

EL SALVADOR

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/ElSalvador>

Documento preparado por Raúl Tauro, José Luis Caballero, Miguel Salinas 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. 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. La evaluación de los recursos en este reporte depende del acceso a información proporcionado por algún organismo oficial, preferentemente en formato *raster* o vectorial.

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 (aprobada por la Asamblea General de las Naciones Unidas). 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	10
Biomasa forestal	10
Subproductos del aprovechamiento y la industria forestal	10
Fuentes de producción	10
Consumo actual.....	11
Plantaciones forestales dedicadas.....	11
Fuentes de producción	11
Consumo actual.....	13
Aprovechamiento de bosques nativos.....	13
Fuentes de producción	13
Consumo actual.....	17
Biomasa de residuos agrícolas.....	18
Subproductos agrícolas, pecuarios y agroindustriales	18
Fuentes	18
Consumo actual.....	18
Cultivos dedicados	18
Fuente	18
Consumo actual.....	21
Análisis del consumo actual	22
Metodología	23
Línea de base	23
Selección de la base espacial.....	23
Módulo de oferta	24
Subproductos del aprovechamiento y la industria forestal	24
Plantaciones forestales dedicadas.....	24
Aprovechamiento de bosques nativos.....	25

Biomasa de residuos agrícolas.....	25
Subproductos agrícolas, pecuarios y agroindustriales	25
Cultivos dedicados	25
Residuos urbanos	26
Módulo de demanda	26
Módulo de integración	28
Oferta potencial para generar calor y electricidad (mediana y gran potencia).....	29
Conclusiones generales del estudio de caso	29
Bibliografía	30

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Inyección de Energía en la matriz energética, CNE (2018).....	7
Figura 2. Áreas con potencial para plantaciones forestales para energía.....	13
Figura 3. Distribución espacial de accesibilidad de biomasa aprovechable para energía y proveniente de bosques nativos de coníferas.	16
Figura 4. Distribución espacial de accesibilidad de biomasa aprovechable para energía y proveniente de manglares.....	17
Figura 5. Área potencial para el cultivo de caña de azúcar.....	19
Figura 6. Área potencial para el cultivo de palma de aceite	20

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Potencial energético de subproductos de la extracción forestal y la industria maderera	11
Tabla 2. Potencial teórico para la producción de madera para energía a partir de plantaciones de Acacia.	12
Tabla 3. Existencias y productividad de combustibles de madera provenientes de bosques naturales (potencial teórico).....	14
Tabla 4. Ejemplo del potencial técnico de biomasa proveniente de bosques naturales	15
Tabla 5. Potencial técnico para la producción de etanol y biodiesel.....	21
Tabla 6. Demanda actual de biomasa en el sector eléctrico	22
Tabla 7. Coeficientes preliminares para la conversión energética de diferentes recursos biomásicos. ...	27
Tabla 8. Potencial técnico total de recursos biomásicos para uso energético	29

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, principalmente mediante tecnologías de baja potencia en zonas rurales y periurbanas. Alrededor del 35% restante se utiliza con tecnologías modernas, de mediana y alta potencia, 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.

A nivel mundial el uso y la producción de la bioenergía ha ido en aumento en los últimos años, impulsada principalmente por países como Estados Unidos, Brasil y un emergente mercado asiático. El aprovechamiento y uso exitoso de la biomasa depende de ciertos factores como; el desarrollo del mercado, el acceso a los recursos biomásicos, la disponibilidad de tecnología, la existencia de políticas públicas y de entidades de certificación, y factores sociales, culturales y económicos. Para evaluar las posibilidades de uso de bioenergía en una región o en un país, es importante en como primer paso estimar el potencial y la disponibilidad espacial de diferentes recursos y, por otro lado, considerar el acceso a tecnologías maduras que permitan la transformación y uso eficiente de la biomasa, tanto en pequeña como en gran escala.

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 utilizan tecnologías de mediana y alta potencia para la producción de electricidad con biomasa, o para uso de biogás y biocombustibles líquidos, como por ejemplo en Guatemala, República Dominicana y Nicaragua ([LCMEXL, 2017](#)).

El Salvador posee una extensión territorial de 21,040.20 Km², con una población de 5,744,113 habitantes. La división política administrativa está conformada por 14 departamentos y 262 municipios. En el sector energético, la biomasa ocupa un lugar predominante, donde la leña y el bagazo de caña de azúcar generan más de 70% de la producción anual de energía primaria en el país, con una participación de 8,660

TeraJoules de bagazo y 7,655 TeraJoules de leña para el año 2017, mientras que la mayor parte de la energía secundaria está compuesta por combustibles fósiles importados (BEN, 2017).

La energía eléctrica en el país proviene mayormente de plantas hidroeléctricas y geotérmicas, cubriendo entre ambas aproximadamente un 48% de la producción nacional (ver Figura 1). Las fuentes fósiles (Carbón, Gas Natural, Fuel Oil y Bunker) cubren otro 44% de la producción de electricidad, tendiendo a incrementar su participación en los próximos años. El uso de la biomasa en este sector está vinculado a la industria azucarera, donde se produce el 7% de la oferta total (CNE, 2018).

Entre la información más relevante sobre el uso de biocombustibles en El Salvador, se puede citar el reporte de Roldán-Villalobos (2010), en el cual se evalúa el potencial de producción de etanol y biodiesel en el país, obteniendo como resultado que para el año 2030 existirá una demanda de 300 m3/día de biodiesel y 340 m3/día de etanol, para una proporción de mezcla B10 y E10 respectivamente. Respecto a la disponibilidad de materia prima para la obtención de biocombustibles, el mismo reporte utiliza supuestos de productividad de etanol y biodiesel por hectárea cultivada, estimando que para el 2030 se necesitarían aproximadamente 20,000 ha de caña de azúcar y 130,000 ha de Jatropha para cubrir la demanda de combustibles en el sector transporte.

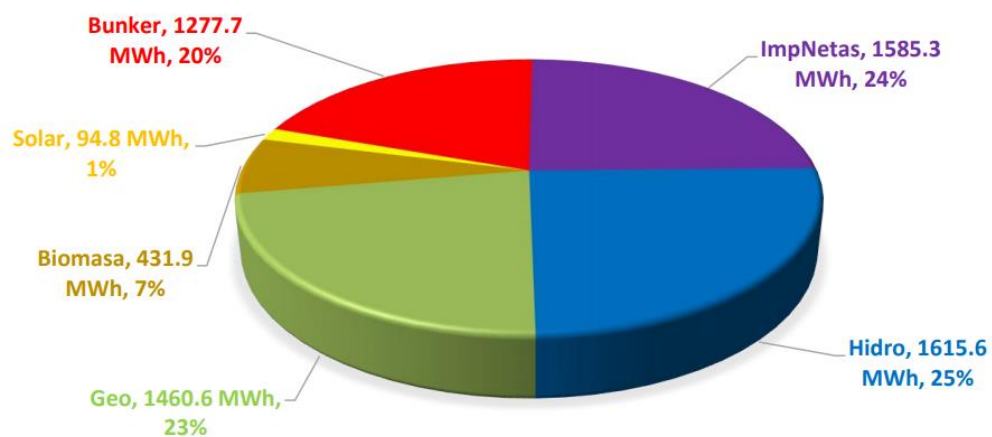


Figura 1. Inyección de Energía en la matriz energética, CNE (2018).

A pesar de la gran importancia que tiene el uso de biomasa en El Salvador, principalmente leña, hasta el momento no se encontraron estudios que utilicen herramientas de SIG para el análisis espacial de la oferta y demanda de biomasa. Además, 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. Esta integración de oferta vs demanda se presenta en una herramienta interactiva, montada en una plataforma web que permite interacción dinámica por parte de los usuarios. Este reporte describe detalladamente los pasos empleados para obtener diferentes resultados mediante el uso de la plataforma. Asimismo, el reporte explica los alcances de la herramienta web para cada recurso biomásico considerado.

Actualmente, existen a nivel global diversas plataformas para consulta online del potencial de biomasa. Entre las más importantes podemos citar la del Centro de Desarrollo de Energías Renovables (CEDER -

CIEMAT) de España, donde se desarrolló una [plataforma geoespacial](#) que permite estimar la disponibilidad de biomasa alrededor de un punto específico y los costos logísticos asociados. El National Renewable Energy Laboratory (NREL), del Departamento de Energía de los Estados Unidos, tiene mapas interactivos para biocombustibles líquidos ([BioFuels](#)) y para calor y electricidad ([BioPower](#)), que permiten consultar los potenciales por unidades administrativas de ese país y cuenta con un sistema georeferenciado de la ubicación actual de plantas de generación eléctrica. El Bioenergy Knowledge Discovery Framework (KDF), también del Departamento de Energía de los Estados Unidos, es una [plataforma de colaboración en línea y manejo de información](#) que proporciona acceso a información espacial y temporal (i.e. escenarios) sobre bioenergía en Estados Unidos. El grupo de investigación en energía del Instituto de Energía y Ambiente de la Universidad de São Paulo publica actualizaciones periódicas del [Atlas de Bioenergía de Brasil](#), un sistema dinámico de consulta. La National Sustainable Energy Authority de la República de Irlanda generó un [sistema de consulta en línea](#) sobre los potenciales espaciales de la bioenergía en ese país, con un diseño muy limpio y fácil de usar, que permite exportar la información consultada en múltiples formatos. La Asociación Europea de Biomasa (AEBIOM) ha desarrollado un [mapa relativamente interactivo](#) de limitada consulta, con ejemplos de instalaciones sobre bioenergía en Europa. El proyecto Basis Bioenergy desarrolló una [plataforma web geoespacial](#) para evaluar el abasto futuro de chips y pellets en Europa para cualquier ubicación de interés. El sistema, además, permite consultar potenciales regionales de bioenergía y la competencia entre recursos, integrando criterios de sustentabilidad a la hora de calcular los potenciales.

La plataforma generada para el SICA y que se presenta en este reporte, cuenta con ciertos aspectos originales que no poseen las herramientas descritas anteriormente. Entre los más importantes se destacan: un Panel de Administración amigable para el usuario que permite la utilización y apropiación del sistema por terceros, una Interfase web para la simulación de escenarios prospectivos - (www.wegp.unam.mx); una Interfase de optimización de localización de centrales eléctricas; la comparación entre oferta vs demanda espacial de diferentes recursos biomásicos. Además, esta plataforma conjunta en una sola herramienta las siguientes opciones; selección de áreas y estadísticas de análisis en raster, criterios de sustentabilidad (filtros espaciales) y diferentes tecnologías de transformación de biomasa en energía 100% personalizables. Se obtiene de esta forma una herramienta de análisis alineada a las políticas energéticas del país, que permite apoyar a tomadores de decisiones, académicos, empresarios y todos aquellos interesados que deseen valorar el potencial de generación de bioenergía en El Salvador.

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 El Salvador 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 urbanos: sólidos, gaseoso y líquidos. Cabe mencionar que la integración de los diferentes recursos en la plataforma, y en consecuencia, en la explicación de este reporte, depende del acceso a información oficial (mapas) proporcionados por cada país integrante del SICA.

Algunos de estos recursos ya se utilizan con fines energéticos en el país (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, en algunos

casos se 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 permiten 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 y en el 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 El Salvador, 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 El Salvador. 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

Los recursos de biomasa para energía comprenden una variada gama de fuentes primarias –es decir, aquéllas 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 cogenerar calor y electricidad. Aunque no existe información sobre el consumo actual 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 y la palma, para la producción de bioetanol y biodiesel respectivamente. A continuación, se explica en el reporte los diferentes potenciales energéticos que se pueden obtener con el uso de la plataforma web.

BIOMASA FORESTAL

De acuerdo con el informe de [Cobertura Forestal de la República de El Salvador \(2012\)](#), en el 2010 la cobertura forestal ocupó más de 482 mil hectáreas en el país, donde predominan los cafetales y en menor medida, los bosques mixtos semi-caducifoleos y los bosques de coníferas. Respecto a la extracción de madera industrial, según datos de la [FAO \(2010\)](#) en el 2007 alcanzaron los 682 mil m³, mientras que la extracción de madera para energía (para uso industrial, comercial o doméstico) superó los 4.2 millones de m³.

Los bosques son vulnerables a las plagas y a los incendios forestales que anualmente afectan a miles de hectáreas. Estos fenómenos necesitan un control y manejo adecuado, que proporcionaría como resultado 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 alcanza los 4.6 PJ/año; de éstos se estimó que la mitad corresponden a subproductos de la extracción forestal y la otra mitad a la industria maderera (Tabla 1). Es importante notar que los recursos de la industria tienen una dispersión espacial mucho menor que los provenientes de la extracción en bosques. Esta diferencia debe ser considerada al plantear

opciones tecno-económicas 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 (Miles tMS/año)	Equivalente en energía primaria (PJ/año)
Subproductos de la extracción forestal	0.68	0.5	0.17	3.1
Subproductos de la industria maderera	0.34	0.5	0.08	1.5
TOTAL				4.6

CONSUMO ACTUAL

Los principales productos no maderables que se aprovechan en los planes de manejo son la leña y el carbón, destinados 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. Se consideran de interés general las plantaciones de las siguientes especies: *Acacia mangium*, *Gmelina arborea*, *Leucaena leucocephala*, *Tectona grandis* y *Eucalyptus*. La metodología se basa en la clasificación de áreas según su aptitud para la producción de madera para energía (para más información ver la sección de [metodología](#)).

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. Para elaborar la tabla se tomó a modo de ejemplo la plantación de *Acacia*. Resultados similares se pueden obtener siguiendo los mismos pasos para las demás especies. En la primera fila se puede observar el potencial teórico máximo existente para todo el país (**283 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, 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 (**114 PJ**). Considerando los mismos criterios de restricción, se pueden obtener los siguientes potenciales energéticos mínimos para cada especie; Gmelina (106 PJ), Eucalipto (193 PJ), Leucaena (42 PJ), Teca (74 PJ).

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

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 sin restricción	1.9	15.7	283	3.0
Potencial mínimo	0.7	6.3	114	1.2

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 (6.3 millones de tMS/año), podemos obtener una potencia eléctrica instalada de **1,218 MWe (1.2 GWe)**. Para llegar a este valor se consideró la transformación de la plantación en astillas, con un contenido de humedad del 30% 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, factor de planta del 80% y factor de disponibilidad del 90%. Para más información ver la [Tabla 6](#) de la sección de metodología.

En la Figura 2 están representadas a modo de ejemplo, las áreas con potencial teórico para el establecimiento de plantaciones de Acacia 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 6.3 hasta 15.7 tMS/ha/año.

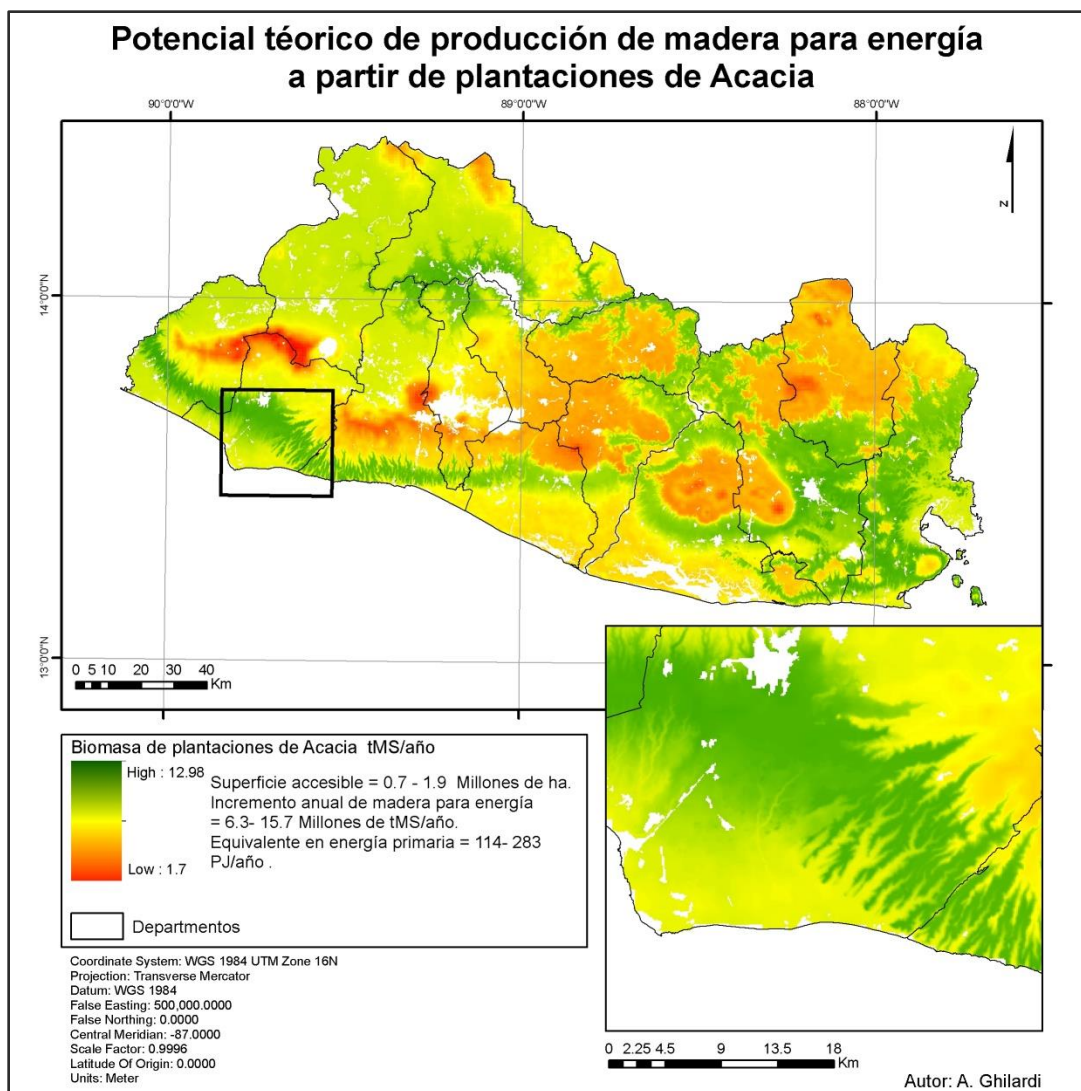


Figura 2. Áreas con potencial para plantaciones forestales para energía

CONSUMO ACTUAL

La leña es el principal producto energético que se aprovecha de las plantaciones forestales en El Salvador. Existe poca información sobre la demanda actual de plantaciones con fines energéticos a mediana o gran escala.

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 deberían excluir 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). Este factor depende de las condiciones regionales de cada capa de vegetación analizada, por lo que se sugiere al usuario considerar y personalizar este factor en las cadenas de transformación de la plataforma. 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. 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 4).

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

Tipo de cobertura forestal	Superficie accesible (Millones ha)	Productividad promedio (tMS/ha/año)	Incremento anual de madera para energía (millones tMS/año)	Equivalente en energía primaria (PJ/año)
Bosque de coníferas	0.07	2.9	0.2	4
Bosque de galería	0.02	2.9	0.05	1
Bosque mixto semi caducifolio	0.11	3.9	0.4	8
Bosque caducifolio	0.11	2.9	0.3	6
Bosque siempre verde	0.02	4.9	0.1	2
Mangle	0.04	6.0	0.2	4
TOTAL				25

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 de coníferas (4 PJ/año, véase Tabla 3), se pueden seleccionar las opciones de accesibilidad mínima o máxima, obteniendo superficies entre 0.05 y 0.07 millones de hectáreas, que multiplicadas por la productividad de cada sitio resulta un potencial técnico que varía entre 2.6 y 3.7 PJ/año. El mismo procedimiento se puede aplicar para las demás capas de vegetación.

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 máxima (MWe)
Bosque de conífera	0.05 – 0.07	0.14 – 0.20	2.6 – 3.7	35
Mangle	0.01 - 0.03	0.06 - 0.20	1.1 – 3.7	35
TOTAL			3.7 - 7.4	70

Nota: la elaboración de la tabla es a modo de ejemplo. Se deben considerar todas las coberturas para determinar los valores totales.

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 de la Tabla y su producción de madera, podemos calcular la potencia eléctrica instalada igual a **70 MWe**. Sin embargo, para determinar la **potencia eléctrica total instalada** para bosques naturales, se deben considerar todas las coberturas. 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, factor de planta y de disponibilidad del 80 y 90%.

En las Figuras 3 y 4 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.

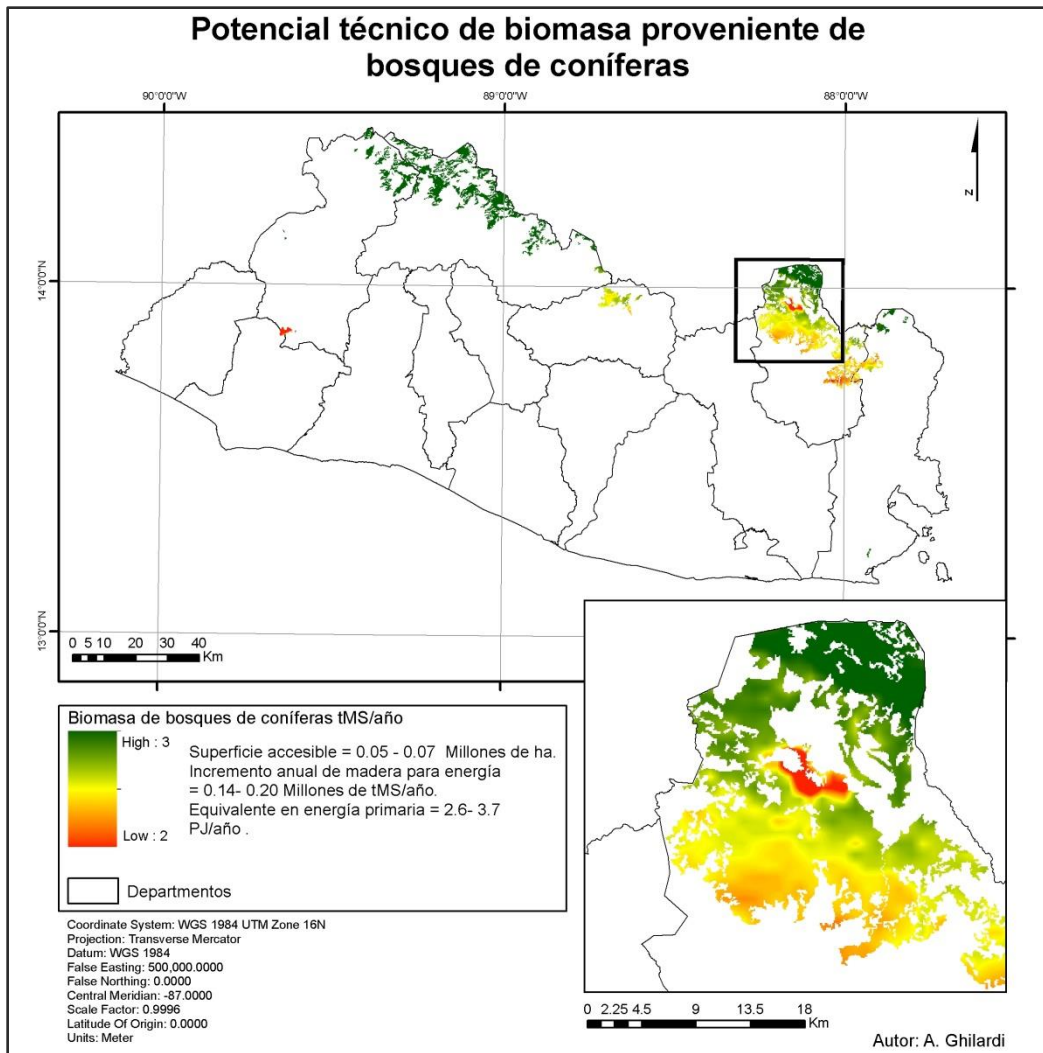


Figura 3. Distribución espacial de accesibilidad de biomasa aprovechable para energía y proveniente de bosques nativos de coníferas.

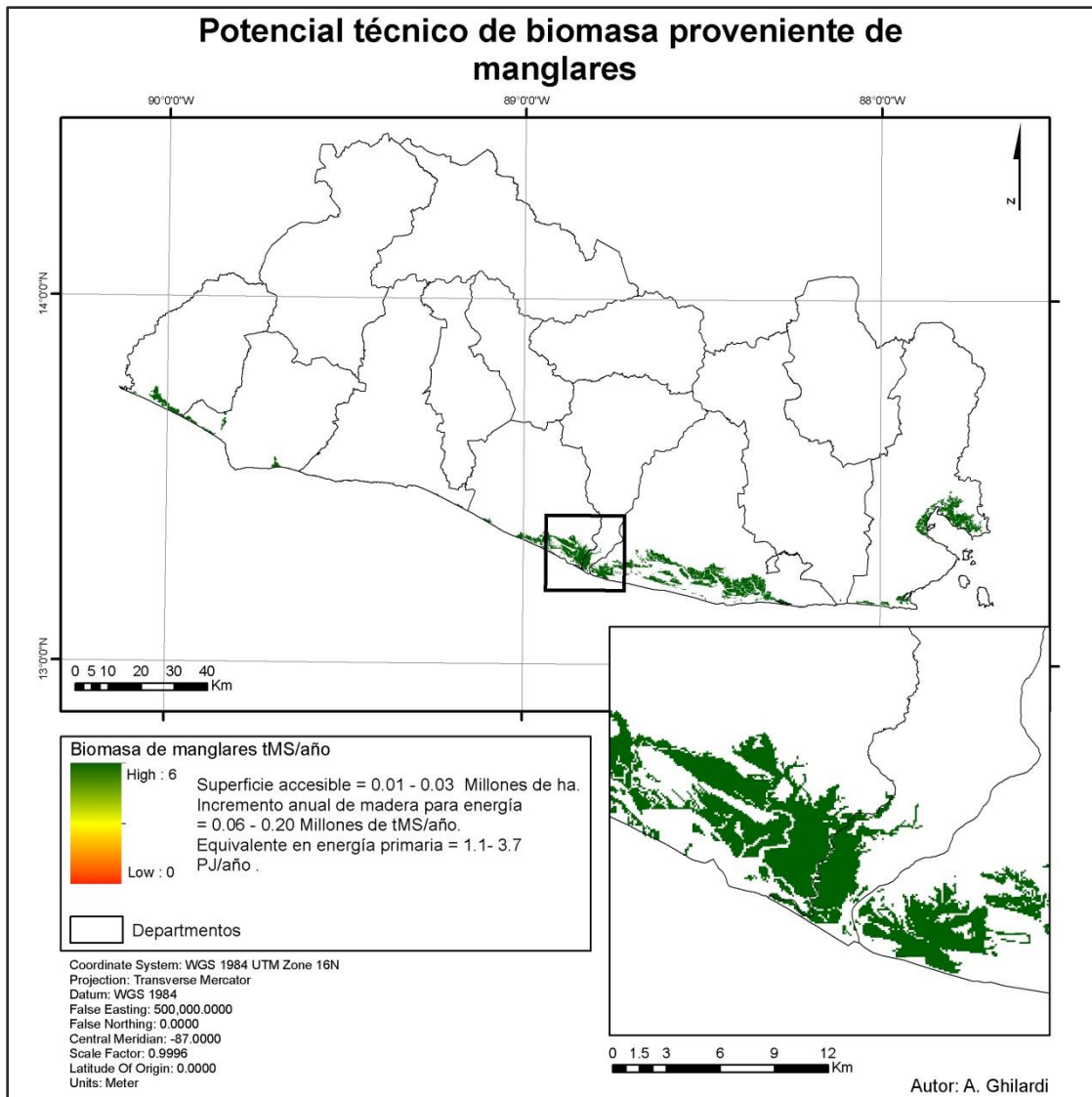


Figura 4. Distribución espacial de accesibilidad de biomasa aprovechable para energía y proveniente de manglares.

CONSUMO ACTUAL

La biomasa proveniente de los bosques nativos se utiliza principalmente para la obtención de leña. Como se mencionó anteriormente, El Salvador tiene una gran dependencia de la leña para cubrir las necesidades energéticas del sector rural. Es necesario contar con una cuantificación de la demanda y analizar planes de mejora tecnológica, que permita disminuir el consumo y mitigar los efectos sobre la salud.

BIOMASA DE RESIDUOS AGRÍCOLAS

SUBPRODUCTOS AGRÍCOLAS, PECUARIOS Y AGROINDUSTRIALES

Un importante porcentaje de residuos agroindustriales se utilizan en el sector industrial para cogenerar o bien para generar electricidad. El principal recurso es el bagazo de caña de azúcar, sin embargo, actualmente no se cuenta con información sobre el potencial de energético de este recurso ni de su demanda. Sería importante también 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. Además, sería necesario considerar el potencial de los residuos agrícolas para la producción de calor industrial y/o electricidad.

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 El Salvador. A pesar de que actualmente existe poca información sobre la producción de bioetanol a partir de los subproductos de la industria del azúcar, es importante evaluar la existencia de tierras disponibles que podrían ser aptas para incrementar el cultivo de la caña. De esta forma, se puede estimar el potencial sustentable de producción de bioetanol, que podría dar valor agregado a la industria del azúcar y podría diversificar las exportaciones. Como se muestra en la Figura 5 las tierras más aptas para incrementar el cultivo de caña de azúcar se encuentran en las zonas bajas de las regiones centro y sur del país.

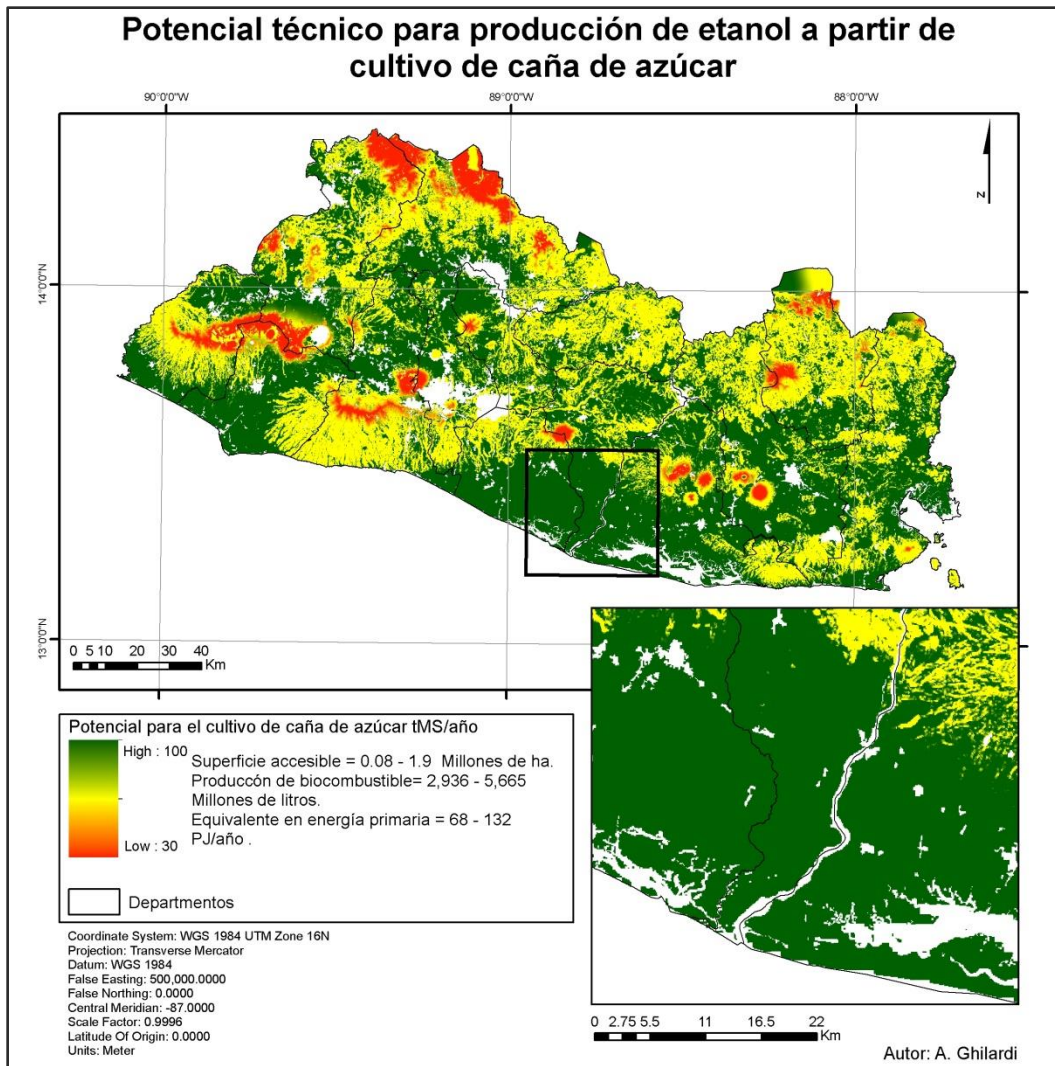


Figura 5. Área potencial para el cultivo de caña de azúcar

En El Salvador existe poca información sobre la producción de biodiesel. Las empresas actuales enfocan sus esfuerzos a obtener biodiesel a partir de aceites usados de cocina, y las pocas investigaciones basan sus estudios en cultivos de higuera o *Jatropha* como materia prima. En nuestro reporte proponemos el cultivo de la palma de aceite o palma africana que, a pesar de que su producción es incipiente en el país, es un cultivo promisorio bajo criterios estrictos de sustentabilidad. Incrementar la producción de biodiesel en el país es importante para consumo interno o como opción para exportar al mercado europeo, como actualmente hacen otros países centroamericanos. Es por lo tanto interesante analizar tierras potenciales disponibles que permitan aumentar la producción de la palma, como se muestra en la Figura 6.

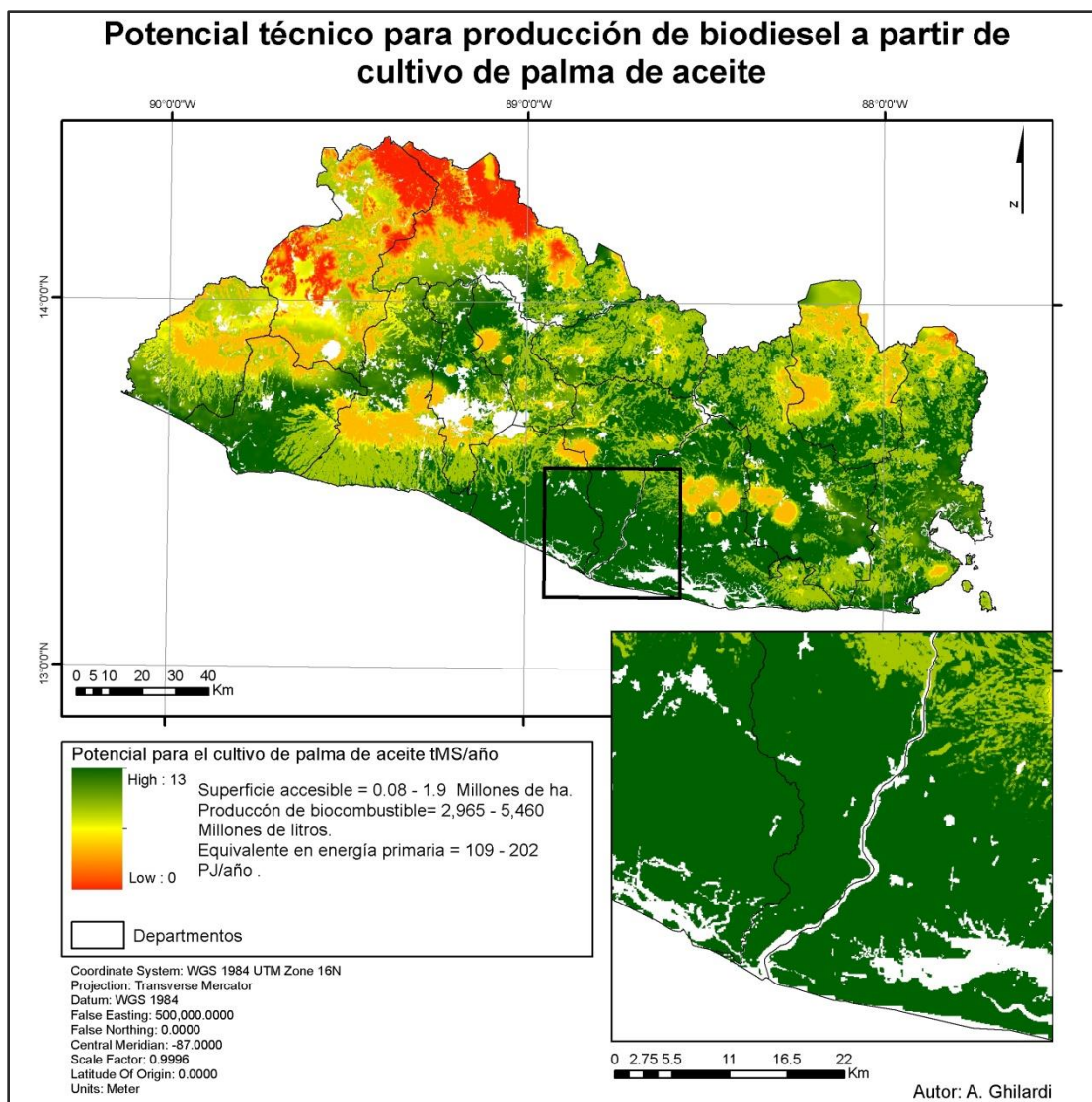


Figura 6. Área potencial para el cultivo de palma de aceite

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 para producir **132 PJ/año** de etanol. En la plataforma se pueden seleccionar filtros, como por ejemplo no considerar las ANP, con lo cual el potencial disminuye a 114 PJ/año. En el caso más conservativo, se puede restringir las ANP y las pendientes mayores a 10°, con lo cual se podrían producir más de **2,900 millones de litros de etanol**, con un equivalente energético igual a **68 PJ/año** (última fila de la Tabla 5).

La misma explicación aplica al cultivo de palma, que al considerar los criterios más conservativos se podrían producir aproximadamente **2,965 millones de litros de biodiesel**. El usuario final podrá reemplazar en la plataforma Web el cultivo de interés y estimar posteriormente la capacidad de producción de biocombustibles, modificando las variables presentadas en las cadenas de transformación de dicha plataforma.

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

Cultivo	Superficie accesible	Superficie potencial (millones ha)	Rendimiento promedio 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	1.9	82.4	162	5,665 *	132
	Mínima	0.8	98.8	83	2,936 *	68
Biodiesel						
Palma de aceite	Sin filtro	1.9	9.7	18	5,460	202
	Mínima	0.8	11.6	10	2,965	109

* Nota: El equivalente energético del cultivo de caña de azúcar considera que sólo el 50% de la producción estaría destinada a la obtención de etanol. La producción en litros se obtiene con las cadenas de transformación de la plataforma.

CONSUMO ACTUAL

No existe información disponible de la demanda actual de biocombustibles en el país.

ANÁLISIS DEL CONSUMO ACTUAL

Según datos del [BEN \(2017\)](#), la generación de energía eléctrica en el país depende principalmente plantas termoelectricas a base de combustibles fósiles importados. Debido a la tendencia del incremento en los costos de los combustibles fósiles en el mercado internacional, existe un enorme potencial de uso de biomasa en estas centrales eléctricas y en diferentes ramos industriales, que además de diversificar las fuentes de energía, ayudaría a mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

Bajo este contexto, actualmente existen algunas empresas dedicadas a la producción de electricidad con biomasa en El Salvador, donde la energía producida es destinada a interconexión o al mercado minorista. El principal recurso biomásico utilizado como combustible es el bagazo de caña de azúcar. En la Tabla 6 se detalla la demanda actual de biomasa en las principales empresas del país según información del SIGET (2017).

Actualmente, la biomasa cuenta con el 9% de la capacidad total instalada 1844 MW, existiendo una tendencia creciente de uso si la comparamos con el porcentaje que ocupaba en el 2008 (2%) ([SIGET, 2017](#)). Según nuestras estimaciones, la demanda actual de biocombustibles sólidos en mediana y gran potencia está representada por el uso de bagazo de caña de azúcar para generación eléctrica, superando los 2 PJ/año.

Tabla 6. Demanda actual de biomasa en el sector eléctrico

Nombre empresa o proyecto	Residuo utilizado	Potencia instalada (MW)	Factor de carga	Factor de utilización promedio anual (%)	Energía primaria consumida (MWh/año) *	Consumo de biomasa (tMS/año)	Equivalente energético (PJ/año)
CASSA. Central Izalco	Bagazo caña azúcar	45	0.62	0.86	150,672	35,874	0.54
CASSA. Ingenio Chaparrastique	Bagazo caña azúcar	78.4	0.45	0.98	214,620	51,100	0.77
Ingenio El Angel	Bagazo caña azúcar	98.8	0.38	0.70	166,440	39,629	0.59
Ingenio Jiboa	Bagazo caña azúcar	35	0.43	0.46	43,174	10,280	0.15
Ingenio La Cabaña	Bagazo caña azúcar	33.5	0.99	0.61	125,956	29,990	0.45
TOTAL					700,863	166,872	2.50

Nota: estimado con datos proporcionados por el [SIGET \(2017\)](#), considera sólo 6 meses al año para producción de electricidad.

METODOLOGÍA

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 energéticos. A continuación se detallan los pasos seguidos para determinar del potencial energético 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 rango 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 autorizados.

Tabla 2: Falta actualizar la productividad promedio de acuerdo a las condiciones locales de crecimiento de las especies forestales. Es necesario contar con un mapa actualizado de suelos y referenciar las calidades de suelo con las condiciones de aptitud de las plantaciones.

Tabla 3: Ídem anterior para las diferentes coberturas vegetales.

Tabla 5: Faltan capas del cultivo de caña o de sus residuos, siendo la caña de azúcar uno de los principales cultivos de El Salvador. Referenciar las calidades de suelo con las condiciones de aptitud para los diferentes cultivos. Se puede actualizar la tabla con cultivos que se consideren de interés regional.

Faltan capas con información sobre los diferentes cultivos agrícolas en el país.

Faltan capas de la distribución de establos y sus producciones (o números de cabezas).

Faltan 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 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 obtener el potencial energético de dichos recursos.

SUBPRODUCTOS DEL APROVECHAMIENTO Y LA INDUSTRIA FORESTAL

El volumen de la producción forestal maderable se obtuvo del informe de [Cobertura Forestal de la República de El Salvador \(2012\)](#), considerando el volumen de aprovechamiento de madera para la producción en trozas, obtenida en metros cúbicos rollo (m^3r) para el año 2010. Como no se encontraron datos sobre el volumen forestal destinado a la industria del aserrío, se estimó que el 50% de la extracción llega a la industria de transformación, quedando el otro 50% como residuo en el bosque. Se desconoce el volumen destinado a la industria de pulpa y papel. 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/ m^3 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 de aptitud basado en 4 criterios claves que determinan la calidad de un sitio para el establecimiento de plantaciones energéticas. 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 del geoservidor del [Plan Nacional de Ordenamiento y Desarrollo Territorial](#) (2004), del [Geoportal del Centro Nacional de Registros](#), entre otros.

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 [Plan Nacional de Ordenamiento y Desarrollo Territorial](#). Los valores de productividad volumétrica se obtuvieron de casos de estudio con condiciones de crecimiento similares a las de El Salvador, como por ejemplo, el estudio de [Piotto \(2007\)](#). 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 (que varía de acuerdo a la aptitud del terreno). Para conversiones energéticas 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 seis 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 37 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:

$$Pt = Mr * Gm * PC \quad (1)$$

Donde: 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. Para este trabajo, el rendimiento fue considerado como el promedio de 80 m³/t establecido por [Ríos y Kaltschmitt, 2013](#).

MÓDULO DE DEMANDA

La demanda actual de biomasa en El Salvador 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, principalmente en ingenios azucareros. 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 interés creciente por el uso de biomasa en el sector industrial y eléctrico. Cada vez son más las empresas, principalmente agroindustrias, que buscan aprovechar sus residuos para la producción de vapor de proceso y para cogeneración. Actualmente, 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 utilizó la siguiente ecuación:

$$Db = \left(\frac{P * H}{Ef / 100} \right) * PCI \quad (2)$$

Donde: 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 actual de biomasa del sector eléctrico, se partió de la base de datos del SIGET (2017) sobre la Capacidad instalada y disponible de las centrales generadoras de electricidad en El Salvador, que detalla la potencia instalada en MW de cada planta de generación. Para determinar la energía anual generada se considera un factor de carga del 80%, factor de disponibilidad del 90% y la eficiencia de planta del 30%. Para estimar el consumo anual de biomasa se contempla un factor de conversión de 4.2 MWh por tMS. Para convertir las tMS a su equivalente energético en PJ se consideró un PCI igual a 15 PJ por millón de tMS para los residuos agroindustriales, y un PCI de 18 PJ por millón de tMS para los recursos forestales.

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 7 se pueden ver las eficiencias más comunes, tomadas como referencia para este trabajo, de acuerdo al tipo de planta y al recurso usado como combustible. Estos coeficientes también son utilizados en la plataforma para las cadenas de transformación de los recursos.

Tabla 7. Coeficientes preliminares para la conversión energética 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

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

Donde: 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

$$P = \frac{Pb * Efc * Eft * Efg}{Fp * t} \quad (4)$$

Donde: 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 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.

OFERTA POTENCIAL PARA GENERAR CALOR Y ELECTRICIDAD (MEDIANA Y GRAN POTENCIA)

Actualmente, El Salvador cuenta con un enorme potencial técnico de recursos biomásicos que se podrían aprovechar con fines energéticos para ampliar la participación de la bioenergía en la matriz energética nacional, superando los 560 PJ/año. El mayor potencial proviene de los cultivos energéticos dedicados de caña de azúcar y palma de aceite, sin embargo, es importante aclarar que se trata de un potencial teórico no existente en la actualidad. Además, este potencial no contempla aspectos económicos de producción y considera aspectos básicos de sustentabilidad.

Las plantaciones forestales dedicadas podrían abastecer leña para cubrir la demanda total en el país (aproximadamente 197 PJ/año). La madera proveniente de bosques nativos es una importante fuente de energía, que podría ser aprovechada mediante planes sustentables de manejo forestal. El potencial de la industria de la madera, a pesar de generar la menor oferta, tiene las mejores condiciones físicas para su uso inmediato. Sería necesario explorar opciones tecno-económicas (pellets, astillas) para su uso eficiente en los diferentes sectores económicos del país.

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 – 4.6
Plantaciones dedicadas	Leña	0 – 197*
Bosques nativos	Leña	13 – 25
Cultivos dedicados		
Caña azúcar	Etanol	68 – 132
Palma de aceite	Biodiesel	109 – 202
TOTAL		190 – 561

Nota: se toma a modo conservativo el potencial energético del Eucalipto por ser el mayor.

CONCLUSIONES GENERALES DEL ESTUDIO DE CASO

El potencial mínimo de biomasa obtenido (190 PJ/año) podría cubrir más del 100% de la oferta total de energía en El Salvador (130 PJ). El potencial energético que proviene como subproducto de la industria forestal y de los bosques nativos (13 - 227 PJ/año), podría ser utilizado para reemplazar el todo el fuel oil utilizado en el sector industrial (14 PJ). El potencial resultante del aprovechamiento y de la industria forestal es muy interesante dado que es un recurso existente, su uso inmediato depende principalmente de la disponibilidad tecnológica para la transformación en distintos vectores energéticos y para su uso eficiente; de la infraestructura de caminos y de los sistemas de transporte; y de las condiciones

económicas, principalmente de la competitividad con los precios actuales de los combustibles fósiles en el país.

A pesar que el potencial de plantaciones forestales dedicadas es mayor que el de bosques nativos, variando de 42 a 193 PJ/año para el caso de la Leucaena y el Eucalipto respectivamente, se trata de un potencial teórico, que puede o no desarrollarse, a diferencia del potencial energético estimado para el sector forestal. Sin embargo, estos valores permiten estimar las áreas más prominentes para establecer plantaciones para la producción de leña, y que además permitirían brindar diferentes servicios ecosistémicos.

Se podrían producir más de 2,900 millones de litros de bioetanol (68 PJ/año) a partir del cultivo de caña de azúcar. Esta cantidad permitiría aumentar el nivel de las exportaciones, o bien, asegurar el suministro nacional. El cultivo de palma de aceite permitiría producir cerca de 3,000 millones de litros de biodiesel al año (109 PJ/año), como alternativa al cultivo de *Jatropha curcas*, atendiendo la volatilidad de los precios internacionales del biocombustible. Es importante mencionar que los cultivos energéticos mencionados, y los que se propongan en el futuro, deben estar impulsados por medio de políticas ambientales que aseguren la sustentabilidad a lo largo de sus ciclos de vida. Se debe evitar principalmente la competencia de tierras con cultivos alimenticios y el cambio de uso de suelo desmedido.

Para mejorar la estimación del potencial energético de los recursos evaluados, es necesario en primer lugar, afinar la estimación del potencial de las plantaciones forestales y de cultivos dedicado. Es indispensable contar con el mapa de suelos para vincular las calidades de suelos en las diferentes regiones del territorio nacional con las aptitudes de crecimiento de los cultivos mencionados. Se deben afinar los criterios de sustentabilidad para el aprovechamiento y uso de cada recurso, de acuerdo a cada región específica. Por último, se deben considerar los 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, y de encontrar alternativas de uso para los diferentes recursos analizados.

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.

Bailis, R., Drigo, R., Ghilardi, A., Masera, O., 2015. The carbon footprint of traditional woodfuels. *Nat. Clim. Change* 5, 266e272.

BEN, Balance Nacional de Energía (2017). Consejo Nacional de Energía, Subdirección de Planificación e Información Energética, El Salvador.

http://estadisticas.cne.gob.sv/wp-content/uploads/2018/07/Balance_2017_PRELIMINAR.pdf

Bowman, M.S., Soares, B.S., Merry, F.D., Nepstad, D.C., Rodrigues, H., Almeida, O.T., 2012. Persistence of cattle ranching in the Brazilian Amazon: a spatial analysis of the rationale for beef production. *Land Use Policy* 29 (3), 558e568.

Brando, P.M., Balch, J.K., Nepstad, D., Morton, D.C., Putz, F.E., Coe, M.T., Silverio, D., Macedo, M.N., Davidson, E., Nobrega, C.C., Alencar, A., Soares-Filho, B.S., 2014. Abrupt increases in Amazonian tree mortality due to drought-fire interactions. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 111, 6347e6352.

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.

Carlson, K.M., Curran, L.M., Ratnasari, D., Pittman, A.M., Soares-Filho, B.S., Asner, G.P., Trigg, S.N., Gaveau, D.A., Lawrence, D., Rodrigues, H.O., 2012.

Cartus, O., Kellndorfer, J., Walker, W., Franco, C., Bishop, J., Santos, L., Fuentes, J.M.M., 2014. A national, detailed map of forest aboveground carbon stocks in Mexico. *Remote Sens.* 6 (6), 5559e5588.

CNE, Consejo Nacional de Energía (2018). Plan indicativo de la expansión de la generación eléctrica de El Salvador 2018-2035. <http://estadisticas.cne.gob.sv/estudios-cne/>

Cobertura forestal de la República de El Salvador (2012). Ministerio de Agricultura y Ganadería, Dirección general de ordenamiento forestal, cuencas y riego división de cambio climático. El Salvador.

Costanza, R., Voinov, A., 2004. *Landscape Simulation Modeling: a Spatially Explicit, Dynamic Approach.* Springer, New York.

Chen, X., Vin~a, A., Shortridge, A., An, L., Liu, J., 2014. Assessing the effectiveness of payments for ecosystem services: an agent- based modeling approach. *Ecol. Soc.* 19 (1).

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.

Eckholm, E.P., 1975. *The Other Energy Crisis, Firewood.* Worldwatch Institute, Washington.

FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (2010). *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2010, Informe Nacional, El Salvador.* FRA2010/061. Roma.

Ferraz, Y.A., 2013. Urban expansion and environmental risk in the São Paulo metropolitan area. *Clim. Res.* 57, 73e80.

Foley, G., 1985. Woodfuel, deforestation and tree growing in the developing world. *Energy Policy* 13 (2), 190-192.

Ghilardi, A., Guerrero, G., Maser, O., 2007. Spatial analysis of residential fuelwood supply and demand patterns in Mexico using the WISDOM approach. *Biomass Bioenergy* 31 (7), 475-491.

Ghilardi, A., Guerrero, G., Maser, O., 2009. A GIS-based methodology for highlighting fuelwood supply/demand imbalances at the local level: a case study for Central Mexico. *Biomass Bioenergy* 33 (6e7), 957e972.

- Ghilardi, A., Mas, J.-F., 2011. Spatial modeling of fuelwood extraction dynamics: a case study for Honduras. In: *Memorias de la XIX Reunion Nacional de la Sociedad de Especialistas Latinoamericanos en Percepcion Remota y Sistemas de Informacion Espaciales (SELPER)*. SELPER, Morelia, Mexico.
- Hansfort, S.L., Mertz, O., 2011. Challenging the woodfuel crisis in West African woodlands. *Hum. Ecol.* 39 (5), 583-595.
- He, G.M., Chen, X.D., Bearer, S., Colunga, M., Mertig, A., An, L., Zhou, S.Q., Linderman, M., Ouyang, Z.Y., Gage, S., Li, S.X., Liu, J.G., 2009. Spatial and temporal patterns of fuelwood collection in Wolong Nature Reserve: implications for panda conservation. *Landsc. Urban Plan.* 93 (1), 92e92.
- 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.
- Kolb, M., Mas, J., Galicia, L., 2013. Evaluating drivers of land-use change and transition potential models in a complex landscape in Southern Mexico. *Int. J. Geogr. Inf. Sci.* 27, 1804e1827.
- Khuman, Y.S.C., Pandey, R., Rao, K.S., 2011. Fuelwood consumption patterns in Fakot watershed, Garhwal Himalaya, Uttarakhand. *Energy* 36 (8), 4769e4776.
- 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.
- Liu, S., Kaire, M., Wood, E., Diallo, O., Tieszen, L.L., 2004. Impacts of land use and climate change on carbon dynamics in south-central Senegal. *J. Arid Environ.* 59, 583e604.
- 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.
- Medvigy, D., Moorcroft, P.R., 2012. Predicting ecosystem dynamics at regional scales: an evaluation of a terrestrial biosphere model for the forests of northeastern North America. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 367 (1586), 222e235.
- Medvigy, D., Wofsy, S.C., Munger, J.W., Hollinger, D.Y., Moorcroft, P.R., 2009. Mechanistic scaling of ecosystem function and dynamics in space and time: ecosystem Demography model version 2. *J. Geophys. Res. Biogeosci.* 114 (1).
- Medvigy, D., Wofsy, S.C., Munger, J.W., Moorcroft, P.R., 2010. Responses of terrestrial ecosystems and carbon budgets to current and future environmental variability. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 107 (18), 8275e8280.

- 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.
- Nepstad, D., Soares, B.S., Merry, F., Lima, A., Moutinho, P., Carter, J., Bowman, M., Cattaneo, A., Rodrigues, H., Schwartzman, S., McGrath, D.G., Stickler, C.M., Lubowski, R., Piris-Cabezas, P., Rivero, S., Alencar, A., Almeida, O., Stella, O., 2009. The end of deforestation in the Brazilian Amazon. *Science* 326 (5958), 1350-1351.
- 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.
- Pathiranaa, A., Deneke, H.B., Veerbeek, W., Zevenbergen, C., Banda, A.T., 2013. Impact of urban growth-driven land use change on microclimate and extreme precipitation: a sensitivity study. *Atmos. Res.* 138, 59-72.
- 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.
- Perez-Vega, A., Mas, J.F., Ligmann-Zielinska, A., 2012. Comparing two approaches to land use/cover change modeling and their implications for the assessment of biodiversity loss in a deciduous tropical forest. *Environ. Model. Softw.* 29 (1), 11-23.
- Piotto, D. (2007). A meta-analysis comparing tree growth in monocultures and mixed plantations. *Forest Ecology and Management*, 255:781-786.
- REN 21 (2016) *Renewables 2016 Global Status Report*. (Paris: REN21 Secretariat).
- REN 21 (2017) *Renewables 2017 Global Status Report*. (Paris: REN21 Secretariat).
- REN21, 2017. *Renewable Energy Tenders and Community [Empowerment]: Latin America and the Caribbean* (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.
- Roldán-Villalobos, C. (2010). *Eficiencia Energética en la Producción de Biocombustibles. Plan de acción para el desarrollo de la estrategia de biocombustibles. Proyecto ATN/OC-10897-ES, El Salvador*.
- 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.
- SIGET, Superintendencia General de Electricidad y Telecomunicaciones (2017). Boletín de estadísticas eléctricas N°19 AÑO 2017. El Salvador.
- 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.
- Sonter, L.J., Barrett, D.J., Soares-Filho, B.S., Moran, C.J., 2014a. Global demand for steel drives extensive land-use change in Brazil's Iron Quadrangle. *Glob. Environ. Change* 26, 63e72.
- Sonter, L.J., J, B.D, Soares-Filho, B.S., 2014b. Offsetting the impacts of mining to achieve no net loss of native vegetation. *Conserv. Biol.* 28 (4), 1068e1076.
- Soares-Filho, B.S., Rodrigues, H., Costa, W., 2010. Modeling Environmental Dynamics with Dinamica EGO. Centro de Sensoriamento Remoto - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brazil. www.csr.ufmg.br/dinamica (Last access: May 2012).
- Soares, B., Moutinho, P., Nepstad, D., Anderson, A., Rodrigues, H., Garcia, R., Dietzsch, L., Merry, F., Bowman, M., Hissa, L., Silvestrini, R., Maretti, C., 2010. Role of Brazilian Amazon protected areas in climate change mitigation. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 107 (24), 10821e10826.
- Soares, B., Silvestrini, R., Nepstad, D., Brando, P., Rodrigues, H., Alencar, A., Coe, M., Locks, C., Lima, L., Hissa, L., Stickler, C., 2012. Forest fragmentation, climate change and understory fire regimes on the Amazonian landscapes of the Xingu headwaters. *Landsc. Ecol.* 27 (4), 585e598.
- Soares, B.S., Nepstad, D.C., Curran, L.M., Cerqueira, G.C., Garcia, R.A., Ramos, C.A., Voll, E., McDonald, A., Lefebvre, P., Schlesinger, P., 2006. Modelling conservation in the Amazon basin. *Nature* 440 (7083), 520e523.
- Top, N., Mizoue, N., Ito, S., Kai, S., Nakao, T., Ty, S., 2006. Re-assessment of woodfuel supply and demand relationships in Kampong Thom Province, Cambodia. *Biomass Bioenergy* 30 (2), 134e143.
- 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.