

CONSIDERACIONES SOBRE LA DENDROENERGÍA BAJO UN ENFOQUE SISTÉMICO

Juan Fernando Patiño Díez¹ & Ricardo Smith Quintero²

¹ Grupo de Estudios en Energía, ² Profesor Titular
Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín
jfpatino@unal.edu.co

Recibido para evaluación: 13 de Mayo de 2008

Aceptación: 16 de Junio de 2008

Entrega de versión final: 18 de Junio de 2008

Resumen

La energía obtenida a partir de biomasa leñosa o también llamada dendroenergía, toma cada vez mas fuerza como otra de las alternativas ante la actual crisis energética y ambiental asociada al uso desmesurado de los combustibles fósiles. Sin embargo aun existen una serie de prejuicios, vacíos de información e inconsistencias frente al tema de la dendroenergía que amerita un adecuado tratamiento y divulgación como se pretende en este artículo. Para este fin es necesario considerar la dendroenergía bajo un enfoque sistémico, es decir, teniendo en cuenta cada uno de sus componentes como partes interdependientes que manejados en conjunto conformarían los llamados sistemas dendroenergéticos. Estos integran aspectos como la producción, aprovechamiento y transporte de biomasa; su respectiva conversión a formas útiles de energía y utilización en aplicaciones específicas. Ante la gran diversidad de factores y agentes involucrados, se hace necesario llevar a cabo un adecuado proceso de planeación de este tipo de sistemas energéticos, utilizando para ello herramientas como los Sistemas de Información Geográfica (SIG), los cuales pueden ayudar a conseguir el diseño de sistemas optimizados, que logren conseguir su mayor potencial y traer consigo grandes beneficios del orden energético y socio-ambiental. Las experiencias con sistemas dendroenergéticos aun son pocas, y especialmente en Colombia se carece de proyectos piloto en donde se demuestre la conveniencia de su implementación y surjan pautas para su planificación, operación y mantenimiento. En vista de las grandes oportunidades que presenta la dendroenergía y su escaso desarrollo, se justifica enormemente desarrollar de manera ordenada y planificada este olvidado sector bajo un tratamiento sistémico como el que aquí se considera.

Palabras Clave: Energías renovables, dendroenergía, sistemas dendroenergéticos, biomasa leñosa, planificación, sustentabilidad.

Abstract

The energy obtained from woody biomass or also called woodenergy, takes each time more importance as another of the alternatives to the current energy and environmental crisis associated to the excessive use of fossil fuels. Nevertheless, there still exist a series of prejudices, information gaps and disagreements about woodenergy that deserves an adequate treatment and disclosure as it is intended in this paper. For this aim, it's necessary to consider woodenergy under a systemic view that means, accounting for each component as an interdependent part that managed all together results in the so called woodenergy systems. They integrate aspects as the production, logging and transportation of biomass; conversion to useful forms of energy and utilization in specific applications. Due to the great diversity of factors and agents involved, is necessary to carry out an adequate process of this type of energy systems planning, using for this purpose tools as the Geographical Information Systems (GIS), which can help to obtain the design of optimized systems, that reach their greater potential bringing with them great energy and socio-environmental benefits. There are still few experiences in woodenergy systems, and especially in Colombia where there is a lack of pilot projects where the convenience of its implementation could be demonstrated offering guidelines for its planning, operation and maintenance. Due to the large opportunities that woodenergy presents and its scarce development, it is enormously justified to develop in an ordered and planned way this forgotten sector under a systemic treatment as the one that is considered here.

Keywords: Renewable energy, woodenergy, woodenergy systems woody biomass, planning sustainability.

1 INTRODUCCIÓN

Históricamente, la biomasa forestal ha sido una fuente importante de energía, usándose en forma directa como leña, o convertida masivamente, mediante diferentes procesos, a otras formas aprovechables por el hombre, bien sea en estado líquido, gaseoso o sólido (Klass, 1998). Se dice que el combustible en forma de leña, fue sin duda el primer recurso energético empleado por el hombre, cuando aparecieron las primeras hogueras en las cuevas donde vivían nuestros antepasados. Posteriormente fueron apareciendo tecnologías como la fermentación alcohólica, aproximadamente hace 28000 años en Egipto, seguida del perfeccionamiento de los sistemas de combustión de biomasa leñosa y el progresivo uso del carbón vegetal, constituyéndose así la biomasa forestal como la base energética de la civilización en la antigüedad (FAO, 2001; Klass, 1998).

Con la llegada de la revolución industrial, los recursos dendroenergéticos se vieron disminuidos e incluso agotados en algunas zonas debido a la creciente demanda de combustibles, lo que llevó a la búsqueda de otros recursos como el carbón y el petróleo. Sin embargo en muchas regiones la dendroenergía; entendida como la energía derivada tanto en forma directa como indirecta de la biomasa leñosa; no ha dejado de ser el principal energético, y aún en los tiempos actuales comienza a ser considerada como una forma moderna y limpia de suministro, volviendo a ser adoptada de manera progresiva en algunos países industrializados (FAO, 2001).

Según Klass (1998) y FAO (2004) el fuerte aumento de los precios del petróleo en la década de los años 70, sumado al desarrollo tecnológico en la conversión de biomasa en los 90 y la incorporación definitiva de la temática ambiental en las discusiones sobre energía, propiciaron el resurgimiento de los biocombustibles como un importante recurso energético. La creciente preocupación por el agotamiento de las reservas de combustibles fósiles, junto a las altas emisiones de gases de efecto invernadero asociadas al uso de dicha fuente energética, ha despertado aun más el interés en muchos sectores hacia el uso de la biomasa forestal en la generación de energía.

Como lo menciona Earl (1975), la dendroenergía representa una de las formas más eficientes de utilizar la energía solar sin pasar por el proceso de fosilización,

como por el contrario ocurre con el petróleo y el carbón. Así mismo la Agencia Internacional de Energía (IEA Bioenergy, 2005) ha señalado que la energía generada a partir de biomasa, se encuentra en concordancia con la tendencia global hacia los métodos de producción más sostenibles, reducción de desechos y polución, conservación de los recursos naturales y reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero. Aspectos como los anteriores, colocan la energía forestal ó dendroenergía en una perspectiva de desarrollo optimista en muchos países, prometiendo impactos positivos tanto en el ámbito socio ambiental como económico.

2. CONCEPTOS Y DEFINICIONES EN DENDROENERGÍA

Vale la pena iniciar aclarando la terminología que frecuentemente es utilizada cuando se hace referencia al tema de la dendroenergía y sus sistemas integrados, buscando unificar las principales diferencias, incompatibilidades y confusiones existentes. Muchos son los términos y conceptos que se han construido alrededor del tema de la energía obtenida a partir de biomasa, estos generalmente difieren según la región donde se generan, las políticas de las diferentes organizaciones encargadas de la obtención y manipulación de tal información, entre otras razones. Según Amous (1998), Denman (1998), Heruela (1998) y Trossero & Horta (1998), tales diferencias han generado serias dificultades para la recolección, procesamiento y comparación de datos estadísticos acerca de los dendrocombustibles y todos sus aspectos relacionados. Esta situación ha llevado en algunos casos a la mala interpretación de situaciones y problemas relacionados con la dendroenergía, generalmente a causa de estimaciones gruesas o estudios episódicos insuficientemente desagregados, impidiendo así tener una base sólida que soporte una adecuada planeación del sector.

La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, 2003) ha señalado que el problema de los datos y definiciones inadecuadas en dendroenergía se debe a la ausencia de políticas sectoriales, pues por su misma naturaleza, es de carácter intersectorial, siendo pertinente a sectores como el rural, agrícola, pero principalmente al forestal y energético, lo cual genera ambigüedad en las responsabilidades institucionales. Esto se traduce generalmente en

información incompatible, fragmentada y de mala calidad. En respuesta a lo anterior, FAO ha realizado una serie de estudios (Horta & Trossero 1998; FAO, 2003 y 2004) con el fin de unificar y organizar la terminología y definiciones en dendroenergía y otros biocombustibles que actualmente se utilizan en estadísticas forestales y energéticas, balances de bioenergía y comercio.

En este artículo se emplearán los términos referentes a la dendroenergía en el contexto de las definiciones establecidas por FAO con el fin de contribuir a la divulgación de un lenguaje unificado, claro y preciso en dendroenergía, que permita de manera adecuada el intercambio y análisis de información relevante para este creciente sector. Según FAO (2004) se entiende por bioenergía la energía proveniente de los llamados biocombustibles, los cuales comprenden todo aquel combustible obtenido directa o indirectamente de la biomasa. En este sentido vale la pena definir el término 'biomasa'. FAO (2004) la define como material de origen biológico excluyendo cualquier material atrapado en formaciones geológicas y fosilizado; abarca la materia vegetal creada por fotosíntesis y sus derivados, tales como residuos forestales y agrícolas, residuos animales, y la materia orgánica contenida en los residuos sólidos industriales, domésticos y de origen municipal. Este material vegetal contiene energía química almacenada, resultante de la conversión energética de la radiación solar que puede ser liberada directamente por combustión o convertida en otros productos energéticos más adecuados para un uso final (Zobel, 1980; FAO, 2004), de allí su designación como bioenergía o energía a partir de biomasa.

Varios autores han sugerido diferentes formas de clasificar la biomasa. Klass (1998) hace referencia a dos tipos principales: virgen y de desperdicios. En el primero se encuentran aquellos recursos primarios de biomasa que serán empleados para uso energético. A su vez comprende la biomasa terrestre y la acuática; la primera incluye forestal, pastos y cultivos; en la segunda se encuentran las algas y plantas marinas. La biomasa de desperdicios incluye los materiales con potencial energético que son dispuestos o desechados y que son principalmente derivados o tienen su origen en la biomasa virgen.

Una forma particular de bioenergía es la dendroenergía, la cual es obtenida a partir de los dendrocombustibles

que no son más que los originados directa o indirectamente a partir de biomasa leñosa, o sea, la materia lignocelulósica de árboles, arbustos y matorrales (FAO, 2001 y FAO, 2004). FAO (2001) considera temas dendroenergéticos los aspectos técnicos, socioeconómicos y ambientales relacionados con la producción forestal, el procesamiento, su eventual conversión en otras formas de energía útil y su efectiva utilización. Cuando todas las unidades y operaciones involucradas en el proceso de producción, preparación, transporte, comercio y conversión de dendrocombustibles a energía útil están integradas, se habla entonces de sistemas dendroenergéticos (FAO, 2004). Igualmente múltiples autores han coincidido en tratar el tema de la bioenergía desde este enfoque integrado (Zobel, 1980; Klass, 1998; Voivontas et al., 2001; FAO, 2003; Graham et al., 2005, etc.), sugiriendo en la mayoría de los casos la necesidad de adquirir una visión integral sobre el tema para llevar a cabo una adecuada planeación.

3. SISTEMAS DENDROENERGÉTICOS

Según FAO (2001) los sistemas energéticos basados en biomasa, en especial la biomasa leñosa y sus derivados, se diferencian de otros sistemas debido al recurso primario adoptado. En este caso es la capacidad natural que posee la fitomasa de almacenar la energía solar lo que diferencia la bioenergía y, así mismo, la dendroenergía, de otras formas de energías renovables considerada esta última como la de mayor diversidad y complejidad (IEA Bioenergy, 2005). Son diversas las aplicaciones y actores que pueden tener los sistemas dendroenergéticos, producción de biocombustibles para la generación de calor en hornos y calderas, gasificación de biomasa para la generación de energía eléctrica, producción de biocombustibles líquidos para el transporte, entre otros, son ejemplos de tales aplicaciones, donde participan y son usuarios actores de diferente naturaleza, desde el sector doméstico hasta el industrial, pasando por el comercial (IEA Bioenergy, 2003; Voivontas et al., 2001). Igualmente la diversidad de fuentes de biomasa, las áreas y sistemas en que se produce, su aprovechamiento y pre-procesamiento, su transporte y procesos de conversión abarcan una compleja gama de factores y agentes, todos ellos interrelacionados para configurar el llamado sistema dendroenergético.

La biomasa, entendida como una forma transformada de la energía solar, y al ser utilizada de manera sostenida

con fines energéticos (bioenergía), se puede considerar como una energía renovable (FAO, 2001). Esto necesariamente implica que debe ser producida sosteniblemente, de otro modo este recurso natural se agotaría de la misma forma como lo vienen haciendo los combustibles fósiles (IEA Bioenergy, 2005). Más aún, Swisher (1994) sugiere que si tal producción no es sostenible, no sólo deja de ser una energía renovable sino que contribuiría a la presión que sufren los bosques actualmente por deforestación, provocando grandes daños ambientales, incluyendo emisiones de CO₂. Es así como se justifica abarcar la dendroenergía desde una visión general que permita considerar todos los factores y agentes interrelacionados como un sistema integrado, buscando su configuración y manejo óptimos; ya que pueden ser generadores sostenibles de energía, trayendo consigo grandes beneficios o, por el contrario, provocar impactos negativos. A continuación se tratan los aspectos más relevantes que se deben considerar en un sistema dendroenergético tanto para su planeación como operación y mantenimiento.

3.1. Producción de biomasa leñosa

La fabricación de productos energéticos a partir de biomasa requiere que las cantidades adecuadas del tipo de biomasa escogida crezca, sea aprovechada y transportada al usuario final o planta de conversión (Klass, 1998). Para hacer de un sistema dendroenergético una fuente renovable de energía, el suministro de materia prima debe ser tal que logre mantener la planta de conversión en operación de acuerdo con la demanda específica del producto. El tipo de biomasa para aplicaciones en energía, en el caso ideal, debe ser de alto rendimiento, con periodos de rotación cortos y que se adapte bien al sitio donde se localiza el sistema dendroenergético (Klass, 1998).

Existen diversos sistemas de producción forestal que pueden ser útiles para la obtención de biomasa leñosa con fines energéticos. Elauria et al. (2003) y Koh & Hoi (2003) resumen en tres las estrategias forestales empleadas para producción de energía a partir de biomasa: plantaciones forestales de larga rotación, de corta rotación, y sistemas agroforestales. Los sistemas forestales de larga rotación o convencionales tienen el potencial de producir biomasa para energía, principalmente, como subproducto de la producción maderera, aunque en algunos casos pueden producir principalmente dendrocombustibles. Cualquier

operación de aprovechamiento, bien sea aclareo de rodales jóvenes o la tala de rodales maduros para madera o pulpa, puede producir, pequeños trozas, copas y ramas utilizables como recurso energético, aunque normalmente tienen poca densidad y valores bajos de combustibilidad.

Los residuos del procesamiento de la madera pueden representar también una importante fuente de materia prima para los sistemas dendroenergéticos. En algunos países, principalmente de Norteamérica y Europa, han logrado importantes avances en el uso de residuos forestales, provenientes de aserríos industriales, para producir calor y electricidad (IEA Bioenergy, 2002). Según Hoffman (2005), actualmente gran parte de la biomasa leñosa usada con fines energéticos proviene de residuos forestales y aserríos, sin embargo se espera que la creciente demanda por dendrocombustibles, sólo pueda ser satisfecha incrementando la producción de biomasa leñosa, en plantaciones de corta rotación destinadas al uso energético (Sudha & Ravindranath, 1999).

El establecimiento de plantaciones forestales de corta rotación con fines energéticos o plantaciones dendroenergéticas es otra de las estrategias empleadas para la producción de dendrocombustibles, y actualmente una de las más prometedoras, donde, según FAO (2001), interesa obtener la mayor cantidad de energía por hectárea en el menor tiempo posible. Mediante diversas técnicas silviculturales y mejoramientos genéticos, en los sistemas de corta rotación se han logrado tiempos de cosecha que van desde 3 hasta 15 años, que los diferencian de otros sistemas forestales. Dichas técnicas se vienen aplicando al crecimiento de especies del género *Eucalyptus* desde hace tres décadas aproximadamente (IEA Bioenergy, 2002). Igualmente, los sistemas de corta rotación se diferencian de los sistemas tradicionales por sus altas densidades de establecimiento, con un espaciamiento entre árboles generalmente inferior a 2 x 2 m, lo que representa más de 2500 árboles por hectárea (FAO, 2001).

Las plantaciones dedicadas a la producción de dendrocombustibles, como una fuente de energía neutra en CO₂, juega un importante rol en el suministro futuro de energía. La contribución potencial de la biomasa a escala mundial ha sido estimada entre 94 y 280 EJ/año, lo cual puede estar entre el 14 y 50% del total de

consumo energético mundial (Faaij, 1997 en van den Broek et al., 2000). Para conseguir tan alta contribución se necesitarán plantaciones energéticas sobre grandes extensiones de tierra. El establecimiento de plantaciones industriales de árboles de corta rotación es una manera de lograr dicho potencial, y ha sido sugerido como el método silvicultural más adecuado para aplicaciones en energía, permitiendo rendimientos de materia seca de varias toneladas por hectárea anualmente (Klass, 1998). Varios países, como es el caso de Brasil, ya poseen experiencia con este tipo de plantaciones (van den Broek et al. 2000). Tal producción de biomasa leñosa con fines energéticos puede traer consigo grandes ventajas (Córdoba, 1986), entre las cuales se encuentran la continuidad de un abastecimiento a bajo costo, disponibilidad del recurso energético a distancias no limitantes y una mayor independencia ante situaciones prevalecientes en el mercado.

3.1.1. Selección de especies

Las especies forestales para aplicaciones en energía, deben maximizar características tales como la eficiencia en la utilización de agua y nutrientes, rendimiento en materia seca por unidad de área al año. Igualmente deben minimizar características como la edad para los ciclos de rotación, requerimientos de agroquímicos (fertilizantes, herbicidas, pesticidas, etc.), los cuales representan gastos tanto monetarios como energéticos. Los requerimientos específicos deben ser tales que las especies puedan crecer bien sobre suelos de baja calidad, de manera que no sea necesario acudir al uso de tierras aptas para la actividad agrícola y forestal tradicional. En algunos casos es deseable que después del aprovechamiento, la plantación vuelva a crecer por rebrote o vegetativamente, sin necesidad de plantar de nuevo. Sorpresivamente, muchas especies cumplen la gran mayoría de estas características de manera satisfactoria, y parecen ser apropiadas para aplicaciones en energía (Klass, 1998).

Según Zobel (1980) el mayor criterio de selección debe estar basado en el balance energético y los costos; donde las especies que posean el mejor balance de energía neta producida con los menores costos serán las especies más indicadas para uso en dendroenergía. Así mismo Klass (1998) señala que mientras los fertilizantes sean fabricados a partir de combustibles fósiles, principalmente gas natural, se deberá llevar a cabo un cuidadoso análisis del sistema integrado para asegurar que la producción de energía neta sea positiva, ya que

éstos representan una de las entradas más intensas en términos energéticos en un sistema de producción de biomasa

De igual forma es importante conocer las características técnicas más importantes de las especies de biomasa, pues éstas determinan su potencial energético y la factibilidad de ser convertidas a otras formas de energía mediante los diferentes procesos físicos, termoquímicos y biológicos (FAO, 2004). Entre las más importantes, se encuentran la composición química, humedad y poder calorífico; particularmente las dos últimas propiedades pueden tener profundos efectos sobre la verdadera utilidad de determinadas especies de biomasa (Klass, 1998). Es importante entonces, conocer acerca del poder calorífico de la madera y los factores que lo influyen cuando se van a elegir especies forestales para ser usadas como combustible, con el fin de obtener el mejor provecho de la energía almacenada (Córdoba, 1986). El poder calorífico se puede definir como la cantidad de calor (energía térmica) que se libera durante la combustión completa de una unidad de masa o de volumen del combustible, se expresa en kJ/kg o en kJ/m³.

Uno de los factores que pueden afectar el poder calorífico y, por ende, la eficiencia y el proceso de conversión, es el contenido de humedad. La presencia de humedad significa una disminución del poder calorífico de la madera, ya que se requiere un consumo de calor para evaporarla (Panel of the Advisory Committee on Technology Innovation, 1980). Sin embargo la humedad es el factor controlable más importante que influye en la eficiencia de la biomasa leñosa (madera) como combustible (Earl, 1975). Los materiales leñosos y fibrosos tienen contenidos energéticos (poder calorífico) aproximadamente entre 9 y 12 MJ/kg con base húmeda y en promedio 18,5 GJ/t con base seca. Para especies del género pinus y eucalyptus se han reportado valores de poder calorífico superior de 21,2 y 18,7 MJ/kg de biomasa seca, respectivamente (Klass, 1998).

Se ha sugerido (Panel of the Advisory Committee on Technology Innovation, 1980) que las especies más aptas para ser usadas en plantaciones para leña son las llamadas especies pioneras, que colonizan espontáneamente áreas deforestadas, muchas son leguminosas de crecimiento rápido, fijadoras de nitrógeno, adaptables y vigorosas en terrenos degradados. Numerosos géneros y especies han sido

señalados como aptos para configurar sistemas dendroenergéticos. Según FAO (2001), las especies mejor adaptadas a las condiciones de las llamadas plantaciones energéticas, son las de los géneros *Eucalyptus* y *Pinus*. Sin embargo, en función de las características edafoclimáticas, se pueden utilizar otras especies como las de los géneros *Acacia*, *Mimosa* y *Leucaena* de la familia de las leguminosas (Fabaceae), siempre que sean de crecimiento rápido. En los países en desarrollo (Little, 1980 en Klass, 1998), cientos de especies en los géneros *Acacia*, *Casuarina*, *Eucalyptus*, *Pinus*, *Prosopis*, y *Trema* son usadas como dendrocombustibles. Se ha concluido de estudios recientes que son preferidas las latifoliadas sobre las coníferas para la producción de biomasa leñosa para la conversión a biocombustibles señalando rendimientos para bosques tropicales desde 20 hasta 50 t/ha/año (Klass, 1998).

Una de las especies arbóreas que ha sido estudiada en gran detalle como recurso energético renovable es el *Eucalyptus* sp. (Mariani, 1978 en Klass, 1998), árbol latifoliado de rápido crecimiento que pertenece a la familia Myrtaceae, y al género *Eucalyptus* con aproximadamente 700 especies identificables. Se perfila como un candidato primordial para uso energético, ya que alcanza un tamaño adecuado para su aprovechamiento cerca de los siete años. Varias especies tienen la capacidad de rebrotar después de ser talados, y se pueden obtener hasta cuatro rotaciones de un solo tocón antes de que sea necesario replantar. En varios países de Sudamérica, los árboles de eucalipto son convertidos en carbón y usados como combustible. También han sido usados para generar energía a aserraderos integrados, destilación de madera, entre otros. De esta forma el énfasis de investigación en Sudamérica se concentra sobre este género, que crece bien en climas tropicales y semitropicales; las proyecciones indican que los rendimientos pueden ser incrementados substancialmente por técnicas de rebrote y mejoramiento genético. El eucalipto ha demostrado tener uno de los mayores potenciales para alcanzar altas tasas de crecimiento, alcanzando rendimientos en un rango de 20 a 43 t/ha/año en pruebas experimentales con clones seleccionados (Klass, 1998).

3.1.2. Disponibilidad de tierras

La disponibilidad de tierras para la producción de biomasa es otro de los factores relevantes para estimar la producción de biocombustibles en una región (Sudha

y Ravindranath, 1998). Es elemental llevar a cabo un inventario de las tierras disponibles para un eventual proyecto dendroenergético, con el fin de estimar el potencial de producción de biomasa y así mismo de generación de energía. Así mismo es recomendable determinar las categorías establecidas en las metodologías de uso potencial del suelo que mejor se ajusten a la naturaleza misma de estos proyectos, en este sentido algunos autores (Klass, 1998; Swisher, 1994; Ignaciuk, 2005) han sugerido que los sistemas energéticos a partir de biomasa, idealmente se deben localizar sobre tierras que no pueden soportar cultivos anuales, ya que su disponibilidad estaría limitada debido a la competencia en el uso del suelo con cultivos alimentarios. En la mayoría de los casos la ubicación de dichas categorías coincidiría con zonas forestales, por lo cual se ha dicho que, cualquier proyecto a largo plazo en bioenergía deberá realizarse con biomasa leñosa proveniente de árboles que crezcan en tierras no aptas para la agricultura de alta producción, aprovechando así el máximo potencial de suelos marginales que aun no cuentan con un uso productivo.

Existen diversas maneras de estimar la disponibilidad potencial de tierras para la producción de biomasa. Elauria et al. (2003), mencionan que las estimaciones se pueden basar en el patrón de uso de la tierra previo y proyectado. En un estudio llevado a cabo en Filipinas se encontraron sólo dos categorías adecuadas para el establecimiento de plantaciones dendroenergéticas: pastizales y matorrales. Otra técnica es la de las 'clases agrológicas', desarrollada por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA, 1966), la cual divide el suelo en ocho clases, según su capacidad. Sin embargo una de las metodologías para la determinación de la capacidad de uso del suelo rural más empleadas en algunos países en desarrollo, especialmente de Centro y Suramérica, es la desarrollada por Tosi (1972), la cual busca determinar la capacidad de uso máximo del suelo, como el máximo uso que se le pueda dar al suelo sin alterar dramáticamente sus condiciones y se pueda mantener indefinidamente en el futuro. Con estas técnicas sólo se podrán estimar las zonas potenciales para la producción de biomasa si previamente se han determinado las categorías definidas en cada metodología que se ajusten idealmente a las condiciones de los proyectos dendroenergéticos.

3.1.3. Potencial de biomasa

El desarrollo energético a partir de biomasa en una

región debe contemplar, como uno de sus primeros pasos, la estimación de su propio potencial, Sudha y Ravindranath, (1998) mencionan que la disponibilidad de tierras, la productividad, el potencial energético y los costos son aspectos críticos en cualquier estimación. Se debe garantizar un suministro tal, que pueda satisfacer tanto las demandas de materia prima de la planta, como la demanda de energía sectorial, bien sea doméstica, industrial o comercial. Es entonces un aspecto clave conocer el potencial de biomasa para lograr una configuración óptima del sistema dendroenergético integrado. De igual forma Swisher (1994) ha sugerido que el conocimiento del potencial puede ser usado simultáneamente para la estimación del impacto ambiental de dicha producción, especialmente las emisiones de gases de efecto invernadero; proponiendo el cálculo del "potencial de ahorro en emisiones de CO₂" asociado a proyectos dendroenergéticos por la substitución del uso de combustibles fosiles.

Voivontas et al. (2001) definen el potencial disponible como la energía contenida en la biomasa que puede ser técnica y económicamente aprovechada con propósitos energéticos. El potencial de producción de biomasa, como ya se ha visto, depende de muchos factores, Elauria et al. (2003) mencionan que dicho potencial depende principalmente de la productividad de las tierras disponibles, igualmente Sudha y Ravindranath (1999) indican que también depende de factores como la precipitación, calidad del sitio, la elección de las especies, la densidad de la plantación, la aplicación de fertilizantes, las medidas de conservación de suelo y agua y las prácticas silviculturales. Del mismo modo no se deja de resaltar los grandes logros que se puede tener en la productividad, al mejorar la reserva genética con programas de selección de especies y proweniencias, mejoramiento de poblaciones e hibridación.

3.2. Logística y transporte

Otra etapa importante en la dinámica de un sistema dendroenergético, a la cual no se le debe restar importancia, es la que se ubica entre la producción de biomasa y el proceso de conversión. A esta etapa corresponden principalmente el pre-procesamiento, almacenamiento y transporte de la materia prima, los cuales tienen seria incidencia en los aspectos energéticos, económicos y ambientales relevantes al sistema dendroenergético integrado. Los sitios, las

condiciones de almacenamiento, y los métodos de transporte de la biomasa a la planta resultan igualmente significativos, debido a las distancias y costos involucrados (Klass, 1998).

Zobel (1980) resalta algunos de los aspectos que representan un reto para el uso efectivo de la biomasa leñosa como fuente energética, entre ellos: los altos costos y el consumo energético necesario para transportar la madera, pues es un material voluminoso y pesado debido a su alto contenido de humedad. Por esta razón se han sugerido (IEA Bioenergy, 2002) distintas estrategias para minimizar los costos, entre ellas se encuentra el incremento de la densidad de la biomasa, reduciendo los residuos a pequeñas piezas por compactación (Pellets) facilitando la manipulación, también se recomienda su almacenamiento y secado al aire al costado de los caminos de extracción, en la terminal central o en la planta de conversión; también su distribución en los periodos de alta demanda.

Los costos son variables dependiendo del tipo de tala, apilamiento, astillado, despacho y transporte a las plantas de conversión (IEA Bioenergy, 2002), Klass (1998), señala que sin un análisis detallado de este tipo de operaciones, las interacciones entre los diferentes componentes del sistema se dificultarían notablemente, y así mismo la selección de la ruta y diseño óptimo del sistema.

3.3. Conversión energética

La energía disponible en los recursos dendroenergéticos se presenta siempre en forma de energía química, imponiendo reacciones para su liberación y posterior utilización en acciones concretas. Existen muchas situaciones en las cuales se requiere la conversión de los biocombustibles; por lo general se transforma un combustible sólido, hacia otra forma energética más homogénea o que presente mejores condiciones para un uso final deseado. En todos los casos se puede afirmar que la utilización de la energía contenida en la biomasa, es la fotosíntesis inversa: que busca rescatar la energía solar almacenada por el vegetal (FAO, 2004).

Varias rutas de conversión son usadas para transformar biomasa sólida a formas útiles de energía y proveer servicios energéticos como calor, electricidad, o transporte. Las rutas de conversión generalmente son termoquímicas o bioquímicas, pero también puede

incluir rutas químicas y físicas (IEA Bioenergy, 2005). Como procesos físicos se consideran la densificación, la reducción granulométrica y la obtención de aceites vegetales por prensado, que típicamente no afectan la composición química original de la materia prima. Los procesos termoquímicos se caracterizan por ocurrir a temperaturas elevadas e incluyen la combustión directa, gasificación, pirólisis y liquefacción, siendo éstos los más comunes para los sistemas dendroenergéticos, sobre todo por su disipación de humedad. Entre los procesos biológicos de conversión, la fermentación alcohólica y la digestión anaerobia son los más utilizados y se desarrollan generalmente en presencia de humedad y de temperaturas cercanas a la temperatura ambiente, presentando poco interés para conversión de los recursos dendroenergéticos (FAO, 2001).

No obstante, es esencial considerar simultáneamente la producción de biomasa con los sistemas de conversión, ya que ambos conjuntamente determinan la cantidad de energía útil obtenible (UNIDO, 1983). Así, Klass (1998), menciona que no se debe realizar simplemente una selección del proceso de conversión adecuado para un tipo de biomasa determinado; ambos, propiedades fisicoquímicas de la biomasa y requerimientos del proceso de conversión deben ser examinados juntos y en detalle para desarrollar un sistema técnica y económicamente factible en la generación de los productos energéticos deseados.

3.3.1. Tecnologías de conversión

Los dendrocombustibles pueden ser convertidos a energía útil a través de un rango de tecnologías incluyendo motores, calderas, refinerías, turbinas, celdas de combustible entre otros (IEA Bioenergy, 2005). Los avances tecnológicos en biomasa cubren un amplio espectro desde el último producto de la última investigación hasta el mejoramiento de sistemas tradicionales los cuales han sido usados por muchos años. No obstante, se ha evidenciado en algunos casos que el obstáculo para su implementación masiva no es estrictamente tecnológico, sino, la dificultad para reducir los costos del proceso en miras de volverse competitivo frente a las tecnologías desarrolladas para combustibles convencionales (UNIDO, 1983).

Según EPRI (1997) en Voivontas et al. (2001), las tecnologías más populares en la generación de energía a partir de biomasa son la combustión directa para la

generación de vapor, la gasificación integrada de ciclo combinado y la co-combustión con combustibles fósiles. Especialmente se han vuelto comunes las tecnologías para producir calor y energía eléctrica en plantas automáticas (Hoffmann & Weih, 2005). Existen varias tecnologías competitivas para la gasificación, las cuales pueden ser clasificadas en diferentes tipos: presurizada o atmosférica, con oxígeno o con aire, de lecho fijo o lecho fluidizado (Yan, 1998 y EPRI, 1997; en Wahlund et al., 2004). El combustible obtenido por gasificación, podría sustituir los combustibles fósiles en la generación de energía eléctrica de alta eficiencia y en aplicaciones combinadas de calor y energía eléctrica (CHP).

La selección de tecnología para aprovechar la biomasa con fines energéticos, depende de las necesidades energéticas específicas y la eficiencia del proceso de producción de conversión (Voivontas et al., 2001).

3.3.2. Procesos de conversión

Según Ravindranath & Hall (1995) en Sudha y Ravindranath, (1999), la generación de bioelectricidad a través de la gasificación de biomasa parece tener el máximo potencial entre las opciones dendroenergéticas. La gasificación de combustibles es un proceso bastante antiguo realizado con el objeto de producir un combustible gaseoso con mejores características de transporte, eficiencia de combustión y para ser utilizado como materia prima en otros procesos (Córdoba, 1986). El objetivo de la gasificación es la conversión de la biomasa en un gas combustible a través de su oxidación parcial a temperaturas elevadas. Este gas, conocido como gas productor es un combustible intermedio que se puede emplear posteriormente en otro proceso de conversión, para generar calor o energía mecánica (FAO, 2001). La eficiencia para producir energía eléctrica con gas productor se encuentra en un rango de 20 - 30 %; mediante determinadas mejoras al sistema se pueden lograr eficiencias desde 40% o mayores (Babu, 2004).

Hislop & Hall (1996), consideran que las plantaciones dendroenergéticas suministran, la mayor oportunidad global a largo plazo, como materia prima para la gasificación y equipamiento de generación, sin embargo mencionan que hasta ahora, solo una pequeña parte de las plantaciones forestales aptas para dendroenergía, están siendo utilizadas con este fin. Según Clarke (1991) la gasificación es una de esas antiguas técnicas

que hoy en día esta siendo redescubierta en los países en desarrollo que no pueden permitirse enormes gastos en importación de combustibles fósiles.

Otro proceso de conversión de gran importancia y el más ampliamente utilizado es la quema directa o combustión. La combustión directa de biomasa es una de las formas más antiguas de generación de energía, e incluso en la actualidad es la más comúnmente usada en los países en desarrollo para cocinar y calentar, a pesar de las bajas eficiencias, alrededor del 5% (UNIDO, 1983). Durante este proceso se libera calor y también se puede generar energía eléctrica mediante el uso de calderas y turbinas. Es una de las tecnologías más simples y, normalmente tiene una eficiencia de solo 20 - 30%, aunque en sistemas combinados de calor y energía puede alcanzar altas eficiencias (80%) (IEA Bioenergy, 2005).

La pirólisis a diferencia de la gasificación consiste en la descomposición térmica de un biocombustible en ausencia total o casi total de un agente oxidante, a temperaturas relativamente bajas y su posterior transformación en combustible sólido, líquido o gaseoso (FAO, 2001). Estos combustibles, aún directamente o después de posteriores procesamientos, pueden ser usados para una amplia variedad de aplicaciones domésticas e industriales (UNIDO, 1983). Cuando el producto de interés es el carbón vegetal, este proceso también se denomina carbonización, el cual consiste en una forma lenta de pirólisis que se emplea desde hace siglos para convertir la leña en un combustible más homogéneo y de mayor densidad energética. Así mismo el proceso de pirólisis, también puede conducir a un proceso de destilación de la biomasa donde los productos principales son los destilados. En los últimos 50 años la pirólisis ha sido progresivamente sustituida por la industria petroquímica (FAO, 2001).

Existen otros procesos como la liquefacción directa de biomasa, la cual se realiza con altas temperaturas y gran presión con catalizadores, es una tecnología que esta siendo desarrollada en varios países. Al nivel de procesos biológicos se encuentra la fermentación de biomasa para producir bio-etanol, tradicionalmente obtenido a partir de granos y cultivos de azúcar, sin embargo, se está investigando actualmente, y es un objetivo de desarrollo, su obtención a partir de lignocelulosa o biomasa leñosa (IEA Bioenergy, 2005).

Cabe mencionar el proceso mediante el cual se obtiene el metanol, la fermentación del metano ó digestión anaeróbica, tiene lugar en la ausencia de oxígeno y con la ayuda de microorganismos de bacterias anaeróbicas que realizan el proceso (Klass, 1998). El gas producido puede ser usado directamente o puede ser mejorado removiendo el dióxido de carbono presente. Así mismo el proceso de fermentación lignocelulósica, a pesar de estar aún en etapa de investigación, es muy prometedor, ya que al convertir los residuos agrícolas y forestales en azúcares y luego en etanol, permite un espectro más amplio de materia prima para la producción, diferente al azúcar y los granos, los cuales deben ser usados igualmente con fines alimentarios (UNIDO, 1983).

3.4. Utilización y aplicaciones

Las formas modernas de bioenergía incluyen su potencial de conversión a combustibles líquidos como el metanol y el etanol, combustibles gaseosos como el bio-gas y el gas productor, y electricidad. Ravindranath & Hall (1995) en Sudha y Ravindranath (1999), reportan el uso de la biomasa leñosa para la generación de calor y electricidad, como aplicaciones que han demostrado ser factibles en muchas regiones de la India. De la misma forma Wahlund et al. (2004), enumeran una serie de aplicaciones energéticas que presentan potencial para el creciente uso de biomasa leñosa; las aplicaciones incluyen la producción de pellets de dendrocombustibles, igualmente combustibles para motor basados en biomasa, metanol, etanol y dimetil-eter (DME); calor y electricidad a partir de biomasa; así mismo el dendrocombustible sólido sin procesar puede ser secado y pelletizado o quemado directamente para producir energía.

El gas productor obtenido a través de la gasificación de biomasa; uno de los productos dendroenergéticos más prometedores, es un combustible ideal tanto para los motores diesel como los de gasolina, y por esto puede utilizarse en el transporte, para hacer funcionar motores fijos y para producir energía eléctrica. En Brasil, desde los 80's, unas sesenta compañías utilizan los gasificadores de biomasa leñosa para hacer funcionar vehículos, alimentar hornos y producir cal, una industria en la que se afirma que con los gasificadores se puede reducir el consumo de madera de 2,5 a 0,8 toneladas por cada tonelada de cal producida (Clarke, 1991). Según Sudha y Ravindranath

(1999), existen tres aspectos cruciales al considerar la opción del gas productor, éstos son la disponibilidad de tecnología, la economía involucrada, y un suministro sostenible de biomasa, el cual depende principalmente de la disponibilidad de tierras y la productividad de la biomasa. Así mismo, se reportan otras aplicaciones del gas productor, la conversión a hidrógeno, químicos, fertilizantes, o sustitutos de los combustibles fósiles; también podría ser usado en celdas de combustible, con el potencial de aumentar notablemente la eficiencia en la generación de energía eléctrica. Reconociendo estos beneficios muchos países están actualmente desarrollando de manera progresiva tecnologías para la gasificación de biomasa (Buba, 2004).

Según Horta y Trossero (1998), en algunos países se viene observando una disminución en el uso de dendrocombustibles en el sector doméstico, sin embargo, dicho fenómeno se presenta simultáneamente con la expansión del uso industrial de la dendroenergía. Brasil representa uno de los casos con mayores resultados en el aprovechamiento moderno de la biomasa, presentando un parque industrial actualizado que se basa en este recurso como fuente combustible; incluso como reductor siderúrgico. A este tipo de contexto es al que Rosillo Calle (1987) en FAO (2004) denomina una biomass society, y que puede; con las debidas adaptaciones; ser considerado como una alternativa que conduzca hacia el desarrollo sostenible en las regiones donde sea adecuado. De cualquier forma, la bioenergía no es necesariamente una panacea, ni debería ser pensada como la única solución para la amplia diversidad de situaciones de los sistemas energéticos, pero seguramente si es una importante alternativa para considerar (Horta & Trossero, 1998).

3.5. Aspectos socioambientales

La dendroenergía, importante opción energética, hoy se ve materializada en contextos reales, donde la energía directa e indirecta obtenida a partir de los bosques significa una contribución a la racionalización de los sistemas energéticos, dinamización del cuadro socioeconómico de las comunidades involucradas y al adecuado uso de los recursos naturales (Horta & Trossero, 1998). Son numerosas las formas existentes de utilización de la dendroenergía, estas van desde las más primitivas y tradicionales hasta las más modernas con alto nivel tecnológico. Adicional a los productos energéticos que suministra, también tiene beneficios

socioeconómicos, como la generación de empleos e ingresos para las poblaciones rurales, impacto ecológico favorable ya que puede ayudar a disminuir la presión sobre los bosques e incorpora suelos marginales a la producción (Reiche, 1984 en Cordoba, 1986). Según IPCC (1996) y Ranney (1992) en Sudha & Ravindranath (1999) la utilización en gran escala de biomasa leñosa para fines energéticos puede aportar al desarrollo rural en los países en desarrollo. Adicionalmente, con los controles debidos, su producción y uso sostenible para la generación de electricidad no crea un aumento neto en los niveles de dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera.

Otro aspecto igualmente importante a considerar es el socioeconómico. Factores como la tenencia de la tierra, la tradición en el uso del suelo, igualmente su condición sociopolítica, podrán determinar en cierto grado la factibilidad del establecimiento de un sistema dendroenergético. Sin embargo Sudha y Ravindranath (1998) afirman que la producción de biomasa con fines energéticos puede ser promovida sin tener que afectar la tenencia de la tierra, vinculando a las comunidades rurales y pequeños terratenientes a dicha producción. Otros factores influyentes son las políticas y legislación sobre el uso del suelo, el costo de oportunidad de la tierra, la viabilidad financiera y la demanda del mercado (Elauria et al., 2003).

En algunas experiencias anteriores (van den Broek et al., 2000) con plantaciones de Eucalyptus sp. a gran escala, para la generación de energía eléctrica, se han encontrado varias desventajas, tanto de naturaleza socio-económica como ecológica. Particularmente el problema de la concentración de la propiedad de la tierra en manos de pocas compañías, lo cual provoca que la gente quede sin tierra o emigre a las ciudades. Revisiones de experiencias pasadas con plantaciones forestales industriales en varios países, han enseñado que sin la vinculación y participación de las comunidades locales en el desarrollo de las plantaciones, la aceptación social será muy baja (Beyea et al. 1991; FAO, 1985 en van den Broek et al., 2000).

La biomasa como un recurso energético renovable esta siendo considerada como una de las estrategias posibles para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (Fearnside, 1999; Gielen et al., 1998; en Ignaciuk et al., 2005), que puede contribuir al desarrollo sostenible (van den Broek et al., 2002 en Ignaciuk et

al., 2005). De esta forma también puede jugar un papel importante en el mantenimiento de la biodiversidad, una vez que la plantación energética pueda reemplazar parte de la tierra agrícola (Borjesson, 1999 en Ignaciuk et al., 2005), y reducir la dependencia de los combustibles fósiles. La biomasa también puede tener un impacto positivo en la adición de humus al suelo y reducir los efectos erosivos. Más aún, la biomasa leñosa requiere menos energía y fertilizantes por hectárea que los cultivos alimentarios tradicionales (Ignaciuk et al., 2005).

3.5.1. Conflicto en el uso del suelo

Igualmente hay que considerar el hecho que un mercado creciente para la bioenergía, estimulado por la implementación de políticas climáticas, podría afectar los patrones de uso del suelo, así como la tierra adicional para producción alimentaria se volvería escasa, pudiendo provocar un aumento en los precios de los productos agrícolas y/o una reducción significativa en la producción de alimentos (Ignaciuk et al., 2005). Azar (2003) en Ignaciuk et al., (2005) argumenta que debido a las políticas del cambio climático, se espera que se intensifique la producción de biomasa para energía, resultando en un aumento inesperado del valor de la tierra y al menos una duplicación en los precios del grano.

Al respecto Swisher (1994) argumenta, que hasta no se alcancen incrementos dramáticos en la productividad agrícola, las tierras aptas para cultivos anuales estarán limitadas por competencia con cultivos alimentarios, quedando las plantaciones dendroenergéticas necesariamente ubicadas en tierras donde no compitan con la producción de alimentos, volviendo así, en algunos casos, tierras abandonadas de baja aptitud agrícola en tierras forestales productivas para la actividad dendroenergética.

Ha llamado la atención los programas de bioenergía del Brasil y los Estados Unidos, tanto por las posibilidades de cultivar biomasa que permita obtener energía, como por los posibles efectos que pueden tener sobre la producción de alimentos, si se dedican considerables extensiones de tierra a cultivos que permitan obtener biocombustibles. Por consiguiente la transformación masiva de tierras agrícolas a cultivos energéticos podría traer consigo una crisis alimentaria, junto con cambios dramáticos en los precios, con efectos perjudiciales en el ámbito socioeconómico. Debido a esto, se proyectan de manera positiva las soluciones forestales en tierras marginales, de las cuales no se

hace un uso productivo y además no cumplen una función ecológica relevante, evitando ó mitigando posibles situaciones como la anterior (Consulta de experto de la FAO, 1981).

3.5.2. Dendroenergía y cambio climático

En respuesta a la amenaza del calentamiento global, ha crecido notablemente el interés entre los científicos, políticos, y gobiernos; en incrementar la captura de carbono en los bosques y el uso de la biomasa forestal para la sustitución de combustibles fósiles con el objetivo de minimizar el incremento en las concentraciones de carbono atmosférico. Existen dos maneras en que los árboles pueden ser usados para reducir las emisiones de carbono, una es la captura directa por reforestación y aforestación, que produce un stock de carbono en los árboles en pie, la segunda es el uso de productos forestales como sustitutos de los combustibles fósiles en la generación de energía (Baral & Guha, 2004).

Como lo explica Matthews y Robertson (2004), la forma en que la bioenergía contribuye a la estabilización del carbono atmosférico mediante la sustitución de combustibles fósiles, se basa en el hecho que al utilizar biomasa en la generación e energía, las emisiones de CO₂ causadas en su conversión fueron previamente fijadas de la atmósfera por la planta durante su crecimiento, así que no hay emisiones netas de CO₂, siempre y cuando el ciclo de crecimiento y corta sea sostenido. Por el contrario, el uso de combustibles fósiles libera CO₂ que ha estado atrapado por millones de años. La dendroenergía representa una medida de largo plazo ya que el aprovechamiento y nuevo establecimiento de plantaciones forestales en un tamaño determinado de tierra, puede llevarse a perpetuidad con un manejo adecuado, sumado a que el uso de biomasa para la generación de energía puede también ayudar al crecimiento de las economías rurales y traer consigo seguridad energética (Baral & Guha, 2004).

Estudios previos sugieren que las estrategias de uso del suelo y cambio en el uso del suelo y silvicultura (LULUCF siglas en ingles), pueden contribuir en gran medida a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) durante la próxima década. Sin embargo, la verdadera conveniencia de la captura de carbono en los bosques esta siendo cuestionada, ya que no proporciona soluciones de largo plazo para el problema de las emisiones de GEI (Schlamadinger et

al., 2001; en Gielen et al. 2002). Ante este argumento, algunos analistas han concluido que, las tierras forestales podrían contribuir más a la estabilización de las concentraciones del CO₂ atmosférico a través de la producción sostenida de combustibles para sistemas energéticos, que reemplacen el uso de combustibles fósiles indefinidamente en el futuro (Houghton, 1990; Hall et al., 1991; en Swisher, 1994). No obstante, se debe garantizar en los proyectos dendroenergéticos, la sostenibilidad de las plantaciones como uso de la tierra (Swisher, 1994), es decir, un proyecto dendroenergético debe mantenerse en el tiempo y no provocar deforestación de tierras adicionales a las involucradas en el proyecto.

Swisher (1994) ha mencionado que las medidas forestales de captura y almacenamiento de CO₂ y sustitución de combustibles fósiles; para la mitigación del cambio climático; antes de competir; deben ser complementarias, ubicando cada tipo de proyecto en las áreas más adecuadas según su naturaleza y la capacidad máxima de uso del suelo. De cualquier modo, la captura de CO₂ no deja de ser una solución conveniente a corto y mediano plazo, con el potencial de traer beneficios secundarios significativos (IPCC, 2001 en, Gielen et al. 2002).

Tres mecanismos fueron establecidos en el Protocolo de Kyoto, los cuales se espera que brinden mayor flexibilidad y reduzcan los costos de las medidas de mitigación para los países con compromisos de reducción. Uno de ellos es el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), el cual brinda la oportunidad a los países en desarrollo para participar en proyectos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). En el contexto de los MDL, la dendroenergía se ubica como una opción atractiva, capaz de satisfacer tanto los requerimientos socio-económicos, como contribuir a los objetivos de mitigación del cambio climático (Silveira, 2005).

Recientemente se vienen desarrollando tecnologías cada vez más avanzadas, que buscan aprovechar el potencial energético de la biomasa de la manera más eficiente posible. Estas tecnologías ofrecen perspectivas significativas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Para la promoción y evaluación de estas tecnologías, es importante conocer su potencial de reducción de gases de efecto invernadero y reducción de costos comparado a las tecnologías convencionales (van Dam et al., 2003).

4. PLANEACIÓN DE SISTEMAS DENDROENERGÉTICOS

Es de gran importancia proponer, diseñar, implantar y operar sistemas dendroenergéticos más eficientes, económicamente rentables y adecuados para el medio ambiente; contribuyendo así a su conservación y, en algunos casos, a la mejora de las condiciones naturales (Trosero & Horta, 1998). No llevar a cabo un adecuado proceso de planeación para este tipo particular de sistemas energéticos; desde una visión general que tenga en consideración todos y cada uno sus componentes interactuantes; puede llevar a consecuencias negativas de distinta índole. Cabe señalar que, en algunos casos, los aprovechamientos dendroenergéticos sin planeación ni control, han constituido una causa importante de degradación ambiental, en especialmente donde la productividad ambiental, además de ser limitada y manejada inadecuadamente, es inferior a la demanda de biomasa, ampliada por pérdidas innecesaria (Horta & Trosero, 1998).

4.1. Sistemas optimizados

Básicamente el objetivo es diseñar y operar sistemas ambientalmente aceptables, que suministren una nueva oferta de energía comerciable a partir de biomasa, bien sea gas productor, metanol, etanol, hidrógeno, calor, vapor o electricidad, entre otros; producidos al mínimo costo posible con un consumo mínimo de energía (Klass, 1998). Para llevar a cabo el diseño adecuado de un sistema dendroenergético integrado, se requiere de la coordinación de numerosas operaciones, tales como, la siembra de la biomasa, manejo del crecimiento, tala y aprovechamiento, almacenamiento, transporte a las plantas de conversión, recuperación, secado, conversión a productos energéticos, control de emisiones, separación del producto, reciclaje, tratamiento y disposición final de residuos sólidos y líquidos, mantenimiento, y transporte o transmisión de los productos comerciables al mercado (Klass, 1998).

Varios autores (Zobel, 1980; Klass, 1998) han sugerido, si el sector forestal ha de volverse un productor eficiente de energía, las plantas de transformación deben ser más pequeñas y eficientes, y así más cercanas de la fuente de biomasa; se deben realizar todos los esfuerzos para mantener los costos y requerimientos energéticos requeridos en la silvicultura, el aprovechamiento y la manufactura al mínimo. Klass (1998) menciona otras consideraciones ideales para los sistemas

dendroenergéticos integrados: todos los productos no combustibles del sistema deben ser reciclados en las áreas de crecimiento, como es el caso de las cenizas, el área debe ser equivalente a un sistema aislado con entradas de radiación solar, aire, CO₂, y agua, y una salida, combustible. Los nutrientes deben ser mantenidos dentro del sistema idealmente, para que la adición de fertilizantes externos y químicos no sea necesaria. De igual manera, los controles ambientales y problemas de disposición de basuras deben ser minimizados. Sin embargo para el uso a gran escala, varias modificaciones del sistema ideal pueden ser conceptualizadas (Klass 1998).

Por su lado FAO (2001) propone soluciones complementarias para la optimización de sistemas dendroenergéticos. Desde los recursos dendroenergéticos sugiere: la protección y manejo adecuado de las formaciones forestales naturales; creación de nuevos recursos dendroenergéticos cercanos a los usuarios; estímulo a los sistemas agroforestales; valorización de los recursos dendroenergéticos mediante la organización de los mercados; y valoración y comercialización de los subproductos y residuos de biomasa no aprovechados. Desde la eficiencia en el uso final se propone la introducción de métodos adecuados para la operación y el mantenimiento de los equipos existentes; adopción de tecnologías eficientes mejoradas para la conversión final; y adopción de técnicas de preparación del combustible.

Para llevar a cabo el proceso de planeación y optimización (FAO, 2001) primero se debe realizar el diagnóstico dendroenergético, que en síntesis consiste en conocer bien dónde se encuentran los recursos dendroenergéticos, cuánto hay y cuánto puede haber, quiénes, cómo y cuánta dendroenergía necesitan y, finalmente, factores que pueden ayudar o dificultar el proceso de perfeccionamiento de los sistemas dendroenergéticos. Con base en una situación actual conocida, se define la configuración deseable del futuro sistema dendroenergético, donde no se debe dejar de reconocer el papel determinante de los recursos humanos en su concepción y operación. De esta forma cuanto más se valora a las personas directa o indirectamente involucradas en la producción, transporte, eventual transformación y uso final de los recursos dendroenergéticos, mayores son las posibilidades de éxito (Horta & Trossero, 1998).

4.2. Herramientas de planeación: SIG

El tamaño, número, y localización de las áreas de crecimiento y procesamiento de la biomasa (Klass, 1998), generalmente presentan una distribución geográfica muy dispersa, lo que ha hecho que los investigadores cada día se muestren más interesados en usar los Sistemas de Información Geográfica (SIG) como una herramienta para la planeación y optimización en la selección del sitio y diseño de los sistemas dendroenergéticos, basándose en factores como los rendimientos esperados en la producción de biomasa y el suministro a las plantas de conversión. Gran parte de los esfuerzos de investigación recientes se han concentrado en aspectos tales como la estimación de las cantidades potenciales de biomasa provenientes de plantaciones energéticas, evaluación de los rendimientos en la producción, determinación de precios competitivos, así como la optimización en la selección y diseño de las plantas de transformación dendroenergéticas en relación con la disponibilidad del recurso a cierta distancia del sitio de la planta (Voivontas et al. 2001).

Los desarrollos basados en los SIG representan una herramienta de gran ayuda para lograr entender el contexto geográfico de un amplio rango de aspectos pertinentes al tema de la energía a partir de biomasa, especialmente la demanda de energía y el suministro del recurso biomasa. Como lo mencionan Graham et al. (2000), la mayor ventaja es que permite tener en cuenta tanto de manera explícita como cuantitativa las diferencias geográficas en factores que pueden afectar la oferta de biomasa y los efectos ambientales de producirla. De la misma forma Voivontas et al. (2001) reporta el uso de este tipo de herramientas para la selección del sitio, concentrándose en la identificación de las áreas óptimas para el desarrollo de plantaciones energéticas basándose en los rendimientos esperados en la producción de biomasa, o en la adjudicación de materia prima a las plantas de energía existentes.

Se mencionan (FAO, 2003) como ventajas del empleo de este tipo de herramientas, el permitir adquirir una visión general y consistente del sector dendroenergético sobre un país entero o región determinada; coleccionar información existente que se encuentre dispersa en diferentes fuentes, e identificar faltantes de información; promueve la cooperación y creación de sinergias entre los inversionistas e instituciones; permite enfocar la

acción en objetivos específicos, optimizando así el uso de los recursos disponibles; entre otras. De esta forma han demostrado entonces, ser herramientas de gran utilidad en muchos estudios de bioenergía alrededor del mundo (Graham et al. 2000, Voivontas et al. 2001), y servir como un instrumento de política para el desarrollo energético a partir de biomasa en diferentes regiones.

4.3. Antecedentes de planeación dendroenergética

Actualmente son pocos los estudios de esta naturaleza que se reportan para Latinoamérica. FAO (2003) con su programa de dendroenergía adelantó en Méjico la implementación de una herramienta para la planificación basada en los SIG llamada WISDOM (Woodfuel Integrated Supply/Demand Overview Mapping), que tuvo como objetivo la identificación de áreas de atención prioritarias para cubrir las demandas de dendrocombustibles, así como controlar la deforestación indiscriminada debido a la misma demanda. Los resultados del estudio - en términos de la identificación de áreas prioritarias - han sido incorporados en las estadísticas nacionales por la Comisión Forestal Nacional de dicho país, la cual planea emprender un programa de hornos de leña eficientes y plantaciones multipropósito para esas áreas.

En Colombia los trabajos relacionados con el tema de la dendroenergía han sido muy escasos y no han contado con una adecuada divulgación, de ellos los más relevantes y que empiezan a generar una base documental para el futuro desarrollo dendroenergético en el país son los estudios llevados a cabo por la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME, 1999; UPME, 2003) del Ministerio de Minas y Energía. Entre ellos se encuentra el estudio titulado "Diseño de un proyecto piloto dendroenergético y formulación de lineamientos de políticas, estrategias e instrumentos para el fomento de sistemas dendroenergéticos en Colombia" en el cual se analiza la prefactibilidad de un proyecto de demostración que pueda generar respuestas a muchas inquietudes que existen alrededor del tema en el país y diseñar lineamientos de política para este sector.

El más reciente y completo es el estudio de "Potencialidades de los cultivos energéticos y residuos agrícolas en Colombia" en el cual estiman el potencial actual y futuro de generación de energía a partir de biomasa con la ayuda de bases de datos enlazadas a un

Sistema de Información Geográfico. Sin embargo en este estudio solo se alcanza a generar una visión general y un acercamiento preliminar acerca del potencial de los cultivos energéticos y residuos agrícolas, y como se recomienda en el mismo estudio "será necesario que los resultados sean verificados con estudios de tipo detallado", específicamente en el área de la dendroenergía, donde también se consideren criterios ambientales para la estimación de dicho potencial y se integre la demanda de energía como un factor determinante para la planeación de sistemas dendroenergéticos.

5. CONSIDERACIONES FINALES

Como se ha podido observar el tema de la dendroenergía efectivamente involucra una gran diversidad de factores y agentes, todos ellos influyentes ante cualquier consideración que se haga de este tipo de energía. Por tal razón, es hoy una exigencia tratar el tema bajo un enfoque sistémico, donde se tenga en cuenta las dinámicas que existen en su interior y con el medio que lo rodea, para así alcanzar su mayor potencial como posible solución energética técnica, económica, social y ambientalmente viable para ciertas regiones.

Debido al escaso desarrollo planificado de los sistemas dendroenergéticos en Latinoamérica y Colombia, junto a la existencia de incertidumbre y serios cuestionamientos, es de vital importancia desarrollar proyectos piloto que permitan hacer estimaciones para la gestión de sistemas energéticos a partir de biomasa, para así esclarecer las verdaderas bondades e inconvenientes, su factibilidad y potencial, y así mismo servir como casos de estudio, de los cuales se puedan generar lineamientos para la planeación y toma de decisiones en este tipo de proyectos. De igual forma al promover la dendroenergía desde un enfoque sistemático y responsable como el que se esboza en este artículo, se estaría en concordancia con las demandas mundiales de cambio hacia el uso de energías renovables con tecnologías de bajo impacto ambiental y mayor beneficio social, atendiendo el llamado hacia la implementación de medidas energéticas para la mitigación del calentamiento global.

En Colombia a pesar de contar con un alto potencial de recursos naturales, no existen experiencias significativas ni políticas claras en dendroenergía como una alternativa renovable de suministro energético para

aquellas zonas donde no es factible un suministro desde el sistema interconectado. Por esta razón vale la pena preguntarse ¿Son los sistemas dendroenergéticos una solución energética sustentable en determinadas zonas de Colombia? Para responder a esta gran pregunta habría que empezar por resolver, entre otras, preguntas como: ¿Cuál sería la disponibilidad actual y futura de biomasa y su potencial de generación de energía?; ¿Dónde se localizarían idealmente los sistemas dendroenergéticos?; ¿Cuáles son las condiciones socioeconómicas de las poblaciones involucradas?; ¿Cuál es el impacto ambiental de dichos sistemas dendroenergéticos? Etc.

Por estas razones, el inicio de un proceso coherente y organizado de investigación encaminado al desarrollo de este tipo de energías en un país o región, debe contemplar dentro de sus primeras etapas la estimación de la contribución potencial de la biomasa en el sector energético y su viabilidad técnica, económica y ambiental. Para esto será necesario realizar estudios con un nivel de detalle apropiado, en un ámbito geográfico predeterminado y así demostrar la conveniencia de incorporar al país tecnologías energéticas renovables que hacen uso sostenible de recursos alternativos, y en donde se pueda buscar las adaptaciones pertinentes para las condiciones locales, y de las que se pudiera diseñar paquetes tecnológicos que pudieran ser replicados y expandidos a las diferentes regiones donde fuera apropiado.

REFERENCIAS

1. Amous, S., 1998. Biomass data issues and challenges in northern and western Africa. En: Biomass energy: Data, analysis and trends - Conference proceedings. Organization for economic cooperation and development (OECD). Francia. pp. 61-66.
2. Babu, S. P., 2004. Thermal gasification of biomass. Task 20. IEA Bioenergy. IEA. Disponible En: <http://www.gastechnology.org/iea>.
3. Baral, A. y Guha, G. S., 2004. Trees for carbon sequestration or fossil fuel substitution: the issue of cost vs. carbon benefit. Biomass and Bioenergy. ELSEVIER. Reino Unido. Vol. 27, No.1. pp. 41-55.
4. Clarke, D., 1991. Madera para producir energía. Informe sobre cuestiones forestales. FAO. Italia. 40 P.
5. Consulta de expertos de la FAO, 1981. Cultivos energéticos y cultivos alimentarios. Boletín de servicios agrícolas de la FAO. 46 Italia. 66 P.
6. Cordoba, D., 1986. La madera en la generación de energía eléctrica. Seminario Agronomía. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Colombia. 41 P.
7. Denman, J., 1998. IEA Biomass energy data: System, methodology and initial results. En: Biomass energy: Data, analysis and trends - Conference proceedings. Organization for Economic Cooperation And Development (OECD). Francia. pp. 19-38.
8. Earl, D. E., 1975. Forest energy and economic development. University Press. USA. 128 P.
9. Elauria, J. C., Castro, M. L. y Racelis, D. A., 2003. Sustainable biomass production for energy in the Philippines. Biomass and Bioenergy. ELSEVIER. Reino Unido. Vol. 25 No.5. pp. 531-540.
10. FAO, 2004. UBET Unified bioenergy terminology. Wood Energy Programme, FAO Forestry Department. FAO. Italia. 58 P.
11. FAO, 2003. WISDOM Woodfuel integrated/supply demand overview mapping. Wood Energy Programme, FAO Forestry Department. FAO. Italia. 81 P.
12. FAO, 2001. UWET- Unified wood energy terminology. Wood Energy Programme, FAO Forestry Department. FAO. Italia. 24 P.
13. Gielen, D. J. Fujino, J. Hashimoto, S. Moriguchi, Y. 2002. Biomass strategies for climate policies?. Climate Policy. ELSEVIER. Reino Unido. Vol.2 No.4. pp. 319-333.
14. Graham, R. L., English, B. C. y Noon, C. E., 2000. A geographic information system-based modeling system for evaluating the cost of delivered energy crop feedstock. Biomass and Bioenergy. ELSEVIER. Reino Unido. Vol. 18 No.4. pp. 309-329.
15. Hislop, D. y Hall, D. O., 1996. Biomass resources for gasification power plants. IEA bioenergy task 20. Disponible en: <http://www.gastechnology.org/webroot/downloads/en/IEA/IEABMFeedHall.pdf>
16. Hoffmann, D. y Weih, M., 2005. Limitations and improvement of the potential utilization of woody biomass for energy derived from short rotation woody crops in Sweden and Germany. Biomass and Bioenergy. ELSEVIER. Reino Unido. Vol. 28 No. 3. pp. 267-279.
17. Horta, L. A. y Trossero, M. A., 1998. Introducing WEIS: The FAO wood energy information system. En: Biomass energy: Data, Analysis and Trends - Conference proceedings. Organization for Economic Cooperation And Development (OECD). Francia. pp. 115-140.

18. IEA, 1998. Biomass energy: Data, analysis and trends. Organization for economic cooperation and development (OECD). Francia. 341 P.
19. IEA, 2005. Bioenergy. Benefits of bioenergy. Disponible en: [http://66.98.252.27/ieabioenergy.com/library/179_Benefits of Bioenergy.pdf](http://66.98.252.27/ieabioenergy.com/library/179_Benefits%20of%20Bioenergy.pdf)
20. IEA, 2003. Bioenergy Task 31. Conventional forestry systems for bioenergy. Task 31 position paper. IEA. Disponible en: [http://forestry.tamu.edu/Links/IEA_Bioenergy_Task_31/Copy of IEA Task 31 News Issue 4 draft.pdf](http://forestry.tamu.edu/Links/IEA_Bioenergy_Task_31/Copy%20of%20IEA%20Task%2031%20News%20Issue%204%20draft.pdf)
21. IEA, 2002. Bioenergy. Sustainable production of woody biomass for energy. Task 31 position paper. IEA. Disponible en: [http://66.98.252.27/ieabioenergy.com/library/157_PositionPaper-SustainableProduction of Woody Biomass for Energy.pdf](http://66.98.252.27/ieabioenergy.com/library/157_PositionPaper-SustainableProductionofWoodyBiomassforEnergy.pdf)
22. Ignaciuk, A., Vöhringer, F., Ruijs, A. y Van Ierland, E. C., 2006. Competition between biomass and food production in the presence of energy policies: a partial equilibrium analysis. Energy Policy. ELSEVIER. Reino Unido. Vol. 34, No. 10. pp. 1127-1138.
23. Klass, D., 1998. Biomass for renewable energy, fuels, and chemicals. Academic Press. USA. 649 P.
24. Koh, M. P. y Hoi, W. K., 2003. Sustainable biomass production for energy in Malaysia. Biomass and Bioenergy. ELSEVIER. Reino Unido. Vol. 25 No. 5. pp. 17-529.
25. Matthews, R. y Robertson, K., 2004. Answers to ten frequently asked questions about bioenergy, carbon sinks and their role in global climate change. IEA bioenergy task 38. Disponible en: <http://www.joanneum.at/iea-bioenergy-task38/publications/faq>.
26. Panel of the advisory committee on technology Innovation, 1980. Firewood crops: shrub and tree species for energy production. National Academy of Sciences. Estados Unidos. 237 P
27. Silveira, S. 2005. Promoting bioenergy through the clean development mechanism. Biomass and Bioenergy. ELSEVIER. Reino Unido. Vol. 28 No.2. pp. 107-117.
28. Sudha, P. y Ravindranath, N. H., 1999. Land availability and biomass production potential in India. Biomass and Bioenergy. ELSEVIER. Reino Unido. Vol. 16 No. 3. pp. 207-221.
29. Swisher, J., 1994. Forestry and biomass energy projects: bottom-up comparisons of CO₂, storage and costs. Biomass and Bioenergy. ELSEVIER. Reino Unido. Vol. 6 No. 5. pp. 359-368.
30. Tosi, J. A., 1972. Una clasificación y metodología para la determinación y levantamiento de mapas de la capacidad de uso mayor de la tierra rural en Colombia. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Medellín. 69 P.
31. Trossero, A. M. y Horta, L. A., 1998. A unified wood energy terminology. En: Biomass energy: Data, analysis and trends - Conference proceedings. Organization for economic cooperation and development (OECD). Francia. pp. 97-114.
32. UPME, 1999. Diseño de un proyecto piloto dendroenergético y formulación de lineamientos de políticas, estrategias e instrumentos para el fomento de sistemas dendroenergéticos en Colombia. Ministerio de Minas y energía, Colombia. 34 P.
33. UPME, 2003. Potencialidades de los cultivos energéticos y residuos agrícolas en Colombia. Ministerio de Minas y energía, Colombia. 34 P.
34. USDA, 1966. Land capability classification. Agricultural handbook. Soil Conservation Service, Washington DC. 210 P.
35. UNIDO, 1983. Implications of biomass energy technology for developing countries. Expert Meeting Preparatory to International Forum on Technological Advances and Development. United Nations Industrial Development Organization. USSR. 19 P.
36. Van Dam, J. F., et al, 2003. Development of standard tools for evaluating greenhouse gas balances and cost-effectiveness of biomass energy technologies. IEA Bioenergy, Task 38 Greenhouse gas balances of biomass and bioenergy systems. Disponible en: <http://www.joanneum.ac.at/iea-bioenergy-task38/>
37. Van Den Broek, R., Van Wijk, A. y Turkenburg, W., 2000. Farm-based versus industrial eucalyptus plantations for electricity generation in Nicaragua. Biomass and Bioenergy. ELSEVIER. Reino Unido. Vol. 19 No.5. pp. 295-310.
38. Voivontas, D., Assimacopoulos, D. y Koukios, E. G., 2001. Assessment of biomass potential for power production: a GIS based method. Biomass and Bioenergy. ELSEVIER. Reino Unido. Vol. 20 No.2. pp. 101-112.
39. Wahlund, B., Yan, J. y Westmark, M., 2004. Increasing biomass utilization in energy systems: A comparative study of CO₂ reduction and cost for different bioenergy processing options. Biomass and Bioenergy. ELSEVIER. Reino Unido. Vol. 26 No. 6. pp. 531-544.
40. Zobel, B., 1980. The forest as an energy resource. Investigación forestal. Research Report No. 51. Cartón de Colombia. S.A. 14 P.