticos (madera para aserrar, para construcción, celulosa y papel, etc.), las cuales se deducen aplicando un

coeficiente o factor de uso energético (FUE = biomasa apta solamente para energía / biomasa leñosa total). Se supone el uso energético de los bosques como complemento y no como uso exclusivo.

Existe un potencial muy importante en los bosques naturales que podría ser aprovechado con fines energéticos. Como referencia, el potencial máximo obtenido (301 PJ/año) podría sustituir más del 14 % de la demanda energética total del país en el año 2013, según datos del [BID \(2017\)](#). En la Tabla 3 se detallan los potenciales teóricos para diferentes tipos de coberturas forestales. Este potencial no considera ningún tipo de restricción física de acceso a la biomasa. Sin embargo, es necesario considerar ciertas restricciones para el aprovechamiento del recurso, que convierte al potencial teórico en un potencial técnico.

Tabla 3. Existencias y productividad de combustibles de madera provenientes de bosques naturales (potencial teórico)

Tipo de cobertura forestal	Superficie accesible (Millones ha)	Productividad máxima (tMS/ha/año)	Incremento anual de madera para energía (millones tMS/año)	Equivalente en energía primaria (PJ/año)
Bosque	5.80	2	10.6	191
Matorral	2.30	3	5.9	106
Mangle	0.04	6	0.2	4
TOTAL				301

Nota: el valor total puede no coincidir por el redondeo de cifras. Para datos exactos ver en la plataforma

En la siguiente Tabla se puede apreciar el potencial técnico para los diferentes tipos de vegetación, que resulta de aplicar filtros al potencial teórico en la plataforma web. Se puede ver para cada tipo de vegetación un valor mínimo y otro máximo de superficie, obtenidas al seleccionar en la plataforma los criterios de accesibilidad. Por ejemplo, al partir del potencial teórico de Bosque (191 PJ/año, véase Tabla 3), se pueden seleccionar las opciones de accesibilidad mínima o máxima, obteniendo superficies entre 2.6 y 3.9 millones de hectáreas, que multiplicadas por la productividad de cada sitio resulta un potencial técnico que varía entre 90 y 131 PJ/año

Tabla 4. Ejemplo del potencial técnico de biomasa proveniente de bosques naturales

Tipo de cobertura forestal	Superficie accesible (Millones ha)	Incremento anual de madera para energía (millones tMS/año)	Equivalente en energía primaria (PJ/año)	Ejemplo: potencia eléctrica instalada (GWe)
Bosque	2.6 – 3.9	5.0 - 7.3	90 – 131	1.50
Matorral	1.4 – 1.9	3.8 – 4.8	69 – 87	1.04
Mangle	0.01 – 0.03	0.08 – 0.20	1.5 – 3.6	0.04
TOTAL				2.58

La disponibilidad de madera estimada en la Tabla anterior puede ser convertida en energía térmica o eléctrica mediante el uso de las cadenas logísticas de la plataforma. A modo de ejemplo, si consideramos las superficies accesibles máximas para cada vegetación (7.3, 4.8, 0.2 millones de tMS/año respectivamente), podemos calcular la potencia eléctrica instalada total para bosques naturales igual a **2.58 GWe**. Para llegar a este valor se consideró la transformación de los recursos en pellets, con un contenido de humedad del 10% y un coeficiente de aprovechamiento del recurso del 80%. Para la conversión energética se utilizó una eficiencia de planta del 30%, conversión energética del recurso de 5 MWh/tMS y factor de planta del 80%.

En las Figuras 3-5 se puede ver la distribución espacial de los tipos de vegetación a lo largo de todo el país. Se puede apreciar que predomina la existencia de bosques ampliamente distribuidos en el territorio. Para el aprovechamiento energético de este recurso, es muy importante considerar los costos asociados a su extracción y transporte. Estos costos dependen principalmente del acceso a tecnologías eficientes para la extracción de madera y de las condiciones de la infraestructura de caminos.

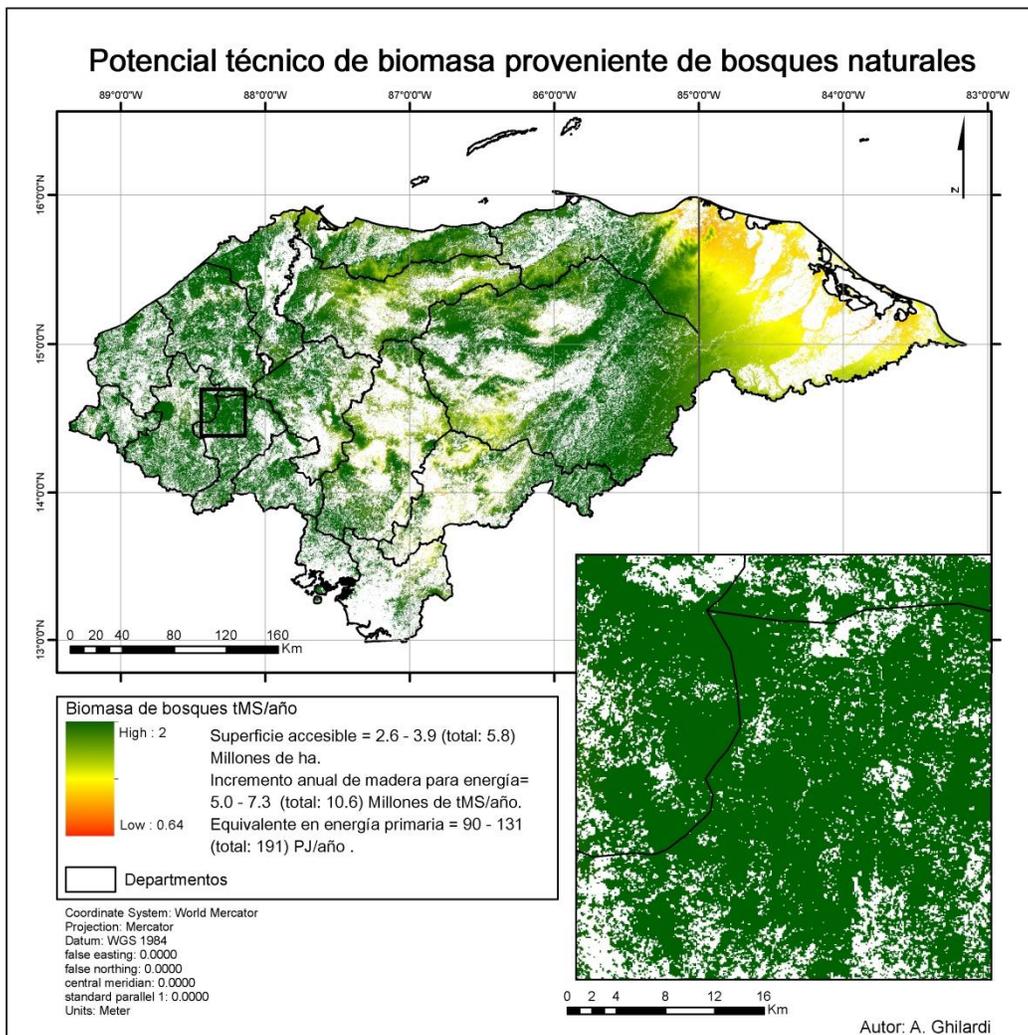


Figura 3. Distribución espacial de accesibilidad de biomasa proveniente de bosques.

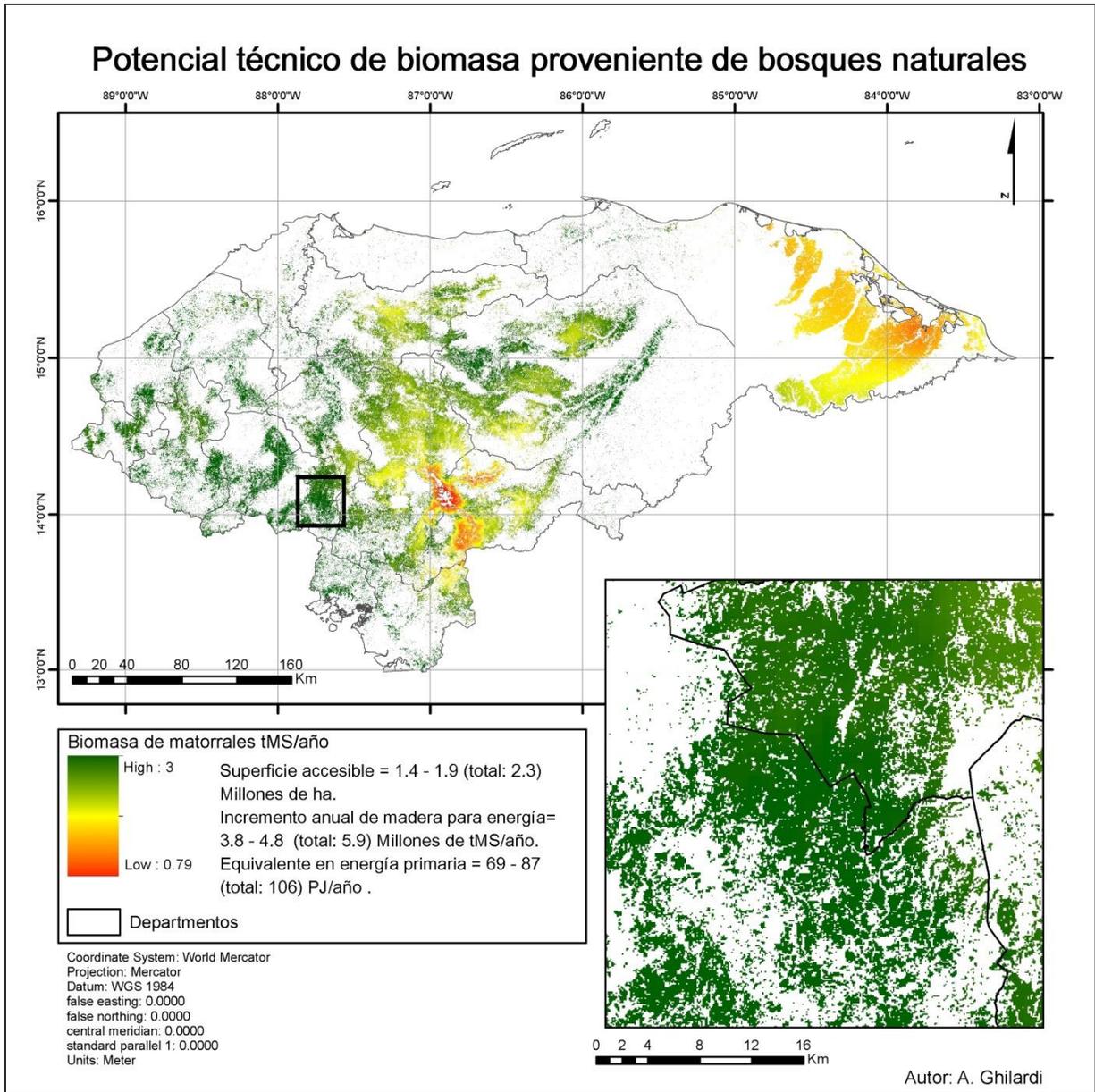


Figura 4. Distribución espacial de accesibilidad de biomasa proveniente de matorrales.

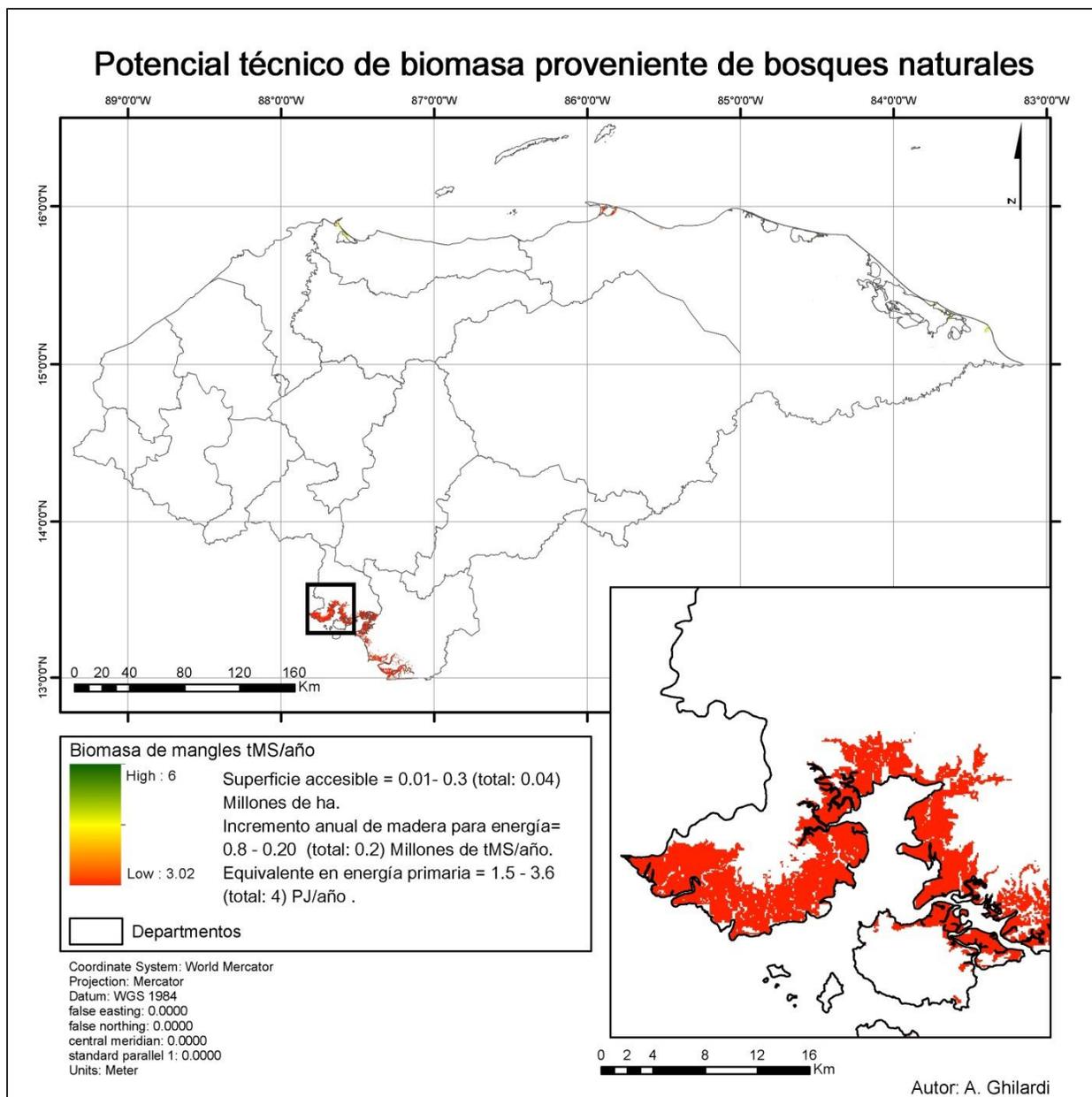


Figura 5. Distribución espacial de accesibilidad de biomasa proveniente de manglares.

CONSUMO ACTUAL

La biomasa proveniente de los bosques nativos se utiliza principalmente para la producción de leña y carbón. Como se mencionó anteriormente, Honduras tiene una gran dependencia de la leña para cubrir las necesidades energéticas del sector rural, con un consumo aproximado a 1.57 barriles equivalentes de petróleo (BEP) por cápita por día.

BIOMASA DE RESIDUOS AGRÍCOLAS

Un importante porcentaje de residuos agroindustriales se utilizan en el sector industrial para cogenerar o bien para generar electricidad para la red nacional de distribución. Los principales recursos son el bagazo de caña de azúcar y algunos pastos de rápido crecimiento como el King Grass.

Es importante evaluar el potencial de producción de biogás por medio de residuos del sector pecuario, que podría ser utilizado para generar electricidad para autoconsumo o para interconexión.

SUBPRODUCTOS AGRÍCOLAS, PECUARIOS Y AGROINDUSTRIALES

FUENTES

No se cuenta con información sobre estos recursos.

CONSUMO ACTUAL

No se cuenta con información detallada.

CULTIVOS DEDICADOS

FUENTE

Se estimó el potencial de producción de etanol y biodiesel por medio de plantaciones dedicadas de caña de azúcar y de palma de aceite respectivamente. Al igual que en el sector forestal, se consideraron tres clases de productividad de los cultivos de acuerdo a la aptitud del terreno.

La caña de azúcar es uno de los principales cultivos en Honduras, cuya producción anual se destina principalmente al consumo nacional y un menor porcentaje (aproximadamente un 30%) se destina a la exportación. A pesar de que actualmente se proyectan aumentos de la producción anual, existen tierras disponibles que podrían estar aptas para el cultivo de caña con fines energéticos, principalmente para la producción de bioetanol.

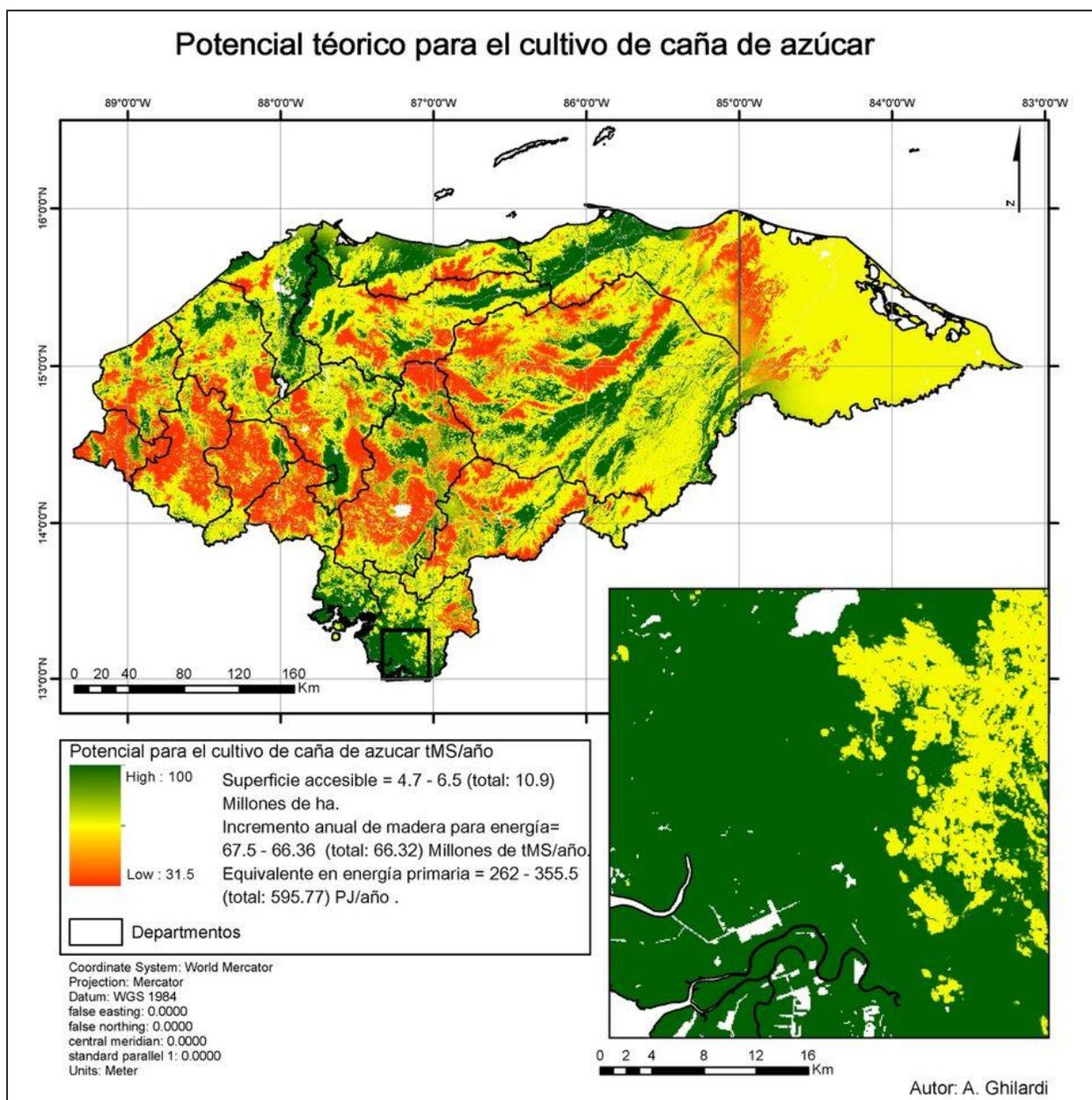


Figura 6. Área potencial para el cultivo de caña de azúcar

Honduras es uno de los mayores productores y exportadores de aceite de palma en América Latina, y el mayor cliente es el mercado europeo. Sin embargo, frente a la incertidumbre que genera el consumo de este aceite en Europa para los próximos años, es imprescindible desarrollar un mercado y uso local del aceite, que podría estar basado en la producción de biodiesel. Además de las tierras que actualmente se emplean para el cultivo de la palma, es interesante analizar tierras potenciales disponibles que permitan aumentar la producción, como se muestra en la Figura 7.

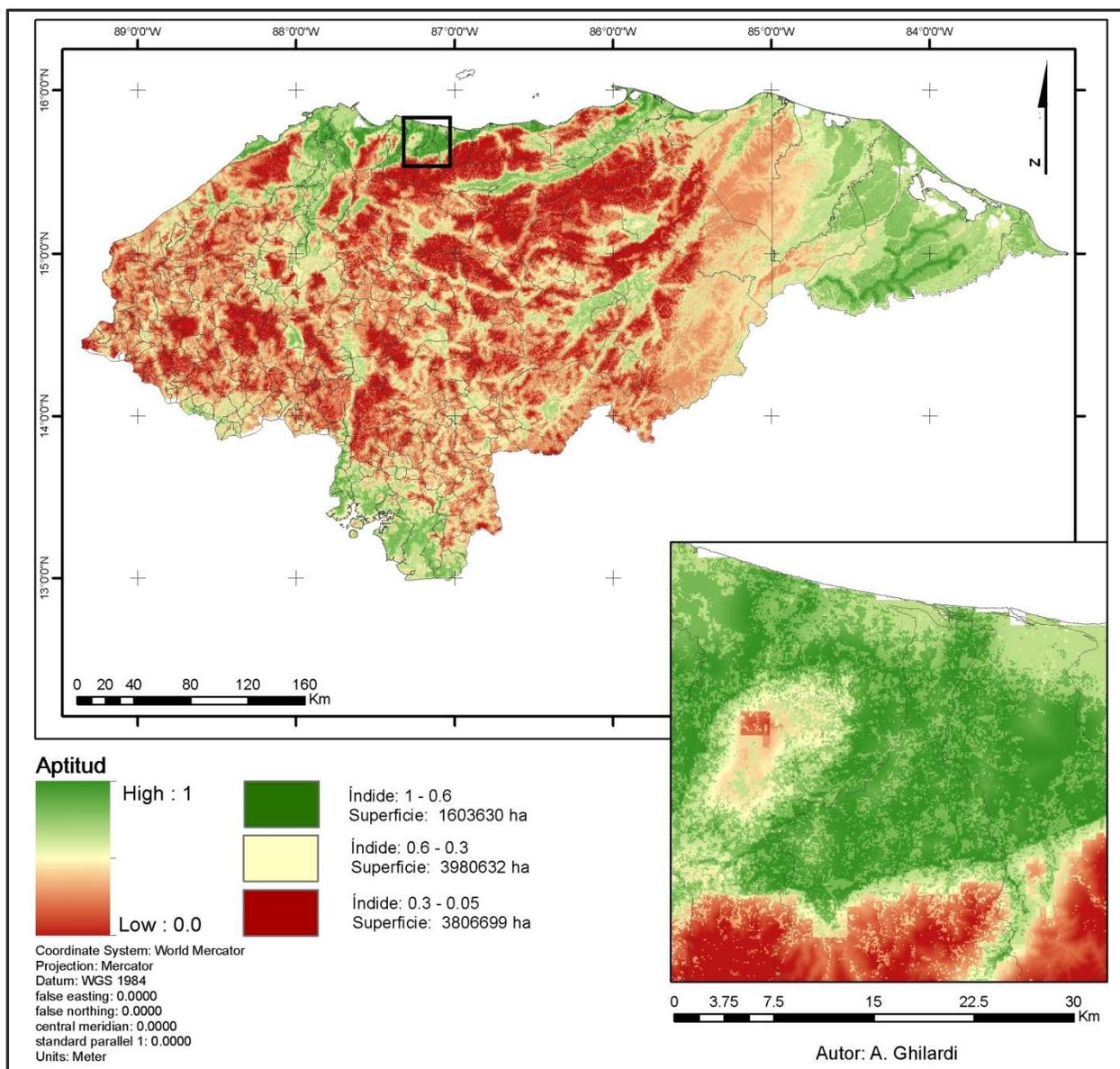


Figura 7. Área potencial para el cultivo de palma de aceite

En la Tabla 5 se resumen los potenciales de cada cultivo según las productividades, que varían de acuerdo al índice de aptitud del terreno y a los criterios de accesibilidad. A modo de ejemplo, la caña de azúcar tiene un potencial teórico máximo que alcanza los 596 PJ/año. En la plataforma se pueden seleccionar filtros, como el límite de accesibilidad máxima al recurso, con lo cual el potencial disminuye a 356 PJ/año. En el caso más conservativo, se pueden seleccionar las opciones de accesibilidad mínima y restringir las ANP, con lo cual se podrían producir más de **2,470 millones de litros de etanol**, con un equivalente energético igual a 29 PJ/año. La misma explicación aplica al cultivo de palma, que al considerar los criterios más conservativos se podrían producir aproximadamente **1,166 millones de litros de biodiesel**.

Tabla 5. Potencial técnico para la producción de etanol y biodiesel.

Cultivo	Superficie accesible	Superficie potencial (millones ha)	Rendimiento máximo del cultivo según aptitud (t/ha)	Producción cultivo (millones t)	Producción de biocombustible (millones litros)	Equivalente energético (PJ/año)
Etanol						
Caña de azúcar	Sin filtro	10.9	66.3	727	50,587	596 *
	Máxima	6.5	66.3	434	30,166	356 *
	Mínima	0.6	58.8	35	2,470	29 *
Biodiesel						
Palma de aceite	Sin filtro	4.0	26.1	105	31,320	1,394
	Máxima	1.6	25.7	42	12,336	566
	Mínima	0.2	25.9	4	1,166	50

* Nota: El equivalente energético del cultivo de caña de azúcar considera que sólo el 50% de la producción estaría destinada a la producción de etanol.

METODOLOGÍA

Como se describió en la sección sobre el inventario de la biomasa en Honduras, los recursos biomásicos que se evaluaron en función de la disponibilidad de información fueron: 1) Forestal: a) subproductos del aprovechamiento y la industria forestal, b) plantaciones forestales dedicadas y c) aprovechamiento de bosques nativos, y 2) Cultivos dedicados. A continuación se detallan los pasos seguidos para la determinación del potencial en cada caso. Primero se explica cómo se genera la línea base de evaluación, posteriormente se describen los módulos de demanda y de oferta para cada potencial de tecnología considerada, y finalmente se explica el módulo de integración, haciendo énfasis principalmente en el uso de leña a pequeña escala.

LÍNEA DE BASE

Para generar la línea de base de evaluación, es necesario completar y/o actualizar la información faltante en los siguientes casos:

Tabla 1: Faltan capas sobre ubicación y capacidad de producción de los centros de transformación de la madera, además de las zonas de aprovechamiento forestal con sus volúmenes y géneros autorizados.

Tabla 2: Falta actualizar la productividad promedio de acuerdo a las condiciones locales de crecimiento. Sería necesario referenciar las calidades de suelo con las condiciones de aptitud de plantaciones.

Tabla 3: Ídem anterior

Tabla 5 y Figuras 4 y 5: Faltan capas de los cultivos de caña, de palma o de sus residuos, siendo la caña de azúcar el principal cultivo de Honduras. Se puede actualizar la tabla con cultivos que se consideren de interés regional.

Falta información sobre producción agrícola y pecuaria, sus capas de distribución de establos y sus producciones (o números de cabezas).

Faltan información y capas sobre rellenos sanitarios y sus respectivas capacidades.

SELECCIÓN DE LA BASE ESPACIAL

La base de datos espacial seleccionada varía conforme a los diferentes recursos biomásicos, debido sobre todo al formato en que viene la información original sobre la distribución de materias primas, y también en función de otras variables espaciales que se utilizan para afectar estos recursos. Por ejemplo, los mapas de biomasa aérea son generalmente mapas raster (celdas cuadradas) de entre 30 y 100 metros de lado (i.e. de resolución) mientras que la información de producción agrícola viene generalmente por unidades administrativas como estados, departamentos o municipios (polígonos vectoriales). Los residuos urbanos, por ejemplo, generalmente se presentan en formato vectorial, pero de puntos en vez de polígonos, que representan los lugares puntuales de origen. La información original muchas veces no viene en un formato espacial propiamente dicho, sino que se presenta en tablas desagregadas en el mejor de los casos haciendo referencia por sitios que pueden tener una representación espacial pero que para lograr su espacialización efectiva y representación en forma de mapas deben integrarse con capas espaciales existentes. El caso más común es cuando las tablas de información vienen listadas por unidades administrativas o estadísticas de las cuales se cuenta con el "mapa base". Si por el contrario, no se tiene datos espaciales sobre las unidades a las que las filas de la tabla en cuestión hacen referencia, es necesario o bien producir el mapa vectorial para que "empate", o agrupar las filas con la fortuna de que varias unidades no mapeadas coincidan con alguna otra unidad mapeada: por ejemplo, si uno cuenta con un mapa solamente de provincias, pero a información tabular está por municipios, será necesario entonces sumar la producción municipal por cada Provincia del mapa a fin de que hay coincidencia y esta pueda ser mapeada.

En el caso del presente reporte, pero sobre todo de la geo-plataforma del SICA, la base espacial de cada recurso se reconoce de manera implícita durante el despliegue de la información y en los metadatos de cada recurso primario y sus vías de transformación en energía.

MÓDULO DE DEMANDA

La demanda actual de biomasa en Honduras está diferenciada en dos grandes sectores y tipos de tecnologías. La demanda del sector residencial/comercial, caracterizada principalmente por medio de tecnologías de pequeña potencia, y la demanda de mediana y alta potencia, referida al sector industrial y a la generación de energía eléctrica. En la plataforma web se ha realizado esta clasificación, pudiéndose visualizar en el panel izquierdo las capas de oferta y demanda para cada escala de potencia mencionada.

Aunque actualmente la mayor demanda de bioenergía en el país es por medio del uso de leña en el sector residencial y de pequeñas industrias, existe un uso creciente en el sector industrial y eléctrico. Cada vez son más las empresas, principalmente agroindustrias, que aprovechan sus residuos para la producción de vapor de proceso y la cogeneración. También el sector eléctrico utiliza biomasa, principalmente bagazo de caña de azúcar, para generar electricidad para autoconsumo o para interconectarse con la red eléctrica nacional. A continuación se explican las fórmulas utilizadas para estimar la demanda de biomasa, principalmente para tecnologías de mediana y alta potencia.

Para estimar la demanda de biomasa para usos térmicos y eléctricos se utiliza la siguiente ecuación:

$$Db = \left(\frac{P * H}{Ef / 100} \right) * PCI \quad (1)$$

Dónde: Db es la demanda de biomasa en equivalente energético (PJ/año); P es la potencia instalada de la planta (MW); H son las horas anuales de trabajo (horas/año); Ef es la eficiencia de planta (%); PCI es el poder calorífico inferior de la biomasa utilizada como combustible en la planta (GJ/tMS).

Para estimar la demanda de biomasa en el sector industrial se consideran conservativamente 3,500 horas de operación de la caldera y una eficiencia de la misma del 80%. Para la demanda del sector eléctrico, se partió del compendio de plantas de generación proporcionado por la Empresa Nacional de Energía Eléctrica (Enee) de Honduras, se utilizó el factor de carga de cada planta y la eficiencia de planta del 30%. Para convertir la unidad másica de la biomasa utilizada (tMS) a su equivalente energético (PJ) se consideró PCI promedio de 17 PJ por millón de tMS.

La eficiencia de planta es una variable que depende de las condiciones del combustible empleado, de la tecnología utilizada, de la eficiencia de la caldera, de la turbina, del generador, entre otros. En la Tabla 6 se detallan las variables más comunes, tomadas como respaldo de información en este trabajo, de acuerdo al tipo de planta y al recurso usado como combustible.

Tabla 6. Coeficientes preliminares para el uso de diferentes recursos biomásicos

Recurso	Vector energético	CH inicial (%)	CH final (%)	Uso final	Eficiencia planta (%)
Cítricos	Cáscara de cítricos	85	30	Producción vapor de proceso	70
Forestal	Astilla – Pellet	50	10	Producción vapor de proceso	85

Caña de azúcar	Bagazo	50	40	Cogeneración	78
Forestal	Astilla	50	35	Cogeneración	85
Forestal	Pellet	40	10	Cogeneración	85
Forestal	Astilla	50	35	Electricidad	30
Forestal	Pellet	40	10	Electricidad	30
Forestal	Leña	50	40	Calefacción	70
Forestal	Astilla	50	35	Calefacción	80
Forestal	Pellet	40	10	Calefacción	90
Forestal	Leña	50	40	Cocción	18
Forestal	Astilla	50	35	Cocción	30
Forestal	Pellet	40	10	Cocción	30

En la tabla anterior se puede ver la eficiencia general de la planta en forma resumida. Para cálculos más detallados, se puede determinar la potencia que podría ser instalada en función del potencial energético de los recursos biomásicos, por medio de las siguientes ecuaciones según el tipo de tecnología empleada:

- Para generación térmica o eléctrica a partir de biogás utilizando un motogenerador:

$$P = \frac{Pb * Efm * Efg}{Fp * t} \quad (2)$$

Dónde: P es la potencia que se podría instalar (MW); Pb es el potencial energético de cada recurso biomásico (MJ/año); Efm eficiencia del motor (%); Efg eficiencia del generador (%); Fp es el Factor de carga o de planta; t es el tiempo en segundo por año. Para el caso de potencia térmica se reemplazan las eficiencias eléctricas (Efm y Efg) por la eficiencia de caldera.

- Para generación térmica o eléctrica a partir de biocombustibles sólidos considerando un ciclo Rankine:

$$P = \frac{Pb * Efc * Eft * Efg}{Fp * t} \quad (3)$$

Dónde: P es la potencia que se podría instalar (MW); Pb es el potencial energético de cada recurso biomásico (MJ/año); Efc eficiencia de la caldera (%); Eft eficiencia de la turbina de vapor (%); Efg eficiencia del generador (%); Fp es el Factor de carga o de planta; t es el tiempo en segundo por año. Para el caso de potencia térmica se eliminan las eficiencias eléctricas (Eft y Efg).

MÓDULO DE OFERTA

Para estimar el potencial de biomasa apta para uso energético, se utilizó un Sistema de Información Geográfica (SIG) para el procesamiento de la información geo-estadística. En base a la superficie accesible y a la aptitud del terreno, se calculó el potencial técnico para el aprovechamiento de los recursos biomásicos. Se utilizaron mapas e información existente de la producción anual y se la afectó por la productividad o por un coeficiente de generación de residuos para, posteriormente, obtener el potencial energético de dichos recursos.

SUBPRODUCTOS DEL APROVECHAMIENTO Y LA INDUSTRIA FORESTAL

El volumen de la producción forestal maderable se obtuvo del Anuario Estadístico Forestal de Honduras, [AEFH \(2015\)](#), considerando el volumen de madera extraída en metros cúbicos rollo (m_{3r}) en el año 2014 que contempla los siguientes datos, 497 mil m_{3r} de coníferas y 20 mil m₃ de latifoliadas. El volumen de madera aserrada considera la proporción de la producción o extracción forestal que se destina a la industria del aserrío, incluyendo la madera destinada a la construcción, chapa y triplay, empaques, postes para transmisión de electricidad y telefonía, y durmientes de ferrocarriles. Según el [AEFH \(2015\)](#), 132 industrias reportaron su producción en el 2015, alcanzando un total de 118 millones de pie tablares (283 mil m_{3r}). Los coeficientes de generación de residuos corresponden a: a) la fracción de la extracción forestal que puede ser utilizada con fines energéticos y b) la fracción de la madera que se pierde como residuos de los aserraderos. Para ambos casos se consideró un coeficiente de generación de residuos promedio igual a 0.5, una densidad media de la madera de 0.5 tMS/m₃ y un contenido energético promedio de 18 Gigajoules/tMS.

PLANTACIONES FORESTALES DEDICADAS

El potencial de biomasa para las plantaciones se obtuvo utilizando un método multicriterio ligado a un SIG, mediante el cual se calculó un índice basado en 4 criterios claves que determinan la calidad de un sitio para el establecimiento de plantaciones energéticas representado como el índice de aptitud. Los criterios clave utilizados fueron: 1) coberturas con vegetación secundaria; 2) pendientes menores a 10° (el programa utilizado trabaja con ángulos); 3) superficie accesible físicamente alrededor de localidades y al costado de carreteras principales; y 4) precipitación total anual. Se utilizaron las capas de cobertura de la Secretaría de Recursos Naturales y Ambiente (SERNA).

Se obtuvieron superficies con valores de índice variable entre 0 y 1, indicando diferente potencial para el establecimiento de plantaciones forestales. Valores cercanos a 0 indican potencial bajo, y valores cercanos a 1 indican las mejores condiciones de aptitud para las plantaciones, resultando en un potencial elevado. Las variaciones en el potencial (por ejemplo, calidad del sitio para el establecimiento y desarrollo de plantaciones) se ven reflejadas en las tasas de productividad esperada para los cuales se utilizaron valores de productividad mínimos y máximos (considerando las categorías dentro del método multicriterio). Los valores de productividad oscilan entre 0 tMS/ha/año para suelos pobres con baja precipitación, hasta 13 tMS/ha/año para suelos muy ricos con alta precipitación. Para la estimación de la disponibilidad de madera para energía se consideró un contenido energético de la madera de 18 GJ/tMS. El análisis no tiene en cuenta el tiempo de corte ni clasifica las especies forestales.

APROVECHAMIENTO DE BOSQUES NATIVOS

Para estimar las existencias y la productividad potencial de combustibles de madera provenientes de bosques naturales se desarrolló una metodología espacialmente explícita basada en información de base ya existente. El rango de superficie accesible se obtuvo utilizando áreas buffer mínimas y máximas alrededor de las localidades y a cada lado de las carreteras principales, a partir de información espacial del Secretaría de Energía, Recursos Naturales, Ambiente y Minas (MiAmbiente). Los valores de productividad volumétrica se obtuvieron de casos de estudio con condiciones de crecimiento similares a las de Honduras. Estos valores de productividad fueron multiplicados por el peso específico de la

madera para obtener la productividad gravimétrica en toneladas de materia seca por hectárea por año (tMS/año). El incremento anual de madera para energía se obtiene como el producto de la superficie accesible por la productividad. Se utilizó un peso específico promedio de la madera de 0.5 tMS/m³ y un contenido energético promedio de 18 Gigajoules/tMS. El coeficiente de acceso máximo a los bosques es 10 km alrededor de localidades y 3 km a cada lado de carreteras principales, mientras que el acceso mínimo es 3 km alrededor de localidades y 0.5 km a cada lado de carreteras principales.

BIOMASA DE RESIDUOS AGRÍCOLAS

SUBPRODUCTOS AGRÍCOLAS, PECUARIOS Y AGROINDUSTRIALES

Aunque aún no está cuantificado el potencial de biomasa proveniente de estos sectores, se puede estimar mediante capas referenciadas que contengan información sobre la producción anual de cultivos para diferentes regiones del país. Es importante también contar con información sobre el coeficiente de residuos generados y los usos potenciales de los mismos.

CULTIVOS DEDICADOS

Se estimó el potencial de producción de etanol y biodiesel por medio de plantaciones dedicadas de caña de azúcar y de palma de aceite respectivamente. Al igual que para las plantaciones forestales energéticas, se obtuvieron superficies con diferente potencial para el establecimiento de cultivos dedicados (0=bajo, 1=alto). Las variaciones en el potencial (por ejemplo, calidad del sitio para el cultivo de caña de azúcar) se ven reflejadas en las superficies cosechadas.

Se aplicaron cuatro criterios de exclusión para determinar las áreas no adecuadas para cada cultivo: 1) rangos de precipitación; 2) altitud; 3) pendientes; y 4) clases de cobertura del suelo (se excluyeron los bosques, matorrales y las zonas destinadas actualmente a agricultura de alimentación).

Para determinar el equivalente energético del potencial (PJ/año) se tomaron las siguientes consideraciones; para la caña de azúcar se considera que el 50% de la producción podría derivarse a la obtención de etanol, un factor de conversión de 70 litros por tonelada y un poder calorífico del etanol de 23.4 MJ/litro. Para el caso de la palma se utilizó un factor de conversión de 300 litros por tonelada y un poder calorífico del etanol de 44.4 MJ/litro.

RESIDUOS URBANOS

A pesar que hasta el momento no se cuenta con información oficial que permita estimar el potencial energético de residuos sólidos urbanos, el mismo puede obtenerse a través de la fracción orgánica contenida en dichos residuos. El potencial se puede estimar por medio de la siguiente ecuación:

$$Pt = Mr * Gm * PC \quad (4)$$

Dónde: Pt es el potencial energético de los residuos urbanos (PJ/año); Mr la masa de los residuos orgánicos totales (t/año); Gm es el rendimiento de biogás o generación específica de metano (m³/t); PC el poder calorífico del biogás producido estimado en 17 MJ/m³.

El rendimiento de biogás está en función del contenido de humedad de los residuos, de la disponibilidad de nutrientes y bacterias en la materia orgánica, el PH y la temperatura. A modo conservativo, el rendimiento puede considerarse como el promedio de 80 m³/t, establecido por [\(Ríos y Kaltschmitt, 2013\)](#).

MÓDULO DE INTEGRACIÓN

La integración entre oferta y demanda es de suma importancia para identificar zonas donde no exista competencia de recursos. Éste es un punto dinámico, donde la oferta y demanda no pueden ser evaluadas por separado. Para generar este módulo es necesario contar con una base georreferenciada de usuarios actuales de bioenergía con sus respectivos consumos.

ANÁLISIS DEL CONSUMO ACTUAL – MEDIANA Y GRAN ESCALA

Según datos del [BID \(2017\)](#), la generación de energía eléctrica en el país depende principalmente plantas termoeléctricas a base de diésel importado. Debido a la tendencia del incremento en los costos de los combustibles fósiles en el mercado internacional, existe un enorme potencial para el uso de biomasa en las centrales eléctricas, que además ayudaría a mitigar las emisiones de GEI asociadas.

Bajo este contexto, actualmente existen numerosos casos de producción de electricidad con biomasa en Honduras, donde la energía producida es destinada a clientes propios de las empresas privadas, o a la Empresa Nacional de Energía Eléctrica (Enee). Los principales recursos biomásicos utilizados como combustibles son bagazo de caña de azúcar, king grass, residuos forestales y raquis de palma. En la Tabla 7 se detalla la demanda actual de biomasa en el sector eléctrico del país, según información de la (Enee), donde el consumo actual de biocombustibles sólidos supera los 17 PJ/año.

Tabla 7. Demanda actual de biomasa en el sector eléctrico de Honduras

Nombre de Central	Capacidad Instalada (MW)	Energía producida (MWh/año)	Consumo de biomasa (tMS/año)	Equivalente energético (PJ/año)
Tres Valles	7.5	166,440	35,413	0.6
Central Tres Valles	12.3	272,962	58,077	1.0
Caracol Knits	18.6	461,652	98,224	1.7
Central El Progreso	9.3	244,404	52,001	0.9
Cogeneración La Grecia	16	408,800	86,979	1.5

Cogeneración de Energía Eléctrica Azucarera La Grecia	18.5	472,675	100,569	1.7
COINSU	1	17,520	3,728	0.1
EECOPALSA	5.6	138,992	29,573	0.5
Geopalsa	1.275	26,061	5,545	0.1
HGPC	43	1,130,040	240,434	4.1
Jaremar	25	540,200	114,936	2.0
Merendon	18.6	461,652	98,224	1.7
Palcasa	5.5	118,041	25,115.	0.4
Santa Matilde	34	397,120	84,494	1.4
		TOTAL	1,033,313	17.6

OFERTA POTENCIAL DE BIOMASA - MEDIANA Y GRAN ESCALA

Actualmente, Honduras cuenta con un enorme potencial técnico de recursos biomásicos que se podrían aprovechar con fines energéticos y ampliar la participación de la bioenergía en la matriz energética nacional. El potencial estimado alcanza valores comprendidos entre los 264 – 2,260 PJ/año, según el tipo de restricción de acceso seleccionada.

El mayor potencial proviene de las plantaciones forestales dedicadas. Sin embargo, es importante recordar que se trata de un potencial teórico no existente en la actualidad, estimado para diferentes aptitudes de crecimiento. Los bosques nativos, aportan el mayor potencial técnico de madera que podría ser utilizada con fines energéticos, mientras que los subproductos de la industria de la madera generan un potencial de uso inmediato. Cabe aclarar que esta es una primera estimación del potencial forestal y sería necesario complementar el estudio con una evaluación económica.

Los cultivos energéticos de caña de azúcar y palma de aceite generan un potencial muy importante para la producción de etanol y biodiesel respectivamente. Entre ambos cultivos podrían producir suficiente biocombustible como para satisfacer toda la demanda actual de gasolina y diésel en el sector transporte, considerada en 22 mbepd (0.13 PJ día) según datos del [BID \(2017\)](#).

Tabla 8. Potencial técnico total de recursos biomásicos para uso energético

Recurso	Residuo/producto generado	Potencial energético (PJ/año)
Sector forestal		
Subproducto de extracción y de la industria de transformación	Puntas, ramas, recortes, aserrín, costaneros	0 - 3.5
Plantaciones dedicadas	Leña	24 – 1,123

Bosques nativos	Leña	160.5 – 221.6
Cultivos dedicados		
Caña azúcar	Etanol	29 – 356
Palma de aceite	Biodiesel	50 – 556
TOTAL		264 – 2260

USO DE LEÑA Y CARBÓN VEGETAL - PEQUEÑA ESCALA

A pesar del hecho de que la energía tradicional de la madera (leña y carbón vegetal) todavía se usa ampliamente en muchos países en desarrollo ([IEA, 2012](#)), el impacto de la cosecha de leña en bosques sigue siendo un punto de discusión. Identificada como la "otra crisis energética" en la década de 1970 ([Eckholm 1975](#)), la extracción de leña y la producción de carbón por parte de las poblaciones rurales y periurbanas pobres se consideraron como los principales impulsores de la degradación ambiental. Algunos análisis todavía informan una conexión directa entre los combustibles de madera y la "deforestación severa" (por ejemplo, [Singh et al., 2010](#), [Pang et al., 2013](#)) o la degradación forestal ([Ahrends et al., 2010](#), [Ryan et al., 2012](#), [Cantarello et al. 2014](#), [Moroni y Musk 2014](#), [Orozumbekov et al. 2014](#), [Specht et al. 2015](#)). Sin embargo, otros piensan que la demanda de leña tiene un impacto limitado en la cubierta forestal (por ejemplo, [Hansfort y Mertz 2011](#), [Shrestha et al., 2013](#)) porque se ve ensombrecida por otros procesos socioeconómicos y ecológicos ([Foley 1985](#), [Hosier 1993](#), [de Waroux y Lambin 2012](#)).

Las generalizaciones son intrínsecamente engañosas, ya que los patrones espaciotemporales de oferta y demanda de leña son específicos del sitio, y los impactos en la vegetación varían mucho de un lugar a otro ([Ghilardi et al., 2007](#), [Wangchuk et al., 2014](#)) y como resultado de patrones específicos de uso de recursos, p.ej leña de subsistencia o carbón comercial ([Naughton-Treves et al., 2007](#)). Además, la vegetación responde a las perturbaciones de maneras que pueden afectar las prácticas de recolección, el cambio de preferencia de especies, los sitios de extracción y los volúmenes extraídos ([Ruger et al., 2008](#), [Jagger y Shively 2014](#)).

Dentro del ámbito de las políticas, se necesitan evaluaciones más matizadas y precisas que den cuenta de los efectos espaciotemporales para predecir mejor el impacto de las intervenciones, como los programas mejorados de estufas (Improved Cookstoves (ICS)) y los hornos de carbón mejorados. En el pasado, los impactos positivos se han asumido como una cuestión de fe en la tecnología en lugar de como se demuestra a través del análisis científico. Por lo tanto, existe una necesidad apremiante de modelos que evalúen con firmeza los impactos de las intervenciones así como como los flujos de carbono.

Las técnicas de modelado geoespacial son una opción prometedora para hacer explícita la variabilidad espaciotemporal ([Deaton y Winebrake 2000](#), [Paegelow y Camacho-Olmedo 2008](#), [Murayama y Thapa 2011](#)). Las preguntas centrales que deben abordarse son:

1. ¿Cuánto combustible de madera se cosecha en un lugar determinado dentro de un marco de tiempo específico?
2. ¿Cómo responde la vegetación a esta presión, medida por las existencias de biomasa aérea y las tasas de crecimiento?

3. ¿Cómo los cambios en la demanda de combustible de madera (por ejemplo, mediante la diseminación de estufas que ahorran combustible) alteran los patrones de cosecha y crecimiento con el tiempo?

Para responder a estas preguntas para el caso de leña residencial (es decir, leña), desarrollamos MoFuSS (Modeling Fuelwood Savings Scenarios - Modelado de escenarios de ahorro de leña) versión 1.0, un modelo espacialmente explícito y dinámico que simula el efecto de la cosecha de leña en la vegetación local. El objetivo general en la construcción del modelo es cuantificar las reducciones esperadas en la cosecha insostenible de biomasa leñosa resultante de intervenciones externas que reducen la demanda. Es importante señalar que MoFuSS fue diseñado para ser aplicado en áreas de estudio donde la leña es una importante fuente de energía para el sector residencial, en el que opera la recolección de madera para uso propio y mercados localizados, y no para tierras sujetas a producción de carbón, donde los patrones de cosecha y de comercialización difieren significativamente ([Masera et al., 2015](#)).

MoFuSS proyecta los sitios de cosecha de leña en el tiempo según el acceso de los recursos forestales. La vegetación responde a la cosecha en cada iteración en función de la cantidad de madera extraída y las funciones de crecimiento de los árboles dentro y fuera de los bosques. Un módulo de Monte Carlo tiene en cuenta las incertidumbres inherentes asociadas con los parámetros de entrada. El modelo también da cuenta de las tendencias observadas y esperadas en la pérdida y ganancia forestal que no están relacionadas con la cosecha de leña. Esto tiene en cuenta que parte de la demanda de leña se satisface de los subproductos de otras actividades, y permite ajustar el mapa de oferta de leña en el tiempo.

INTRODUCCIÓN A MOFUSS

MoFuSS se creó en un entorno de modelado freeware denominado "DINAMICA EGO" (EGO, siglas de Environment for Geoprocessing Objects), diseñado para construir modelos complejos para el análisis y la simulación de fenómenos espaciales y temporalmente dinámicos (Soares-Filho et al., 2010). Mediante el uso del lenguaje de flujo de datos (arrastrando y conectando algoritmos a través de sus puertos), los modelos se construyen y se muestran como diagramas, que son relativamente fáciles de comprender y modificar por usuarios que no están familiarizados con los lenguajes y scripts de la computadora. El software se ha popularizado entre los usuarios que analizan una amplia gama de fenómenos dinámicos (por ejemplo, Soares et al., 2006, Nepstad et al., 2009, Soares et al., 2010, Bowman et al., 2012, Carlson et al., 2012, Pérez-Vega et al. al. 2012, Soares et al. 2012, Ferraz 2013, Kolb et al. 2013, Pathiranaa et al. 2013, Brando et al. 2014, Sonter et al. 2014a, Sonter et al., 2014b). Además, los scripts DINAMICA EGO en MoFuSS activan varios procesos externos que se ejecutan en R (www.r-project.org), FFmpeg (www.ffmpeg.org) y LaTeX (miktex.org) que proyectan, remuestran, rasterizan y recortan datos de entrada, realice análisis estadísticos, genere gráficos, mapas animados y un informe resumido final en pdf.

MoFuSS simula la dinámica espaciotemporal en un paisaje sujeto a la extracción tradicional de leña. Describe los cambios en un patrón espacial desde el momento t hasta el tiempo $t + 1$, de modo que:

$$X_{(t+1)} = f(X_{(t)}, Y_{(t)}) \quad (5)$$

Donde $X(t)$ es el patrón espacial en el tiempo " t " e $Y(t)$ es un conjunto de elementos de datos que pueden representar la transición, como mapas, tablas, matrices, expresiones matemáticas / lógicas o constantes. MoFuSS tiene tres funciones principales:

1. Proyectar la presión ejercida por la cosecha de leña sobre las fuentes existentes de biomasa leñosa.
2. Estimar la respuesta esperada de la vegetación a la perturbación en términos de crecimiento de AGB.
3. Estimar el efecto de las intervenciones que reducen el consumo de leña en el stock y crecimiento forestal existente.

MoFuSS consta de cuatro componentes o módulos: 1) un componente de fricción que crea mapas de impedancia; 2) un algoritmo modificado de distancia inversa ponderada (IDW) que crea mapas de presión que representan la propensión de los eventos de cosecha de leña; 3) un componente de oferta / demanda que proyecta la cantidad esperada de leña que se cosechará en cada marco de tiempo en cada píxel, y la respuesta de la vegetación a esa perturbación; y 4) un módulo de pérdida y ganancia forestal que proyecta eventos de limpieza de tierras o eventos de ganancia forestal en cada paso de tiempo, con base en observaciones anteriores.

MoFuSS integra un conjunto de scripts que requiere algún freeware para ser instalado primero. El primer paso consiste en descargar el manual de usuario de MoFuSS en este enlace: <https://gitlab.com/MoFuSS/MoFuSS>. Esta sección contiene instrucciones detalladas pero concisas para descargar, instalar y usar MoFuSS y cualquier otro programa gratuito necesario. MoFuSS (versión 1.0) fue diseñado y codificado por Adrian Ghilardi entre septiembre de 2011 y abril de 2015 con contribuciones de cuatro coautores: Jean-François Mas, Robert Bailis, Rudi Drigo y Omar Masera. Un quinto coautor, Ernesto Vega, ayudó con problemas de código R durante la depuración.

MoFuSS y cualquier otro software necesario están disponibles para su descarga y uso, y todos los scripts de MoFuSS se pueden abrir, editar y guardar con cualquier editor de código libre como Notepad ++ o Sublime Text. Los guiones de MoFuSS fueron codificados en Dinamica EGO (.egoml), R (.R), LaTeX (.tex) y Windows batch scripting (.bat). Los scripts de MoFuSS y los archivos asociados (por ejemplo, ffmpeg.exe, zip.exe, mensajes pdf) son aproximadamente 45 MB, y el conjunto de datos de Honduras (datos de trama espacial en geotiff, datos vectoriales espaciales y tablas) es de aproximadamente 550 MB y se puede descargar como un archivo separado, como se explica en el manual del usuario.

MODULO DE DEMANDA – PEQUEÑA ESCALA

La magnitud y distribución espacial de la demanda de leña se calcula siguiendo la ecuación 6:

$$C_{(t)} = \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n hh_{ij} \cdot u_j \cdot fc_i \right)_{(t)} + \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n hh_{ij} \cdot u_j \cdot fb_i \right)_{(t)} \quad (6)$$

donde C (t) es el consumo total de leña residencial en toneladas de materia seca (tMS) para cualquier paso de tiempo "t"; hh_{ij} es el número de hogares que usan leña, por la comunidad "i" que usa un dispositivo de cocción "j" (una estufa tradicional o incluso mejorada pero considerada como el escenario de negocios normales); u_j es el consumo de los hogares en tMS; fc_i es la fracción promedio de leña que se recolecta; y fb_i es la fracción promedio de leña que se compra.

La distribución espacial de los sitios de recolección de leña está determinada en parte por su proximidad a los centros de demanda. Los mapas de fricción o impedancia son un medio de procesamiento geográfico para dar cuenta de la "proximidad" de una manera realista (Salonen et al.,

2012). En estos mapas, cada píxel o celda se puede caracterizar por el tiempo que un colector de leña necesita para viajar a pie o en vehículo (según las vías utilizadas en una localidad determinada). Los datos requeridos para construir mapas de fricción son las velocidades de desplazamiento de los colectores de leña y las características topográficas (pendientes, condiciones del camino, ríos y cuerpos de agua), o tipos de cobertura terrestre (por ejemplo, la vegetación densa o espinosa reduce las velocidades de desplazamiento).

Un componente de IDW crea un mapa de presión (es decir, representa la probabilidad o propensión de cada píxel para cosechar leña) para dos tipos de recolectores de leña: 1) personas que viajan a pie y recolectan leña para uso doméstico, y 2) vendedores comerciales de madera que usan vehículos, lo que les permite acceder a áreas distantes y transportar grandes volúmenes de madera. La ecuación 3 define cómo se calculan los mapas de presión:

$$P_{(t)k} = \left(\sum_{i=1}^n \frac{C_{ik}}{d_{ik}^n} \right)_{(t)} \quad (7)$$

Donde $P_{(t)k}$ es un índice que indica la presión de ambos tipos de colectores de leña "k" para cualquier paso de tiempo "t"; C es el consumo residencial de leña en tMS por localidad, aldea o ciudad "i"; d es el tiempo acumulado (costo-distancia) necesario para llegar a cualquier píxel de cada localidad o aldea; y n es un número real positivo que modula la función de disminución de la interpolación.

El índice resultante es una interpolación Weighted Distance modificada, en la que la distancia (en unidades lineales) se reemplaza por el costo acumulado (en unidades de tiempo). El poder de esta simple ecuación reside en el hecho de que cada píxel dentro del área de análisis está influenciado por todos los centros de consumo. Esto evita la necesidad de determinar las áreas accesibles para leña o las denominadas "cobertizos para leña" (Ghilardi et al. 2009) o áreas "alcanzables" (The Gold Standard 2011), que no tienen en cuenta los centros de demanda superpuestos y son difíciles de definir. El hecho de que las personas tienen más probabilidades de recolectar combustible cerca de su lugar de residencia se integra en el modelo en forma de costos de viaje. Si se conocen algunas frecuencias y ubicaciones de recolección (a partir de mediciones de GPS terrestres, por ejemplo), la función de disminución se puede calibrar para reflejar los patrones de recolección observados. Este cálculo ha sido informado previamente por varios autores (Ghilardi y Mas 2011, Chen et al. 2014, Bailis et al. 2015).

Los mapas de presión se cargan en un módulo gobernado por un mecanismo estocástico. Finalmente, el consumo total de leña recolectada y comprada en el área de estudio se distribuye sobre los mapas resultantes del mecanismo de evaluación estocástico.

MÓDULO DE OFERTA – PEQUEÑA ESCALA

Hay tres fuentes principales de leña residencial:

1. Bosques y selvas: la leña se suministra podando o cortando árboles vivos o recogiendo ramas caídas y madera muerta.
2. Árboles fuera de los bosques (TOF): incluye árboles en tierras de cultivo, compuestos domésticos y áreas comunes a los lados de las carreteras, a los que se accede podando árboles vivos y / o recolectando ramas muertas / derribadas. Esta categoría también incluye los árboles de sombra en las plantaciones de café, que se podan regularmente y constituyen una importante fuente de madera en las zonas cafeteras de la región.

3. Actividades de limpieza de tierras: incluye la tala de bosques o matorrales para nuevos cultivos o pastoreo y constituye una importante fuente de suministro de madera.

Se supone que el crecimiento de la biomasa leñosa es una función de tres factores: el stock en la iteración anterior, la tasa máxima de crecimiento (r_{max} : la primera derivada de la curva "tipo S") y la densidad máxima de biomasa o "capacidad de carga" (K) (Bailis et al. 2015). Tanto r_{max} como K dependen de parámetros biofísicos como la cobertura de la tierra, el suelo, la hidrología, la insolación y la altitud, entre otros. Sin embargo, los datos para múltiples parámetros de crecimiento biofísico raramente están disponibles. En nuestro estudio de caso, por ejemplo, definimos K y r_{max} basados únicamente en la clase LULC. La ecuación 4 describe esta relación:

$$AGB_{(t+1)i} = AGB_{(t)i} + AGB_{(t)i} \cdot r_{max} \cdot \left(1 - \frac{AGB_{(t)i}}{K_i}\right) \quad (8)$$

$AGB(t)_i$ y $AGB(t+1)_i$ son biomasa leñosa sobre el suelo adecuada para leña en la clase LULC "i". El stock de biomasa inicial, $AGB(t=0)$, determinará el comportamiento futuro de AGB durante el período de simulación. MoFuSS acepta mapas LULC con tantas clases como estén disponibles, pero también se requieren parámetros de stock y crecimiento para cada clase. Los mapas que muestran una distribución espacial continua de $AGB(t=0)$ (por ejemplo, Cartus et al., 2014) son igualmente válidos (incluso deseables) porque la ecuación 4 se calcula píxel por píxel.

Además, si AGB cae por debajo de un umbral ajustable, los píxeles se vuelven "no controlables" hasta que el crecimiento natural los eleva por encima del umbral. En este conjunto de simulaciones, el umbral se estableció en 5.0 tMSha-1 para personas que usan vehículos y 0.1 tMSha-1 para personas que cosechan a pie. Vale la pena señalar que estos valores son "cálculos aproximados" sin literatura o respaldo de datos de campo. Pero dado que solo se aplican a bosques, se espera que la gente recurra a áreas vecinas donde el AGB está por encima de estos valores.

MoFuSS incluye una simulación de Monte Carlo (MC) para adaptarse a la incertidumbre inherente de los patrones de crecimiento de la biomasa leñosa y la acumulación de existencias de AGB . Con cada corrida de MC, todos los parámetros de crecimiento de biomasa leñosa varían aleatoriamente siguiendo las funciones de densidad de probabilidad normal truncada (Figura A.6 en el Material suplementario en línea). El número predeterminado de ejecuciones se estableció en 100.

Otros parámetros que pasan por el módulo MC pero no están relacionados con el crecimiento de biomasa son la parte del paisaje "visitada al menos una vez" para la recolección de leña en cada iteración y un factor de transición que regula el grado de estocasticidad del mecanismo de siembr.

La sensibilidad de los resultados a algunos parámetros de entrada fue probada ejecutando 6 simulaciones de 100 realizaciones de Monte Carlo cada una, mientras que permite que un parámetro por simulación varíe aleatoriamente y mantenga los otros constantes. Los parámetros analizados fueron: porcentaje de paisaje cosechado en cada iteración, factor de ciruela pasa, biomasa máxima alcanzable K , tasa de crecimiento r_{max} y leña disponible de árboles fuera de los bosques.

MÓDULO DE OFERTA VS DEMANDA: SIMULACIÓN DINÁMICA DE EVENTOS DE COSECHA Y REVEGETACIÓN DEL PAISAJE POR CRECIMIENTO NATURAL

Según se define en la lista de siglas, la biomasa no renovable (NRB) es la cantidad de madera cosechada que excede el crecimiento natural durante un período de tiempo determinado, más comúnmente un año. Cuando el NRB se da como una fracción del uso total de leña, en su lugar se usa el fNRB ("fracción de biomasa no renovable"). Esto describe la proporción de la cosecha de leña que es insostenible.

En el modelo, cada paso de tiempo es una iteración (un año en nuestro caso de estudio) y n-pasos constituye una simulación. MoFuSS se ejecuta durante cualquier período de simulación especificado por el número de ejecuciones de Monte Carlo que se establecen, produciendo tres parámetros de salida principales: a) el stock AGB restante (crecimiento menos cosecha en $t = n$), b) NRB calculado en píxeles donde disminuye en AGB han ocurrido (ecuación 5), y c) fNRB, calculada como la fracción del consumo total de leña que no es renovable (ecuación 6). Estos dos productos básicos se modelan: 1) dentro de cada iteración (imitando un análisis de oferta-demanda estático); 2) dentro de cada período de simulación; y 3) para todo el conjunto de realizaciones de Monte Carlo para NRB y fNRB. Para cada píxel:

$$NRB_{(t=n)} = \begin{cases} AGB_{(t=0)} - AGB_{(t=n)} & \text{if } AGB_{(t=0)} > AGB_{(t=n)} \\ 0 & \text{if } AGB_{(t=0)} \leq AGB_{(t=n)} \end{cases} \quad (9)$$

Donde NRB ($t = n$) es la cantidad de leña en tDM que, cuando se cosecha, da como resultado una disminución neta en AGB entre el tiempo $t = 0$ y $t = n$. En esta evaluación, n puede consistir en una o varias iteraciones de un solo paso: una iteración corresponde al análisis estático de oferta-demanda descrito anteriormente como output1; $n = 30$ corresponde a la simulación completa descrita anteriormente como salida 2. Cada ejecución MC genera un valor diferente de NRB ($t = n$) repitiendo la ecuación 5 en cada ejecución (salida 3). NRB ($t = n$) se calcula a nivel de píxel, lo que significa que no tiene en cuenta ningún incremento de AGB que se produzca en áreas donde $AGB(t = n) \geq AGB(t = 0)$. En otras palabras, NRB ($t = n$) no es la disminución neta de AGB en todo el "cobertizo de leña". En cambio, da cuenta de las pérdidas de AGB solo en el conjunto de píxeles donde se produjo una pérdida.

Finalmente, la fracción de NRB con respecto a la madera cosechada se calcula como:

$$fNRB_{(t=n)} = \frac{NRB_{(t=n)}}{C_{(t=n)}} \quad (10)$$

Como se mencionó anteriormente, MoFuSS se ejecuta durante muchas iteraciones de paso de tiempo dentro de una simulación. C (t) puede expresarse como C (n), que corresponde al consumo de leña sumado entre el tiempo 0 y el tiempo n (ecuación 6). Como C (t) se carga en cada iteración de un solo paso, los cambios temporales (y espaciales) en el uso de leña, que pueden ser inducidos por una difusión gradual y espacialmente desigual de ICS, pueden simularse en MoFuSS. Sin embargo, si falta información espaciotemporal sobre el despliegue pasado y esperado de ICS, MoFuSS puede simular la difusión hipotética de ICS que se distribuye uniformemente en el espacio, es decir, proporcional a las tendencias de uso de leña en el escenario de BaU.

Ejecutamos MoFuSS de 2000 a 2030 bajo dos escenarios: BaU, suponiendo valores promedio de uso de leña asociado con cocinas tradicionales, y un escenario de proyecto, suponiendo una difusión gradual y espacialmente uniforme de ICS entre 2000 y 2030. Bajo este escenario se asumió que se logró una disminución anual del 5% en el uso de leña mediante un proyecto de intervención "exitoso".

El modelo propuesto, MoFuSS, que probamos para el caso de Honduras, incorpora nuevas características en comparación con los modelos anteriores (Top et al. 2006, Ghilardi 2009, Bailis et al., 2015) y representa las situaciones de la vida real más de cerca en el nivel de paisaje con respecto a la cosecha tradicional de leña para fines residenciales. Sin embargo, se necesitan más mejoras para integrar otros patrones y procesos comunes asociados con el suministro y la demanda de leña. Las mejoras más relevantes que se desarrollarán en el futuro serían:

1. Verificar resultados con datos empíricos basados en el campo es una tarea altamente desafiante pero necesaria. Una forma de avanzar es utilizar técnicas de teledetección para cuantificar la degradación forestal (por ejemplo, Ryan et al., 2012) en áreas y períodos de tiempo previstos por el modelo (por ejemplo, 2000 a 2015), en lugares donde la degradación causada por la extracción de leña debería ser significativa. La tarea tiene que hacer frente a múltiples complejidades, como separar los controladores superpuestos para probar la causalidad en cualquier cambio observado. Información adicional sobre la validación de los resultados se proporciona en el Apéndice B-3 en el Material complementario en línea.
2. Agregar una función elástica para la demanda basada en la escasez: a medida que disminuyan las fuentes y suministros de leña, impulsados por la sobreexplotación o más comúnmente por procesos LULC, el consumo unitario también debería disminuir y la propensión a cambiar a los portadores de energía alternativa tales como ya que el GLP debería subir. Estas suposiciones están fuertemente influenciadas por diversos parámetros espaciales (por ejemplo, proximidad a la red de distribución de GLP) y no espaciales (por ejemplo, datos socioeconómicos) (Khuman et al., 2011). Estamos modificando ecuaciones del tipo "depredador-presa" para lograr esto.
3. Además del uso de leña para fines residenciales, incluya otros usos como carbón o leña para pequeñas industrias.
4. Incluir un módulo que busque patrones hipotéticos de difusión de estufas que maximicen el ahorro de carbono en comparación con los patrones de diseminación alternativos. El módulo de "mejor solución" podría basarse en un algoritmo genético que maximice la llamada función de optimización dado un conjunto de variables de penalización que representan las limitaciones logísticas de cualquier proyecto de estufas en particular.
5. Las alternativas a los procedimientos de sensibilidad de "un factor a la vez", que asumen que los parámetros son independientes entre sí, han sido propuestos en la literatura (Saltelli y Annoni 2010) y deben ser explorados para el presente modelo de enfoque.
6. Otras mejoras importantes para las versiones de gama alta del modelo incluyen:
7. Un componente "climático" que integra los factores de emisión de las estufas tradicionales y los ICS y, en consecuencia, traduce NRB en gases de efecto invernadero o valores CO₂eq para BaU y escenarios de proyectos.
8. Las nuevas versiones del componente de crecimiento de la biomasa leñosa incluirán sucesiones que conducen a diferentes mosaicos paisajísticos, biodiversidad, competencia entre especies o respuestas a la tala selectiva (por ejemplo, Ruger et al., 2008, Medvigy et al., 2009, Medvigy et al., 2010, Medvigy y Moorcroft 2012).
9. Un desarrollo a más largo plazo consiste en agrupar versiones mejoradas de MoFuSS con otros modelos de pastoreo basados en DINAMICA (por ejemplo, Bowman et al., 2012) e incendios (por ejemplo, Soares et al., 2012), para integrar otros factores de degradación forestal. Un ejemplo notable de esto, y con el alcance más amplio para comprender el ciclo biogeoquímico, es el trabajo de Liu y colaboradores (2004). En este estudio, la cosecha de leña y las actividades en barbecho se integran con los escenarios de LULCC y cambio climático para explorar los impactos a largo plazo en la dinámica del carbono. Aunque los patrones de cosecha de leña se modelan de una manera diferente a la del presente estudio, se puede tomar como referencia

sólida en términos de técnicas y enfoque para integrar varios impulsores del cambio de ecosistemas en un conjunto de modelos.

En conclusión, hemos desarrollado un modelo que explora los impactos de procesos complejos como la cosecha de leña en el medio ambiente. El modelo se puede usar en una variedad de aplicaciones que incluyen cuantificar la dinámica del carbono en los sistemas tradicionales de leña, aumentar nuestra comprensión de los procesos que afectan la seguridad energética de las personas pobres dependientes del bosque y examinar diversas estrategias para garantizar la sostenibilidad a largo plazo de la biomasa leñosa recursos.

ANÁLISIS PROSPECTIVO (ESCENARIO PESIMISTA, TENDENCIAL Y OPTIMISTA) HACIA 2030

La Figura 8 muestra las trayectorias para AGB, NRB (ecuación 9) fNRB (ecuación 10) y el uso total de leña. Las líneas rojas se generaron utilizando los parámetros medios definidos por el usuario, mientras que las líneas grises claras muestran cada realización de MC utilizando parámetros variables.

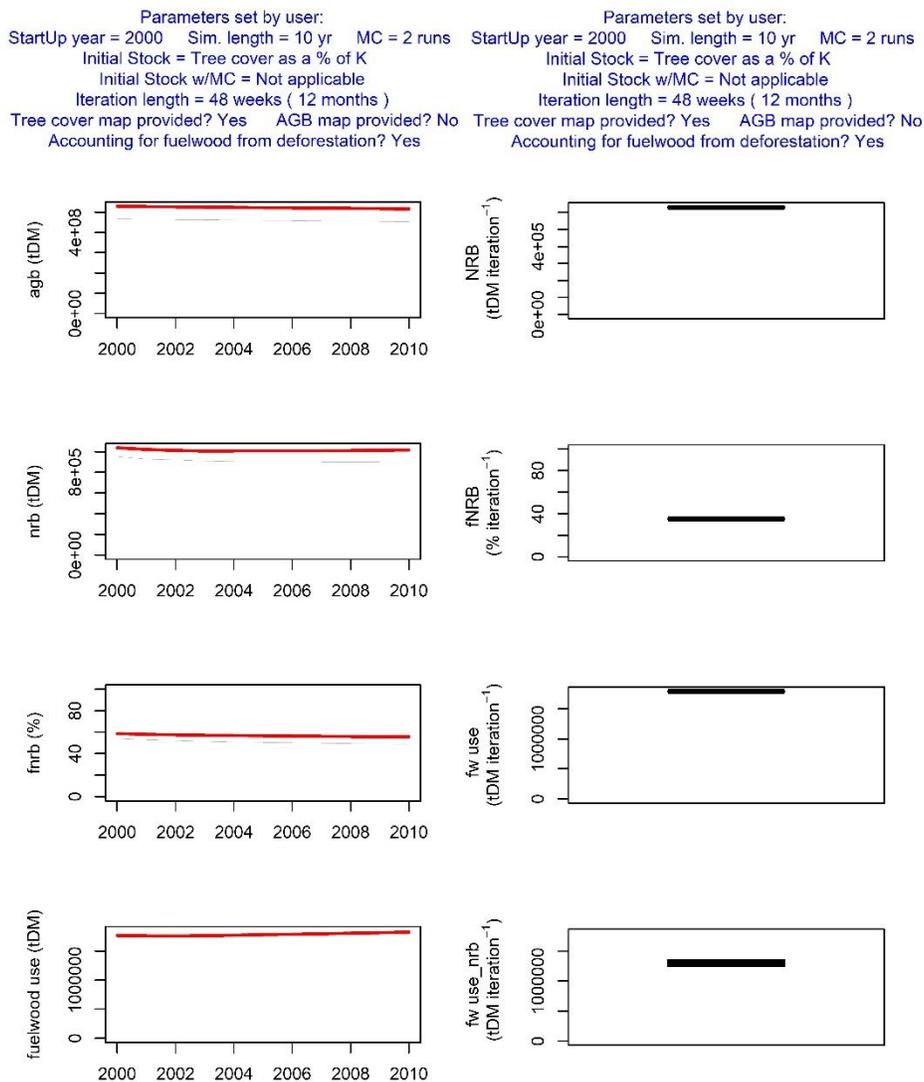


Figura 8. Comportamiento de AGB, NRB, fNRB y uso total de leña

El uso de leña parece tener muy poco impacto en AGB para toda el área. Sin embargo, la cosecha de leña que ocurre en algunos lugares no es renovable, como lo muestran las trayectorias de NRB. En el escenario de BaU, NRB aumenta con el tiempo en la mayoría de las realizaciones de MC, impulsadas por el constante aumento del consumo de leña. Además, en ciertos lugares, el incremento anual de biomasa leñosa es menor que el volumen cosechado de leña.

Las trayectorias positivas de NRB no significan necesariamente que las tierras boscosas dentro del paisaje estudiado se estén degradando hasta su agotamiento. Al otro lado del paisaje, los bosques muestran cierta resistencia porque los píxeles que experimentan un NRB positivo cambian con cada paso del tiempo. Esto permite que muchos píxeles con NRB positivo se recuperen, perdiendo efectivamente su estado "NRB". Esto da como resultado menores pérdidas que si los sitios de cosecha se fijaran permanentemente, lo que refleja estrechamente prácticas de cosecha reales y muestra la importancia de 1) definir un marco de tiempo para un estudio NRB, y 2) evitar análisis estáticos o instantáneos (por ejemplo, Ghilardi, 2010; et al., 2009).

Este patrón de píxeles que cambian dentro y fuera del estado de NRB durante la simulación es sensible al número de eventos de recolección, que está directamente relacionado con la resolución temporal y espacial de la simulación. Exploramos la sensibilidad de los resultados al porcentaje de paisaje que se cosecha en cada iteración o paso de tiempo a continuación.

Además, debido a que fNRB se define como la proporción de NRB y Ct (ecuación 6), su comportamiento a lo largo del tiempo es impulsado por ambos factores. Esto explica la trayectoria casi constante de fNRB en el escenario BaU: tanto el consumo de NRB como el de leña aumentan a un ritmo similar. Con la diseminación de ICS, fNRB disminuye constantemente durante la mayor parte de la simulación. Para resumir simulaciones completas, MoFuSS produce diagramas de caja que muestran distribuciones de NRB, fNRB, uso de leña y uso de leña solo en píxeles NRB, es decir, uso de leña que contribuye directamente a la deforestación o degradación.

Un enfoque alternativo sería priorizar la diseminación de ICS en zonas con mayor NRB. Pero, ¿cómo podemos saber la ubicación de las comunidades que más contribuyen a NRB? La Figura 9 muestra las distribuciones espaciales de AGB, NRB, fNRB, leña procedente de la deforestación y el uso total de leña en los escenarios BaU para la primera realización de MC (línea roja en la Figura 8) La distribución espacial de NRB y fNRB se muestra para el período de simulación completo. Estos mapas podrían ayudar a identificar las comunidades con mayor uso de leña, que se encuentran dentro o cerca de las "áreas" con alto NRB. El proceso de selección de aldeas clave que contribuyen más a los NRB podría hacerse manualmente, o mediante un procedimiento de optimización (por ejemplo, algoritmo genético) que maximiza una reducción en NRB basado en el despliegue selectivo de ICS en espacio y tiempo y podría incorporar explícitamente logística o mercado. El Apéndice B-1 en línea (Material complementario) muestra una producción adicional de MoFuSS: la distribución espacial de la desviación estándar para NRB, el uso total de leña y el uso de leña para la degradación forestal.

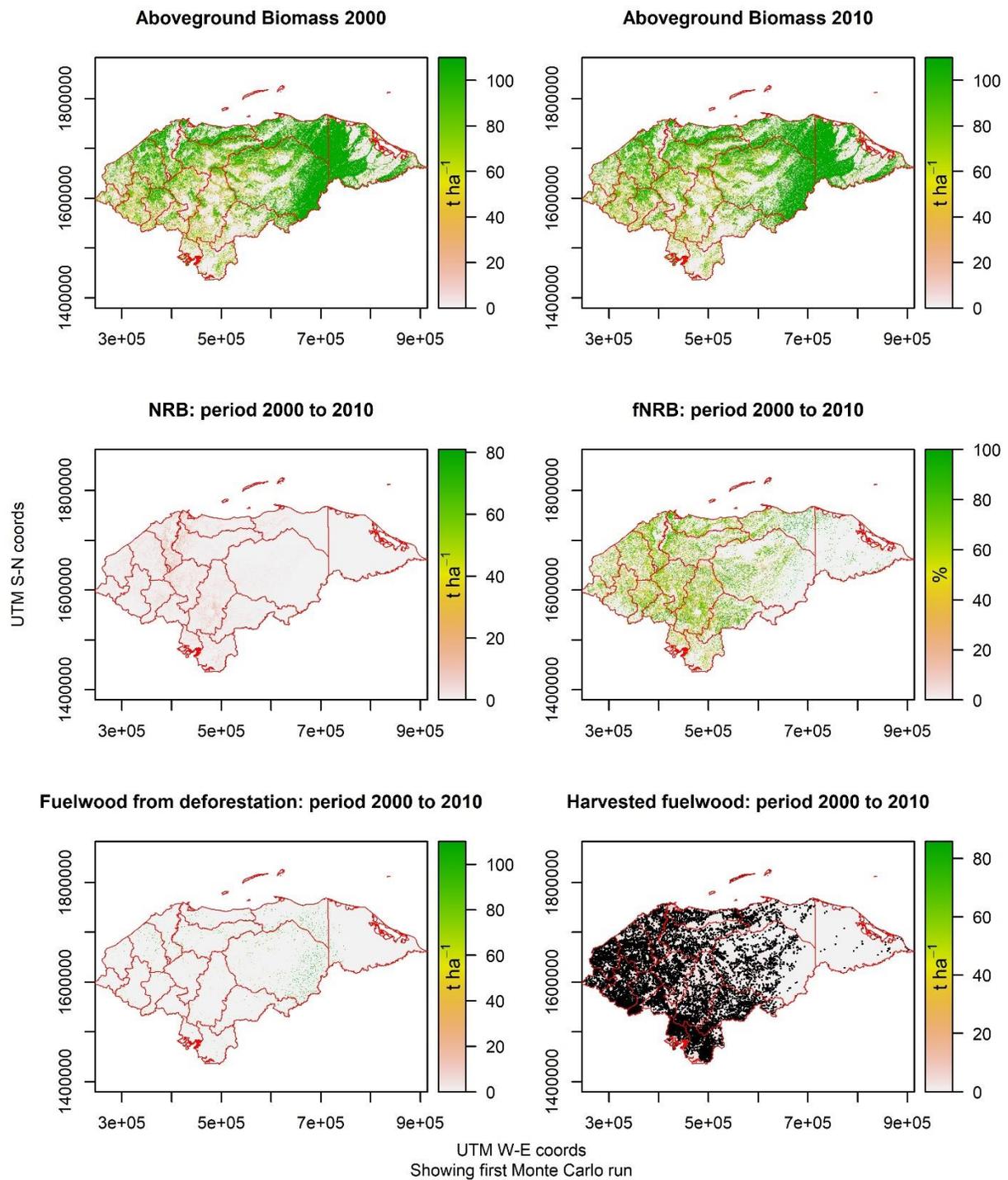


Figura 9. Comportamiento espacial de AGB, NRB, fNRB, leña procedente de la deforestación y uso total de leña en el escenario BaU

CONCLUSIONES GENERALES DEL ESTUDIO DE CASO

Si consideramos que la demanda total de energía en Honduras es de 115.000 barriles de petróleo equivalente por día (mbepd) ([BID, 2017](#)), que equivale a 42 millones de bep al año o 1,768 PJ/año, el potencial de biomasa obtenido podría cubrir un importante porcentaje del consumo total.

El mayor potencial técnico proviene principalmente del sector forestal. El potencial que proviene del aprovechamiento y de la industria forestal es muy interesante dado que es un recurso existente y su uso depende principalmente de disponibilidad tecnológica, de infraestructura de caminos y de condiciones económicas. A pesar que el potencial de plantaciones es mayor que el forestal, se trata de un potencial teórico, que puede o no desarrollarse, a diferencia del potencial energético estimado para el sector forestal.

Actualmente, el sector eléctrico es un mercado inminente para la implementación inmediata de los recursos energéticos, principalmente de biocombustibles sólidos. Es necesario el desarrollo de una plataforma online, con acceso abierto a diferentes "stakeholders", donde se pueda simular la disponibilidad de biomasa y se puedan calcular y optimizar los costos asociados a su aprovechamiento energético.

Para mejorar la estimación del potencial técnico de los recursos evaluados, es necesario en primer lugar, afinar la estimación del potencial de las plantaciones forestales y de cultivos dedicados, considerando las calidades de suelos en las diferentes regiones del territorio nacional y sus aptitudes para los diferentes cultivos. Se deben considerar criterios de sustentabilidad para el aprovechamiento y uso de cada residuo, así como considerar sus costos de logística y de producción, además de los precios comparativos de los combustibles fósiles en el mercado nacional, a fin de determinar los potenciales sustentables y económicos respectivamente.

BIBLIOGRAFÍA

Ahrends, A., Burgess, N.D., Milledge, S.A.H., Bulling, M.T., Fisher, B., Smart, J.C.R., Clarke, G.P., Mhoro, B.E., Lewis, S.L., 2010. Predictable waves of sequential forest degradation and biodiversity loss spreading from an African city. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 107 (33), 14556-14561.

Anuario Estadístico Forestal de Honduras – AEFH (2015). Unidad de Estadísticas Forestales del Instituto Nacional de Conservación y Desarrollo Forestal, Áreas Protegidas y Vida Silvestre (ICF). Comayagüela, M.D.C., 2015.

Banco Interamericano de Desarrollo – BID (2017). Dossier Energético: Honduras. Nota técnica N° IDB-TN1235

Cantarello, E., Lovegrove, A., Orozumbekov, A., Birch, J., Brouwers, N., Newton, A.C., 2014. Human impacts on forest biodiversity in protected Walnut-Fruit Forests in Kyrgyzstan. *J. Sustain. For.* 33 (5), 454-481.

Deaton, M.L., Winebrake, J.J., 2000. *Dynamic Modeling of Environmental Systems*. Springer, New York.

- de Waroux, Y.L., Lambin, E.F., 2012. Monitoring degradation in arid and semi-arid forests and woodlands: the case of the argan woodlands (Morocco). *Appl. Geogr.* 32 (2), 777-786.
- Drigo, R., Bailis, R., Ghilardi, A., Masera, O. (2015). Analysis of woodfuel supply, demand and sustainability in Honduras. Yale-UNAM Universities Project.
- Eckholm, E.P., 1975. *The Other Energy Crisis, Firewood*. Worldwatch Institute, Washington.
- Flores, W. C., Ojeda, O. A., Flores, M. A., & Rivas, F. R. (2010). Sustainable energy policy in Honduras: Diagnosis and challenges.
- Foley, G., 1985. Woodfuel, deforestation and tree growing in the developing world. *Energy Policy* 13 (2), 190-192.
- Ghilardi, A., Guerrero, G., Masera, O., 2007. Spatial analysis of residential fuelwood supply and demand patterns in Mexico using the WISDOM approach. *Biomass Bioenergy* 31 (7), 475-491.
- Hansfort, S.L., Mertz, O., 2011. Challenging the woodfuel crisis in West African woodlands. *Hum. Ecol.* 39 (5), 583-595.
- Hosier, R.H., 1993. Charcoal production and environmental degradation – environmental history, selective harvesting, and postharvest management. *Energy Policy* 21 (5), 491-509.
- International Energy Agency - IEA (2012). *Technology Roadmap Bioenergy for Heat and Power*. Technology Roadmaps. Paris, France.
- Jagger, P., Shively, G., 2014. Land use change, fuel use and respiratory health in Uganda. *Energy Policy* 67, 713-726.
- LC/MEX/L (2017). Informe de la reunión de expertos sobre la situación de la biomasa en países de Centroamérica y el Caribe y evaluación del potencial para su aprovechamiento energético. CEPAL. Sede Subregional en México.
- Masera, O., Drigo, R., Bailis, R., Ghilardi, A., Ruiz-Mercado, I., 2015. Environmental burden of traditional bioenergy use. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 40, 121-150.
- Moroni, M.T., Musk, R.A., 2014. Domestic Timber Harvesting Affects Wood Quantities in Tasmanian Dry Eucalypt Forests. *Australian Forestry*.
- Murayama, Y., Thapa, R.B., 2011. *Spatial Analysis and Modeling in Geographical Transformation Process: GIS-based Applications*. Springer, New York.
- Naughton-Treves, L., Kammen, D.M., Chapman, C., 2007. Burning biodiversity: woody biomass use by commercial and subsistence groups in western Uganda's forests. *Biol. Conserv.* 134 (2), 232-241.
- Orozumbekov, A., Cantarello, E., Newton, A.C., 2015. Status, distribution and use of threatened tree species in the walnut-fruit forests of Kyrgyzstan. *For. Trees Livelihoods* 24 (1).

Paegelow, M., Camacho-Olmedo, M.T., 2008. *Modelling Environmental Dynamics: Advances in Geomatic Solutions*, first ed. Springer, New York.

Pang, C., Yu, H., He, J., Xu, J., 2013. Deforestation and changes in landscape patterns from 1979 to 2006 in Suan County, DPR Korea. *Forests* 4 (4), 968-983.

REN 21 (2016) *Renewables 2016 Global Status Report*. (Paris: REN21 Secretariat).

REN 21 (2017) *Renewables 2017 Global Status Report*. (Paris: REN21 Secretariat).

Rios M, Kaltschmitt M. Bioenergy potential in Mexico, status and perspectives on a high spatial distribution. *Biomass- Convers Biorefinery* 2013; 3:239–54.

Ruger, N., Williams-Linera, G., Kissling, W.D., Huth, A., 2008. Long-term impacts of fuelwood extraction on a tropical montane cloud forest. *Ecosystems* 11 (6), 868-881.

Ryan, C.M., Hill, T., Woollen, E., Ghee, C., Mitchard, E., Cassells, G., Grace, J., Woodhouse, I.H., Williams, M., 2012. Quantifying small-scale deforestation and forest degradation in African woodlands using radar imagery. *Glob. Change Biol.* 18 (1), 243-257.

Shrestha, S., Karky, B.S., Gurung, A., Bista, R., Vetaas, O.R., 2013. Assessment of carbon balance in community forests in Dolakha, Nepal. *Small-scale For.* 12 (4), 507-517.

Singh, G., Rawat, G.S., Verma, D., 2010. Comparative study of fuelwood consumption by villagers and seasonal "Dhaba owners" in the tourist affected regions of Garhwal Himalaya, India. *Energy Policy* 38 (4), 1895-1899.

Specht, M.J., Ribeiro Pinto, S.R., Albuquerque, U.P., Tabarelli, M., Melo, Felipe P.L., 2015. Burning biodiversity: fuelwood harvesting causes forest degradation in human-dominated tropical landscapes. *Glob. Ecol. Conserv.* 3, 200-209.

Wangchuk, S., Siebert, S., Belsky, J., 2014. Fuelwood use and availability in Bhutan: implications for national policy and local forest management. *Hum. Ecol.* 42 (1), 127-135.