

# **Sostenibilidad de la Producción de Energía a Partir de la Biomasa Forestal en la Orinoquía Colombiana**

Karen Jimena Gualtero Rodríguez

Programa de Economía

Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas

Universidad Católica de Colombia

Bogotá D.C., Colombia

2019

**Sostenibilidad de la Producción de Energía a Partir de la Biomasa Forestal en la Orinoquía  
Colombiana**

Karen Jimena Gualtero Rodríguez

Trabajo de grado dirigido por:

Joan Manuel Redondo

Programa de Economía

Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas

Universidad Católica de Colombia

Bogotá D.C., Colombia

2019



## Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:

**Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)**

Para leer el texto completo de la licencia, visita:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

### Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra

hacer obras derivadas

### Bajo las condiciones siguientes:



**Atribución** — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



**No Comercial** — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

## Tabla de contenido

<b>1. Introducción .....</b>	<b>6</b>
<b>1.1. Contextualización.....</b>	<b>6</b>
<b>1.2. Planteamiento del Problema .....</b>	<b>10</b>
<b>1.3. Justificación .....</b>	<b>12</b>
<b>1.4. Objetivos .....</b>	<b>14</b>
<b>1.4.1. Objetivo general.....</b>	<b>14</b>
<b>1.4.2. Objetivos Específicos.....</b>	<b>14</b>
<b>2. Marco Referencial .....</b>	<b>14</b>
<b>2.1. Marco Teórico.....</b>	<b>14</b>
<b>2.2. Estado del Arte .....</b>	<b>20</b>
<b>2.3. Marco Normativo .....</b>	<b>25</b>
<b>3. Metodología.....</b>	<b>28</b>
<b>4. Resultados .....</b>	<b>30</b>
<b>5. Conclusiones .....</b>	<b>37</b>
<b>6. Bibliografía.....</b>	<b>39</b>

## Resumen

A nivel mundial la bioenergía proveniente de biomasa forestal, está siendo acogida entre los esfuerzos que se están adoptando para mitigar el calentamiento global como consecuencia del uso de combustibles fósiles. Y es que hay una gran necesidad que el pensamiento de sostenibilidad pase a ser la corriente principal en todos los agentes que participan directa o indirectamente en una comunidad. Al mismo tiempo los especialistas en desarrollo, y los terratenientes a nivel mundial, o para Colombia las Alcaldías Municipales, se han dado cuenta que la producción de energía basada en recursos maderables están contribuyendo al desarrollo rural. Sin embargo, para cumplir con estas dos finalidades, sin repercutir en el ambiente, o tener otros efectos negativos, se deben trabajar en proyectos forestales que sean incorruptiblemente sostenibles.

Pero ¿Cómo se puede llevar una producción de bioenergía a ser sostenible? El presente trabajo se centra en la revisión de literatura crítica, que traza como objetivo para una verdadera sostenibilidad el principio del “Triple Bottom Line” de John Elkington, demostrando que un proyecto que quiera ser sostenible, debería alinear su misión y visión con tres factores fundamentales, es decir pensar en lo social, lo económico y lo ambiental como una unidad indivisible.

El trabajo estudia dos procesos termodinámicos generadores de energía, que son muy usados a nivel mundial, uno es un proceso por pirólisis que descompone la materia orgánica, que para el caso son trozos de madera, llamados pellets, esto lo hace por la ausencia del oxígeno, y la acción del calor, y produce carbón biológico, SynGas y aceite biológico, el cual es el destinado para ser transformado en energía, y puede ser también almacenado para un futuro uso, haciéndolo fácilmente transportable. Y el otro proceso es el de gasificación, los pellets ingresan a la máquina gasificadora a muy altas temperaturas, y se le adiciona oxígeno o vapor, generando una oxidación incompleta donde se forma el SynGas, y de este luego se puede obtener etanol (que es el que se usa para generar energía), alcohol biológico, combustibles biológicos entre otros. Como subproductos de este proceso, también se obtiene escoria, alquitranes y CO<sub>2</sub>.

Al final se presentan los resultados obtenidos manejando insumos forestales de un corregimiento de Puerto Carreño, perteneciente a la región de la Orinoquía, estos resultados son orientados a las variables: empleo, emisión de CO<sub>2</sub> e ingresos, mostrando comportamientos más favorables para el proceso de pirólisis.

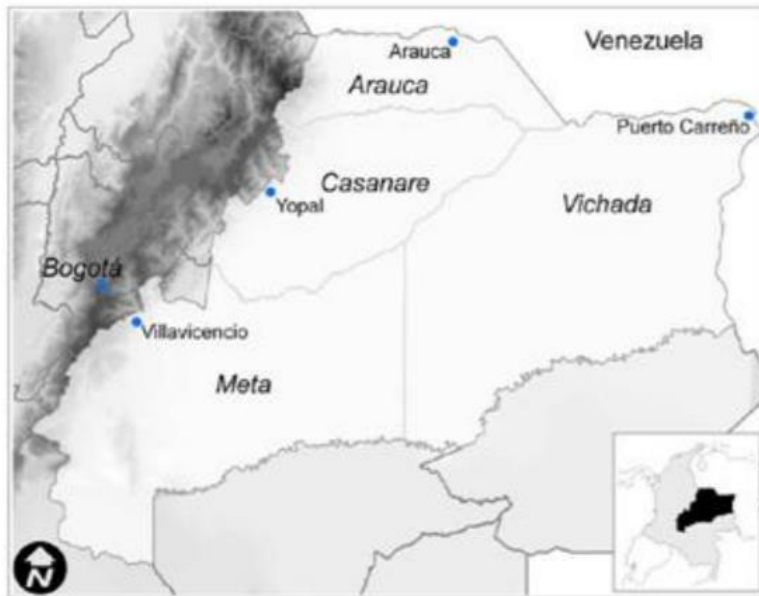
## 1. Introducción

### 1.1. Contextualización.

La región de la Orinoquía colombiana se localiza en los departamentos de Arauca, Meta, Casanare, Vichada con aproximados 310.000 km<sup>2</sup> de extensión. Es la tercera región más grande de Colombia, limitando por el norte y el oriente con Venezuela, por el sur con la región Amazónica y al occidente con la cordillera oriental. Se encuentra hídricamente conformada por la Cuenca Arauca, Cuenca Meta, Cuenca Bitá, Cuenca Cagua Mesetas, Cuenca Tomo, Cuenca Tuparro, Cuenca Vichada, Cuenca Zama, Cuenca Mataven, Cuenca Ajota, Cuenca Guaviaro, Cuenca Inirida y Cuenca Atabapo, que se encuentran agrupadas en subregiones naturales conocidas como:

1. Piedemonte llanero
2. Llanuras del Meta
3. Llanuras del Guaviare.
4. Pantanos del Arauca y
5. Serranía de la Macarena

Mapa 1 región de la Orinoquía: sus departamentos y ciudades capitales



Fuente: IGAC. Tomado de Vilorio de la Hoz, 2009

Cuenta con una Corporación Autónoma Regional y de Desarrollo Sostenible conocida como Corporinoquía, provista con personería jurídica, autonomía financiera y administrativa para actuar solo dentro de su jurisdicción, velando por que las políticas del Ministerio del Medio Ambiente sean cumplidas. Tiene una extensión de 25.994.300 ha, geográficamente limita por el sur, con los departamentos de

Guaviare y Caquetá; por el norte, con el río Arauca que es límite con la República de Venezuela; por el noreste, con el río Orinoco que limita con la República de Venezuela; por el sudoeste, con los departamentos de Cundinamarca y Huila; por el noroeste, con los departamentos de Boyacá y Huila y por el sudeste, con el río Guaviare que separa los departamentos del Guaviare y Guainía. Se divide en 5 departamentos y 45 municipios, los cuales son:

- Departamento de Vichada: La Primavera, Cumaribo, Puerto Carreño y Santa Rosalía.
- Departamento de Boyacá: Pisba, Cubará, Pajarito, Paya y Labranzagrande.
- Departamento de Cundinamarca: Une, Chipaque, Ubaque, Guayabetal, Choachí, Quetame, Fosca, Paratebueno, y Gutiérrez.
- Departamento de Casanare: Chámeza, Hato, Yopal, Aguazul, La Salina, Corozal, Monterrey, Nunchía, Maní, Orocué, Villanueva, Recetor, Paz de Ariporo, Sácama, Pore, Recetor, Sabanalarga, Sácama, Támara, Trinidad, San Luis de Palenque y Tauramena.
- Departamento de Arauca: Cravo Norte, Saravena, Arauquita, Arauca, Tame, Fortul, Puerto Rondón y Saravena.

Los suelos de esta jurisdicción se identifican porque son muy poco productivos, tienen baja aplicabilidad del fósforo, la presencia de aluminio, el cual genera acidez en el suelo (pH inferior a 5.5), ocasionando una limitación para un adecuado desarrollo de los cultivos (CONIF 1998).

El uso de estos suelos se distribuye en:

- Suelos boscosos, allí se encuentran bosques de galerías, selvas, área lacustre, zonas especiales y relictos boscosos, zonas petroleras y zonas urbanas que corresponden al 79,9%.
- Suelos destinados a pastos, situados en su gran mayoría en Arauca, Vichada, Meta y Casanare
- Suelos para plantaciones forestales comerciales, su extensión es del 19.06% (CONIF 1998).
- Suelos para cultivos, ubicado sobretodo en los departamentos de Cundinamarca y Boyacá, su extensión es del 1.04%. (CONIF 1998).

Mapa 2 Jurisdicción de Corporinoquía

Fuente: Corporinoquía, 2012.



Esto es coadyuvante de la riqueza en flora y fauna que en general la región Orinoquia posee, como en la parte arborífera, con el guayacán amarillo, ceibas, epifitas o parásitas, gramíneas, palmeras de moriche, pastos, bejucos, musgos florales y frutales. Mientras que su fauna lo ubica en el reconocido primer lugar a nivel mundial en diversidad de aves con 644 especies, 44 especies de anfibios, 101 especies de mamíferos y 119 de reptiles (Rangel-Ch 2015).

La Orinoquia tiene 66 tipos de vegetación, 2692 especies vegetales, se caracteriza por tener estratos arbóreos superiores, e inferiores, los géneros más dominantes en los primeros son: *Didymopanax morototoni* (Araliaceae) y especies de *Nectandra*, *Brosimum* y *Aspidosperma*. Y palmas como *Socratea durissima*, *Astrocaryum vulgare* y *Oenocarpus minor*. Y en el inferior son: *Calliandra surinamensis* (LEG Mimosaceae), *Waltheria glomerulata* (Sterculiaceae), *Curatella americana* (Dilleniaceae) y *Miconia* sp. Las familias que cuentan con más especies son: Rubiaceae, Leguminosae, Poaceae, Cyperaceae, Melastomataceae, Asteraceae, Orchidaceae, Euphorbiaceae, Palmae y Apocynaceae. Todo esto en 154193 km<sup>2</sup> de superficie, y donde el 15% de esta superficie ha sido deforestada (Rangel-Ch ).

La vegetaciones muy variada por contar con diferentes pisos térmicos, empezando por una altura desde los 150 msnm en el Piedemonte llanero, hasta la zona de páramos en los 4000 msnm por el sector del Sumapaz, en donde se involucran diversos ecosistemas como la sabana húmeda de la alta densidad fluvial, la sabana eólica en donde por la fuerza de los vientos son modelados diversos paisajes como los podemos apreciar en el recorrido entre Monterrey hasta Aguazul, también apreciamos los sectores formados por montículos anegados la mayor parte del año denominados zurales que localizamos en recorridos por el Guainía; los esteros que son reconocidos sectores acuáticos de baja profundidad como los encontrados en el recorrido por Yopal ya que se encuentra un recorrido hídrico que es el río Orinoco, los morichales llamados así por ser angostas franjas de bosques en forma de galerías ejemplos que podemos apreciar desde la carretera marginal de la selva de camino a Orocué, y por último las selvas inundables que podemos apreciar en sectores selváticos del Guainía, toda esta variedad entre paisajes van de la mano de un clima ecuatorial que maneja una temperatura media de 30 grados centígrados en la planicie llanera hasta los -4 grados centígrados en los páramos.

La región se reconoce como de altas precipitaciones y, por ser parte de la zona de convergencia intertropical, en la época seca se presentan vientos alisios manteniendo un promedio de 8 meses al año de lluvias con precipitaciones de medias a altas (Giraldo 2018).

La población en la región, ha hecho que se talen grandes superficies con la casi nula intervención del gobierno para controlar estos excesos, debido a inequidades sociales y políticas que han disminuido las grandes regiones forestales que nos permitían el reconocimiento del mayor pulmón del mundo; ahora se destacan grandes superficies dedicadas a la ganadería, a grandes plantaciones dedicadas a la palma africana introducida en el período presidencial del señor Álvaro Uribe, hectáreas que actualmente se



explotan para el comercio del biocombustible (Giraldo 2018), y otros cultivos más pequeños dedicados al cultivo de la piña en el departamento de Casanare.

La mayor parte de esta región está siendo usada ilegalmente, tanto por la guerrilla como por los carteles de la droga, cambiando los usos de la tierra, o sobre-explotando sus recursos, ocasionando un desplazamiento de las comunidades a pequeñas parcelas, las cuales terminan afectando negativamente la flora y la fauna de estos espacios que, en muchas ocasiones, para este territorio de la Orinoquía, son pantanos (Sánchez 2017), lo cual causa una re-estructuración forzada del espacio.

Como gran desventaja para la conservación de la región, Colombia no tiene identificadas sus áreas de producción permanente y otorga, bajo la figura de permisos temporales, el acceso productivo al bosque natural (Giraldo 2018). Proyectos de producción a gran escala han sido aprobados a compañías extranjeras multinacionales, con consentimiento del gobierno durante los últimos veinte años, permitiendo la apropiación de extensas hectáreas, para la extracción de petróleo, el engorde de ganado, la producción de aceite de palma, la agroindustria, y recientemente la silvicultura industrial (DNP 2016). Pero a pesar de todos estos mercados, la distribución inequitativa, la segmentación y segregación social siguen siendo comunes en este territorio, como consecuencia de un abandono del gobierno y corrupción generado por falta de una clara gobernanza (Sánchez 2017).

En la actualidad, el nuevo negocio minero se basa en la extracción de tantalio de las minas de coltán, lo que es una causa más de daños ambientales como se demuestra en la Amazonía y Orinoquía, dejando una huella de deforestación, contaminación en el agua, inequidades socio-políticas, declive rural, y lo que pareciera menos imperceptible, un cambio radical del uso del suelo, irrumpiendo con la biodiversidad. La pérdida de esta biodiversidad también se traduce en la desaparición de campesinos, indígenas y todo el pueblo autóctono del área, amenazando culturas, creencias, y costumbres.

A nivel regional, el departamento y su Consejo de Planificación, tiene la labor de coordinar los 19 municipios de Casanare, pero para ello cuenta con una autonomía, conocimiento técnico y presupuesto muy limitado, con gobiernos inestables y corruptos en el poder.

A nivel local, el alcalde está encargado de dar vía libre a proyectos, siempre y cuando estos se encuentren dentro de los lineamientos del Consejo Municipal y sus decretos reguladores. Según las reglas sectoriales, los municipios tienen tres instrumentos de operación en el desarrollo de sus procesos: programa de gobierno, planes municipales de desarrollo y el plan de uso de tierras. Esto deben ser consistentes, complementarios, subsidiarios, y asociativos dentro de todos los niveles territoriales.

Evidentemente los factores clave son, una apropiada administración de los recursos y políticas claras, apropiadas, con entes veedores que garanticen su aplicación, minimizando así la posibilidad de corrupción.

## 1.2. Planteamiento del Problema

La bioenergía no es un recurso en metamorfosis, lleva en sus hombros una gran carga histórica. Desde cuando era puramente usada de forma doméstica, pasando por la Revolución Industrial, en la cual los recursos de biomasa, fueron pieza clave hasta nuestros días. Sin embargo, no es la única existente, ni la más usada. En 2015, se determinó que, de toda la energía consumida a nivel mundial, solamente alrededor del 19% es renovable. Aunque la humanidad siempre ha dependido de los recursos fósiles como el carbón, el gas natural, pero sobre todo del petróleo, este patrón está empezando a cambiar, y es que según su distribución geográfica, estos están bajo el dominio de unos pocos, además el mundo se está empezando a concientizar y más que eso, a sufrir las consecuencias del mal manejo que se le han dado a los recursos naturales, ya que aunque parecen ser abundantes en la tierra, son finitos, y cuando se extralimita la mano del hombre y exprime los recursos del planeta de una forma antinatural, se altera su equilibrio, generando un aumento de emisiones de efecto invernadero y la atenuación del cambio climático. Por todo lo anterior, países como, España, Alemania, Estados Unidos y China lideran el desarrollo de tecnologías para el aprovechamiento de energías renovables, haciendo de esta manera su aporte.

En cuanto a Latinoamérica, Brasil es líder en la aplicación de bioenergía en el sector del transporte. Fue también líder en la producción de etanol hasta 2005.

Hay muchas razones por las cuales la bioenergía se considera como una tecnología relevante tanto para países en vía de desarrollo, como para los industrializados. Brindan seguridad en la oferta de energía, alivian preocupaciones ambientales, cooperan con los ahorros de divisa, solventan problemas socio-económicos de todos los sectores rurales a nivel mundial, son renovables y están disponibles alrededor del mundo. (Demirbas 2009).

La gran concentración de gases de efecto invernadero son una consecuencia directa de las actividades humanas de los últimos 50 años, puesto que los que son antropogénicos se acumulan en la atmósfera, y producen un calentamiento global por el fortalecimiento natural del efecto invernadero. Dentro de estas actividades humanas, solamente el uso de la energía aporta el 80% de estos gases de efecto invernadero antropogénico (producción, transformación, manejo y consumo de commodities energéticos). 35% es el incremento del dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) en el último siglo y medio, mostrando su más alto crecimiento, sobre todo en los últimos 18 años. Estos comportamientos también ocurren con los niveles de crecimiento del metano ( $\text{CH}_4$ ) y óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ). Unas de las consecuencias que se proyectan de este impacto son el incremento de la temperatura del aire y el crecimiento del nivel del mar, y aunque aparentemente no sean del todo visibles ahora, su escalamiento a través del tiempo las hará irreversibles.

Colombia no está exenta de estas secuelas, el fenómeno climático del Niño Oscilación del Sur (ENOS), se evidencia así:

- Hay incrementos en la temperatura del aire, en las horas del día, y se disminuyen notoriamente en horas de la madrugada, de manera más focalizada en los valles interandinos.
- Desencadena otro fenómeno, que son las heladas en los altiplanos, u otras áreas superiores a 2500m.
- Aumento de la evaporación y la evapora-transpiración disminuyendo la cantidad de recursos hídricos, afectando a la población, la generación de energía, la agricultura, etc.
- Un fenómeno más, y es el que se refleja en la superficie de la tierra, y afecta a los colombianos, pues como hay tiempo muy seco, las horas de brillo solar son más prolongadas, generando radiación solar o también conocida como ultravioleta.

El caso contrario es el fenómeno de “La Niña”, pues trae consigo temporadas muy frías, e indiscriminadamente estos dos fenómenos perturban el estado ideal de sostenibilidad ambiental “Triple Bottom Line” en el que se quiere estar. (IDEAM 2014)

A grandes rasgos, este era el comportamiento de combustibles fósiles y de recursos renovables en Colombia hace 4 años:

- 93% Recursos primarios de origen fósil.
- 4% Hidro-energía y 3% Biomasa y residuos.
- 69% Exportación principalmente de carbón mineral y petróleo.
- Del neto después de exportaciones, se divide así: 78% recursos fósiles, y 22% recursos renovables.

Lo que significa que no hace mucho, Colombia dependía de un 78% en recursos fósiles.

Y, si repasamos las repercusiones ambientales por el uso de combustibles fósiles en Colombia, y le sumamos que sus reservas no son mayores a 170 años para el carbón, 15 años para el gas natural y solo 7 años para el caso del petróleo (Min Minas 2018), pero lo contrastamos con el crecimiento exponencial en la demanda de energía (200% en los últimos 30 años, pasando de 205,150 GWh en 1980 a 454,260 GWh en 2012) (Gómez-Navarro 2018), sería entonces válido hacernos la pregunta:

- ¿Cuál es la sostenibilidad de la producción de energía a partir de la biomasa forestal en la Orinoquía colombiana? –

Este trabajo se limitará a hacer un análisis, señalando externalidades positivas o negativas, según sea el caso, para la generación de energía a partir de biomasa forestal de la Orinoquía colombiana, solamente evaluando los procesos por pirólisis y por gasificación. Los factores a evaluar son:

la generación de empleo para cada proceso, las emisiones de CO<sub>2</sub> por cada uno separado, y el factor monetario, que determina cuánto dinero se va a recibir por MWh generados según la tecnología usada. Esto se evaluará para 20.000 Ha, en el corregimiento de Puerto Carreño en Vichada, donde los suelos, el clima y la altura favorecen el desarrollo de la especie arbórea de Eucalyptus Pellita. No se tiene en cuenta ninguna variable relacionada con el transporte, ni tampoco ninguno de los costos en los que incurren las plantas de procesamiento. En cuanto al periodo de preparación de la tierra para la siembra, no es incluida. Los valores que pertenecen a factores de producto generado fueron tomados de la bibliografía, y aplicados al modelo, conservando su relación según el número de hectáreas plantadas.

El alcance del trabajo, es llegar a determinar si la producción de energía biodegradable a partir de biomasa forestal, puede ser considerada como sostenible, basándonos en los componentes de generación de empleo, emisión de CO<sub>2</sub> e ingresos generados por cada uno de los dos procesos propuestos. Esto con miras a que dentro de un futuro, se puedan favorecer y brindar oportunidades a las poblaciones de las zonas no interconectadas de gozar de un servicio ininterrumpido, garantizado y sostenible, y en cuanto al sistema interconectado nacional, de abastecer la demanda cada vez creciente, dejando totalmente de lado el uso de combustibles fósiles, aprovechando el capital natural con el que cuenta la región de la Orinoquía, dejando atrás la importación de otros insumos para producir energía, y disminuyendo toda clase de contaminación generada a partir del uso de fuentes no renovables, que está produciendo sobre todo gases de efecto invernadero y lluvias ácidas.

### **1.3. Justificación**

El gobierno colombiano tiene como objetivo, desempeñarse como una economía baja en carbón, y está creando todo un escenario normativo como estrategia, que incentive la incorporación de tecnologías generadoras renovables en el Sistema Interconectado Nacional.

La intención de este trabajo es analizar si la generación de energía a través de la biomasa forestal en la Orinoquía cumple con esta meta, y podría ser una opción viable para sugerir o no su uso, con base también en la información de las otras alternativas de energías renovables que son aplicables según las características del país, porque:

- A pesar de que ya hemos visto que la tasa de crecimiento de la población colombiana durante los últimos años está decayendo, esta sigue siendo positiva, es decir que siempre va a haber más población que en los años pasados.
- Hay zonas no interconectadas ZNI al Sistema Interconectado Nacional SIN, debido a que esta red está montada sobre la cordillera de los Andes.
- Los nuevos adelantos tecnológicos han hecho un gran aporte en la evolución de la humanidad, y hacen que cada persona, cada vez más, demande más energía para su uso, es decir que hay un elemento neto de la demanda por energía per cápita. Y Colombia debería prever situaciones

donde la demanda de energía supere la oferta que se tiene, dando soluciones social, ambiental y económicamente eficientes, que no perjudiquen a ninguno de los actores involucrados en estas tres esferas. Esto significa, que no solo se debe ampliar la transmisión para garantizar el servicio de los usuarios en las ZNI, pero también velar para que la demanda aumentada de los usuarios del SIN sea satisfecha.

- Actualmente Colombia cuenta con tecnologías de energía renovable hidráulica, gas, carbón, biomasa, eólica, térmica y solar (Min Minas 2018), pero se encuentran algunas desventajas en estas. La energía solar, al parecer es muy costosa, muy poca información se tiene, pues hasta el momento se usa generalmente solo en algunos barrios colombianos de clase alta (Gómez-Navarro 2018).
- Por otro lado, se sabe que en la Guajira hay un potencial de vientos muy interesante, donde podrían instalarse plantas eólicas, pero esto afectaría económicamente muchas empresas, que operan en la zona donde debería montarse el parque eólico, por este tema de intereses cruzados, solamente se mira como un experimento de laboratorio.
- Y en cuanto a la hidráulica, pese a ser en la que más se depende, su producción no es fija, por el contrario suele ser muy volátil, está variando entre el 45% y el 95% (Gómez-Navarro 2018), y es que su desventaja es principalmente el fenómeno climático “El Niño” y “La Niña” – Oscilación del Sur (ENOS), y la problemática recae cuando el fenómeno “El Niño” afecta, causando sequías en los embalses, lo cual desencadena que su nivel bajo, haciéndole más difícil generar por lo menos el mismo nivel de energía. Cuando el embalse alcanza un nivel crítico, se echa mano de la capacidad instalada contingente la cual son las termoeléctricas, y es que, aunque se han venido generando más embalses, para no tener que adoptar este “plan B”, nos estamos enfrentando a las fuerzas naturales.
- En cuanto a las termoeléctricas, no solamente se usan como un plan de contingencia, estás también son funcionales, antes de mencionar su desventaja, es clave formular una pregunta retórica: Frente a un déficit de energía causado por el fenómeno del “Niño”, ¿tendría Colombia la suficiente capacidad termoeléctrica instalada para atender la nueva y creciente demanda de energía? Y su desventaja radica en que estas plantas tienen que quemar combustibles fósiles, básicamente carbón para poder funcionar, emitiendo así dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero en la atmósfera, lo que crea es un fenómeno de retro-alimentación o ciclo vicioso, porque de esta forma se está deteriorando cada vez más el medio ambiente, generando cambios climáticos, que hacen que los fenómenos “El niño”, y “La Niña” sean cada vez más recurrentes, afectando los regímenes de lluvia, causando sequías, impactando directamente los embalses de las plantas hidroeléctricas, y obligando a un uso más frecuente de las plantas termoeléctricas. La pretensión debería ser no emitir más dióxido de carbono, porque no le hace bien a la fuente de energía nacional que es la hidroeléctrica.

En el pasado Colombia ha podido suplir la creciente demanda, pero frente a estos retos que son cada vez nuevos y mayores que antes, se debería levantar la vista hacia otras alternativas energéticas, como la que aquí se propone, la biomasa forestal, con recursos de la región de la Orinoquía.

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. Objetivo general**

Establecer la sostenibilidad de la producción de energía a partir de la biomasa forestal en la Orinoquía colombiana.

### **1.4.2. Objetivos Específicos**

- Identificar y describir los tipos de producción de energía a partir de biomasa forestal.
- Elaborar un método de evaluación de la sostenibilidad de la producción de energía a partir de biomasa forestal.
- Evaluar la sostenibilidad de dos tipos de producción de energía a partir de biomasa forestal.

## **2. Marco Referencial**

### **2.1. Marco Teórico**

El concepto de generación de energía renovable a partir de biomasa nace cuando se ven las limitaciones de los recursos naturales, sobre todo, los que desde siempre se han usado como corriente principal para obtener energía: combustibles fósiles y carbón. Agregando al factor finito de estos recursos naturales, su uso desmedido, conlleva también a generar impactos negativos, como lo son, las emisiones de gases de efecto invernadero, que traen como consecuencia el calentamiento global. Y es allí que sabiendo que el desarrollo de un país va de la mano con su oferta energética, cuando las naciones para asegurar que ésta, pueda cubrir las demandas que la sociedad hoy en día requiere para su subsistencia, está haciendo esfuerzos para lograr substituir el uso de recursos agotables, e incluir prácticas más amigables con el planeta, como es el caso de las energías renovables: Energía hidráulica, energía eólica, energía geotérmica, energía de biomasa, energía solar, energía de las mareas y energía de las olas, entre otras. (Da Silva 2017.)

Casos como los de Brasil el cual su mayor fuente de generación de energía es hidráulica, aproximadamente el 69%. Nos permite concluir que no solo debemos quedarnos estancados en un único recurso generador, pues como la historia lo cuenta, la crisis generada por la insuficiencia de agua en este país entre los años 2014 y 2015, también limitó la oferta de energía, poniéndolos en un gran riesgo. (Portugal-Pereira 2015).

Por esto mismo la propuesta es que las naciones logren tener una diversificación, mezcla y aprovechamiento de los recursos renovables que se encuentran en cada una de ellas. Aunque el interés detrás de este análisis, se centra en el recurso de la biomasa forestal, este tiene una habilidad de desarrollo bastante prometedora, además de ser el único que no depende del clima, consiste en material orgánico de plantas leñosas, sobre todo árboles, usa los tallos pequeños, la leña menuda, ramas y residuos de la tala y el procesamiento de la madera. Si ésta se usara para obtener electricidad, combustibles y calefacción, sumado a las demás alternativas, las naciones que cuentan con suficientes recursos forestales, dejarían de depender tanto en la importación de energía, pudiendo dar un mejor uso a estos recursos económicos. La biomasa forestal como recurso para generar electricidad doméstica, no es nueva, su importancia data cuando en 1973 se desató una crisis petrolera, sin embargo, no pudo llegar a ser acogida internacionalmente, debido a un subsecuente bajo precio de combustible fósil (Carleton 2018).

Uno de los métodos de obtención de energía a través de biomasa forestal, más adecuado, consiste en un proceso de conversión termoquímica, el cual alcanza a llegar a temperaturas hasta de 600 °C, en menos de 2 segundos para descomponer las partículas de biomasa, que por lo general miden menos de 2 milímetros, y tienen menos del 10% de humedad. Éste elimina las partículas de oxígeno de los materiales, generando vapores que son condensados en un aceite biológico líquido, durante este proceso también se genera carbón, y una mezcla de gases no condensables (SynGas). El aceite biológico es sometido a turbinas de encendido de compresión, y transportado a esta conversión termoquímica se le llama Proceso de Pirólisis Rápida, este aceite biológico es transportado de la planta de pirólisis a la unidad de generación de electricidad, donde alimenta una caldera de vapor que acciona una turbina también de vapor para generar electricidad (Pighinelli 2018, Ayer 2018).

La pirólisis es un método termoquímico muy usado, el cual convierte biomasa en electricidad, esto se hace al quemar los insumos a altas temperaturas sin la presencia del oxígeno, generándose una combustión completa, la cual produce CO<sub>2</sub> y vapor de agua. Según las temperaturas a las que son sometidos los insumos, esta conversión puede ser: Pirólisis Rápida, sucede cuando alcanza una temperatura entre 450°C y 600°C, y Pirólisis Lenta, es cuando se llega a una temperatura promedio de 400°C, el producido de esta es carbón sólido (Quintero 2015).

Otros métodos de conversión termoquímico son:

- Combustión: Es el método usado más antiguo para la producción de energía. Están presentes el carbono y el hidrógeno, que como resultado liberan calor, dando agua y CO<sub>2</sub>, debido a su reacción por el exceso de oxígeno.

La combustión independiente, se centra en que los generadores a diésel son aprovisionados no con diésel, pero con aceites vegetales. Cuando el generador quema este diésel orgánico, produce energía. Por otro lado, la biomasa puede ser directamente mezclada y quemada con el carbón para producir energía, lo cual se conoce como co-combustión, o mezclada con cualquier otro combustible fósil, lo que se conoce como combustión conjunta (Huang 2018).

Las eficiencias netas varían entre 20 – 40% (Quintero 2015).

- Gasificación: Al contrario del proceso por pirólisis, este tiene una conversión térmica incompleta, y de forma fragmentada a través de un proceso de oxidación, se va transformando el combustible sólido a gas, cuya composición tiene monóxido de carbono, hidrógeno y metano. La naturaleza de este gas producido varía según el agente gasificante utilizado, por ejemplo, si se emplean turbinas de gas o motores diésel, para generar oxígeno o vapor, la productividad será mayor al 30%, comparada con el método conservador que usa aire como agente gasificador, aunque algunas veces éste sea optimizado con oxígeno, y al disminuir su concentración de nitrógeno, su poder calorífico es incrementado. La máquina gasificadora rompe las moléculas de biomasa en vapor a 700 °C, típicamente contiene oxígeno o vapor, el SynGas producido es hecho a partir de monóxido de carbón e hidrógeno. La escoria que es un producto sólido tiene que ser removido usando un ciclón, que a base de movimientos rotacionales y combinado con la gravedad colecciona toda la escoria fundida. Luego todos los alquitranes, metano, amonio, sulfuro y dióxido de carbono son removidos, este último es capturado antes de ir a la atmósfera y almacenado profundamente bajo la tierra, puede llegar a tener otros usos comerciales. Este gas caliente que ya ha sido presurizado pasa a través de un proceso de catálisis por un reactor para así tomar su forma líquida, con ayuda de monóxido de carbón e hidrógeno, cuando estas moléculas han sido condensadas, luego son refinadas para producir diferentes productos, como etanol, alcohol biológico, combustible biológico, entre otros.

El inconveniente de este método de gasificación, es que el gas resultante tiene muchas partículas, se deben tener en cuenta los costos de equipos especiales de limpieza para su purificación. El poder calorífico de los gases está entre 60 – 80%, y esto depende de la presión, el tiempo, y la velocidad de calentamiento del reactor, también como de la residencia de los gases (Loaiza 2015). No se debe confundir el poder calorífico, con el valor de eficiencia, ya que existen diferencias entre ellos. El rendimiento se evalúa mejor, en una planta a pequeña escala, una vez la electricidad se ha producido.

La eficiencia neta puede alcanzar 50%, si se combina el proceso de gasificación con ciclos de gas y vapor (Loaiza 2015).

Y en cuanto a los métodos bioquímicos, encontramos:



- Fermentación: Este proceso convierte los azúcares en celulosa, lo que produce combustibles alcohólicos como etanol. También se genera dióxido de carbono. Es un proceso anaeróbico, ya que se hace en ausencia del oxígeno. Sus principales materias primas son: el maíz, la caña de azúcar y la remolacha azucarera (Quintero 2015).
- Digestión Anaeróbica: Es la descomposición de la materia orgánica, en ausencia de oxígeno, mediante grupos de microorganismos.

Tengamos en cuenta la importancia de la biomasa forestal, ya que no solo ayuda a generar energía, sino también tiene otros usos como lo es el bioetanol, biocombustible, biogas, y calefacción. Esta también podría guardarse, (acordémonos del proceso de pirólisis rápida, la cual genera un líquido aceitoso) y ponerse a disposición, según su requerimiento en el mercado. Aparte de todos los beneficios ambientales anteriormente mencionados, veamos también los económicos y sociales, que a simple vista se ven reflejados, como lo son la generación de empleos en las zonas boscosas, tiene el potencial de crear hasta veinte veces más trabajos comparado con la producción de carbón (Bowd 2018), las ganancias directas a los propietarios forestales, y la generación de valor a los materiales de desecho en los bosques. (Barnett 2016, Gonzales-García 2019).

Sin embargo, nos encontramos con unas condiciones que afectan negativamente, sobre todo el ámbito social y ambiental, y que requieren un estudio muy minucioso, ya que es muy difícil evaluar sus impactos sociales, pero sería muy apreciado para la implementación de soluciones. Aspectos tales como, el incremento, o el cambio drástico de cultivo de especies arbóreas de un tamaño menor, al anteriormente cultivado en la zona. Aunque ya se ha mencionado como un beneficio, pero la recolección completa de todos los residuos que quedan después de la tala de los árboles genera un efecto negativo, ya que los desechos orgánicos son necesarios en el cultivo, como parte de los nutrientes y carbón que la tierra necesita para su abono. Y el aumento de la densidad de especies arbóreas que tienen una corta rotación, va en detrimento de los suelos, además de tener que incrementar el uso de fertilizantes, pesticidas y herbicidas. Estas malas prácticas agrícolas de cultivos de árboles dedicados a la producción de biomasa van generando a largo plazo externalidades negativas para el ambiente, siendo aún peores que las que se derivan de la producción de energía no sostenible. Degradando la calidad del agua, la tierra, la biodiversidad y aumentando la emisión de gases de efecto invernadero (Barnett 2016).

Una evaluación que contó con 27 indicadores, y se aplicó a todas las fuentes de energía, arrojó como resultado que la biomasa, haciendo parte de las fuentes renovables, aún está entre los niveles más bajos, con un puntaje muy cercano al del carbón, recursos nucleares no-renovables o gas natural. Demostrando así las falencias a nivel sostenible de la biomasa. (Szulecka 2019).

Como lo que buscamos no solamente es generar energía, para solventar las necesidades económicas y sociales de una comunidad irrumpiendo con el medio ambiente, sino que también nuestro

propósito es hacerlo sosteniblemente, debemos adentrarnos en los factores que hacen que esta producción sea sostenible.

Pero primero debemos establecer una definición clara para lo que es sostenibilidad. Ya que existen múltiples significados de esta noción, y debido a esto podemos alejarnos de la intención del manuscrito, si no tenemos un marco que referencia a donde pretendemos llegar. Para el presente trabajo vamos a adoptar el término de sostenibilidad tomado de la teoría de John Elkington "Triple Bottom Line", este es influenciado por el informe Brundtland de 1987, y aquí se integran tres conceptos que giran alrededor de la definición de sostenibilidad, los cuales son: económico, social y ambiental.

Cuando se encuentra un factor común para las actividades económicas, las necesidades sociales, y el equilibrio ambiental, y a este son orientados los proyectos para el desarrollo de una nación, el equilibrio se mantendrá y la definición de lo que se explica en "Triple Bottom Line", será alcanzada (Elkington 2006). En otras palabras y aplicado al caso que se está trabajando aquí, simplemente porque la expansión energética está debilitando la arista ambiental, no podemos limitarla, aunque fuese una buena alternativa que ayudará a resarcir todos los impactos generados a la conservación del medio ambiente por causa de las acciones humanas, pero a su vez estaríamos ignorando el debilitamiento en la arista social y económica, ya que, si nos fijamos, el desarrollo económico depende del uso de la energía.

Teniendo en cuenta lo anterior, se debe evitar el uso de prácticas inadecuadas que generen un manejo insostenible de la biomasa forestal; previniendo esto, hoy en día tenemos varias organizaciones que se encargan de promocionar y certificar la sostenibilidad de proyectos forestales. La Iniciativa de Silvicultura Sostenible (SFI por sus siglas en inglés), encargada solamente de regular actividades forestales en Canadá y Estados Unidos, y el Consejo de Manejo Forestal (FSC por sus siglas en inglés), el cual es una ONG internacional, que tiene políticas regulatorias muy estrictas, son la más reconocidas a nivel internacional, y se han encargado de avalar por lo menos 38.6 millones de hectáreas, para proyectos forestales en Estados Unidos, lo cual representa casi el 80% de las zonas boscosas de este país, que han sido apartadas solo para proyectos renovables. Razón por la cual la Unión Europea pronostica aumentar las importaciones de biomasa de Estados Unidos en un 400% para el año 2020, con respecto a los niveles alcanzados en 2010. (Barnett 2016.)

En el caso de Italia el recurso mayormente usado es el gas natural, pues los costos de la producción de bioenergía son elevados, pero se ha conocido, que tienden a disminuir cuando se produce a grande escala, claro que para este país la carencia en la materia prima, se traduce también en altos costos para su cuidado, desarrollo y transportación, lo cual resulta en una anulación de los beneficios en los costos a gran escala. Por lo tanto, el uso de los residuos y desechos en los cultivos de la tierra, bosques y la industria para la producción de energía biológica, son fundamentales para todo su sistema energético, ya que se planea un crecimiento del uso de energía renovable del 17% para el año 2020 en este país, siendo su principal objetivo garantizar que la demanda energética pueda ser suplida, reduciendo todos

los efectos negativos de las energías fósiles. Debido a la escasez de los recursos, la estabilidad eléctrica italiana recae principalmente en sus importaciones (González-García 2019).

Las políticas de Obligación de Renovables del Reino Unido (RO por sus siglas en inglés), precisan que toda la biomasa forestal que se deba importar a este país, deberá tener un estándar de mínimo 60% en el ahorro de las emisiones de gases de efecto invernadero comparado con las emisiones de los combustibles fósiles, lo cual pone nuevamente en la mira a organizaciones como SFI y/o FSC, como un estereotipo de certificación de biomasa forestal que garantiza una regulación dirigida hacia los retos de la sostenibilidad de generación de bioenergía (Barnett 2016).

Aunado a esto, está en estudio el análisis de la sostenibilidad del uso de la maquinaria de pirólisis, las nuevas regulaciones que ha establecido el gobierno canadiense en 2017, dejan al descubierto que este sistema de conversión, podría estar produciendo altas emisiones contaminantes, a través de sus máquinas. Por lo tanto, el Análisis del Ciclo de Vida (LCA por sus siglas en inglés) es usado, esta evaluación arroja un promedio después de cuantificar los beneficios y desventajas de usarla para producir aceite y carbón biológico con los recursos forestales (Ayer 2018).

Para un mejor manejo de la biomasa para la pirólisis, esta debería ser acondicionada. Las partículas deben ser reducida a un tamaño menor, teniendo cuidado, pues el aserrín nuestro objetivo final, ya que no tendría la cohesión necesaria. Este proceso recibe el nombre de peletización, no solamente mejora la manejabilidad, lo cual, en términos de transporte, y logística es más benéfico, sino que también tiene un alto valor calorífico, y sus emisiones son menores. Estos pellets de biomasa son usados para suplir la demanda de energía, calefacción y combustibles para el transporte en sectores domésticos, comerciales e industriales.

Con el auge de este proceso de peletización para crear bioenergía, y analizando el caso de África, donde estimaríamos que, debido a sus condiciones naturales, la biomasa forestal debería ser una de las corrientes principales, ya que hay aproximadamente 2.500 Kg de biomasa que se podría llegar a usar en solo el Sur de África. Allí sus tierras, su clima y otros factores permite a sus árboles alcanzar la madurez después de solo 15 años, contrastado con las condiciones de Europa y América del Norte, donde se debe esperar más de 50 años. El tiempo de espera en esta región es muy favorable, y se podría pensar que a futuro estos podrían ser los mayores colaboradores en el aporte de recursos para biomasa forestal. Sin embargo, en el presente la realidad es otra, hasta el día de hoy solo cuatro plantas de peletización se han creado, y han permanecido en el mercado solamente durante seis años, es decir que en la actualidad África del Sur no cuenta con ninguna planta donde se realice la peletización. (Bowd 2018).

La industria forestal tiene dinámicas socio-ambientales que se entrelazan, por esto a pesar de que existan unas condiciones atmosféricas apropiadas para el cultivo arbóreo, se necesita también de un clima social apropiado, políticas regulatorias, impuestos y/o subsidios cuando sean requeridos, como por

ejemplo un impuesto a la producción y/o uso de carbón mitigaría el uso de este, y alentaría más al sector de la bioenergía, subsidios para los inversionistas lo que atraería mayor capital, mejoramiento de la infraestructura, clasificación en las tarifas, apoyo a la industria, entes encargados de evaluación y control a los procesos, entre otros.

## **2.2. Estado del Arte**

En Minnesota se estima que más de 156 trillones Btu (unidad de medida del calor en el sistema británico) de energía de biomasa fue consumida en este estado en 2015, esto equivale al 8.7% del consumo total. Cantidad que no lograron superar las otras fuentes renovables, ni si quiera combinándolas. Y anualmente podría llegar a producirse más energía a partir de la biomasa forestal de forma sostenible, pero el ritmo de desarrollo en este sector ha descendido (Carleton 2018), por lo tanto, se hace necesaria la gobernanza. Estos acuerdos entre el sector dirigente y sus dirigidos, ayudan a incubar oportunidades resolviendo de forma no forzosa desventajas para ambos lados, lo cual genera desarrollo y ayuda a proteger el sector, a través de la creación de entes institucionales encargados de erigir las normas adecuadas para generar esos cambios.

El resultado de esta gobernanza, debe ser un método el cual compacte a toda una comunidad de personas interesadas, que estando en continua interacción, mutuamente se robustezca con el gobierno, y las fuerzas del mercado, operando a través de políticas.

Una legítima gobernanza requiere ser diseñada y estructurada a través de políticas y programas coordinados tanto por instituciones estatales como no estatales, dentro del Sistema de bioenergía forestal. Entendiendo y no sobrepasando el poder y la autoridad dada a las agencias, ya sean gubernamentales o no gubernamentales. Delimitando adecuadamente el rango de cada agente en la toma de decisiones, y sus responsabilidades tanto dentro del mercado, como con el medio ambiente. Esta autoridad dada, que conlleva a unas responsabilidades, son parte fundamental de la estabilidad institucional. No solamente como una percepción de confianza, sino también como un garante que las ejecuciones se están haciendo de forma adecuada, conservando un ambiente de "Triple Bottom Line", manteniéndonos dentro de los lineamientos, que es desarrollar un sistema sostenible.

En cuanto a las normas y políticas estas deben tener la cualidad de ser adaptativas, estas son características progresivas que mejoran el desempeño institucional, básicamente dentro del ámbito que estamos analizando esto se transfiere a la facilidad de aceptar que hay un mercado cambiante, y que de repente la materia prima que se usó anteriormente, no puede ser la misma que debería ser usada hoy, debido a distintas condiciones, en la industria, en el medio ambiente, internacionales, etc. También se incluye la flexibilidad a cambios legislativos, como la implementación o la suspensión de subsidios o tasas impositivas, cambios de normas en cuanto al uso de los recursos naturales, etc. (Carleton 2018).

Como último cabe resaltar que esta gobernanza debe ser accesible a todos los agentes interesados, para garantizar su transparencia. El acceso equitativo a los recursos forestales, información, programas, subsidios e impuestos, son la base para lograr su legitimidad.

Un buen manejo de estas políticas, logrará identificar, cobijar y proteger los sectores que se encuentren en riesgo, debido a cualquier externalidad negativa, que se pueda generar durante la producción de energía renovable a través de la biomasa forestal. Es cierto que las intenciones detrás de la generación de bioenergía, son de ayudar a mitigar la contaminación que se ha producido por el uso de recursos no amigables con el medio ambiente, a través también de procesos que no han sido sostenibles. Pero, para saber cuáles son las oportunidades de mejora, o implementación de nuevos marcos políticos, es necesario tener identificados claramente, no solo para el presente, si no para un término a futuro, todos los efectos negativos, que esta industria genere, o pueda llegar a generar, puesto que aunque como se mencionaba anteriormente, el uso de la madera para generación de energía no es algo nuevo, era comúnmente usado en labores domésticas, y en esa entonces era un sistema muy simple, hoy día y a futuro, debido al crecimiento demográfico, y avances tecnológicos, este sistema ya no es tan simple, sino que tiene una jerarquía más compleja, que está en continua evolución, y que requiere de un análisis también complejo, para poder entenderlo y mejorarlo, y saber cuáles serán las consecuencias de su uso a futuro. (Lattimore 2010). No olvidando que el concepto de sostenibilidad, no está sesgado a una dimensión puramente ambiental, sino que también está basado en la esfera social y económica. En este caso, a primera vista, encontramos que la disponibilidad del suelo se verá afectada, en otras palabras, el cambio directo e indirecto del uso del suelo, sería una externalidad negativa, la dicotomía entre usar la tierra para generar alimentos, o para plantaciones de árboles para abastecimiento energético estará siempre presente. El suelo por lo general siempre ha sido usado en mayor parte para la cosecha de comida para nuestra subsistencia, teniendo en cuenta que este es un bien básico, se necesitará determinar, cual es la proporción de tierra que se usará solamente para la generación de bioenergía, y cual la proporción para el cultivo de alimentos. El cambio del uso del suelo también impacta directamente en la capacidad de almacenamiento de carbón en la tierra, lo que puede desenvolver en un desequilibrio de los gases de efecto invernadero a su vez. La otra externalidad negativa es el uso del agua, el cual no solamente se ve afectado con la producción de energía no renovable por la minería, extracción, transformación y transporte, pero también se ve aún más vulnerado en el uso para la energía de biomasa forestal, ya que, aunque no hay una actividad de minería, como en la anterior, los otros pasos si son requeridos, y sumado a estos, el cultivo arbóreo usa una extensa cantidad de agua. Hay estudios que muestran que dichos cultivos requieren cerca de 8 - 574 m<sup>3</sup> por GJ, y en la otra mano se usan solo 0.03 - 0.14 m<sup>3</sup> por GJ producción de energía convencional. (Kang 2018).

Nuevamente cabe retomar que estamos adentrándonos en un sistema complejo, que no es tarea fácil acotar todas y cada una de las consecuencias que puede sobrevenir a futuro, ni siquiera en un futuro a corto plazo por la gran cantidad de agentes que están implicados, generalmente cada uno de ellos con

distintas expectativas, e intereses. Una buena arquitectura para la producción de energía a través de biomasa, debería requerir que todos los agentes interesados, se involucren desde el inicio, hasta el fin. Esto facilitaría la comunicación efectiva en cada una de las etapas. Una parte crucial que ha sido ya tomada en cuenta en el centro de este tema del intercambio de información, es que los descubrimientos científicos de alta calidad, por lo general son retenidos en las élites académicas, impidiendo así su debida recopilación y propagación a otros agentes interesados, instituciones o programas que puedan tomarlo como referencia para aprender y entender metodologías, y puedan servir como para otras aplicaciones a futuro.

Solamente el tiempo (el cuál actúa a través de la experiencia en otros proyectos de uso de la biomasa forestal para la producción de energía, y suele ser de mucha ayuda si se sabe recopilar la información obtenida de estos, y orientarla hacia futuros programas similares, esto se conoce como una progresión llamada Manejo Forestal Adaptativo, y sirve como una delimitación global para la Gestión Forestal Sostenible (SFM por sus siglas en inglés)), un adecuado estudio investigativo (extrayendo lo mejor de los descubrimiento hallados, que sirvan para el diseño, y ejecución de otros proyectos similares) y aplicaciones a casos en particular (supervisando y tomando nota de todos los impactos generados en cada uno de los procesos de inicio a fin), permitirá planear efectivamente sistemas sostenibles a largo plazo (Lattimore,2010).

Profundizando más en el tema de la sostenibilidad, se quiere dejar en claro que, para el caso de la generación de bioenergía, vamos a observar que esta se subdivide paralelamente en dos figuras, que analizan dos temas diferentes, aunque correlacionados. La primera es la que se encarga de monitorear los sistemas que se usan en su proceso de generación, y la segunda, es la que evalúa las tecnologías existentes para la generación de energía. (Maxim 2014), centra su estudio en la segunda, proponiendo el uso de LCA para la evaluación del primer tipo de sostenibilidad.

Su objetivo principal, es hacer un rango que muestre las energías renovables más sostenibles, para lo cual, él usa distintos indicadores, que tienen una estrecha relación con cada uno de los pilares del “Triple Bottom Line”, añadiendo un pilar más: el tecnológico.

El primer indicador es el Costo Energético Nivelado (LCOE por sus siglas en inglés), ligado con el pilar económico, por lo tanto, todos los resultados que arroja son los más significativos a nivel financiero. Toma los datos de los precios de equilibrio de cada una de las diferentes tecnologías generadoras de energía durante todo su ciclo de vida, y los compara entre sí. Tiene en cuenta costos de inversión, operacionales, y costos de mantenimiento, y cuando el proyecto los genera, también incluye los costos de emisiones de CO<sub>2</sub>. El gran obstáculo de este indicador es la carencia de información, sobre todo como lo es en el caso de las tecnologías que no son muy conocidas. Según este primer acercamiento, económicamente los proyectos más viables son los geotérmicos, nucleares, de biomasa, de las grandes

plantas hidroeléctricas, y los térmicos convencionales. Y los más costosos son las pequeñas plantas hidroeléctricas, eólicos y solares.

El segundo, tercer y cuarto indicador están relacionados estrictamente con el pilar tecnológico. Respectivamente, el primero es la habilidad de responder a la demanda, y se refiere solamente a establecer cuando un tipo de energía puede o no puede suplirla, se pueden clasificar en tres opciones: “Sí, rápido” (puede satisfacer la demanda en términos de minutos), “Sí, lento” (para satisfacer la demanda puede demorar horas, o incluso días) o “no” (no puede satisfacer la demanda). Para este caso puramente tecnológico, las más adecuadas son: Las grandes plantas hidroeléctricas y de gas natural, las de motores de pistón, y las celdas de combustible. El segundo es la eficiencia, es dado en cantidades porcentuales, las energías más eficientes son la eólica, la hidráulica y la solar. Y el último es el factor capacidad, se mide en unidades de producción de energía, a lo largo de una cantidad específica de tiempo, las energías más capaces son: nuclear, de carbón, gas natural, las de motores de pistón y las celdas de combustible.

El quinto y sexto indicador se asocian con el aspecto ambiental. El uso del suelo es el primero, que es básicamente el costo de oportunidad entre usar un área de suelo para satisfacer las necesidades humanas, o usar la misma área para permitir el desarrollo y expansión de la flora y la fauna. El mejor costo de oportunidad de uso del suelo, está en la energía a partir de la biomasa. Y el segundo son los costos externos, se basa en la degradación del suelo, no se refiere al suelo estrictamente como la pastura, o el piso de un área, si no en un ambiente, y analiza muchos tipos de contaminación, como la auditiva, visual, hídrica, termal, etc. y cuáles son los costos en los que se tendrían que incurrir para su recuperación: eólica, nuclear y solar son las energías con menores costos externos según el estudio.

Y para la dimensión social, nos encontramos con varios indicadores. El primero son los costos externos, el principio es el mismo, pero aquí se hace referencia a la calidad de la salud en los seres humanos, eólica y solar son las energías que encabezan la lista. El siguiente es la creación de empleos, se mide como trabajo-años, solamente tiene en cuenta los empleos directos generados, las energías que más mano de obra emplean son solar, y las grandes y pequeñas plantas hidroeléctricas. El tercer indicador es la aceptabilidad social y también incluye el potencial para generar conflictos. Las tecnologías más acogidas por la comunidad son: solar, hidráulica, y eólica.

Otro tipo de evaluación es la propuesta por (Mirkouei 2017), sugiere una cadena de suministro de energía basada en biomasa mixta, esto quiere decir bio-refinerías de modo mixto, que están compuestas por las tradicionales, como las que se ubican en una locación exacta, y móviles, son plantas de pirólisis que se montan en remolques, y al contrario de las anteriores, son estas las que viajan hacia donde se encuentran los insumos de biomasa forestal, estas unidades móviles usan bio-carbón, SynGas o electricidad. Y también transporte mixto: el tradicional y el de camino mixto, la diferencia entre estos es el número de camiones y el número de viajes que un camión cisterna debe hacer entre los lugares de

recolección, la planta fija, y la ubicación donde se almacena el aceite biológico, según el análisis la emisión de gas invernadero del primer método (transporte tradicional) es de 0.43 Kg CO<sub>2</sub> por galón de bio-aceite, mientras que el segundo (camino mixto) es 0.29 Kg CO<sub>2</sub> por galón de bio-aceite.

Acompañado por un marco de toma de decisiones de criterios múltiples influenciando los pilares económicos y ambientales en el sector de exploración y producción, o como también es conocido “upstream”, aplicando el método estocástico de programación lineal integral mixta, el cual es un algoritmo computacional encargado de resolver un modelo, compuesto por factores incertidumbre. Son muy pocos los estudios que se han elaborado aplicando éste método, ya que es muy complejo dar un resultado final, cuando no se tienen datos exactos. Y precisamente (Mirkouei 2017), lo hace de este modo, puesto que, por el carácter natural de los insumos con los que se cuentan, no se sabe con certeza la cantidad y calidad de biomasa que se pueda extraer.

En cuanto al marco de toma de decisiones son tres los parámetros a tener en cuenta para su análisis, el primero las bio-refinerías y el segundo el transporte mixto, para estos dos, se requieren modelos económicos, que muestren las combinaciones adecuadas, para llegar al resultado que se espera. Y el tercer parámetro es el reconocimiento del bosque, detectando sus ventajas y desventajas, y formulando estrategias que permitan intensificar los beneficios sostenibles a unos costos competitivos. Los resultados encontrados mostraron que una cadena de suministro mixta puede llevar a mejorar los comportamientos de sostenibilidad, reduciendo los costos hasta en un 24%, como también los impactos ambientales hasta un 5%, comparado con una cadena de suministro tradicional.

El potencial del uso de la biomasa forestal, no se encuentra totalmente explorado. Puede llegar a diversificarse y aplicarse según las necesidades de la sociedad. Un caso aplicable se da en una cementera en Quebec, donde la obtención de los combustibles renovables requeridos durante todo su proceso de producción se está haciendo a través del proceso de pirólisis rápida, y el método de evaluación usado para la cuantificación de los impactos ambientales y los beneficios de la sustitución de combustibles, es el Análisis del Ciclo de Vida (LCA), y aunque se conoce que las emisiones de gases de efecto invernadero deberían reducir al reemplazar los combustibles fósiles, todavía en el caso de Canadá no se ha llegado a cuantificar. Este estudio toma datos del inventario del ciclo de vida de las pirólisis disponibles comercialmente, e incluye una evaluación de oportunidades de mejora para la cadena de suministro de pirólisis. Dos casos se analizan, básicamente el primero, donde 1.18% de la energía convencional es reemplazada, y el segundo donde el intercambio es del 2.42%. Para ambos casos hay una disminución del potencial de calentamiento global, potencial de acidificación, y potencial de eutrofización, respectivo a cuanto iba aumentando el uso de la energía a base de biomasa forestal. Para el caso #2 los efectos respiratorios disminuyen un 40% más, pero el potencial de agotamiento del ozono, no fue directamente proporcional con su disminución, lo cual se debe a la sustitución que se hizo del aceite biodegradable por combustible de aceite pesado y energía de carbón. Y para la formación de oxidantes fotoquímicos, en otras palabras, smog, hubo un incremento para ambos escenarios, esto debido a que el proceso de pirólisis rápida debe hacer combustión. Según este estudio lo que demuestra



es que el desplazamiento de combustibles fósiles por aceite biodegradables, y carbones biodegradables, hace que se pueden mirar otras alternativas, disminuyendo la oferta de combustibles no renovables, y que los impactos ambientales sean menores. (Ayer 2018).

### **2.3. Marco Normativo**

Pese a que la mayoría de normas y políticas en Colombia tienen unas bases sólidas, y están proyectadas a limitar actividades que generen impactos ambientales, aún hay colectividades que consumen los recursos naturales sin limitaciones, lo que compromete su oferta y calidad, en el presente, y por supuesto a futuro.

Las políticas reconocen que el país necesita acoger en sus proyectos formas de crecimiento que sean amigables con el ambiente, a partir del uso de capital natural para la producción de bienes y servicios sostenibles, ya que el crecimiento económico vigente no se podrá sostener durante el largo plazo, pues va en detrimento de los recursos con los que cuenta el país, generando altos costos económicos, ambientales y sociales, que según el DNP en 2018 llegaron a ser el 2,08% (DNP 2018).

El enfoque internacional de un crecimiento verde nace en 2005 en la Comisión Económica y Social para Asia y el Pacífico de Naciones Unidas (CESPAP), y el corazón de este concepto que más tarde llegaría a engendrar la Política de Crecimiento Verde es que por medio de la tecnología, la eficiencia y la innovación, el capital natural sea la simiente de la oferta y demanda de bienes y servicios eco-sistémicos, satisfaciendo las necesidades de la sociedad, proporcionando así bienestar socio-económico, además de una incidencia recíproca, donde estos individuos no solo se benefician por el consumo de bienes y servicios, sino que también se convierten en el capital humano para el desarrollo de actividades económicas. Los entes económicos públicos y privados encargados de transformar estos insumos y materiales, también gestionarán proyectos que garanticen la conservación y restauración de dicho capital natural, apoyados por la población. (COMPES 2018).

En Colombia esta política se crea con el apoyo de Banco Interamericano de Desarrollo, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo, y nace por la necesidad de cumplir con las metas propuestas en la Agenda 2030, establecidas por la Asamblea General de Naciones Unidas, conforme a la Resolución 70/1 de 2015. Esta Agenda también está muy inclinada hacia la meta “Triple Bottom Line”, exponiendo 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), los cuales cada uno de ellos se encuentra dentro de los tres pilares, claro que se incluye un pilar más, el cual es “la construcción de paz”.

La Política de Crecimiento Verde para el país vela por:

- Generar nuevas oportunidades económicas
- Mejorar el uso de los recursos naturales en los sectores económicos
- Generar y fortalecer el capital humano

- Establecer acciones estratégicas en materia de ciencia, tecnología e innovación para que los sectores productivos puedan ser más eficientes.
- Asegurar una coordinación y articulación interinstitucional para implementar esta política.

El lineamiento con las metas del “Triple Bottom Line” es visible, en particular por los primeros tres objetivos, ya que se quiere pluralizar la economía desde la producción de bienes y servicios teniendo en cuenta la sostenibilidad del capital natural, alcanzando así la eficiencia y productividad, y aportando a la sociedad nuevos conocimientos que al final se traducirán en una mano de obra más calificada.

El periodo de implementación de esta política está entre 2018-2030, y se estima una inversión de 2,3 billones de pesos. (CONPES 2018).

La visión de esta política respalda otras políticas anteriormente creadas, como lo son:

- La Política Nacional de Cambio Climático aprobada en 2016, donde la gestión del cambio climático entra a formar parte de las decisiones públicas y privadas, apoyando todo crecimiento que respete la capacidad del ambiente para superar los impactos de dichas actividades de desarrollo. Bajo sus cinco ejes, protege los tres pilares fundamentales de la sostenibilidad: social, ambiental y económico.
- “La Estrategia Integral de Control a la De-forestación y Gestión de Bosques - Bosques Territorio de Vida”, que es una política que fomenta un uso sostenible de las reservas forestales, de aquí nace en 2017 la Comisión Intersectorial para el Control de la de-forestación.
- La Ley 1715 de 2014 fomenta el progreso y el uso de corrientes no tradicionales, para la generación de energías renovables, no solamente para el abastecimiento en las Zonas No Interconectadas, si no la inclusión también al mercado ya existente, donde la generación de energía se hace a partir de combustibles fósiles, y también para cualquier otra actividad que demande de una fuente energética. Dota al mercado eléctrico con leyes, normas e instrumentos para el uso eficiente de las fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER), y promueve beneficios fiscales y financieros, por ejemplo, el Fondo de Energías Renovables No Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía (FENOGE). Sin embargo, muchas de estas normas no se implementan todavía, pero mediante Resolución 41286 de 2016 el Ministerio de Minas y Energía adopta dentro de su Plan de acción el Programa de Uso Racional y Eficiente de Energía (PROURE) para el periodo 2017 – 2022.

En cuanto a las actividades comerciales forestales, anterior al año 1950 ya se están tramitando regulaciones en este campo, de estas son consideradas como referentes jurídicos (ONF, 2018):

- Ley 2 de 1959, por esta se fijan siete Zonas de Reserva Forestal, que tienen como meta desarrollar, proteger y aprovechar la economía forestal, los suelos, la vida silvestre y las aguas, incluyendo dentro del aprovechamiento los productos no maderables, y los de la flora silvestre.

- Ley 101 de 1993, incluye dentro de las actividades puramente agrícolas la explotación forestal y la reforestación comercial
- Ley 139 de 1994, establece el Certificado de Incentivo Forestal como el que regula los entes comerciales de cultivos forestales y sistemas agro-forestales.
- Ley 1021 de 2006, fomenta el desarrollo sostenible forestal e introduce una organización administrativa para regular toda actividad forestal y sus plantaciones, sin embargo, esta fue declarada inexecutable debido a vacíos existentes. Años después en 2010 la ley de reforestación comercial Ley 1377 pretendió llenar estos vacíos, pero tampoco tuvo éxito. Más recientemente en el año 2011 el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural a través de otro proyecto de ley intentó enmendar todos estos vacíos, pero fracasó y fue archivado en 2013, y hasta el momento no se ha aprobado ley alguna que reduzca la comercialización de madera ilegal en Colombia

Las políticas y normas para este sector están estancadas. Según las cifras en 2014 el 21,7% del territorio nacional era de plantaciones forestales con las capacidades necesarias para ser comercializadas, pero solo el 1,8%, de este territorio, estaba siendo usado con plantaciones forestales comerciales en 2015, siendo el aporte del sector forestal al PIB, del 0,79% en 2017 (DANE 2018).

Según el Estudio de la Economía Forestal bajo el marco de la Misión de Crecimiento Verde, las limitantes del crecimiento del sector forestal obedecen a que, aunque existe un Plan Nacional de Desarrollo Forestal desde el año 2000, su objetivo no ha sido trabajar en el aprovechamiento de los bosques, las normas existentes son incongruentes y tiene lagunas jurídicas que no hacen fácil su implementación. Aparte, los entes encargados de la administración forestal son numerosos y no es fácil ponerlos de acuerdo, o simplemente no están activos, y a nivel territorial, el mismo caso parece repetirse, generando la informalidad e ilegalidad. Y por último la metodología para la formación de precios no es uniforme en todos los países, lo que los pone en desventajas frente a otros países con menores precios tal es el caso de producir un metro cúbico de madera en pie de eucalipto, que es un 60% más costoso en Colombia, que en su vecino país Brasil. Lo que desincentiva en estos países en desventaja la inversión tanto local, como extranjera (CONPES 2018).

En la Orinoquía, la Corporación Autónoma Regional de la Orinoquia, es la máxima autoridad ambiental, su área de potestad asignada es la más extensa de Colombia, siendo responsable del ordenamiento y desarrollo forestal, facilita y orienta proyectos de reforestación, su administración está descentralizada en Yopal y Casanare primordialmente, y como ciudades secundarias Villavicencio, La Primavera y Arauca (ONF, 2018)

Por otro lado, nos encontramos con el Plan Energético Nacional -PEN 2050, propuesto por, la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), cuyo objetivo es robustecer globalmente el mercado energético para el año 2050, llevando al país a un ahorro en términos monetarios, y de recursos que hoy se están usando ineficientemente, y a la vez asegurando la oferta de energía, a través a la transición a otras fuentes no convencionales, y sostenibles (Informe de gestión, 2018).

### 3. Metodología

Para poder realizar el análisis del proyecto de generación de energía a partir de biomasa forestal en la Orinoquía de Colombia a través del proceso de pirólisis, o gasificación, se plantearon y siguieron los siguientes pasos.

1. La información que se usó como referencia, fue obtenida el día 19 de febrero del año en curso, usando una plataforma en línea que guarda en su archivo bases de datos de información científica, que brinda herramientas, las cuales fueron usadas valorando la calidad de la información más apropiada para el proyecto, el nombre de este servicio en línea es “Web of Science” y es suministrado por Thomson Reuter. La matriz generada para dicha búsqueda fue “TEMA: (biomass) AND TEMA: (energy production) AND TEMA: (forest) AND TEMA: (sustainability) Período de tiempo: Todos los años. Índices: SCI-EXPANDED, SSCI, A&HCI, ESCI”, lo que arrojó un total de 223 resultados (de Colección principal de Web of Science). Con esta matriz se alimentó el algoritmo de análisis inteligente “Tree of Science”, que es otra herramienta web que sirve para el análisis de citas, la cual organizó la matriz de datos, con la que fue alimentada, y mostró cuales de éstas citas pertenecían a artículos que serían oportunos para la investigación, clasificando todos estos 233 resultados en “hojas”, “tronco” y “raíz”. Donde las “hojas” eran todos aquellos artículos recientes, el “tronco” los artículos estructurales, y la “raíz” los artículos clásicos. Los artículos más usados en el presente trabajo, son los que hacían parte de las hojas, ya que permitieron ver de qué va el análisis a la fecha, sin dejar de lado los otros artículos, puesto que también permiten ver los orígenes del tema. Como último paso para poder acceder a estos artículos, leerlos y revisar cuales finalmente serían relevantes, accedí a “Mendeley” y “Telegram Messenger” los cuales fueron usados como gestores de referencias bibliográficas, y en el caso del primero como lector de PDF. De esta forma obtuve un total de 21 referencias bibliográficas, que fueron consultadas para la preparación del presente trabajo.
2. Criterio de selección del área de plantación: Se seleccionó el área ubicada a dos kilómetros hacia el este, de La Fundación El Meroy, en el corregimiento de Puerto Carreño, Vichada, Región Orinoquía, ya que, según estudios que se han hecho de sus suelos, se han precisado como idóneos para el cultivo de la especie arbórea propuesta. Estos suelos tienen una textura franco arenosa a arenosa, se puede ver horizontalmente una sedimentación en su perfil, debido a inundaciones ocasionadas por los ríos. La precipitación anual en el sector es de 2.200 mm. En cuanto a su clima, durante el año notoriamente se aprecian dos estaciones: verano, comprende temperaturas entre 32 y 40°C, e invierno, van de 25 a 35 °C. Y los cambios de una estación a la otra son moderados. Aproximadamente está a 95 m.s.n.m (CONIF, 1998).
3. Método para selección del cultivo arbóreo: Se ha escogido la especie *Eucalyptus Pellita* originaria de Australia, ya que su rendimiento puede llegar a ser de 40 ha/año. Un estudio realizado por La

Corporación Nacional de Investigación y Fomento Forestal (CONIF) ya ha zonificado la región de la Orinoquía de acuerdo a su aptitud forestal, y encontró que el Eucalyptus Pellita tiene una gran adaptabilidad a las condiciones de bosque húmedo tropical, con baja fertilidad, suelos muy drenados, franco arenosos y arenosos. como el que encontramos en el área seleccionada del corregimiento de Puerto Carreño, Vichada (Giraldo, 2014). Para la siembra de Eucalipto, se sugiere un espaciamiento por cada árbol de 2,5 x 2,5 m (Ospina, 2006); es decir que se sembrarán 1.600 árboles/ha. Su altura alcanza los 40 m, su desarrollo se da bajo condiciones climáticas entre 15 y 37°C, altura entre 0 a 800 m.s.n.m, y precipitaciones anuales promedio de 2.500 mm (Giraldo, 2014).

4. Los dos procesos para la generación de energía a través de biomasa forestal se escogieron así: Como el trabajo menciona, hay dos métodos de conversión de la materia natural boscosa, el termoquímico y el bioquímico, ambos procesos seleccionados usan el método termoquímico, por lo que tienen más posibilidades de aprovechamiento de tecnologías de punta. Dentro de estos se toman el proceso de pirólisis y gasificación, pero no de combustión, pues aunque este proceso es muy usado, cuando se requiere hacer una alta conversión de materias primas, su eficiencia queda rezagada con respecto a los otros dos procesos (Strezov, 2018). Ahora para obtener las cifras de los productos que se obtienen a través de los procesos, necesitamos tener los datos fijos, de los insumos iniciales, con sus factores de transformación, y para esto se siguieron estos pasos: Una vez se encuentra un área de 20.000 km<sup>2</sup> para la plantación, se prosigue a determinar cuántos árboles se sembrarán, para lo cual se investiga que la especie de Eucalyptus Pellita, necesita un espaciamiento de 2,5 x 2,5 m (Ospina 2006), Se hizo el cálculo por hectárea, y se halló, que se pueden sembrar un total de 1600 árboles, más adelante se requirió la cantidad de madera recogida en esa hectárea, conociendo que un solo árbol tiene un peso de 1,2 Kl, se multiplicó por el número de árboles plantados, encontrando un peso total de madera de 1920 Ton/Ha. Giraldo (2014) dice que cuando la madera se ha secado, esta pierde una tercera parte de su peso, por lo tanto la madera que habíamos recogido anteriormente se multiplica por 0.3 y ahora tiene un peso de 576 Ton, y una vez peletizada pierde un 2%, lo que deja un total neto de 564 Ton de insumos listos para pasar por cualquiera de los dos procesos. En este punto se deben determinar los productos generados, los cuales pueden variar, dependiendo de las tasas de crecimiento, los factores variables para el proceso de pirólisis, son la cantidad de SynGas, de aceite biológico, y de Carbón, los cuales (Giraldo 2014), ya determinó que son del 15, 65 y 20% respectivamente. Para saber cuál es la producción de energía total a partir de este proceso, se toma todo el aceite biológico producido, y se multiplica por el factor de conversión a energía, que es del 1.32 MWh/ton (Pighinelly 2018), Para calcular la emisión de CO<sub>2</sub>, solo se multiplica la energía generada por el valor de conversión de contaminante, que es de 0,084 Ton/MWh (Pighinelly), Y por último para verificar la variable de empleo, el cual genera 4 empleos por cada MWh (Pighinelly 2018). Para el proceso de gasificación, se producen, escoria, SynGas, y etanol al 15, 80 y 5% respectivamente, Después de esto la producción de energía, se genera a partir del etanol, es decir que vamos a multiplicar el valor generado por el

etanol, y lo multiplicamos por 1.32 MWh/ton, las emisiones de CO<sub>2</sub> para este proceso son de 0.6 Ton/MWh, es decir que el total de la energía producida va a ser multiplicado por 0.6, y por último el factor de generación de empleo ese mismo, siendo de 4 puestos de empleo generado por cada MWh producida.

5. Para generar los resultados, se diseñó un modelo a través de un software llamado "Vensim", que es una herramienta matemática, que permite graficar, simular y analizar los datos de una forma versátil y sencilla. A este programa llevamos los datos que hemos recopilado en el paso anterior, alimentando la gráfica creada, para generar un modelo consistente, capaz de hacer un cálculo exacto del producto final. Dicho modelo tiene todos los criterios que se han venido hablando a lo largo del trabajo involucrando las tres esferas que componen el "Triple Bottom Line", la económica (ingresos generados por cada MWh generado), la social (empleos generados por cada MWh y la ambiental (Deforestación del bosque natural, y generación de CO<sub>2</sub> por cada MWh). En la gráfica se integran los dos procesos generadores de electricidad, por un lado, está el proceso por pirólisis, y en el otro está el proceso por gasificación. Se ha diseñado un "interruptor", desde donde se puede prender o apagar el proceso que no se desee, o que se desee ver, bloqueando toda la información del proceso "apagado" y así permitir que se puedan monitorear las cifras sujetas al tipo de proceso en el que se esté trabajando de una forma más comprensible.

#### **4. Resultados**

Los resultados de esta investigación fueron diseñados como necesidad para que proyectos de generación de energía similares, sean evaluados con parámetros contundentes, que no estén sesgados hacia la parte económica y que solamente generen ganancia al proyecto, sino que también se miren a los demás actores activos o pasivos que son impactados directa o indirectamente. No podemos bajo ninguna circunstancia dejar de lado el impacto al medio ambiente, ya que debemos velar por el bienestar de nuestras generaciones futuras.

Con base en información obtenida, para cada uno de los dos tipos de procesos para la generación de energía con biomasa forestal seleccionados (pirólisis y gasificación), se hacen análisis comparativos por cada parámetro establecido. La información inicial a partir de la cual se origina el proyecto para correr la simulación en el programa "Vensim" se muestra en la tabla número 1.

Partimos de una plantación de Eucalyptus Pellita en el primer año de 2.000 ha, las gráficas a continuación muestran lo que sucede en el año 12 cuando los árboles están totalmente desarrollados, y la madera es recolectada.

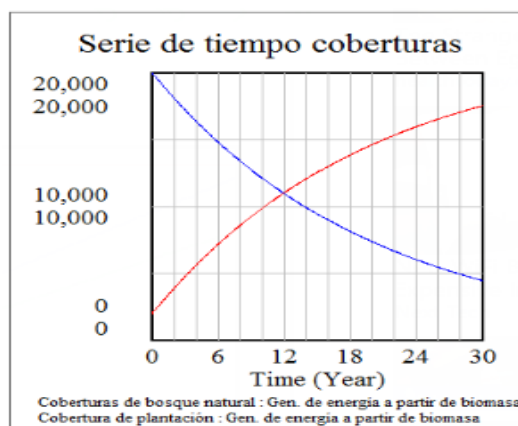
Tabla 1 Parámetros para proceso de generación de energía a partir de biomasa

No	Tipo de parámetro	Nombre del parámetro	Unidad	Pirólisis	Gasificación	Fuente
1	Condiciones iniciales	Bosque natural inicial	Hectáreas	20.000	20.000	
2	Supuesto	Cobertura plantación inicial	Hectáreas	2.000	2.000	
3	Tiempos de retardo	Tiempo promedio de cosecha	Años	12	12	Ospina C, 2006
4	Factor de conversión	Número de árboles sembrados hectárea al año	Árboles	1.600	1.600	
5	Supuesto	Número de árboles plantados inicial	Árboles	3.200.000	3.200.000	
6	Supuesto	Madera recogida inicial	Toneladas	3.840.000	3.840.000	
7	Supuesto	Madera seca inicial	Toneladas	1.152.000	1.152.000	Giraldo D, 2014
8	Supuesto	Pellet inicial	Toneladas	1.128.960	1.128.960	Springer N, 2017
9	Supuesto	Carbón biológico inicial	Toneladas	225.792	-	Ayer N, 2018
10	Supuesto	Aceite biológico inicial	M3/año	733.824	-	
11	Supuesto	Escoria inicial	Ton/año	-	169.344	
12	Supuesto	Etanol inicial	M3/año	-	56.448	Losiza M, 2015
13	Factor de conversión	Factor de generación de carbón orgánico	Porcentual	20%	-	Ayer N, 2018
14	Factor de conversión	Factor de generación de SynGas - Pirólisis	Porcentual	15%	-	
15	Factor de conversión	Factor de generación de SynGas - Gasificación	Porcentual	-	80%	Losiza M, 2015
16	Factor de conversión	Factor de generación de aceite biológico	Porcentual	65%	-	Ayer N, 2018
	Factor de conversión	Factor de generación de escoria	Porcentual	-	15%	
17	Factor de conversión	Factor de generación de etanol	Porcentual	-	5%	Losiza M, 2015

Como primera medida, antes de mirar los resultados con cada proceso, (pirólisis y gasificación), analizaremos lo que sucede con el bosque natural cuando la tasa de deforestación es modificada y es superior a "0".

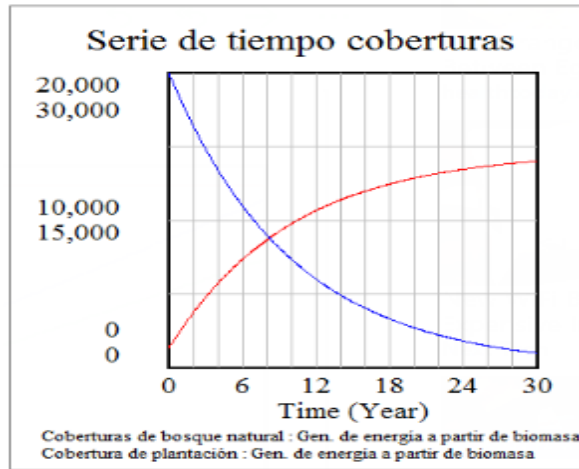
Al trabajar con una tasa de adecuación del 5%, como se observa en la gráfica 1. A esta tasa el bosque se conserva más, el CO<sub>2</sub> que se genera por las plantas de procesamiento, puede ser absorbido por el bosque virgen. El impacto ambiental que se genera es muy reducido, ya que estamos cuidando el bosque, también a esta tasa de crecimiento del producto, la actividad de cualquiera de las plantas de procesamiento será muy baja, generando menores emisiones de CO<sub>2</sub>. Pero el impacto económico será negativo comparado con una mayor productividad, ya que los rendimientos que recibirá el proyecto son los mínimos, teniendo en cuenta la capacidad de producción.

Gráfico 1. Tasa de Adecuación 5%



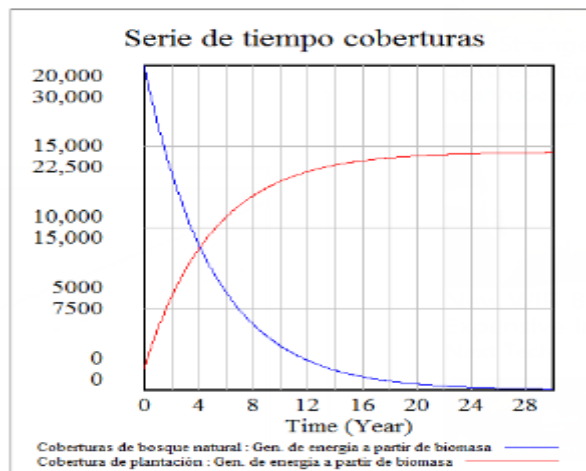
Aumentando la tasa de adecuación al 10%; a este ritmo de plantación poco después de los 30 años, el bosque lo hemos usado completamente, no dando lugar para destinar el bosque a ninguna otra clase de cultivos agrícolas, lo que puede repercutir en un impacto social, al no permitir que otras poblaciones ya sean autóctonas o no, se asienten en esta área. Gráfico 2

Gráfico 2. Tasa de Adecuación 10%



Por último si la tasa de adecuación es aún más alta, tomando un valor del 20%; para el año veinte, el bosque se encuentra totalmente deforestado, impactando positivamente la variable económica, pues por cada MWh generado, el proyecto recibe una contribución a cambio, y de hecho la variable social tiene un doble impacto, por un lado, positivo ya que la cantidad de empleo creado depende directamente de la cantidad de MWh generados; por el otro, la afectación negativa se genera, cuando sobre todo a las poblaciones indígenas y/o autóctonas se les obliga a movilizarse a otro territorio. Desde otra perspectiva un impacto negativo es el ambiental, ya que estamos deteriorando los bosques naturales, y a su vez generando mayores emisiones de CO<sub>2</sub>.

Gráfico 3 Tasa de Adecuación 20%





Como segunda medida centrándonos en los procesos de pirólisis y gasificación, analizaremos los porcentajes de productividad con cada uno.

**Pirólisis:** Ya sabemos que el factor de generación del aceite biológico es del 65%, para este tipo de proceso; este es el producto último que se requiere para ser almacenado o inmediatamente usado y así luego ser convertido en energía. Otro de los productos que se obtienen es el carbón biológico, el cual representa el 20% del total de pellets transformados, que posteriormente puede ser usado en la generación de más energía por combustión, o gasificación, o como fuente combustible para la planta de pirólisis. Y este que es el SynGas que contribuye con el 15%, a partir del cual, por medio de vapor, una mezcla de gas es creada, luego condensada y por medio de la destilación se produce el aceite biológico.

**Gasificación:** Este proceso también da origen a diferentes productos, como SynGas, etanol y escoria, esta última no tiene valor dentro de la planta de operación, pero tiene otros usos. Y como se ha relatado antes el SynGas presurizado y condensado es la fuente generadora del etanol, en el que nos concentraremos, ya que finalmente es usado para la generación de energía. Su factor de generación es del 5% del total de pellets transformados.

Las gráficas que se muestran a continuación comparan los resultados de las dos plantas cuando ambas trabajan con una tasa de adecuación de 0. En estas gráficas se analizan diferentes variables, las cuales son representativas de las tres aristas o enfoques, de los que se ha venido enfatizando a lo largo del trabajo sobre la teoría del "Triple Bottom Line". Estas variables son capacidad instalada de generación de energía que afecta directamente los ingresos recibidos, los empleos generados a partir de funcionamiento de alguna de estas dos plantas, y por último las emisiones del CO<sub>2</sub>, que también son reflejo directo de la cantidad de energía producida.

La primera pareja de gráficas muestra los productos obtenidos. Claramente después de los primeros 12 años que es cuando se hace la primera cosecha, las curvas del carbón biológico, aceite biológico, etanol y escoria, comienzan a incrementar suavemente. Pero el SynGas automáticamente incrementa en todo su valor potencial, y se mantiene constante a lo largo del proyecto (para cuando la tasa de adecuación de la tierra es 0, de lo contrario esta comienza a incrementar ligeramente en la misma cantidad en la que los insumos son incrementados), esto debido a que el SynGas no se acumula, para ninguna de las dos plantas de proceso, lo que concuerda enormemente con la práctica, ya que este SynGas, es producido, transformado, presurizado y condensado para ser convertido ya sea en aceite biológico o etanol. A pesar de que la generación de SynGas para la planta de gasificación es mayor, la planta de proceso por pirólisis alcanza a producir una mayor cantidad de aceite biológico. Por lo tanto, su curva es un poco más perpendicular.

Gráfico 4. Proceso Pirólisis con tasa de adecuación de 0

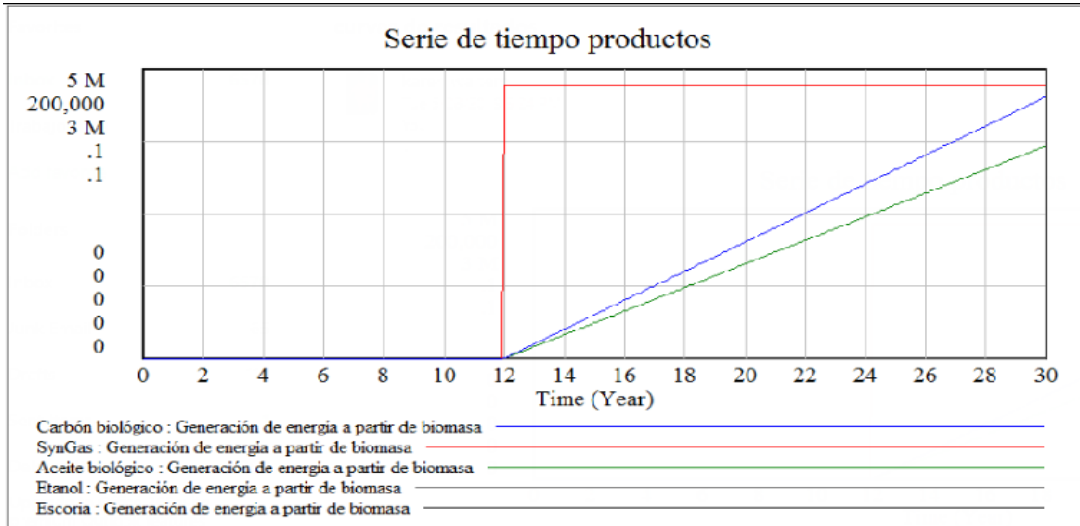
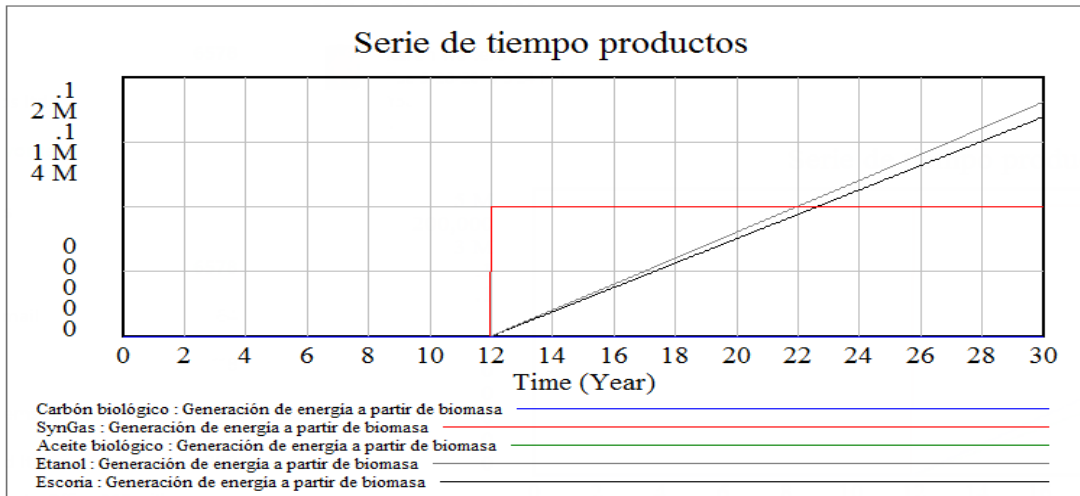


Gráfico 5. Proceso Gasificación con tasa de adecuación de 0

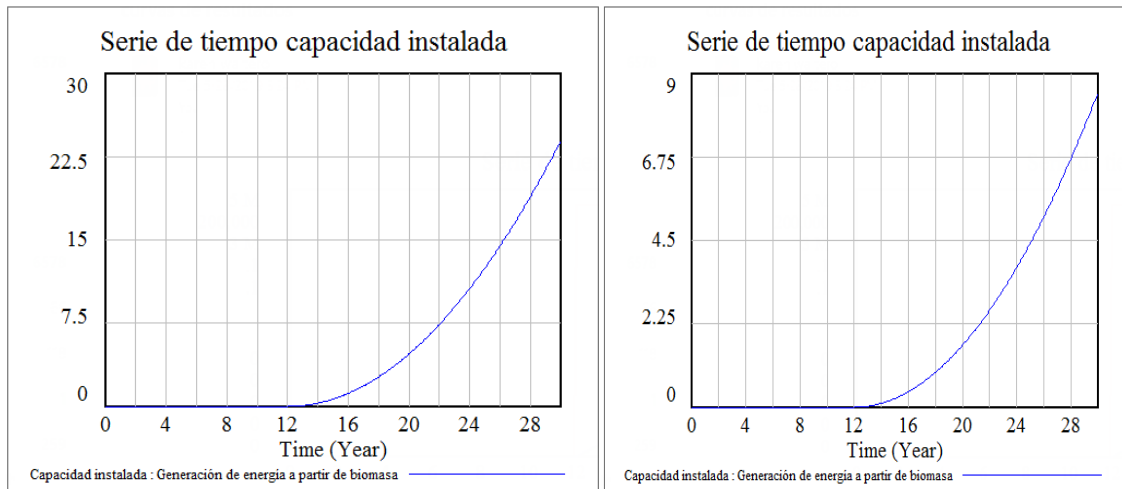


Las siguientes gráficas dejan ver el potencial máximo que tienen para transformar y producir insumos maderables en biomasa. La gráfica de la izquierda muestra la capacidad instalada en la planta de pirólisis, y la de la derecha, la planta de gasificación.

Gráficos 6 y 7.

Proceso por Pirólisis con tasa de adecuación de 0

Proceso por Gasificación con tasa de adecuación de 0



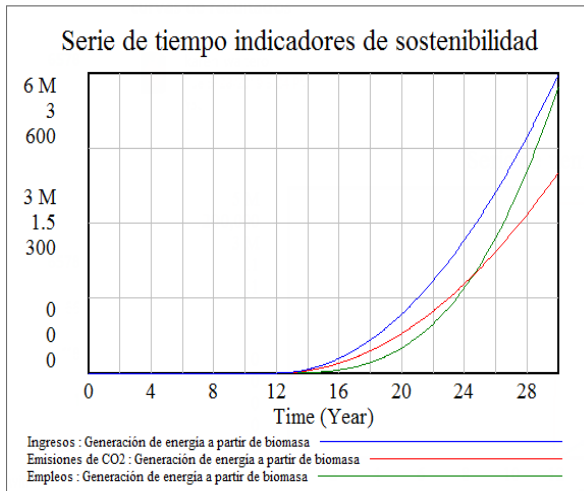
En cuanto a las esferas ambiental, social y económica, como se puede apreciar en las gráficas, aquí se analizan los ingresos, el empleo, las emisiones de CO<sub>2</sub>. La curva del proceso por pirólisis del empleo es más inclinada que la del proceso por gasificación, esto es consecuente con el análisis hecho por la capacidad instalada, y es porque por cada MWh de energía, se generan cuatro empleos (IRENA 2018), este cálculo ya integra tanto trabajos directos, como indirectos. Y según ese análisis la planta de pirólisis es la que más capacidad productiva tiene, por ende, es la que más jalona el sector del empleo en comparación con la planta por gasificación.

Las curvas de ingreso van directamente relacionadas con las de producción, a mayor producción, mayores ingresos brutos como resultado de las ventas. Se deduce que la planta de pirólisis es la que más ingresos por venta generan.

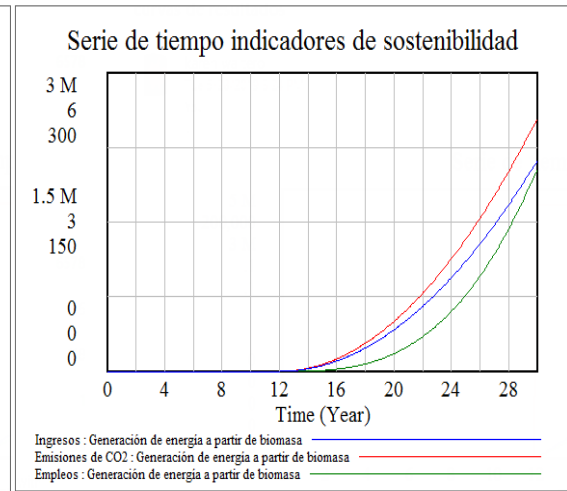
En la otra mano, tenemos los valores de emisión de CO<sub>2</sub> por cada método usado; para la tecnología de pirólisis el factor usado va a ser de 84 g de CO<sub>2</sub>/Kwh (Pighinelli A, 2018), Y en cuanto al otro método que es por gasificación, este emite el 50% menos de CO<sub>2</sub> que una planta regular generadora de electricidad no biodegradable que genera 1200 g de CO<sub>2</sub>/KWh (Pighinelly A, 2018). La curva de emisiones de CO<sub>2</sub> de la planta gasificadora indica una mayor participación de emisiones comparada con la planta de pirólisis

Gráfico 8 y 9.

Proceso por Pirólisis con tasa de adecuación de 0



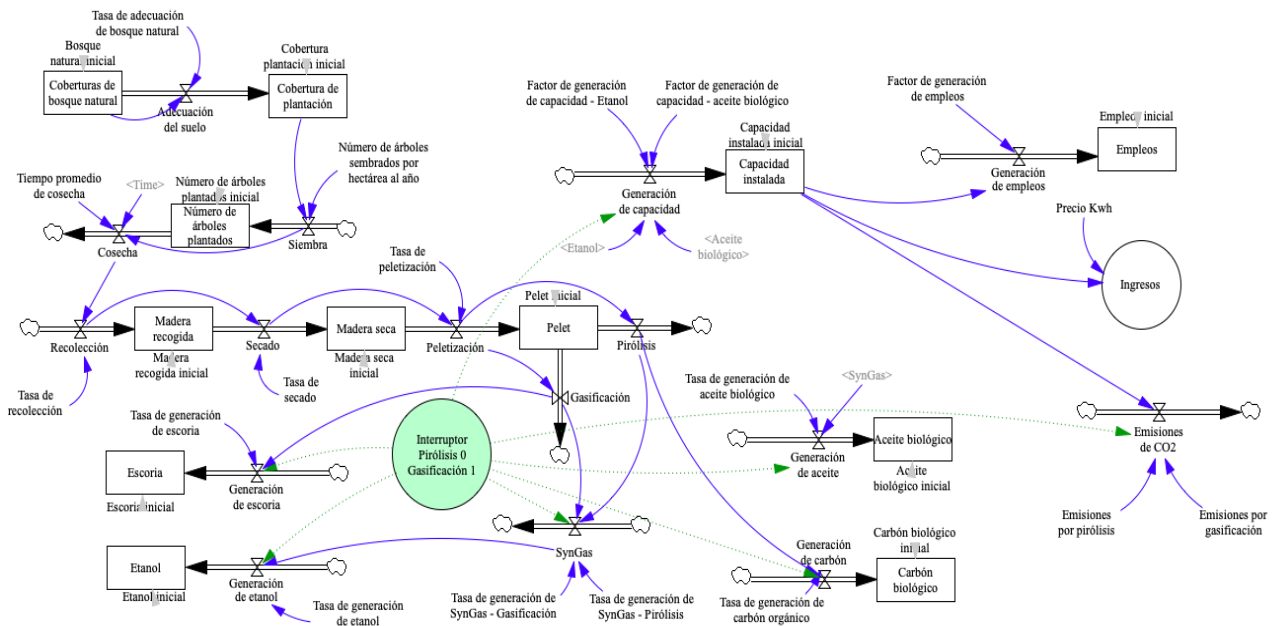
Proceso por Gasificación con tasa de adecuación de 0



## 5. Conclusiones

Este es el modelo que se obtiene a raíz de los análisis hechos sobre las dos opciones de procesamiento de biomasa forestal. Aquí se detalla desde principio a fin la transformación a la que son sometidas los insumos, Iniciando con la plantación en el bosque natural, la recolección de la madera, y pre-tratamiento hasta llegar a una de las dos plantas de procesamiento. Luego encontramos los subproductos que se obtienen de cada tecnología, Y por último los impactos que se desprenden de cada uno de los dos métodos.

Gráfico 10. – Modelo de planta pirólisis y gasificación



Proyectos sostenibles deberían ser promovidos y fomentados por el gobierno, proyectos que sean ambientalmente amigables, socialmente equitativos y económicamente justos, que impulsen los municipios donde se concentran altas tasas de pobreza y desempleo, contratando bajo unos términos legales y justos a estas poblaciones, donde básicamente ganan no solo en una dimensión, sino de muchas formas, ya que no solo jalonan la economía y el desarrollo del área directamente, cuidando de los recursos, pensando siempre en las generaciones futuras. Pero también directamente se verán beneficiadas esta y otras zonas, con proyectos como el que aquí se está analizando, puesto que el objetivo es el de producir energía para satisfacer la demanda que hay, bien sea en las Zonas No Interconectadas, como ser un respaldo para el Sistema Interconectado Nacional.

Como se puede observar en los resultados, la planta de pirólisis es la que más subproducto para la generación última de energía origina. Ya que el factor de la fuente de aceite biológico es del 0.65. Esto

es una externalidad positiva, para la economía en cuanto a que la región de Orinoquía se podría ver beneficiada económicamente. Directamente la población se beneficiaría más por medio de esta tecnología, disminuyendo la tasa de desempleo, que según cifras tomadas del DANE (2019) en su boletín técnico semestral, se publica con un valor del 9.5% para el segundo semestre del 2018, mitigando de alguna forma tendencias migratorias que suelen ocasionarse por falta de empleos, tanto de mano de obra calificada, como no calificada.

Según las cifras, se puede verificar que hay una emisión más controlada de CO<sub>2</sub>, comparada con la planta de gasificación, aún incluso produciendo con una capacidad notoriamente más elevada la planta de pirólisis tiene unas emisiones más controladas y bajas que la planta de gasificación. Lo que pondría en ventaja a la tecnología por pirólisis frente a los nuevos planes de los gobiernos de fomentar ideas más responsables con el planeta, como lo propone la Ley 1753 de 2015 art 170, que es trabajar en planes de acción sectorial, para que gradualmente (corto, mediano y largo plazo) se identifiquen eestrategias que permitan disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero, y como meta a corto plazo se propone el año 2020.

La planta de gasificación podría llegar a estar en equilibrio con el concepto del “Triple Bottom Line”, si buscara e implementara tecnologías de punta que le permitiera disminuir su factor contaminante, pues en cuanto a la parte económica, no olvidemos que no solo genera etanol, sino que indirectamente se generan otros productos, que aunque están alejados del uso para fines eléctricos, también podrían resarcir los menores ingresos adquiridos, debido a la baja productividad que no son debido a incompetencias, sino al poco rendimiento de los insumos, que a través de esta particular transformación, se quedan cortos, comparados con los rendimientos del proceso por pirólisis.

## 6. Bibliografía

- Ayer NW, Dias G (2018). G, Supplying renewable energy for Canadian cement production: Life cycle assessment of bioenergy from forest harvest residues using mobile fast pyrolysis units, *Journal of Cleaner Production*, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.12.040.
- Brad Barnett (2016) An evaluation of the UK's use of SFM standards to procure solid woody biomass for electricity generation using sustainable bioenergy criteria, *Biofuels*, 7:1, 1-17, DOI: 10.1080/17597269.2015.1118775 To link to this article: <http://dx.doi.org/10.1080/17597269.2015.1118775>,
- Bowda, R., Quinnb, NW., Kotzea, D. C. & Guilfoyle. M. J. (2018). A systems approach to risk and resilience analysis in the woody-biomass sector: A case study of the failure of the South African wood pellet industry.
- Carleton, L.E. & Becker, D. (2018). *Forest Biomass Policy in Minnesota: Supply Chain Perspectives on Barriers to Bioenergy Development*.
- Da Silva, V. R., Thaisa, T. R., Ribeiroa, S. C., Rosa dos Santosb A., Marcattic, G. E., Lorenzonia, S. A., Martins de Castro, N. L., Domingues, G. F., García, L. H., Martins da Costa de Menezes, S. J., Santos M. P. E., & de Almeida T. L. A. (2017). Forest biomass power plant installation scenarios.
- Gómez-Navarro, T., & Ribó-Pérez, D. (2018). Assessing the obstacles to the participation of renewable energy sources in the electricity market of Colombia.
- González-García, S., & Bacenetti, J. (2019). Exploring the production of bio-energy from wood biomass. Italian case study.
- Huang, C., & Bagdon, B. A. (2018). Contents lists available at ScienceDirect *Journal of Forest Economics* journal homepage: [www.elsevier.com/locate/jfe](http://www.elsevier.com/locate/jfe) quantifying environmental and health benefits of using woody biomass for electricity generation in the Southwestern United States.
- Kang, S., Selosse, S. & Maïzi, N. (2018). Contribution of global GHG reduction pledges to bioenergy expansion.
- Lattimore, B., Smith, T. & Richardson, J. (2010). Coping with complexity: Designing low-impact forest bioenergy systems using an adaptive forest management framework and other sustainable forest management tools.
- Elkington, J. B. (2006). *Governance for Sustainability*.
- Maxim, A. (2014). Sustainability assessment of electricity generation technologies using weighted multi-criteria decision analysis.

- Mirkouei, A., Karl, R. H., Sessionsc, j. & Murthy, G. S. (2017). A mixed biomass-based energy supply chain for enhancing economic and environmental sustainability benefits: A multi-criteria decision making framework.
- Pighinelli, A., Anna L.M.T., Mark A. S., & Akwasi A. B. (2018). Utilization of eucalyptus for electricity production in Brazil via fast pyrolysis: A techno-economic analysis.
- Springer, N., Kaliyan, N., Bobick, B. & Jason Hill, H. (2017). Seeing the forest for the trees: How much woody biomass can the Midwest United States sustainably produce?
- Szulecka, J. (2019). Towards Sustainable Wood-Based Energy: Evaluation and Strategies for Mainstreaming Sustainability in the Sector.
- CONPES. (2016). Departamento Nacional de Planeación, Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Ministerio de Minas y Energía, Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Unidad Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres. (2016). CONPES 3870, Programa nacional para la formulación y actualización de planes de ordenamiento territorial: POT Modernos.
- DNP, (2019). Boletín técnico Gran Encuesta Integrada de Hogares (GEIH) Julio- diciembre 2018.
- Giraldo, Ch. D. L., Nieto, R. V. M., Sarmiento, M., & Borralho, N. (2018).
- Rangel-Ch, O. (2015). La biodiversidad de Colombia: significado y distribución regional.
- Rangel-Ch, O. (2015). Flora Orinoquense.
- Sánchez, S. J. C., (2017). Territorio y conflicto en el Piedemonte llanero: una reflexión sobre el destierro y sus efectos en la memoria de comunidades de formación reciente.
- Portugal-Pereira, J., Soria R., Rathmann, R., & Schaeffer, A. (2015). Agricultural and agro-industrial residues-to-energy: Technoeconomic and environmental assessment in Brazil, Biomass Bioenergy. 81 (2015) 521–533, <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.08.010>.
- CONPES. (2018). Documento CONPES 3926 Política de Adecuación de Tierras 2018-2038. Bogotá.
- Quintero, J., & Quintero, L. (2015). Biomasa: Métodos de producción, potencial energético y medio ambiente. Revista I3+, 2(2), 28 – 44 p.
- Loaiza, M. (2015). Modelo de generación de energía a partir de biomasa forestal.
- CONIF, (1998). Guía para plantaciones forestales comerciales Orinoquía, CONIF: serie de documentación No. 38.
- IDEAM. (2017). Plantaciones con base en registro ICA a octubre de 2016. Bosque natural basado en Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono- SMBYC, información con corte a 18-11-2017.



- Ospina, C. (2006). El Eucalipto.
- Giraldo, L. A. (2014). Estimación indirecta de la densidad de la madera mediante el uso de pilodyn en la selección de clones de *Eucalyptus pellita* F. Muell. *Colombia Forestal*, 17(2), 181-192.
- DNP, (2018). Departamento Nacional de Planeación. Estudios de Economía Forestal en el Marco de la Misión de Crecimiento Verde en Colombia -Resumen ejecutivo.
- IRENA, (2018). Estudios de Economía Forestal en el Marco de la Misión de Crecimiento Verde en Colombia -Resumen ejecutivo Annual Review 2018.
- Mirkouei, A., Karl, R. H., Sessionsc, j. & Murthy, G. S. (2017). A mixed biomass-based energy supply chain for enhancing economic and environmental sustainability benefits: A multi-criteria decision making framework.
- Pighinelli, A., Anna L.M.T., Mark A. S., & Akwasi A. B. (2018). Utilization of eucalyptus for electricity production in Brazil via fast pyrolysis: A techno-economic analysis.
- Springer, N., Kaliyan, N., Bobick, B. & Jason Hill, H. (2017). Seeing the forest for the trees: How much woody biomass can the Midwest United States sustainably produce?
- Szulecka, J. (2019). Towards Sustainable Wood-Based Energy: Evaluation and Strategies for Mainstreaming Sustainability in the Sector.
- CONPES. (2016). Departamento Nacional de Planeación, Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Ministerio de Minas y Energía, Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Unidad Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres. (2016). CONPES 3870, Programa nacional para la formulación y actualización de planes de ordenamiento territorial: POT Modernos.
- DNP, (2019). Boletín técnico Gran Encuesta Integrada de Hogares (GEIH) Julio- diciembre 2018.
- Giraldo, Ch. D. L., Nieto, R. V. M., Sarmiento, M., & Borralho, N. (2018).
- Rangel-Ch, O. (2015). La biodiversidad de Colombia: significado y distribución regional.
- Rangel-Ch, O. (2015). Flora Orinoquense.
- Sánchez, S. J. C., (2017). Territorio y conflicto en el Piedemonte llanero: una reflexión sobre el destierro y sus efectos en la memoria de comunidades de formación reciente.
- Portugal-Pereira, J., Soria R., Rathmann, R., & Schaeffer, A. (2015). Agricultural and agro-industrial residues-to-energy: Technoeconomic and environmental assessment in Brazil, *Biomass Bioenerg.* 81 (2015) 521–533, <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.08.010>.
- CONPES. (2018). Documento CONPES 3926 Política de Adecuación de Tierras 2018-2038. Bogotá.

Quintero, J., & Quintero, L. (2015). Biomasa: Métodos de producción, potencial energético y medio ambiente. *Revista I3+*, 2(2), 28 – 44 p.

Loaiza, M. (2015). Modelo de generación de energía a partir de biomasa forestal.

CONIF, (1998). Guía para plantaciones forestales comerciales Orinoquía, CONIF: serie de documentación No. 38.

IDEAM. (2017). Plantaciones con base en registro ICA a octubre de 2016. Bosque natural basado en Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono- SMBYC, información con corte a 18-11-2017.

Ospina, C. (2006). El Eucalipto.

Giraldo, L. A. (2014). Estimación indirecta de la densidad de la madera mediante el uso de pilodyn en la selección de clones de *Eucalyptus pellita* F. Muell. *Colombia Forestal*, 17(2), 181-192.

DNP, (2018). Departamento Nacional de Planeación. Estudios de Economía Forestal en el Marco de la Misión de Crecimiento Verde en Colombia -Resumen ejecutivo.

IRENA, (2018). Estudios de Economía Forestal en el Marco de la Misión de Crecimiento Verde en Colombia -Resumen ejecutivo Annual Review 2018.