

EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DENDROENERGÉTICO PARA PELETIZACIÓN EN  
TERRITORIOS AFECTADOS POR CULTIVOS ILÍCITOS  
(CASO DE ESTUDIO MUNICIPIO EL TARRA NORTE DE SANTANDER)

BRYAM DUQUE GARCIA

PROGRAMA DE INGENIERIA EN ENERGÍA  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECHANICAS



UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BUCARAMANGA  
NOVIEMBRE DE 2019

EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DENDROENERGÉTICO PARA PELETIZACIÓN EN  
TERRITORIOS AFECTADOS POR CULTIVOS DE USO ILÍCITO  
(CASO DE ESTUDIO MUNICIPIO EL TARRA NORTE DE SANTANDER)

BRYAM DUQUE GARCIA

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de  
INGENIERO EN ENERGIA

Director: YECID ALFONSO MUÑOZ MALDONADO  
PhD.  
ymunoz294@unab.edu.co

PROGRAMA DE INGENIERIA EN ENERGÍA  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECAICAS  
UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BUCARAMANGA  
NOVIEMBRE DE 2019

Nota de Aceptación

---

---

---

---

Presidente del Jurado

---

Jurado

---

Jurado

Bucaramanga, noviembre de 2019

Dedico este proyecto a mi familia y a mi pareja, los cuales estarán muy orgullosos de esta meta cumplida.

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco el apoyo que he tenido por parte de la Universidad Autónoma de Bucaramanga por brindarme los conocimientos necesarios para culminar el primer paso como profesional de Ingeniería, también agradezco a mi familia, especialmente a mi papá José Iván Duque que me brindo el apoyo económico para incursionar en el mundo universitario, a mi mamá Sofía García de Duque por el apoyo emocional y los valores que me permitieron no desfallecer en los retos que se presentan día a día, también a mi pareja Liz Johanna Pita, que siempre me mantuvo con fe y esperanza de finalizar mi carrera, por ultimo a mi tío José Luis Duque, que a pesar de la distancia, siempre me impulso a finalizar mis proyectos.

Por otra parte, agradezco a mi compañero de estudio Julián Guerrero Macías, el cual siempre me brindo una mano de ayuda y ha sido mi ejemplo a seguir.

Finalmente, agradezco a todos los profesores, que durante la trayectoria que estuve en la universidad, me transmitieron su sabiduría.

## CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN.....	17
2. OBJETIVOS .....	18
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	18
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	18
3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	19
3.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....	19
3.2 JUSTIFICACIÓN .....	20
3. METODOLOGÍA.....	21
3.1. Fase 1: Identificación del área objetivo y la especie herbácea o forestal. ....	21
3.2. Fase 2: Cálculos del potencial dendroenergético.....	21
3.3. Fase 3: Simulación de la alternativa de aprovechamiento energético en Homer PRO. 21	
4. MARCO TEORICO .....	23
4.1 Biomasa .....	23
4.1.1 Definición de la Biomasa.....	23
4.1.2 Clasificación de la biomasa.....	24
4.1.3 Métodos de obtención de energía .....	25
4.1.4 Aplicaciones de la bioenergía .....	27
4.2 Dendroenergía .....	29
4.2.1 Definición de la Dendroenergía.....	29
4.2.2 Especies forestales o herbáceas para la dendroenergía.....	29
4.2.3 Dendroenergía a partir de residuos forestales .....	30
4.2.4 Dendroenergía por cultivos energéticos.....	31
4.2.5 Obtención de energía .....	31
4.3 Pellets .....	33
4.3.1 Definición de Pellets .....	33
4.3.2 Procedimiento para peletizar .....	35
4.3.3 Fuentes de biomasa aptas para peletización .....	36
4.4 Meteonorm .....	38

4.4.1 Definición de Meteonorm. ....	38
4.4.2 Interfaz.....	39
4.5 Tremarctos 3 .....	39
4.5.1. Definición.....	39
4.5.2. Interfaz.....	40
4.6 HOMER energy .....	40
4.6.1 Definición de HOMER .....	40
4.6.2 Módulo de Biomasa .....	41
4.6.3 Dimensionamiento en HOMER .....	42
4.7. MARCO LEGAL .....	44
5. ESTADO DEL ARTE.....	50
5.1 Dendroenergía .....	50
5.1.1 Porcentaje de participación de la Biomasa (dendroenergía) en la matriz energética del mundo .....	50
5.1.2 Principales países generadores de dendroenergía en el ámbito internacional .	51
5.1.3 Principales generadores de dendroenergía en el ámbito nacional .....	53
5.2 Pellets .....	54
5.2.1 Peletización de biomasa en el ámbito internacional .....	54
5.2.2 Usos finales de los pellets de biomasa en el ámbito internacional .....	56
5.2.3 Estándares de calidad para vender pellets de biomasa en el mercado europeo .....	57
5.3 Sustitución de cultivos de uso ilícito .....	59
5.3.1 Proceso de sustitución de cultivos de uso ilícito en el ámbito internacional.....	59
5.3.2 Proceso de sustitución de cultivos de uso ilícito en el ámbito nacional .....	59
5.4 Cultivos de uso ilícito en El tarra .....	61
5.4.1 Ubicación geográfica del tarra.....	61
5.4.2 Descripción del Tarra.....	62
5.4.3 Cultivos de uso ilícito .....	63
5.4.4 Acuerdo de paz. Punto 1 y 4.....	65
5.4.5 PNIS y PDET .....	67
5.5 Homer Software .....	68
5.5.1 Micro-redes usando generación de energía a partir de la biomasa .....	68

6. IDENTIFICACIÓN DEL ÁREA OBJETIVO.....	71
6.1. Panorama nacional.....	71
6.2 Identificación del área objetivo en el municipio de El Tarra.....	72
7 Identificación de las alternativas de sustitución.....	74
7.1 Características del territorio.....	74
7.2 Clasificación de las especies herbáceas y forestales.....	79
7.2.1 Identificación de las especies endógenas.....	80
7.2.2 Clasificación de las especies.....	83
8. POTENCIAL DENDROENERGÉTICO.....	89
8.1. Área objetivo.....	89
8.2 Condiciones del cultivo.....	92
8.2.1. Rotación del cultivo.....	93
8.2.2. Disponibilidad de Residuos.....	94
8.3 Potencial dendroenergético para procesos de peletización.....	95
9. EVALUACIÓN DE UNA SOLUCIÓN ENERGÉTICA USANDO HOMER PRO.....	97
9.1. Peletización de la biomasa.....	98
9.1.1. Cosecha.....	99
9.1.2. Triturado.....	100
9.1.3. Molienda.....	100
9.1.3. Secado.....	101
9.1.4. Peletización.....	102
9.1.5. Enfriado.....	104
9.1.6. Transporte.....	104
9.2. Pérdida de masa en el proceso de peletización.....	104
9.3. Dimensionamiento de la planta peletizadora.....	106
9.4. Generación Eléctrica.....	108
9.4.1. Tecnología de conversión.....	108
9.4.2. Dimensionamiento.....	110
9.5. Análisis de la alternativa de generación energética con apoyo del software Homer PRO.....	112
9.5.1. Variables de entrada.....	112
9.5.2. Simulación de la solución energética.....	114



9.5.3 Comparación de alternativas.....	116
10. DISCUSIÓN.....	119
12. CONCLUSIONES.....	121
13. RECOMENDACIONES.....	123
BIBLIOGRAFÍA.....	124
ANEXO 1.....	134
ANEXO 2.....	139
ANEXO 3.....	141

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
TABLA 1 CARACTERÍSTICAS FISCOQUÍMICAS DE PELLETS SEGÚN NORMATIVIDAD INTERNACIONAL .....	34
TABLA 2 NORMAS EN-PLUS PARA PELLETS.....	37
TABLA 3 RECURSOS INICIALES DE HOMER.....	43
TABLA 4. LEYES Y DECRETOS REFERENTES A LA ENERGIZACIÓN DEL TERRITORIO COLOMBIANO .....	44
TABLA 5. LEYES Y DECRETOS REFERENTE A LA GENERACION CON FNCER, GENERACIÓN DISTRIBUIDA, AUTOGENERACIÓN Y REDES INTELIGENTES.....	45
TABLA 6. RESOLUCIONES REFERENTES AL FOMENTO DE LA AUTOGENERACIÓN, GENERACIÓN DISTRIBUIDA Y FNCER. ....	47
TABLA 7 CLASES DE CALIDAD DE PELLETS .....	57
TABLA 8. CARACTERISTICAS DE LA UCS 1910.....	75
TABLA 9. CARACTERISTICAS DE LA UCS 1039.....	76
TABLA 10. CARACTERISTICAS DE LA UCS 1044.....	76
TABLA 11. LOCALICIONES REPRESENTATIVAS PARA LAS UCS PRINCIPALES. COORDENADAS EN WGS84.....	77
TABLA 12 ESPECIES PREDOMINANTES PARQUE NACIONAL NATURAL CATATUMBO BARÍ.....	81
TABLA 13. ZONAS DE VIDA MUNICIPIO DE EL TARRA.....	82
TABLA 14. PRESENCIA DE ESPECIES POR FAMILIAS EN LA FRANJA SUBANDINA BAJA, SERRANIA DE PERIJÁ.....	82
TABLA 15. ESTRUCTURA VERTICAL EN EL BOSQUE FRAGMENTADO CON VEGETACIÓN SECUNDARIA DEL OROBIOMA BAJO DE LOS ANDES .....	83
TABLA 16. CLASIFICACIÓN DE LAS PRINCIPALES ESPECIES ENDOGENAS EN FUNCION DE SU TIPO (MADERABLE, NO MADRABLE) Y SU APARICIÓN EN LA LITERATURA INTERNAICONAL.....	84
TABLA 17 CONTENIDO BROMATOLÓGICO.....	86
TABLA 18. PRINCIPALES CARACTERISTICAS DE LAS ALTERNATIVAS PARA LA SUSTITUCIÓN DE CULTIVOS ILÍCITOS.....	87
TABLA 19. POTENCIAL DENDROENERGÉTICO EN EL MUNICIPIO DE EL TARRA. ....	96
TABLA 20. CARACTERISTICAS DE LOS EQUIPOS PRINCIPALES PARA EL PROCESO DE PELETIZACIÓN .....	107
TABLA 21. ESPECIFICACIONES TECNICAS DEL SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGIA DE GASIFICACIÓN DFBG 200. ....	110

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
FIGURA 1 METODOLOGÍA DEL DESARROLLO DEL PROYECTO.....	22
FIGURA 2 ESQUEMA QUE MUESTRA EL PROCESO DE GENERACIÓN DE BIOMASA .....	23
FIGURA 3 ALGUNAS RUTAS DE CONVERSIÓN A BIOCOMBUSTIBLES AVANZADOS.....	26
FIGURA 4 EL ESQUEMA MUESTRA LA CAPACIDAD DE LA BIOMASA PARA SATISFACER DEMANDAS DE ENERGÍA DE DISTINTO TIPO.....	27
FIGURA 5 SECTORES DE DEMANDA Y EJEMPLOS DE OPCIONES O APLICACIONES DE BIOENERGÍA .....	28
FIGURA 6 PROCESOS DE CONVERSIÓN DE BIOMASA EN ENERGÍA.....	32
FIGURA 7 PRODUCTOS DERIVADOS DE LA PIROLISIS DE BIOMASA.....	33
FIGURA 8. INTERFAZ METEONORM.....	39
FIGURA 9. INTERFAZ TREMARCTOS 3.....	40
FIGURA 10 PANEL DE CONTROL HOMER PRO .....	41
FIGURA 11 RECURSO DE BIOMASA DISPONIBLE POR TONELADAS. ....	41
FIGURA 12 PROCEDIMIENTO PARA DIMENSIONAR EN HOMER .....	42
FIGURA 13 BOTON PARA CALCULAR EL DISEÑO DE LA MICRORED EN HOMER.....	43
FIGURA 14 PARTICIPACIÓN ESTIMADA EN ENERGÍA RENOVABLE DE LA PRODUCCIÓN MUNDIAL DE ELECTRICIDAD, A FINES DEL 2016.....	50
FIGURA 15 PARTICIPACIÓN ESTIMADA DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES EN LA PRODUCCIÓN MUNDIAL DE ELECTRICIDAD A FINALES DEL 2016.....	51
FIGURA 16 GENERACIÓN MUNDIAL DE BIO-ENERGÍA.....	52
FIGURA 17 PRODUCCIÓN DE PELLETS DE MADERA EN EL MUNDO (DESDE EL 2000 HASTA EL 2016, EN MILLONES DE TONELADAS).....	55
FIGURA 18 CONSUMO POR SECTOR DE PELLETS DE MADERA EN LA UNIÓN EUROPEA.....	56
FIGURA 19 PRODUCCIÓN MUNDIAL DE PELLETS CERTIFICADOS ENPLUS (DESDE EL 2011 HASTA EL 2017, EN MILES DE TONELADAS) .....	58
FIGURA 20 VOLUMEN DE PELLETS DE MADERA ENPLUS CERTIFICADOS POR PAÍS (2016, EN TONELADAS).....	58
FIGURA 21 MAPA DE EL TARRA .....	62
FIGURA 22 TENDENCIAS DE LOS CULTIVOS COCA EN COLOMBIA 2000 – 2016 .....	64
FIGURA 23 DEFORESTACIÓN PARA SIEMBRA DE COCA.....	65
FIGURA 24 ZONAS DONDE SE IMPLEMENTA EL PDET EN COLOMBIA.....	67
FIGURA 25 EVIDENCIA DE LA SOCIALIZACIÓN DE LOS PDET EN MORELIA CAQUETÁ .....	68
FIGURA 26 SISTEMA HIBRIDO PROPUESTO EN HOMER.....	69
FIGURA 27 MODELO PARA SIMULACIÓN DE UN SISTEMA HIBRIDO DE ENERGÍA .....	70
FIGURA 28 DENSIDAD DE CULTIVOS DE COCA EN COLOMBIA, 2016.....	72
FIGURA 29 DENSIDAD DE CULTIVOS DE COCA EN EL MUNICIPIO DE EL TARRA, 2016.....	73
FIGURA 30. CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS EN EL MUNICIPIO DE EL TARRA. ....	75
FIGURA 31. TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN MENSUAL DE LA LOCALIZACION REPRESENTATIVA PARA LA UCS 1910. IZQUIERDA: TEMPERATURA; DERECHA: PRECIPITACIÓN.....	78

FIGURA 32. TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN MENSUAL DE LA LOCALIZACION REPRESENTATIVA PARA LA UCS 1039. IZQUIERDA: TEMPERATURA; DERECHA: PRECIPITACIÓN.....	78
FIGURA 33. TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN MENSUAL DE LA LOCALIZACION REPRESENTATIVA PARA LA UCS 1044. IZQUIERDA: TEMPERATURA; DERECHA: PRECIPITACIÓN.....	79
FIGURA 34. ÁREA DE INFLUENCIA ANALIZADA PARA LA IDENTIFICACIÓN DE ECOSISTEMAS EN LA HERRAMIENTA TREMARCTOS COLOMBIA 3.0.....	80
FIGURA 35. LOCALIZACIONES POTENCIALES PARA LA CENTRAL PELETIZADORA EN EL MUNICIPIO DE EL TARRA. ....	90
FIGURA 36. AREA POTENCIAL PARA LA SUSTITUCION DE CULTIVOS ILÍCITOS EN EL MUNICIPIO DE EL TARRA. ....	91
FIGURA 37 PROCESO DE FABRICACIÓN DE PELLETS DE MADERA EN ÁGREP FORESTAL S.A. ...	99
FIGURA 38. TRITURADORA DE DOBLE EJE.....	100
FIGURA 39. MOLINO DE MARTILLOS.....	101
FIGURA 40. SECADOR ROTATIVO. ....	102
FIGURA 41. SECADOR DE BAJA TEMPERATURA (DE BANDA CONTINUA).....	102
FIGURA 42. PRINCIPIO DE DENSIFICACIÓN PARA PELETIZADORAS DE DADO PLANO. ....	103
FIGURA 43. PRINCIPIO DE DENSIFICACIÓN PARA PELETIZADORAS DE DADO DE ANILLO. ....	103
FIGURA 44. PERDIDAS DE MASA DURANTE EL PROCESO DE PELETIZACIÓN.....	105
FIGURA 45. DIAGRAMA CONCEPTUAL DE LA PLANTA PELETIZADORA. ....	106
FIGURA 46. FLUJO MÁSICO DE LA BIOMASA A TRAVES DEL PROCESO DE PELETIZACIÓN.....	107
FIGURA 47. CAPACIDAD Y POTENCIA DE LOS PRINCIPALES EQUIPOS DEL PROCESO DE PELETIZACIÓN. ....	107
FIGURA 48. RELACIÓN ENTRE LA PRODUCCIÓN DE PELLETS Y LOS COSTOS DE PRODUCCIÓN. ....	108
FIGURA 49. TECNOLOGÍAS DE GASIFICACIÓN DE ACUERDO A LA POTENCIA INSTALADA .....	110
FIGURA 50. GASIFICADOR DFBG 200.....	111
FIGURA 51. RECURSO DE BIOMASA.....	112
FIGURA 52. VENTANA PRINCIPAL GENERADOR 200 kW GEN. ....	113
FIGURA 53. CURVA DE CONSUMO DE COMBUSTIBLE PARA EL GENERADOR 200 kW GEN.....	113
FIGURA 54. CARGA ELÉCTRICA REPRESENTATIVA.....	114
FIGURA 55. HORARIO DE FUNCIONAMIENTO PARA EL GENERADOR A PARTIR DE BIOMASA. ....	114
FIGURA 56. BALANCE GENERAL DE COSTOS .....	115
FIGURA 57. CONSUMO DE COMBUSTIBLE.....	115
FIGURA 58. GENERACIÓN DEL GENERADOR A BASE DE BIOMASA.....	116
FIGURA 59. ALTERNATIVAS SELECCIONADAS POR EL SISTEMA .....	116
FIGURA 60. ESCENARIO SOLO DIESEL. ....	117
FIGURA 61. ESCENARIO DIESEL Y BIOMASA .....	117
FIGURA 62. GENERACIÓN A PARTIR DE BIOMASA PARA EL ESCENARIO DIESEL Y BIOMASA. ....	117
FIGURA 63. COMPARATIVA ECONÓMICA DE LA ALTERNATIVA SOLO DIESEL Y DIESEL-BIOMASA	118

## RESUMEN

Durante el año 2003 la Unidad de Planeación Minero Energética, UPME, desarrolló el estudio titulado "Potencialidades de los cultivos energéticos y residuos agrícolas en Colombia"; en el cual, identifica el potencial de la bioenergía en el país, específicamente, de los cultivos energéticos y de los residuos agrícolas. Ahora, la metodología de este estudio se basó en tres grandes grupos de tareas que son: la recopilación de información, la captura y análisis de información cartográfica y, los resultados; de manera que se lograron desarrollar mapas de disponibilidad de recursos y de potencialidad energética de estos[1]. Este estudio abrió el camino para el desarrollo de nuevas investigaciones especializadas, incluyendo el aprovechamiento energético de los cultivos forestales.

Además, un proyecto similar fue desarrollado por el IPSE en convenio con la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, en Necoclí (Antioquia) el cual consistió en la obtención de energía a partir de gasificación de biomasa de tal manera que se logró implementar una central de generación de 40kW. Este sistema consiste en la producción de un gas pobre a partir de la madera acumulada en las playas de Necoclí, con el fin de alimentar con dicho gas a un grupo electrógeno convencional. Además, la madera debe pasar por un proceso de secado, con el fin de disminuir su humedad relativa, y luego se realice su corte antes de ser ingresada en el gasificador. [2]

El mercado colombiano del desarrollo de productos energéticos a partir de la biomasa está basado principalmente en la producción de carburantes y combustibles a partir de cultivos energéticos que compiten con los cultivos alimenticios, lo cual ha generado varias discusiones ambientales y económicas, colocando en una balanza el desarrollo del agro del país: por un lado, con cultivos para producir alimentos y por el otro con cultivos para obtener energía.

La Organización de las naciones unidas para la alimentación y agricultura, FAO (por sus siglas en inglés), es quien establece que características debe tener un cultivo energético para que no compita con los cultivos alimenticios [3]. Adicionalmente, existen ciertas restricciones para los cultivos energéticos que son respetuosos con el medio ambiente tales como:

- Madurez precoz
- Fiabilidad de rendimiento en cultivo extensivo
- Resistencia a las enfermedades

Estas restricciones deben ser un criterio importante para identificar las especies forestales y herbáceas aptas para cultivos energéticos.[4]

Los proyectos de producción de energía mediante el aprovechamiento de la biomasa en Colombia no son un caso aislado a nivel mundial, puesto que los cultivos energéticos leñosos han sido estudiados también en Estados unidos, Canadá, Europa, Sudamérica y

Japón, con el objetivo de producir biomasa en grandes cantidades y, actualmente, se valoran también como fijadores de CO<sub>2</sub> [2]. A partir del análisis de algunos de estos estudios es desarrollado este proyecto el cual tiene como primer objetivo realizar una investigación sobre el potencial dendroenergético de las diferentes especies de plantas que existen en el municipio El Tarra, Norte de Santander, que tengan un crecimiento rápido, que puedan crecer en terrenos no aptos para cultivos tradicionales, que no tenga alta demanda de agua y fertilizante y caracterizarlos de acuerdo a sus propiedades fisicoquímicas, tales como la densidad aparente, la humedad, el poder calorífico de acuerdo a la literatura existente y estudios realizados en otros países.

Además, en esta investigación se busca analizar el desarrollo de proyectos dendroenergéticos como alternativa para reemplazar los cultivos ilícitos. Ahora, en Colombia, Nariño, Putumayo y Norte de Santander siguen siendo los departamentos más afectados por cultivos de coca; puesto que en estos tres departamentos se concentra el 63% de toda la coca del país. [5]

Debido a lo anterior, esta investigación evalúa el aprovechamiento energético de las diferentes especies herbáceas o forestales del municipio de el Tarra de Norte de Santander como una alternativa para la sustitución de cultivos ilícitos.

**PALABRAS CLAVE:** “Dendroenergía”, “biomasa”, “carburantes”, “gasificación”.

## ABSTRACT

During 2003, the Energy Mining Planning Unit, UPME, developed the study entitled "Potentials of energy crops and agricultural waste in Colombia"; in which, it identifies the potential of bioenergy in the country, specifically, of energy crops and agricultural waste. Now, the methodology of this study was based on three large groups of tasks that are: the collection of information, the capture and analysis of cartographic information and the results; so that they were able to develop maps of resource availability and energy potential of these [1]. This study opened the way for the development of new specialized research, including the energy use of forest crops.

In addition, a similar project was developed by the IPSE in agreement with the National University of Colombia, Medellin headquarters, in Necoclí (Antioquia) which consisted of obtaining energy from biomass gasification in such a way that a plant was implemented 40kW generation This system consists of the production of a poor gas from the wood accumulated on the beaches of Necoclí, in order to feed a conventional generator set with said gas. In addition, the wood must go through a drying process, in order to decrease its relative humidity, and then its cut is made before being entered into the gasifier. [2]

The Colombian market for the development of energy products from biomass is mainly based on the production of fuels and fuels from energy crops that compete with food crops, which has generated several environmental and economic discussions, placing the development of the country's agriculture: on the one hand, with crops to produce food and on the other with crops for energy.

The United Nations Organization for Food and Agriculture, FAO (FAO), is the one who establishes what characteristics an energy crop must have so that it does not compete with food crops [3]. Additionally, there are certain restrictions for energy crops that are environmentally friendly such as:

- Early maturity
- Reliability of yield in extensive culture
- Disease resistance

These restrictions should be an important criterion for identifying forest and herbaceous species suitable for energy crops. [4]

Energy production projects through the use of biomass in Colombia are not an isolated case worldwide, since woody energy crops have also been studied in the United States, Canada, Europe, South America and Japan, with the aim of producing biomass in large quantities and, currently, they are also valued as CO<sub>2</sub> fixers [2]. Based on the analysis of some of these studies, this project is developed, which has as its first objective an investigation into the dendroenergetic potential of the different species of plants that exist in the municipality of El Tarra, North of Santander, that have a rapid growth, that can grow in lands not suitable

for traditional crops, which does not have high demand for water and fertilizer and characterize them according to their physicochemical properties, such as bulk density, humidity, calorific value according to existing literature and studies in other countries.

In addition, this research seeks to analyze the development of energy-efficient projects as an alternative to replace illicit crops. Now, in Colombia, Nariño, Putumayo and Norte de Santander remain the departments most affected by coca crops; since in these three departments 63% of all the coca in the country is concentrated. [5]

Due to the above, this research evaluates the energy use of the different herbaceous or forest species of the municipality of Tarra de Norte de Santander as an alternative for the substitution of illicit crops.

**KEY WORDS:** “Dendroenergy”, “biomass”, “fuels”, “gasification”.



## 1. INTRODUCCIÓN

La época actual presenta grandes desafíos para la industria de producción de energía, como el agotamiento de los combustibles fósiles, el cambio climático producido por los gases de efecto invernadero generados en los procesos de transformación energética de los combustibles fósiles, la volatilidad de los precios del petróleo, y el deterioro del ecosistema causado por las actividades de exploración y explotación de hidrocarburos. Además, el embargo petrolero de los 80's generó que el mundo se concientice de que debemos encontrar diferentes alternativas para satisfacer nuestras necesidades energéticas sin depender del petróleo, por lo tanto, actualmente tenemos un mix de energías alternativas cada vez mayor, incluyendo la energía solar, eólica y la bioenergía entre otras.

La dendroenergía es toda energía obtenida a partir de biocombustibles sólidos, líquidos y gaseosos; tanto primarios como secundarios, los cuales son derivados de los bosques, árboles y otra vegetación de terrenos forestales, [6] pero en Colombia no cuentan con gran participación.

Colombia está atravesando por un gran cambio debido al posconflicto y se debe aprovechar las oportunidades que acarrear. De acuerdo al decreto presidencial 896 del 29 de mayo del 2017 "Por el cual se crea el Programa Nacional Integral de Sustitución de cultivos de uso ilícito -PNIS- resalta que el punto 4 del Acuerdo Final reconoce expresamente la pertinencia y necesidad de implementar planes integrales de sustitución de cultivos de uso ilícito y desarrollo alternativo como herramienta para solucionar el problema de las drogas ilícitas, como parte de la transformación estructural del campo que busca la Reforma Rural Integral que contribuya a generar condiciones de bienestar y buen vivir para las poblaciones afectadas por estos cultivos [7]. El reemplazo de cultivos de uso ilícitos por cultivos energéticos es una herramienta para solucionar el problema de las drogas ilícitas.

Durante el desarrollo del proyecto primero se revisó el estado de arte internacional, identificando los países con mayor progreso en el uso de la dendroenergía, para luego realizar una verificación del estado de arte a nivel nacional, identificando las fallas de investigación. Se continuó con la comparación entre recursos forestales o herbáceos entre los países, el análisis de la tecnología necesaria para la conversión de energía y de la disponibilidad de terrenos para los cultivos energéticos de segunda generación. Finalmente, a partir de la literatura y de Sistemas nacionales de información forestal [8] se realizó la clasificación de los cultivos energéticos de segunda generación respecto a sus propiedades relevantes para la transformación de energía, tales como: su densidad aparente, humedad, contenido de cenizas, poder calorífico, cantidad de biomasa producida por hectárea plantada y cantidad de energía útil por cantidad de biomasa transformada; para luego realizar un análisis de estos datos mediante el software Homer PRO con diferentes simulaciones de abastecimiento de una demanda de la energía obtenida por la biomasa producida en estos cultivos energéticos de segunda generación.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

Realizar un análisis del potencial dendroenergético de especies herbáceas y forestales aplicables al municipio de El Tarra, Norte de Santander, para desarrollar procesos de aprovechamiento energético que ofrezcan una alternativa al reemplazo de cultivos ilícitos por cultivos energéticos

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Clasificar los cultivos energéticos herbáceos y forestales aplicables para la zona de estudio de acuerdo a sus propiedades principales para la obtención de energía.
- Determinar el potencial energético de las principales fuentes de biomasa herbácea y forestal para peletización en la zona de estudio
- Evaluar una alternativa de generación energética con base en el potencial dendroenergético del cultivo, utilizando el software Homer PRO

### 3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

#### 3.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Se desarrolla este proyecto con el fin de realizar una investigación sobre las diferentes especies vegetales que existen en el municipio de El Tarra y las cuales permitan su aprovechamiento energético.

Al tratarse de uno de los países con mayor biodiversidad del mundo, existe un gran potencial dendroenergético en Colombia al cual no se le ha dado espacio de participación dentro de la canasta energética nacional.

No obstante, el acuerdo de paz y citando indica: “Que se deben buscar nuevas opciones centradas en procesos de sustitución de cultivos de uso ilícito y la implementación de Planes Integrales de Sustitución y Desarrollo Alternativo que harán parte de un nuevo Programa Nacional Integral de Sustitución de Cultivos de Uso Ilícito que tendrá una nueva institucionalidad.”[9]

Por lo tanto, el nuevo panorama nacional abre la puerta para nuevas técnicas de silvicultura y dendroenergía que permitan un desarrollo innovador focalizado hacia la restitución de los suelos, el impulso a la economía local y el cambio de la dinámica de los cultivos ilícitos en el país.

Al respecto, los departamentos de mayor afectación y, por lo tanto, de mayor potencial son: Nariño, Putumayo y Norte de Santander, en los cuales se concentra el 63% de los cultivos de coca del país. [5]

Debido a ello se realizará una investigación sobre las diferentes especies herbáceas o forestales en el municipio El Tarra de Norte de Santander, que brinden un alto poder calorífico, con unas características específicas que puedan ser cultivadas en terrenos con antecedentes de cultivos de uso ilícito, determinar la densidad energética obtenida por cada cultivo y adicional identificar cual sería el proceso de transformación de la biomasa en energía más adecuado.

Al obtener los resultados de la investigación y sus respectivos análisis, es posible calcular el potencial dendroenergético de la zona estudiada, y cuáles serían las iniciativas para explotar este recurso de manera eficiente.

Utilizando el módulo de biomasa de la herramienta Homer PRO es posible modelar múltiples tecnologías de conversión de la biomasa, así como diferentes generadores alimentados con la misma, adicionalmente es posible especificar la disponibilidad y el costo de la materia prima, sensibilizando las variables de influencia con la finalidad de lograr identificar el punto de mayor optimización para los sistemas dendroenergéticos en el municipio de El Tarra.

### 3.2 JUSTIFICACIÓN

La energía obtenida por la biomasa o bioenergía, tiene un porcentaje de participación en el suministro de energía primaria del 13,4% en el mundo, de los cuales 70,7% corresponde a biocombustibles. Durante el periodo comprendido entre 1990 y 2015, las fuentes de bioenergía experimentaron un crecimiento variado: 12,8% para el biogás, 10,1% para biocombustibles líquidos y tan solo el 1,1 % para biocombustibles sólidos, en comparación al crecimiento que ha tenido la energía solar y eólica, con un 45,5% y un 24% respectivamente. [4]

La biomasa es la fracción biodegradable de los productos, desechos y residuos procedentes de la agricultura y las silvicultura, industria conexas, así como la fracción biodegradable de los residuos industriales y municipales [4]. Entonces, la biomasa como fuente de producción de energía puede clasificarse en cinco tipos: cultivos bioenergéticos, residuos agrícolas, residuos forestales, residuos industriales y residuos urbanos[10] y existen diferentes procesos de obtener la energía de la biomasa, tales como la combustión directa, proceso termo-químico y procesos bioquímicos, entre los cuales se pueden resaltar la gasificación, pirolisis y digestión anaerobia [11].

Colombia es un país con gran biodiversidad, de acuerdo al Sistema de información ambiental de este país, el cual, junto a Bolivia, Brasil, China, Costa Rica, Ecuador, India, Indonesia, Kenia, México, Perú, Sudáfrica y Venezuela forma parte del denominado Grupo de países megadiversos y, según la WWF, Colombia es por naturaleza un territorio donde predominan los ecosistemas forestales. De las 114 millones de hectáreas que comprenden la superficie del país se estima que 55 millones, el 50% del territorio nacional, mantienen cobertura forestal [12], por lo tanto existen muchas oportunidades para la explotación de la dendroenergía. Según Felipe Fonseca, director de la Unidad de planeación Rural Agropecuaria (UPRA), Colombia cuenta con 26 millones de hectáreas de tierras –superficie más grande que la del Reino Unido- aprovechables para la producción maderera. [13]

El posconflicto en Colombia presenta grandes oportunidades que deben ser aprovechadas por el gobierno y las empresas privadas. De acuerdo al decreto presidencial 896 del 29 de mayo del 2017 "Por el cual se crea el Programa Nacional Integral de Sustitución de cultivos de uso ilícito -PNIS-" es de resaltar el punto 4 del Acuerdo Final el cual reconoce expresamente la pertinencia y necesidad de implementar planes integrales de sustitución de cultivos de uso ilícito y desarrollo alternativo como herramienta para solucionar el problema de las drogas ilícitas, esto como parte de la transformación estructural del campo que busca la Reforma Rural Integral con el fin de contribuir en la generación de condiciones para el bienestar y buen vivir de las poblaciones afectadas por estos cultivos.[9] Además, dicho marco representa una ventana de oportunidad para el crecimiento de cultivos energéticos como parte del PNIS.

### **3. METODOLOGÍA**

Para desarrollar el proyecto y cumplir con los objetivos fijados en la sección anterior, es necesario determinar una metodología, la cual consta de 3 fases que se describirán a continuación:

#### **3.1. Fase 1: Identificación del área objetivo y la especie herbácea o forestal.**

1. Verificar informe de la UNODC y ODC para examinar el estado de Colombia respecto a los cultivos de uso ilícito.
2. Identificar la región con mayor porcentaje de aumento en cultivos de coca de un año respecto al anterior.
3. Seleccionar el Departamento que tenga el mayor incremento de cultivos ilícitos.
4. Seleccionar el municipio que permita implementar proyectos de sustitución de cultivos de uso ilícitos.
5. Caracterizar el territorio de estudio en el cual se desarrollará el proceso de sustitución de cultivos de uso ilícito.
6. Identificar las especies endógenas del territorio de estudio.
7. Evaluar posible implementación de especies foráneas para la sustitución de cultivos de uso ilícito en el territorio de estudio.
8. Elegir la especie forestal o herbácea que se adapte a las condiciones del clima, tipo de suelo y cuente con estudios previos de aplicación con fines energéticos.

#### **3.2. Fase 2: Cálculos del potencial dendroenergético**

1. Acotar el área disponible para sustitución de cultivos de uso ilícito.
2. Establecer la distribución y rotación del cultivo dendroenergético.
3. Calcular la disponibilidad de residuos en el periodo de cosecha del cultivo.
4. Plantear una ecuación que permita calcular la disponibilidad de biomasa en kilogramo
5. .
6. Calcular el potencial dendroenergético mediante el poder calorífico inferior de la especie seleccionada en la anterior fase.

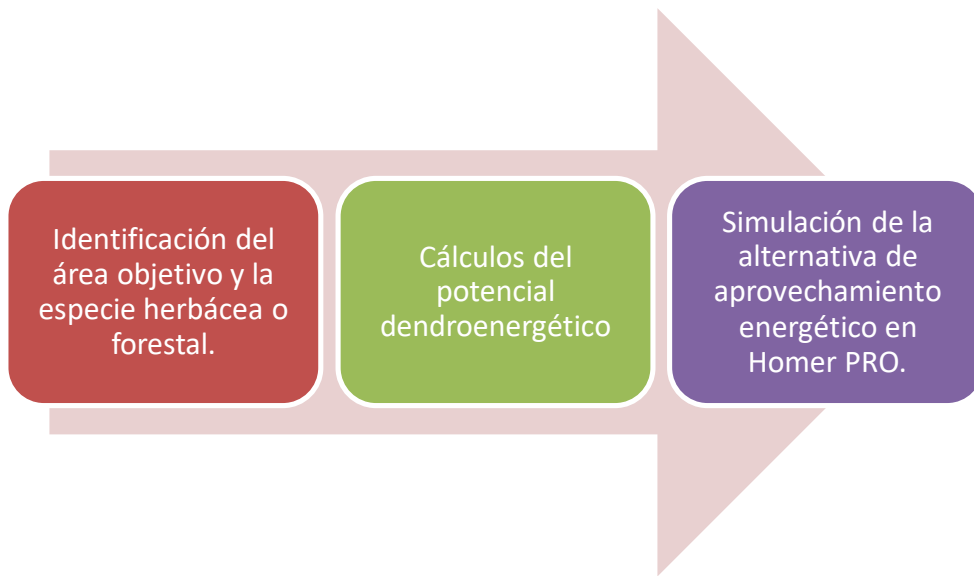
#### **3.3. Fase 3: Simulación de la alternativa de aprovechamiento energético en Homer PRO.**

1. Plantear alternativas de aprovechamiento energético y seleccionar la más adecuada
2. Dimensionar el proceso de peletización de la especie dendroenergética

3. Seleccionar la tecnología de conversión energética
4. Dimensionar la tecnología seleccionada
5. Simular la alternativa de aprovechamiento energético con la tecnología de conversión energética.

Finalmente se entregan los resultados obtenidos en cada fase y se analizan para sus conclusiones correspondientes.

Figura 1 Metodología del desarrollo del proyecto.



## 4. MARCO TEORICO

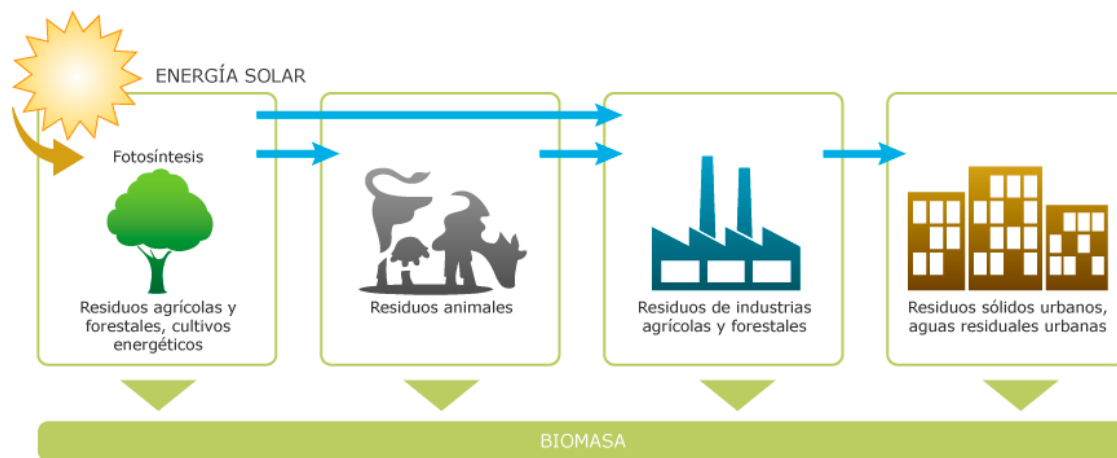
### 4.1 Biomasa

#### 4.1.1 Definición de la Biomasa

La biomasa es la materia de origen orgánico, tanto vegetal como animal, que podemos utilizar para fines energéticos, de modo tal que es la materia prima de la bioenergía, por esto, la Directiva de energía renovable (2009/28/CE) la define como “*la fracción biodegradable de los productos, desechos y residuos de origen biológico de la agricultura, silvicultura y las industrias relacionadas, incluyendo pesca y la acuicultura, así como la fracción biodegradable de los residuos industriales y municipales*”. Ahora, siempre y cuando se tenga energía solar y agua, se puede considerar a la biomasa como una fuente de energía renovable. Acorde a la FAO, *la biomasa comprende toda materia orgánica originada en un proceso biológico utilizable como fuente de energía*.

La figura 2 muestra que la biomasa se puede obtener de forma natural como residuos agrícolas, forestales, cultivos energéticos y residuos animales o también como subproductos de procesos industriales o urbanos

Figura 2 Esquema que muestra el proceso de generación de biomasa



Fuente: Núcleo de capacitación en Políticas Publicas, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura, FAO, disponible en: <http://www.fao.org/alc/cursos/biomasa/home/pag/04> [14]

#### 4.1.2 Clasificación de la biomasa

La biomasa es considerada una fuente de energía renovable y limpia, la cual se produce y se puede aprovechar energéticamente de diferentes maneras. Según la FAO, la biomasa se clasifica en biomasa natural, biomasa residual y cultivos energéticos.

- La biomasa natural, se produce en la naturaleza sin la actuación del ser humano y puede ser utilizada de forma directa como la leña, las ramas o el estiércol seco.
- La biomasa residual se divide en dos grandes grupos, la biomasa residual generada por actividades agrícolas, silvícolas y ganaderas (RAC) y la biomasa residual generada por la industria (principalmente agroalimentaria y maderera) (RAI).
- Cultivos energéticos, son cultivos destinados especialmente para la producción de biomasa, pueden ser cultivos alimenticios tales como el maíz y la remolacha, como también pueden ser cultivos forestales o herbáceos.

Adicionalmente la Biomasa también puede clasificarse según su origen o según su uso. A continuación se detalla la biomasa según su origen[14]:

- Cultivos energéticos
  - Cultivos tradicionales
  - Cultivos poco frecuentes
  - Cultivos acuáticos
  - Cultivos para producción de líquidos
- Biomasa vegetal
  - Biomasa residual
    - Residuos industriales
      - Forestales
      - Agro-alimentarios
      - Agrícolas
    - Residuos agrícolas y forestales
    - Residuos urbanos
      - Residuos sólidos
      - Aguas residuales: biomasa animal
    - Residuos ganaderos
  - Excedentes agrícolas

Ahora, la biomasa según su uso se clasifica de la siguiente forma:

- Biomasa natural
- Biomasa seca
- Biomasa húmeda
- Cultivos energéticos
- Biocombustibles



Cultivos poco frecuentes:

Son cultivos que pueden generar una gran producción de biomasa y se pueden reproducir en condiciones desfavorables, algunas de las especies de cultivos que se encuentran en esta categoría son:

- Caña de Provenza (arundo donax)
- Cardos (Onopordum sp)
- Pataca (Heliantus tuberosus)

Este tipo de cultivos no competiría con la alimentación y además son adaptables a zonas marginales o áreas que no son aptas para cultivos tradicionales, por lo cual tienen un alto potencial para su aprovechamiento energético sostenible.[15]

#### 4.1.3 Métodos de obtención de energía

Existen diversos métodos para la obtención de energía a partir de biomasa, no obstante, y a grandes rasgos, dichos métodos pueden clasificarse como: [11]

- Procesos de combustión directa
- Procesos termo-químicos
- Procesos bioquímicos

Procesos de combustión directa

*La combustión directa* es el proceso de transformación energético más antiguo y común, consiste en la generación de calor mediante la incineración de la biomasa, pero, desde el punto de vista de la generación de energía es un proceso ineficiente. Normalmente se utiliza en estufas, hornos y calderas; además, de forma más avanzada se pueden utilizar la combustión con lecho fluidizado.[11]

La combustión directa puede ser utilizada para generar calor, o electricidad, mediante un ciclo Rankin.[16]

Procesos termoquímicos

Los procesos termoquímicos consisten en la combustión incompleta y controlada de la biomasa de manera tal que su estructura se rompe produciendo combustibles (en estado sólido, líquido o gaseoso) con densidad y valor calórico mayores a los de la biomasa con el fin de facilitar su uso en la producción de calor y electricidad y su transporte [11].

*Producción de carbón vegetal:* Este es un proceso de pirolisis a bajas temperaturas. Pero para efectos termoquímicos sigue siendo la degradación térmica en ausencia de oxígeno. [11]

*Gasificación:* conjunto de reacciones termoquímicas que se producen en un ambiente pobre de oxígeno, que da como resultado de la transformación de un sólido a un gas (de síntesis,

pobre o de producto), el cual puede ser utilizado posteriormente en calderas, turbinas o un motor para generar energía útil. [17]

*Pirolisis:* La pirolisis es la degradación térmica de la biomasa, también se conoce como devolatilización, es un proceso endotérmico el cual separa del cuerpo principal de la biomasa de 75 a 90% de materiales volátiles de los cuales el principal es el aceite pirolítico (un hidrocarburo líquido); además, el remanente solido tras el proceso es conocido como CHAR.[18]

### Procesos bioquímicos

Los procesos bioquímicos se caracterizan por aprovechar las propiedades bioquímicas de la biomasa y, mediante la acción metabólica de microorganismos, produce combustibles líquidos y gaseosos. Estos procesos se recomiendan para tratar la biomasa húmeda, en lugar de utilizar procesos termoquímicos. [11]

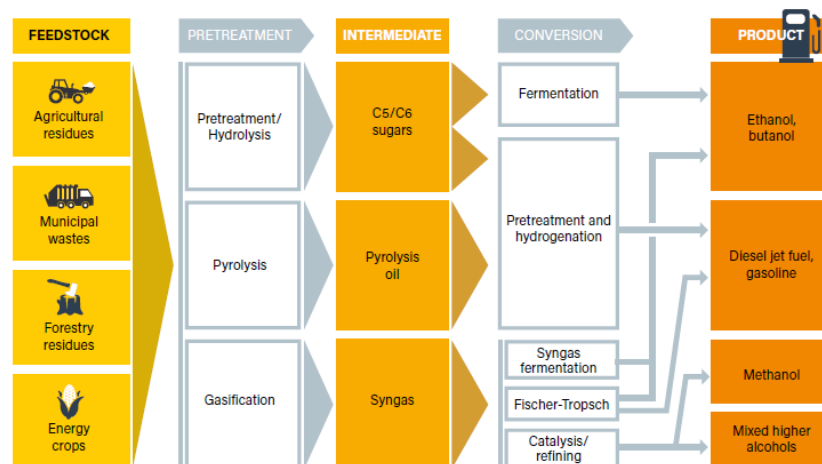
*Digestión anaerobia:* Es el proceso de descomposición de residuos animales y vegetales que, sin aire, hace que se produzca gas y lodo. El gas resultante en este proceso se conoce como biogás y el lodo se usa como fertilizante orgánico.[16]

*Fermentación:* el bioetanol es uno de los productos del proceso bioquímico de fermentación, el cual se obtiene al fermentar ciertos azucares, especialmente glucosa, utilizando materias primas como maíz, almidón de trigo y residuos de papa entre otros

A continuación, podemos ver un esquema tomado del REN21 en el cual muestra la materia prima, el tratamiento para obtener un biocombustible, y por último el producto obtenido después de su conversión energética.

Podemos destacar que la gasificación tiene gran variedad de productos energéticos.

Figura 3 Algunas rutas de conversión a biocombustibles avanzados



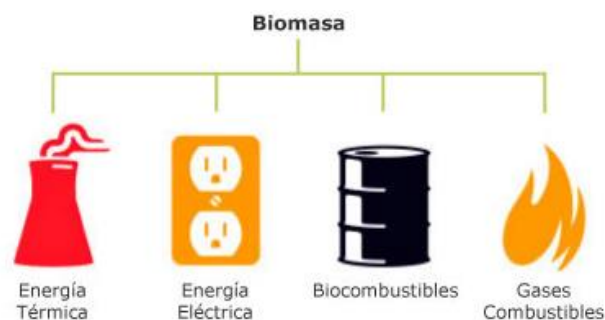
Fuente: Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. Renewables 2016 global status report. Disponible en: [http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/06/GSR\\_2016\\_KeyFindings1.pdf](http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/06/GSR_2016_KeyFindings1.pdf). [19]

#### 4.1.4 Aplicaciones de la bioenergía

La bioenergía es aquella obtenida a partir de la biomasa y comprende todas las formas de energía derivada de combustibles orgánicos. [14] [20]

La bioenergía puede ser utilizada para generar energía térmica o eléctrica, como también puede usarse para la producción de energía mecánica en los motores de combustión interna, todo lo anterior mediante el uso de los biocombustibles, biocarburantes y gases combustibles como el biogás.

Figura 4 El esquema muestra la capacidad de la biomasa para satisfacer demandas de energía de distinto tipo.



Fuente: Núcleo de capacitación en Políticas Públicas, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura, FAO, disponible en: <http://www.fao.org/alc/cursos/biomasa/home/pag/08> [14]

La bioenergía tiene el potencial para reducir significativamente el consumo de combustibles derivados del petróleo, cada vez más conflictivo y oneroso, generando ahorros, reduciendo la dependencia externa y contribuyendo a la mitigación del Cambio Climático. [14]

Las aplicaciones de la bioenergía se pueden dividir en dos grandes grupos:[21]

- Aplicaciones térmicas
- Aplicaciones eléctricas

Dentro de las *aplicaciones térmicas* comprenden los biocarburantes que generan calor, tales como la leña, las briquetas, los pellets, los cuales se transforman en energía térmica mediante procesos de combustión directa, adicionalmente se puede utilizar el gas generado mediante la gasificación o pirolisis para aplicaciones térmicas como el acondicionamiento de un hogar.

De acuerdo al Instituto para la diversificación y ahorro en la energía, IDAE, la producción térmica sigue un escalafón de aplicaciones, el primer escalafón es el uso de la biomasa para cocción en el hogar, el segundo escalafón es para acondicionamiento térmico en los hogares y el tercer escalafón es mediante redes de calefacción centralizadas, las cuales operan desde una central térmica y son conectadas mediante redes de tuberías a las urbanizaciones para su uso. [21]

A continuación, podemos ver las aplicaciones de la bioenergía en diferentes sectores:

Figura 5 Sectores de demanda y ejemplos de opciones o aplicaciones de bioenergía

Vivienda e institucional		Rural		Sector eléctrico		Transporte		Industria	
Estufas tradicionales de biomasa	Estufas avanzadas de biomasa	Plantas de biogas a mediana escala	Planta de energía off-grid	Bio-Electricidad	Co-combustion en plantas de carbon	Mezclas en carros y camiones	Uso en motores dedicados	Sistemas de coproductos	Co-generación

Fuente: Figura adaptada de documento Module1: Techno-economic background; FAO/UNEP/UN-Energy Bioenergy Decision Support Tool [22]

*Vivienda e institucional*, las aplicaciones más comunes son para cocción de alimentos, luz en las viviendas.

*Rural*, la generación de energía in situ provee una opción de mejorar las condiciones rurales, y mantener pueblos con los beneficios que ofrece un sistema de interconexión eléctrico, tales como el uso de electrodomésticos, telecomunicaciones entre otros. La generación de energía a partir de biomasa mediante plantas de biogás, provee de energía térmica o eléctrica a las viviendas.

*Sector eléctrico*, se puede dividir en diferentes escalas, bioenergía para cogeneración, para generación de calor distribuido y para combustión junto con carbón o lignito.

*Transporte* pueden incluir una variedad de combustibles líquidos y gaseosos. En algunos casos, los combustibles se pueden mezclar con combustibles fósiles, como el etanol mezclado con gasolina o el biodiesel con combustible diésel.

*Industria* las aplicaciones de la bioenergía en la industria pueden incurrir dependiendo de su fuente o uso[22]:

- Puede ser usada para sustitución directa, por ejemplo, remplazar el carbón por el bagazo
- Suministro dedicado o especializado de calor y energía a las industrias
- Uso de subproductos de la industria, como licor negro o residuos de aserraderos
- Uso de biocombustibles en maquinaria especializada, p. aceite vegetal en equipos agrícolas

## 4.2 Dendroenergía

### 4.2.1 Definición de la Dendroenergía

Se puede considerar que la energía más primitiva es la utilizada mediante la combustión de madera, la dendroenergía es *energía solar eficientemente almacenada*. [23]

Del griego *dendro* que significa árbol, se junta este prefijo con la palabra energía para formar dendroenergía, el cual es una clasificación de la bioenergía que es obtenida a partir de los árboles. Dicha definición se extiende también a cualquier fuente herbácea. La dendroenergía es toda energía obtenida a partir de biocombustibles sólidos, líquidos y gaseosos primarios y secundarios derivados de los bosques, árboles y otra vegetación de terrenos forestales.[6]

Contrariamente a las pautas de uso actual de los biocombustibles líquidos, el uso de madera que proviene de fuentes sostenibles para la generación de energía térmica y energía eléctrica, o para la cogeneración, resulta sumamente eficiente, tanto desde el punto de vista de la conversión energética como de las emisiones de gases de efecto invernadero [14]

### 4.2.2 Especies forestales o herbáceas para la dendroenergía

Aunque se puede suponer que todas las especies forestales o herbáceas son aptas para la generación de dendroenergía, debido a que cualquiera de estas puede ser útil para generar combustión mediante un proceso termoquímico y de esta manera producir cierta cantidad de energía, se debe considerar la viabilidad de la obtención de energía de esta fuente mediante la valoración de su poder calorífico que puede entregar, por lo tanto hay ciertas condiciones como el porcentaje de humedad, el porcentaje de cenizas, entre otras, para que la fuente de biomasa sea considerada viable para este proceso.

Adicionalmente, se debe considerar el rendimiento de los cultivos, su rotación y la densidad por hectárea (cantidad de árboles, arbustos o hierbas que se puedan plantar por hectárea).[24]

Algunas de las especies comúnmente utilizadas para la producción dendroenergía son: [24]

- Acacia cyanophylla, A. dealbata, A. melanoxilon;
- Acer negundo, A. saccharium;
- Ailanthus altissima;
- Alnus spp;
- Brachychiton populnea;
- Castanea sativa;

- Casuarina cunninghamiana, C. equisetifolia;
- Celtis australis;
- Ceratonia siliqua;
- Eucalyptus camaldulensis, E. globulus, E. gomphocephala, E. hemiploia, E. robusta, E. rudis, E. tereticornis, E. xideroxilon;
- Ficus sp;
- Fraxinus sp, F. angustifolia;
- Gleditsia triacanthos;
- Grevillea robusta;
- Gmelina arborea;
- Liquidambar orientalis, L. styraciflua;
- Morus alba, M. nigra;
- Melia azedarach;
- Parkinsonia aculeata;
- Paulownia spp;
- Pinus canariensis, P. pinaster, P. radiata, P. sylvenstris, P. taeda;
- Pistacia atlantica;
- Platanus orientalis, P.occidentalis;
- Populus sp;
- Prosopis spp;
- Quercus ilex, Q. petraea, Q. pirenaica, Q. faginea, Q. robur, Q. suber;
- Robinia pseudoacacia;
- Salix spp;
- Schinus molle;
- Tectona spp;
- Ulmus pumilla

Las especies pertenecientes a las familias Eucalipto y Pinus son las más utilizadas para producción de dendroenergía.

#### *4.2.3 Dendroenergía a partir de residuos forestales*

La dendroenergía por residuos forestales, es aquella que utiliza los restos de ramas, aserrín o partes que se quedan en los bosques después de un proceso de tala de árboles. Cuando se utilizan los residuos forestales para generar energía, se presentan beneficios, como la limpieza de los bosques, la disminución de incendios forestales entre otros.

De acuerdo a la FAO, se considera que, de cada árbol extraído de un bosque para producir madera, tan solo se aprovecha un 20%, debido a que un 40% se deja en el campo, y el otro 40% son residuos en la industria al procesarlas, ya que genera, chips, aserrín. [14]

#### 4.2.4 Dendroenergía por cultivos energéticos

La dendroenergía mediante cultivos energéticos es una forma reciente de generar energía, los cultivos energéticos de biomasa forestal se basan en tener plantaciones de especies forestales o herbáceas cuyo único propósito es el aprovechamiento energético, para generar energía útil la biomasa primero tiene que someterse a procesos de secado, almacenamiento y transformación de energía.

La mayor ventaja de estos cultivos, es que no compiten con la alimentación, ya que como se ha visto en cultivos energéticos a base de soya, remolacha, maíz, entre otros cultivos para el consumo alimenticio, se produce un aumento excesivo de los precios de estos alimentos.

#### 4.2.5 Obtención de energía

La producción de calor a partir de la madera se remonta a muchos años atrás, pero el costo bajo del carbón, los productos petrolíferos, el uso del gas natural y su característica principal el poder calorífico que contiene una pequeña parte en comparación a la madera fueron las causas para que disminuyera su consumo y le quitaran el primer lugar como materia prima para obtención de energía. [4]

*Combustión:* Se refiere a la reacción de oxidación completa de la biomasa con aire eventualmente precalentado, inyectado en el horno. La humedad que contiene la biomasa es eliminada por completo mediante la evaporación de la misma. Mediante reacciones químicas se rompen macromoléculas generando CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y SO<sub>2</sub> los cuales se oxidan inmediatamente al entrar en contacto con el aire y constituyen las llamas.

Una desventaja de la combustión es la producción de sustancias contaminantes, tales como el monóxido de carbono, los compuestos orgánicos volátiles, el polvo y los hidrocarburos aromáticos policíclicos.[4]

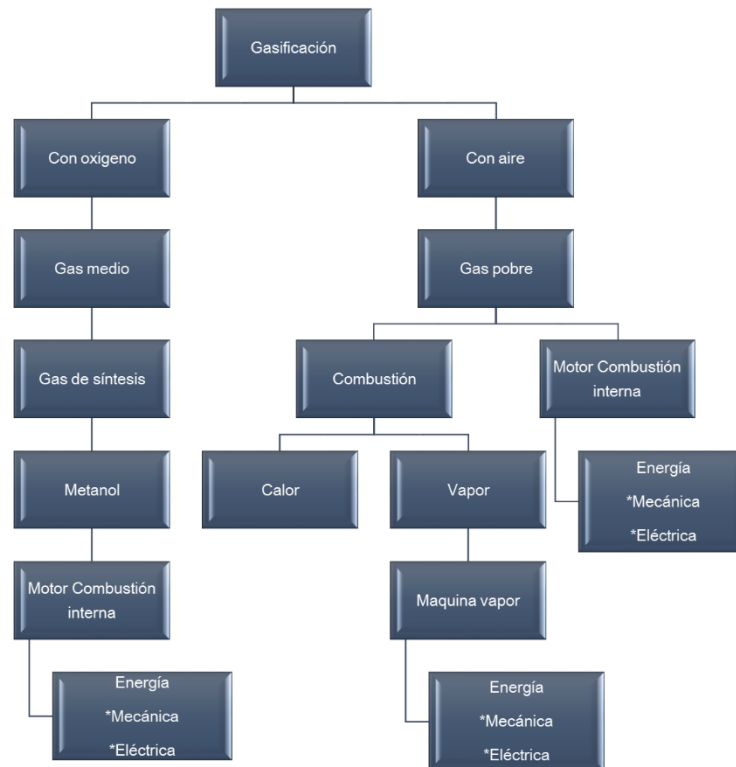
*Gasificación:* es la destrucción exotérmica de la biomasa por oxidación en presencia de un defecto de aire o de oxígeno con respecto a la estequiometría correspondiente: no hay oxígeno en los gases producidos. Por el continuo aumento de temperatura que se genera en las reacciones exotérmicas, se fragmentan las macromoléculas obteniendo moléculas más cortas en estado de gas, como el hidrógeno, el monóxido de carbono y el metano.[4]

Existen diferentes tipos de gasificadores y los más comunes son:

- Gasificadores de lechos fluidizados circulantes atmosféricos.
- Gasificadores de lechos fluidizados burbujeantes atmosféricos.
- Gasificadores de lechos fluidizados presurizados
- Gasificadores de lecho fijo en co-corriente

- Gasificadores de lecho fijo a contra corriente
- Gasificadores ciclón atmosféricos
- Lechos arrastrados atmosféricos

Figura 6 Procesos de conversión de biomasa en Energía



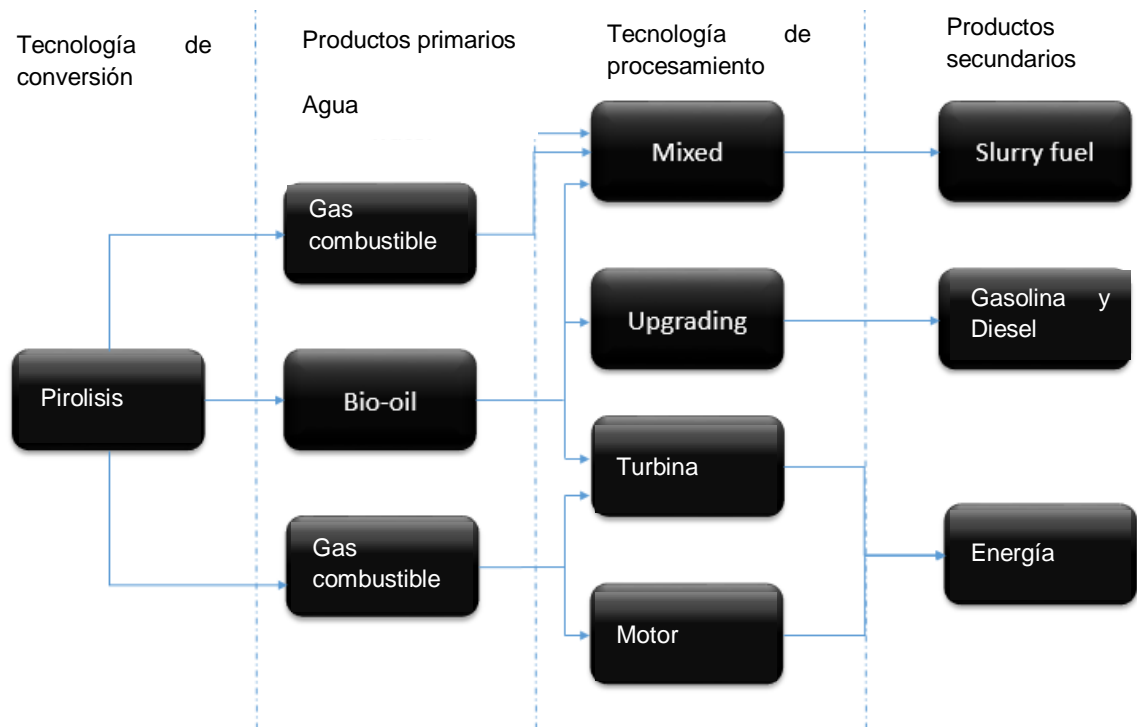
Fuente. Adaptación DNDP, subsecretaría de energía eléctrica República de Argentina

*Pirólisis:* el principio de la pirólisis es aumentar la temperatura de biomasa con ausencia total de aire para producir reacciones endotérmicas que rompan las macromoléculas contenida dentro de ellas y generen un gas, líquido o sólido debido a la descomposición espontánea de la biomasa.

Al final de este proceso y en ausencia de oxígeno, solo queda carbono con la fracción mineral contenida en la biomasa: el coque o char, un gas compuesto de hidrocarburos (metano, etileno, etano, propileno...) y el aceite pirólítico, el cual muchas veces es el producto principal



Figura 7 Productos derivados de la pirolisis de biomasa



Fuente: Adaptación Libro La biomasa Fundamentos, tecnologías y aplicaciones; Damiens, Alain; 2010 [4]

## 4.3 Pellets

### 4.3.1 Definición de Pellets

Los pellets son sólidos cilíndricos de material comprimido con dimensiones aproximadamente de 4 a 10 mm de diámetro con una longitud no mayor a 30 ms. Dependiendo de la composición del pellet, este puede ser considerado como un combustible líquido

El pellet es una fuente de energía renovable, ecológica y relativamente económica. Se trata de un combustible ecológico cuyo poder calórico depende del material a partir del cual es fabricado. [6]

Podemos identificar diferentes ventajas del uso de pellets como el hecho de no depender de los continuos cambios en los precios de otros combustibles, no es volátil, no produce olores y no presenta riesgo de explosión en su almacenamiento.

Los pellets se obtienen mediante una aplicación de presión de gránulos de biomasa, el aumento de presión genera una elevación en la temperatura a valores hasta de 90 C lo que genera que la lignina que contiene la biomasa se funda y luego en el proceso de enfriamiento se solidifique, jugando el papel de ligante.

La especificación técnica europea establece las siguientes normas para biocombustibles sólidos: la EN plus para certificación, y a manera de estandarización la ISO 17225-2 para pellets leñosos y la ISO 17225-6 para pellets de biomasa mixta.

A continuación, se podrá observar en la Tabla 1 las características fisicoquímicas de pellets y briquetas según la normatividad internacional

Tabla 1 Características fisicoquímicas de pellets según normatividad internacional

Propiedad	Unidad	ENplus A1	ENplus A2	ENplus B	Estándar <sup>11)</sup>
Diametro	mm	6 ± 1 o 8 ± 1			ISO 17829
Longitud	mm	3,15 < L ≤ 40 <sup>4)</sup>			ISO 17829
Humedad	w-% <sup>2)</sup>	≤ 10			ISO 18134
Cenizas	w-% <sup>3)</sup>	≤ 0,7	≤ 1,2	≤ 2,0	ISO 18122
Durabilidad mecánica	w-% <sup>2)</sup>	≥ 98,0 <sup>5)</sup>	≥ 97,5 <sup>5)</sup>		ISO 17831-1
Fines (< 3,15 mm)	w-% <sup>2)</sup>	≤ 1,0 <sup>6)</sup> (≤ 0,5 <sup>7)</sup> )			ISO 18846
Temperatura de los pellets	°C	≤ 40 <sup>8)</sup>			
Valor calórico neto	kWh/kg <sup>2)</sup>	≥ 4,6 <sup>9)</sup>			ISO 18125
Densidad a granel	kg/m <sup>3</sup> <sup>2)</sup>	600 ≤ BD ≤ 750			ISO 17828
Aditivos	w-% <sup>2)</sup>	≤ 2 <sup>10)</sup>			-
Nitrógeno	w-% <sup>3)</sup>	≤ 0,3	≤ 0,5	≤ 1,0	ISO 16948
Sulfuros	w-% <sup>3)</sup>	≤ 0,04	≤ 0,05		ISO 16994
Cloro	w-% <sup>3)</sup>	≤ 0,02		≤ 0,03	ISO 16994
Temperatura de deformación de las cenizas <sup>1)</sup>	°C	≥ 1200	≥ 1100		CEN/TC 15370-1
Arsénico	mg/kg <sup>3)</sup>	≤ 1			ISO 16968

Cadmio	mg/kg <sup>3)</sup>	≤ 0,5	ISO 16968
Cromo	mg/kg <sup>3)</sup>	≤10	ISO 16968
Cobre	mg/kg <sup>3)</sup>	≤10	ISO 16968
Plomo	mg/kg <sup>3)</sup>	≤10	ISO 16968
Mercurio	mg/kg <sup>3)</sup>	≤ 0,1	ISO 16968
Niquel	mg/kg <sup>3)</sup>	≤10	ISO 16968
Zinc	mg/kg <sup>3)</sup>	≤100	ISO 16968

Fuente: Adaptación Informe EN PLUS Manual para la certificación de pellets de madera para usos térmicos; European Pellet Council Association, c/o AEBIOM - European Biomass; 2013 [25]

#### 4.3.2 Procedimiento para peletizar

Para fabricar un pellet la materia prima disponible, debe someterse a un proceso de secado para obtener una humedad deseada ( $\leq 10$  w-%), el cual puede al aire o en secador.

Luego de obtener la humedad necesaria, opcionalmente, se realiza el proceso de cortado, disminuyendo el tamaño original de la biomasa en una trituradora, el siguiente proceso es llevar este material a un Hammer Mill o molino de martillo, para obtener la granulometría adecuada, aproximadamente entre 4 y 2 mm de longitud.

Si es necesario se procede a humedecer nuevamente estos trozos de madera, obteniendo un porcentaje de humedad final aproximadamente entre 10% a 16%, en algunos escenarios se deben añadir aglomerantes (por ejemplo, puede usarse en pellets con fuentes herbáceas) que sirvan para compactar las partículas. El esquema de producción del pellet en forma resumida es el siguiente:

La peletización es la formación y compactación de un material en pequeños cilindros. [6]

1. Recogida y picado de los residuos de madera: La obtención de la materia prima puede ser a partir de 2 residuos: de madera o cultivos dendroenergéticos. En el caso de los residuos de madera se pueden dividir en residuos forestales, residuos de aserraderos y residuos industriales de madera, en la mayoría de los casos estos son en forma de serrín o viruta, pero se debe verificar que no existan residuos metálicos que pueden encontrarse en el proceso de recolección de estos residuos. En el caso de cultivos dendroenergéticos, se debe realizar el proceso de secado de las fuentes herbáceas luego realizar los cortes necesarios para obtener el tamaño adecuado.
2. Secado para normalizar su contenido de humedad: El proceso de secado es una de las más críticas del proceso, ya que la elección del tipo de secador puede definir el

contenido de poder calorífico al final del proceso del pellet, ya que puede disminuir la cantidad de terpenos que contiene la madera. Si se seca demasiado, los materiales volátiles se separaran, aunque en muchos casos se busca esto para evitar riesgo de explosiones durante el proceso de peletización.[26] La tendencia es utilizar para el proceso de secado calor residual generado por algún proceso, por ejemplo en plantas de cogeneración. [27]

3. *Molienda más fina para mejorar aún más el rendimiento energético en la combustión:* Independientemente de la materia prima, en todos los casos se debe tener el tamaño de la partícula, la variación se encuentra precisamente en el tamaño óptimo para el proceso y que, dependiendo del tamaño deseado una u otra tecnología, puede consumir más energía para lograr la molienda antes de entrar al proceso de densificación. Las propiedades fisicoquímicas del pellet son influenciadas por una correcta molienda, por lo tanto se debe elegir la tecnología correcta.[28] Existen diferentes tecnologías para realizar la molienda, y en este caso se menciona las más comunes: Molino de corte (cutting mill), molino de impacto (impact mil) y molino de martillo (hammer mil).
4. Peletizado. Formación por compactación de los pellets cilíndricos: Las tecnologías de peletización comercial son de dos tipos:

- Sistemas de anillo plano (Flat type die)

El sistema Flat type die consiste en una base con orificios del diámetro del Pellet y un rodillo que cumple la función de generar la presión necesaria sobre la biomasa molida para que sea extruida por los orificios y se compacte con el tamaño del diámetro del orificio.

- Sistemas de anillo cilíndrico (Ring type die)

Las partículas de biomasa son introducidas en la maquina peletizadora, la cual contiene un anillo con varios orificios que tienen las medidas de longitud y diámetro del pellet. Estas partículas son acumuladas mediante un rodillo que hace la presión necesaria para compactarlos. Este proceso debido al rozamiento y compresión calientan las partículas de biomasa, por lo tanto, la humedad se reduce y la lignina que contiene la biomasa forestal se convierte en un excelente aglutinante, generando las fuerzas de cohesión necesarias para obtener un pellet.[14], [28], [29]

5. *Distribución en sacos o bien a granel:* La distribución en sacos, o en granel depende del tipo de cliente que se tenga, ya que puede ser un cliente residencial o industrial.

#### 4.3.3 Fuentes de biomasa aptas para peletización

No existe una clasificación definitiva de las especies forestales o herbáceas aptas para realizarle un proceso de peletización, estas especies se restringen con las normas

establecidas para peletizar, teniendo en cuenta los parámetros como su poder calorífico, densidad aparente, humedad y contenido de cenizas entre otros.

Según la norma UNE-EN ISO 17225-2:2014 [30] establecen las especificaciones de la fuente de biomasa para peletizar, tal como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2 Normas EN-plus para pellets

ENplus-A1	ENplus-A2	EN-B
Madera del fuste	Arboles enteros sin raíces	Forestal, plantaciones y otras maderas no usadas ni tratadas
	Madera del fuste	Residuos y subproductos de la industria maderera sin tratamientos químicos
	Residuos de tala	
Residuos de la industria maderera sin tratamientos químicos	Corteza	Madera reciclada sin tratamientos químicos
	Residuos y subproductos de la industria maderera sin tratamientos químicos	

Fuente: Adaptación; Manual para la certificación de pellets de madera para usos térmicos; European Pellet Council Association, c/o AEBIOM - European Biomass; 2013 [25]

El sistema de certificación de la calidad EN plus® se basa en el estándar internacional ISO 17225-2 la cual se refiere a los pellets de madera y el ISO 17225-6 para las fuentes de biomasa no leñosas [25] el primer estándar tiene 3 clases de certificación y de acuerdo a ellas se exige cierta materia prima.

Se han desarrollado varios estudios con los cuales utilizan diferentes tipos de especies forestales y herbáceas o plantaciones dendroenergéticas para peletizar. Entre ellas tenemos las siguientes:

Herbáceas:

- Arundo donax [31]–[33]
- Gynerium sagittatum [32], [33]
- Pennisetum purpureum [32], [33]
- Phyllostachys aurea [32], [33]
- Sorghum bicolor. [32], [33]
- Saccharum officinarum [32]
- Cynara cardunculus [34]
- Miscanthus [35]

- Heno [28]
- *Dactylis glomerata* [35]

#### Forestal

- *Tectona grandis* [32]
- *Phyllostachys aurea* [32]
- *Eucalyptus Camaldulensis* [36]
- *Fagus sylvatica* [37]
- Bambusoideae [38]
- *Populus nigra* [36]
- *Vitis vinífera* [36]
- *Pinus pinaster* [36]
- *Eucaliptus globulus labill* [39]

#### Residuos forestales

- *Elaeis guineensis* [32]
- *Cupressus lusitánica* [32]
- *Quercus pyrenaica* [40]

## 4.4 Meteonorm

### 4.4.1 Definición de Meteonorm.

Meteonorm es una combinación única de fuentes de datos confiables y herramientas de cálculo sofisticadas. Proporciona acceso a años típicos y series de tiempo históricas.

Meteonorm genera años típicos precisos y representativos para cualquier lugar de la tierra. Puede elegir entre más de 30 parámetros climáticos diferentes.

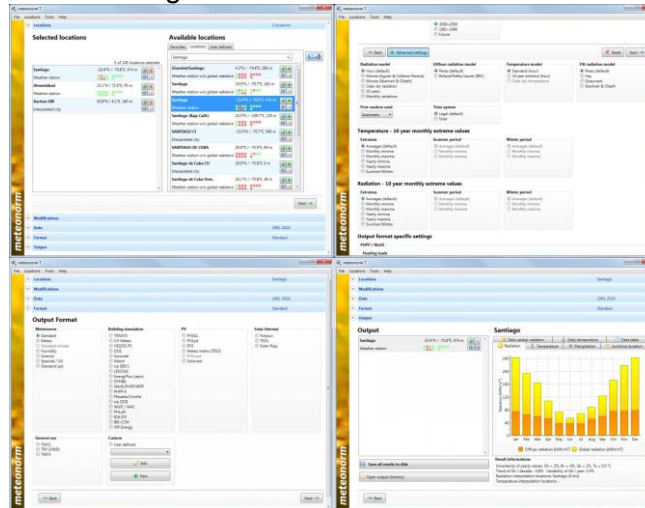
La base de datos consta de más de 8 000 estaciones meteorológicas, cinco satélites geoestacionarios y una climatología de aerosol calibrada globalmente. Sobre esta base, los sofisticados modelos de interpolación, basados en más de 30 años de experiencia, proporcionan resultados con alta precisión en todo el mundo.

Meteonorm incluye dos de los mejores modelos en el mercado para simulaciones confiables de grandes plantas fotovoltaicas o sistemas de gestión de energía y baterías. Puede modelar los efectos del calor urbano para apoyar el desarrollo de ciudades verdes. Contiene algoritmos para calcular años extremos, por ejemplo, para probar los límites de diseño. Incluso puede simular el cambio climático utilizando escenarios del IPCC [41].

## 4.4.2 Interfaz

La interfaz principal de Meteonorm se aprecia en la Figura 88.

Figura 8. Interfaz Meteonorm.



Fuente: Meteonorm.com

## 4.5 Tremarctos 3

### 4.5.1. Definición

TREMARCTOS-COLOMBIA es un sistema gratuito en línea que evalúa preliminarmente la vulnerabilidad sobre el ambiente que generan las obras de infraestructura y minería "screening" y provee recomendaciones sobre las eventuales compensaciones que un determinado proyecto deberá asumir [42].

TREMARCTOS-COLOMBIA está soportada en la cartografía oficial para el país, así como otras generadas para esta herramienta, como son polígonos de especies (amenazadas, endémicas y migratorias)], entre otras.

Niveles de consulta

#### A. Planeación

En este nivel de evaluación preliminar "ex ante", los administradores y promotores, podrán realizar un análisis de alternativas en línea con el fin de consultar los impactos probables de un proyecto de infraestructura sobre los siguientes elementos: la biodiversidad sensible (especies amenazadas, migratorias y endémicas), las áreas protegidas, ecosistemas naturales y aspectos culturales de relevancia (etnoterritorios y áreas arqueológicas), Paramos, Reservas Forestales de Ley 2; así mismo podrán analizar proyectos donde se muestre la vulnerabilidad y susceptibilidad del territorio frente al cambio climático. En este

nivel, los usuarios podrán seleccionar la cartografía temática que desean consultar y obtener un reporte con el listado de los elementos afectados.

#### B. Diseño de proyecto

En este nivel de consulta, el promotor ingresa su proyecto como una capa cartográfica (shape), o la dibuja, o sube las coordenadas; con unos requerimientos especificados por el administrador. El administrador realizará un análisis de vulnerabilidad tramo por tramo de ser necesario, donde se determinará la superficie de afectación de cada elemento y sugiere una serie de compensaciones ambientales que son entregadas al usuario en forma de reporte.

#### 4.5.2. Interfaz

La figura 9 presenta la interfaz principal de la herramienta Tremarctos 3.

Figura 9. Interfaz Tremarctos 3.



Fuente: Adaptado de [43]

### 4.6 HOMER energy

#### 4.6.1 Definición de HOMER

Hybrid Optimization of Multiple Electric Renewables, HOMER, por sus siglas en inglés, es un software que permite la evaluación de sistemas de potencia como micro-redes aislada o conectada a la red eléctrica.

Al desarrollar un dimensionamiento se deben tener presente los componentes que se incluirán en el sistema, el tamaño de estos mismos, la variedad de posibles combinaciones de componentes por tamaño, costo, rendimiento, etc. lo cual genera una gran dificultad en la toma de decisiones. Los algoritmos de optimización y análisis de sensibilidad de HOMER facilitan la evaluación de muchas configuraciones de sistema posibles.[44]

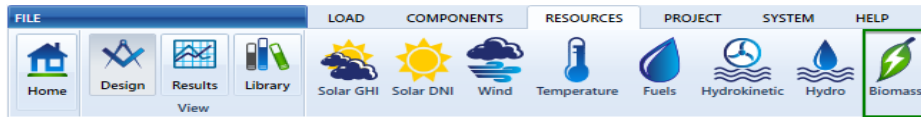


#### 4.6.2 Módulo de Biomasa

En HOMER existen módulos para aplicaciones específicas, en este caso se identifica que existe un módulo de Biomasa, el cual permite modelar combustibles (ya sea sólidos, líquidos o gaseosos) y los generadores que pueden usar estos combustibles a partir de valores de entrada del usuario. El modulo permite utilizar diferentes tipos de materia prima de biomasa.

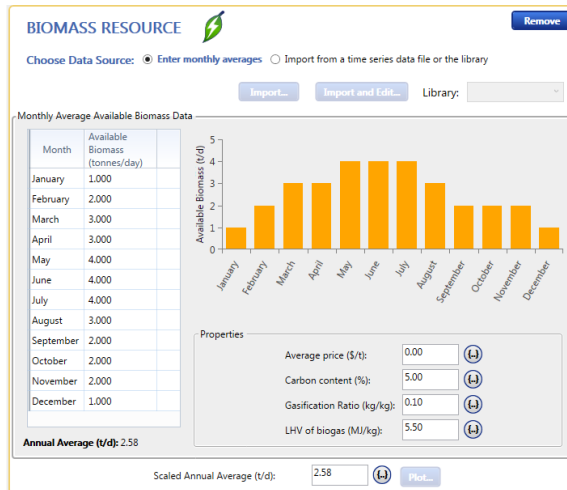
Desde el menú de Recursos de biomasa se puede seleccionar la disponibilidad y el costo de la materia prima de biomasa

Figura 10 Panel de control Homer PRO



Fuente. Homer, Modulo de Biomasa, Disponible en: <https://www.homerenergy.com/products/pro/modules/biomass.html>, consultado 20 febrero 2018. [45]

Figura 11 Recurso de biomasa disponible por toneladas.



Fuente. Homer, Modulo de Biomasa, Disponible en: <https://www.homerenergy.com/products/pro/modules/biomass.html>, consultado 20 febrero 2018. [45]

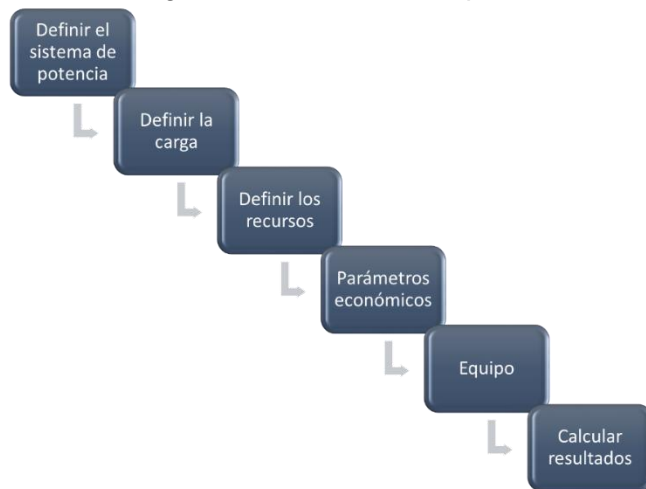
Para realizar el respectivo diseño en HOMER, es necesario tener una curva de disponibilidad del recurso de biomasa durante todo un año, adicional unas propiedades como el precio promedio de la biomasa (\$/t), el porcentaje de carbón que contiene la

biomasa (%), la tasa de gasificación (kg/kg) y el PCI (poder calorífico inferior expresado en MJ/kg)

#### 4.6.3 Dimensionamiento en HOMER

HOMER permite dimensionar una microred con diferentes tipos de recursos y procesos de conversión de energía para abastecer una demanda determinada, a continuación, se mostrará el procedimiento para dimensionar en Homer

Figura 12 Procedimiento para dimensionar en HOMER



*Definir el sistema de potencia:* Se debe definir el diseño del sistema de alimentación eligiendo entre diferentes componentes tales como generadores, bancos de baterías, paneles fotovoltaicos, turbinas eólicas y otros componentes del sistema de alimentación

*Definir la carga:* Es necesario para HOMER determinar la carga para que HOMER calcule el consumo diario promedio del sistema en función de sus sistemas de potencia. HOMER ofrece cuatro métodos para especificar un perfil de carga: Configurar la carga eléctrica, importando una carga desde un archivo externo, construir una carga sintética usando datos de medición y elegir una carga de la biblioteca

*Definir los recursos:* En HOMER un recurso es cualquier variable ambiental o externa a partir de la cual el sistema puede generar energía eléctrica.

Existen diferentes recursos que pueden ser asociados en HOMER y la Tabla 3 muestra los recursos disponibles en el Software HOMER:

Tabla 3 Recursos iniciales de HOMER

Recursos	
Recursos Solar	Irradiación global horizontal
	Irradiación normal directa
Recurso de temperatura	
Recurso de aire	
Recurso hídrico	
Recurso de combustible	
Recurso de biomasa	

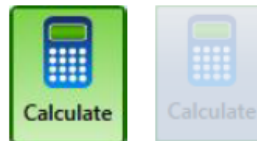
Fuente. Adaptado de HOMER Pro Version 3.7 User Manual; HOMER Energy LLC; 2016[44]

*Parametros economicos:* HOMER permite agregar factores economicos del proyecto tales como la tasa de interes anual, la vida útil del proyecto, la vida útil de los equipos, costo del capital fijo del sistema, costo fijo de operación y mantenimiento.

*Equipo:* Es parte del sistema de potencia que se desea analizar. En homer existen diferentes equipos o componentes que se pueden seleccionar, tales como: un generador, un panel fotovoltaico, una turbina, una PCH, un tanque de hidrogeno, un controlador de carga electrica, entre otros. En el sistema de potencia se puede agregar mas de un equipo para realizar las diferentes comparaciones.

*Calcular resultados:* HOMER calculara las diferentes combinaciones posibles en función de las entradas proporcionadas y simulara el sistema de potencia. En HOMER aparece en todas las ventanas el botón de Calcular, el cual cambiara a color verde cuando todo el diseño actual contenga todos los componentes y recursos necesarios, de lo contrario el botón aparecera de color gris.

Figura 13 Boton para calcular el diseño de la Microred en HOMER



Fuente. HOMER Pro Versión 3.7 User Manual; HOMER Energy LLC; 2016 [44]

## 4.7. MARCO LEGAL

Leyes y decretos referentes a la energización del territorio colombiano.

Tabla 4. Leyes y decretos referentes a la energización del territorio colombiano

Leyes y decretos	Nombre o asunto	Descripción
Decreto 1073 de 2015	Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Administrativo de Minas y Energía.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Se compila la normativa existente sobre las facultades reglamentarias conferidas a las diferentes entidades para la ejecución de las leyes.</li> <li>Se definen los objetos y funciones de las diferentes entidades encargadas del sector minero energético</li> </ul>
Ley 1283 de 2009	Por la cual se modifican y adicionan el artículo 14 de la Ley 756 de 2002, que a su vez modifica el literal a) del artículo 15 y los artículos 30 y 45 de la Ley 141 de 1994	<ul style="list-style-type: none"> <li>Se determina la utilización de las participaciones de las regalías por departamento y municipio.</li> </ul>
Ley 1117 de 2006	Por la cual se expiden normas sobre normalización de redes eléctricas y de subsidios para estratos 1 y 2	<ul style="list-style-type: none"> <li>Establece que el MME definirá las condiciones y porcentajes bajo los cuales se realizará la asignación de subsidios para los estratos 1 y 2</li> </ul>
Decreto 257 de 2004	Por la cual se modifica la estructura del Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas, IPSE	<ul style="list-style-type: none"> <li>Se establece el alcance del IPSE a las zonas no interconectadas del país.</li> <li>Se determina el objeto y las funciones del IPSE</li> </ul>
Decreto 3652 de 2003	Por el cual se reglamenta el Fondo de Apoyo Financiero para la Energización de las Zonas Rurales Interconectadas, FAER.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Se reglamenta el objeto y funciones del FAER</li> </ul>
Ley 756 de 2002	Por la cual se modifica la Ley 141 de 1994, se establecen criterios de distribución y se dictan otras disposiciones	<ul style="list-style-type: none"> <li>Modifica la Ley 141 de 1994.</li> <li>Se definen los criterios de distribución del Fondo Nacional de Regalías</li> </ul>
Ley 788 de 2002	Por la cual se expiden normas en materia tributaria y penal del orden	<ul style="list-style-type: none"> <li>Se crea el Fondo de Apoyo a la Electrificación</li> </ul>

	nacional y territorial; y se dictan otras disposiciones	de Zonas Rurales Interconectadas
Ley 141 de 1994	Por la cual se crean el Fondo Nacional de Regalías, la Comisión Nacional de Regalías, se regula el derecho del Estado a percibir regalías por la explotación de recursos naturales no renovables se establecen las reglas para su liquidación y distribución y se dictan otras disposiciones	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modificadas por la Ley 756 de 2002</li> <li>• Se crea el Fondo Nacional de Regalías (FNR)</li> </ul>
Ley 143 de 1994	Por la cual se establece el régimen para la generación, interconexión, transmisión, distribución y comercialización de electricidad en el territorio nacional, se conceden unas autorizaciones y se dictan otras disposiciones en materia energética	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ley Eléctrica</li> <li>• Reestructuración del sector Eléctrico</li> </ul>

Leyes y decretos referentes a la generación con fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER), generación distribuida, autogeneración y redes inteligentes.

Tabla 5. Leyes y decretos referente a la generación con FNCER, generación distribuida, autogeneración y redes inteligentes.

Leyes y decretos	Nombre o asunto	Descripción
Decreto 348 de 2017	Por el cual se adiciona el Decreto 1073 de 2015, en lo que respecta al establecimiento de los lineamientos de política pública en materia de gestión eficiente de la energía y entrega de excedentes de autogeneración a pequeña escala	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se adiciona a la Sección 4A al Capítulo 2 del Título 3 de la Parte 2 del Libro 2 del Decreto 1073 de 2015</li> <li>• Se establecen los lineamientos de política energética en materia de gestión eficiente de la energía y entrega de excedentes de autogeneración a pequeña escala.</li> </ul>
Decreto 2469 de 2014	Por el cual se establecen los lineamientos de política energética en materia de entrega de excedentes de autogeneración.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se establecen los parámetros generales para el establecimiento de la venta de excedentes de los autogeneradores a gran escala, los contratos de respaldo y los límites mínimos de autogeneración</li> </ul>

Ley 1715 de 2014	Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se establecen los mecanismos de incentivos para la promoción de la generación a partir de fuentes renovables no convencionales de energía</li> </ul>
Decreto 3683 de 2003	Por el cual se reglamenta la Ley 697 de 2001 y se crea una Comisión Intersectorial	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se crea la Comisión Intersectorial para el Uso Racional y Eficiente de Energía (CIURE), con el propósito de articular las instituciones relacionadas con las políticas de URE para facilitar la ejecución de dichas políticas.</li> <li>• La CIURE debe realizar funciones asesoría, consultoría y apoyo de al MME en actividades relacionadas a la políticas URE.</li> </ul>
Ley 788 de 2002	Por la cual se expiden normas en materia tributaria y penal del orden nacional y territorial; y se dictan otras disposiciones	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Establece incentivos tributarios a determinados proyectos, actividades o bienes, que generen o estén destinados a generar reducciones certificadas</li> <li>• Exención de renta por venta de energía eléctrica generada a partir de biomasa, viento y residuos agrícolas.</li> <li>• Exención del IVA a la importación de equipos y maquinaria destinados a generar reducciones certificadas.</li> </ul>
Ley 697 de 2001	Mediante la cual se fomenta el uso racional y eficiente de la energía, se promueve la utilización de energías	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le asigna al Uso Racional y Eficiente de Energía (URE) un carácter de</li> </ul>

	alternativas y se dictan otras disposiciones.	<p>interés general y de conveniencia nacional.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Promueve la utilización de energías alternativas</li> <li>• Crea el Programa Uso Racional y Eficiente de la Energía y demás Formas de Energía No Convencionales (PROURE) estableciendo como entidad responsable de éste al MME</li> <li>• Establece que el MME formulará los lineamientos de las políticas para el fomento y la promoción de las fuentes no convencionales de energía, con prelación en las zonas no interconectadas.</li> </ul>
Ley 629 de 2000	Por medio de la cual se aprueba el "Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático", hecho en Kyoto el 11 de diciembre de 1997.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se aprueba el protocolo de Kyoto</li> </ul>
Ley 142 de 1994	Por la cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se crea la División de Ahorro, Conservación y Uso Eficiente de la Energía.</li> </ul>
Ley 164 de 1994	Por medio de la cual se aprueba la "Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático" hecha en Nueva York el 9 de mayo de 1992.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se aprueba la Convención Marco de Naciones Unidas</li> </ul>

Resoluciones de la Comisión de Regulación de Energía y Gas, el Ministerio de Minas y Energía y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible referentes al fomento de la autogeneración, generación distribuida y FNCER.

Tabla 6. Resoluciones referentes al fomento de la autogeneración, generación distribuida y FNCER.

Resolución	Nombre o asunto	Descripción
CREG 030 de 2018	Por la cual se regulan las actividades de autogeneración a	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se regulan aspectos operativos y comerciales</li> </ul>

	pequeña escala y de generación distribuida en el Sistema Interconectado Nacional	para permitir la integración de la autogeneración a pequeña escala y de la generación distribuida al Sistema Interconectado Nacional, SIN.
CREG 001 de 2018	Por la cual se ordena hacer público el proyecto de resolución “Por la cual se regulan las actividades de generación distribuida y autogeneración a pequeña y gran escala en las Zonas No Interconectadas”.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se hace público el proyecto de resolución “Por la cual se regulan las actividades de generación distribuida y autogeneración a pequeña y gran escala en las Zonas No Interconectadas”.</li> </ul>
CREG 121 de 2017	Por la cual se ordena hacer público el proyecto de resolución “Por la cual se regulan las actividades de autogeneración a pequeña escala y de generación distribuida en el sistema interconectado nacional”	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se hace público el proyecto de resolución por la cual se regulan las actividades de autogeneración a pequeña escala y de generación distribuida en el sistema interconectado nacional</li> </ul>
MADS 1283 de 2016	Por la cual se establece el procedimiento y requisitos para la expedición de la certificación de beneficio ambiental por nuevas inversiones en proyectos de fuentes no convencionales de energías renovables- FNCER y gestión eficiente de la energía, para obtener los beneficios tributarios de que tratan los artículos 11,12, 13 y 14 de la Ley 1715 de 2014 y se adoptan otras determinaciones	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Establece el procedimiento y los requisitos para la expedición de la Certificación de Beneficio Ambiental por nuevas inversiones en proyectos de Fuentes No Convencionales de Energías Renovables y gestión eficiente de la energía, con la cual se podrá acceder a los beneficios tributarios de que tratan los artículos 11, 12, 13 y 14 de la Ley 1715 de 2014.</li> </ul>
MME 41286 de 2016	Por la cual se adopta el Plan de Acción Indicativo 2017-2022 para el desarrollo del Programa de Uso Racional y Eficiente de la Energía, PROURE, que define objetivos y metas indicativas de eficiencia	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se adopta el Plan de Acción Indicativo –PAI 2017-2020 realizado por la UPME.</li> </ul>



	energética, acciones y medidas sectoriales y estrategias base para el cumplimiento de metas y se adoptan otras disposiciones al respecto	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se definen los objetivos específicos del PAI para el desarrollo del PROURE</li> <li>• Se definen las metas indicativas para el PROURE</li> </ul>
CREG 024 de 2015	Por la cual se regula la actividad de autogeneración a gran escala en el sistema interconectado nacional (SIN) y se dictan otras disposiciones.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Regula la actividad de autogeneración a gran escala en el SIN</li> <li>• Define que hasta que la UPME no determine el límite el MME no emita la política aplicable para autogeneración, todo autogenerador será considerado como de gran escala.</li> </ul>
CREG 175 de 2014	Por la cual se ordena hacer público un proyecto de resolución “Por la que se reglamenta la actividad de autogeneración a gran escala en el sistema interconectado nacional (SIN)”	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se hace público el proyecto de resolución por el que se reglamenta la actividad de autogeneración a gran escala en el sistema interconectado nacional (SIN)”</li> </ul>
MME 180919 de 2010	Por la cual se adopta el Plan de Acción Indicativo 2010-2015 para desarrollar el Programa de Uso Racional y Eficiente de la Energía y demás Formas de Energía No Convencionales, PROURE, se definen sus objetivos, subprogramas y se adoptan otras disposiciones al respecto.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se adopta el Plan de Acción Indicativo 2010-2015 para desarrollar el Programa de Uso Racional y Eficiente de la Energía y demás Formas de Energía No Convencionales, PROURE</li> </ul>

## 5. ESTADO DEL ARTE

### 5.1 Dendroenergía

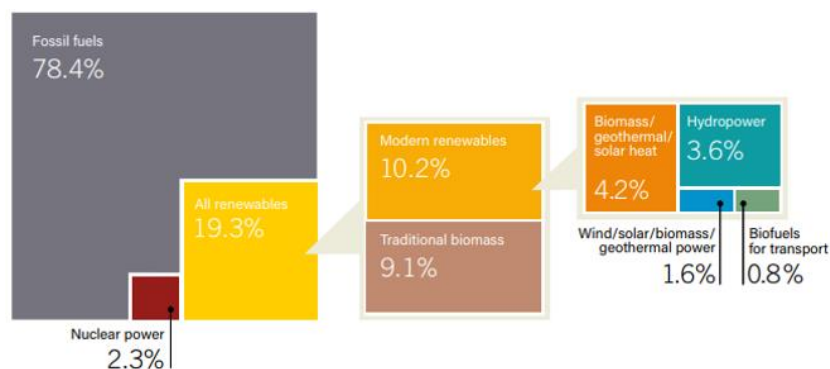
#### 5.1.1 Porcentaje de participación de la Biomasa (dendroenergía) en la matriz energética del mundo

La biomasa aproximadamente representa un 33% del consumo de energía final en Africa, Asia y Latinoamérica, siendo la principal fuente de energía en los hogares de 2.000 millones de personas.[14]

Según el Consejo mundial de energía (WEC por sus siglas en inglés), en el año 2008, la contribución de la biomasa (incluyendo usos tradicionales no eficientes) a nivel mundial alcanzaba los 1.194 Mtep de energía primaria, lo que representaba un 10% del total mundial; en 2011 esta contribución era de 1277 Mtep de energía primaria, representando un 6% del total mundial y la WEC realizó un calculo estimado de la contribución de la biomasa a nivel mundial para 2020 en 1323 Mtep, que representará un 6% del total mundial. [20]

En el 2014 el suministro total de energía primaria fue de 13,700 Mtep de las cuales el 13,8% correspondían a las energías renovables, con una participación de 10,1% de la biomasa. De acuerdo al reporte global del REN21 se puede observar la siguiente participación de la biomasa en el mundo, en el 2015 el consumo final de energía del mundo estaba distribuido de la siguiente forma:

Figura 14 Participación estimada en energía renovable de la producción mundial de electricidad, a fines del 2016

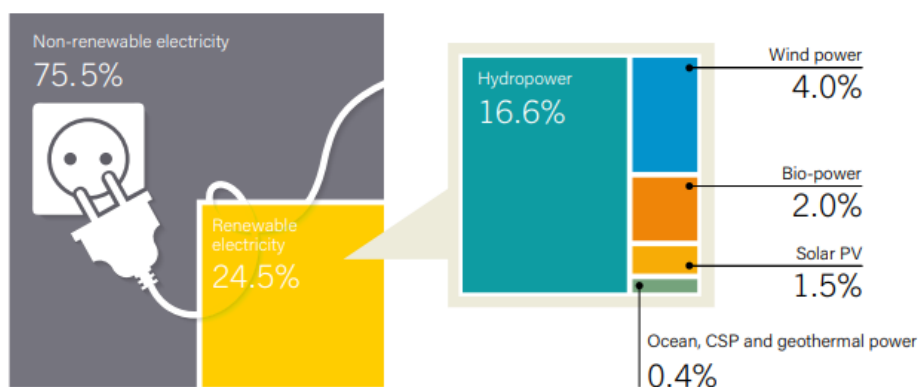


Fuente: Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. Renewables 2016 global status report. Disponible en: [http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/06/GSR\\_2016\\_KeyFindings1.pdf](http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/06/GSR_2016_KeyFindings1.pdf). [19]

Se observa que el 9.1% de la participación energética corresponde a biomasa tradicional, adicionalmente dentro del 10,2% correspondiente a fuentes de energía renovables modernas también se cuenta con una participación modesta de la biomasa.

La figura 15 presenta la participación estimada de las energías renovables en la generación mundial de energía eléctrica durante el último trimestre del 2016

Figura 15 Participación estimada de las energías renovables en la producción mundial de electricidad a finales del 2016



Fuente: Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. Renewables 2016 global status report. Disponible en: [http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/06/GSR\\_2016\\_KeyFindings1.pdf](http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/06/GSR_2016_KeyFindings1.pdf). [19]

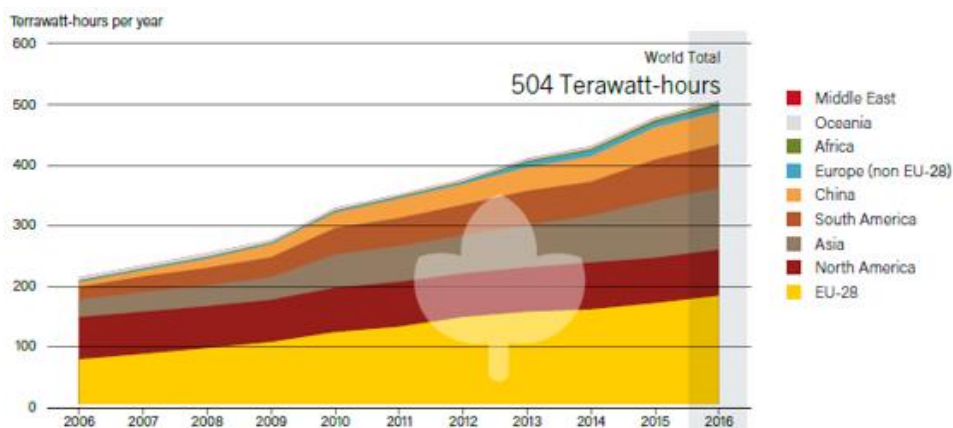
En el cual se destaca que la Bioenergía tiene un 2% de participación. Se evidencia que el aporte a la energía eléctrica de la biomasa es mucho menor a su consumo total, esto se debe a que la mayoría de la biomasa consumida en el mundo es usada para la generación de calor para cocción o acondicionamiento de los hogares.

### 5.1.2 Principales países generadores de dendroenergía en el ámbito internacional

Aun no existe un dato exacto de la cantidad de plantaciones forestales y herbáceas para uso dendroenergético, ya que no ha sido posible diferenciar claramente entre los cultivos forestales y los rebrotes naturales, por lo cual la mejor manera de realizar un estimado es identificando los proyectos que se desarrollan en los diferentes países.

De acuerdo al informe del estatus global de las energías renovables del 2017 realizado por el REN21 puede verse la generación mundial de bioenergía desde el 2006 hasta el 2016, destacando las regiones Unión Europea (EU-28), Norte América y Asia como las de mayor generación.

Figura 16 Generación mundial de Bio-energía



Fuente: Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. Renewables 2016 global status report. Disponible en: [http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/06/GSR\\_2016\\_KeyFindings1.pdf](http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/06/GSR_2016_KeyFindings1.pdf). [19]

Según EROSKI consumer “En Europa, el combustible de madera es la fuente principal de energía para calefacción de 80,6 millones de personas como mínimo y en América del Norte, para 7,9 millones de personas. Las industrias de los países desarrollados también la utilizan en actividades muy diversas. Estados Unidos, Canadá, Suecia y Finlandia se encuentran entre los países que más utilizan la dendroenergía en sus industrias.”[46]

La mayor parte de la biomasa producida en la Unión Europea es utilizada para procesos de calefacción en instalaciones domésticas individuales o colectivas [6], siendo los siguientes países los mayores productores y usuarios de energía generada a partir de la biomasa en el año 2016: Reino Unido con 19.589 TWh (solo plantas eléctricas, el dato para plantas CHP (plantas de calor y potencia eléctrica combinadas, por sus siglas en inglés) es cero para esta nación), Alemania con 10.794 TWh (incluyendo plantas CHP), Finlandia con 10.603 TWh (incluyendo plantas CHP), Suiza con 9750 TWh (incluyendo plantas CHP), Polonia con 6913 TWh (incluyendo plantas CHP), Italia con 4.125 TWh (incluyendo plantas CHP) y España con 4.048 TWh (incluyendo plantas CHP). [47]

Según la FAO “En los países en desarrollo, el uso de la dendroenergía se divide en leña, 90 %; licor negro, 6 %; carbón vegetal, 4 %. Los hogares son sus principales consumidores, especialmente los rurales, con la industria y el sector de los servicios que consumen menos.” [14]

En el año 2012 Argentina creó el Proyecto para la promoción de la energía derivada de biomasa, el cual es una iniciativa de los Ministerios de Agricultura y de Planificación a través de la Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca y la Secretaría de Energía, y cuenta con la asistencia técnica y administrativa de la FAO.[14] Con el cual se incentiva la producción de dendroenergía térmica y eléctrica.

Argentina se ha destacado por su potencial de desarrollo en dendroenergía. El país cuenta con condiciones agroecológicas y ventajas comparativas y competitivas en sus sectores agro y foresto-industrial, que lo convierten en un caso a estudiar dentro del campo de la energía renovable.[14]

### *5.1.3 Principales generadores de dendroenergía en el ámbito nacional*

Según el Ren21 para el 2014 aproximadamente el 13% de la población colombiana utiliza la biomasa leñosa para cocinar. [48]

En 1999 la UPME desarrollo la formulación de un proyecto piloto dendroenergético, en el cual indica que para abastecer la demanda energética en las zonas no interconectadas (ZNI) se debe hacer uso del energético más abundante en estas zonas el cual es la biomasa forestal.[49]

También indica que para abastecer una central de 25 MW de potencia se debe manejar y aprovechar un área de 1000 hectáreas de cultivo forestal. [49]

Actualmente en Colombia hay pocos proyectos de aprovechamiento dendroenergético, el IPSE desarrolló un centro de innovación tecnológica con énfasis en biomasa ubicado en Nueva Pampa en el año 2008, el cual es un sistema de generación de energía eléctrica que utiliza la biomasa leñosa residual depositada en las playas cercanas al corregimiento Nueva Pampa (Antioquia). Es el primer proyecto dendroenergético desarrollado en Colombia, el cual cuenta con un gasificador de lecho fijo.[50] Según el periódico El espectador, “La madera que dejó de generar energía”, el proyecto del IPSE actualmente no está generando energía, ya que como lo dice acorde al IPSE — “La planta de generación de energía a partir de biomasa se pensó como un prototipo de investigación que buscaba estudiar una alternativa para solucionar la ausencia de energía en un lugar desconectado de la red eléctrica nacional, pero nunca fue pensado como un sistema de energía regular” [51]

Según el Balance energético colombiano (BECO) [49], la leña como energético en el 2016 presentó una oferta interna bruta de 7759 kTon de las cuales el 100% fue por extracción primaria, producción o transformación, el consumo final fue de 7598 kTon, de los cuales el 89,06% corresponde al sector residencial, 0,24% al sector industrial y 10,71% al sector agropecuario. Resaltando que del 89,06% del sector residencial, el 93% es consumo en el sector rural.[52]

De acuerdo a un estudio desarrollado por la Universidad Nacional de Colombia junto con el Ministerio de ciencia e innovación de España (CIEMAT), mediante una herramienta llamada ModerGis se determinó el potencial dendroenergético para Colombia en 4400 MW con 6.8 millones de hectáreas factibles para el uso de la dendroenergía.[53]

## 5.2 Pellets

### 5.2.1 Peletización de biomasa en el ámbito internacional

En los últimos años, la industria de producción de biomasa densificada (y en particular la de fabricación de pellets) ha experimentado un gran auge a escala mundial como consecuencia, entre otras, del gran desarrollo de equipos de combustión que utilizan específicamente este combustible. [54]

La producción de pellets en Europa se desarrolló después de la crisis energética del petróleo en 1973 y 1979 y en Norte América debido a la disponibilidad del recurso y el crecimiento de la demanda en Europa, por tales motivos son actualmente las regiones con mayor avance en tecnología de producción de pellets.[55]

Según el REN21 el mercado global de pellets de madera para uso industrial y calefacción se ha expandido año tras año, teniendo un crecimiento constante de 1 millón de toneladas por año durante un periodo de 10 años. En Alemania, Suecia e Italia se consumieron alrededor de 14 millones de toneladas para los mercados de calefacción. [19] Un valor similar alcanza la demanda de pellets en el sector industrial para el año 2016 con 13,8 millones de toneladas [19]

Existen ejemplos actuales de la transición de las centrales eléctricas de gran escala de carbón a centrales eléctricas de pellets, Dinamarca y el Reino Unido los casos más destacables. Por ejemplo, en Dinamarca una unidad de 360 MW que era alimentada por carbón, paso a ser alimentada por pellets, suministrando calor a más de 100 000 hogares y electricidad a 230 000 viviendas [56]. Por el otro lado, en el Reino Unido, la planta energética más contaminante que suministra aproximadamente el 10% de la energía eléctrica en Inglaterra pertenece a la empresa Drax [57]. recibió la aprobación de la Comisión Europea para convertir la tercera unidad de su planta de carbón en pellets de madera y de esta forma contribuir con la producción de energías limpias y la disminución de la contaminación con gases de efecto invernadero. [57]

Siendo el tercer país con mayor producción de pellets en el mundo, Canadá cuenta con un total de 39 plantas productoras a gran escala, la planta Pinnacle Pellet B. L. posee una capacidad de 320 Kton/año cerca del 10% del total instalado nacional equivalente a 3262 Kton/año. En este país, los pellets son generalmente empleados en comunidades remotas y con fines de calefacción residencial. [58], [59]

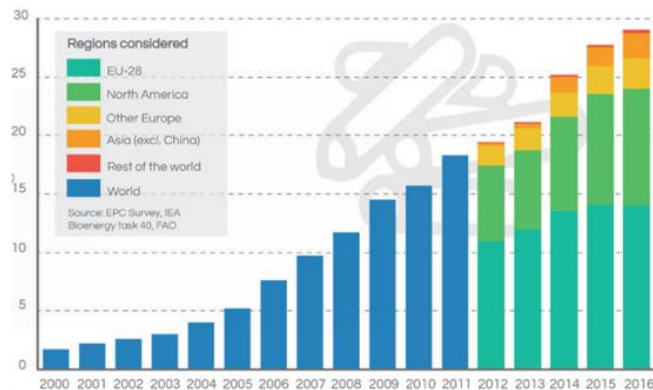
Japón importa 300 000 toneladas de pellets por año, de los cuales el 70% son de Canadá. [60], [61]

Estados Unidos es el mayor exportador de pellets de madera. En 2016, los fabricantes estadounidenses produjeron aproximadamente 6,9 millones de toneladas de pellets de madera y exportaron 4,8 millones de toneladas[62]

Letonia es el mayor exportador de Europa, con 1,9 millones de toneladas métricas, principalmente a Dinamarca, y el Reino Unido.[19]

En el reporte anual de AVEBIOM (Asociación de Biomasa Española) nos indica el crecimiento de la producción anual de pellets en el mundo desde el año 2000 hasta el año 2016 en millones de toneladas métricas.

Figura 17 Producción de pellets de madera en el mundo (Desde el 2000 hasta el 2016, en millones de toneladas)



Fuente. Informe anual AEBIOM 2017 [63]

En el 2016, 28,9 millones de toneladas de pellets fueron producidas globalmente, en el cual la Unión Europea-28 se cataloga como la región líder mundial, pero en otras regiones se está generando un impacto, principalmente en Asia donde se evidencia que está en auge de crecimiento tanto en producción como en consumo de pellets. [63]

En Latinoamérica el principal productor de pellets es Brasil, donde son producidos principalmente a partir de residuos de madera. En Brasil, la principal fuente de madera residual es la industria de la madera, que contribuye al 91% de todos los residuos generados.[64]

Actualmente hay 13 plantas de pellets en Brasil, las cuales producen 75 000 toneladas por año.[65]

En Argentina genera una gran cantidad de alrededor de 3,4 millones de m<sup>3</sup> de residuos de madera por año. Sin embargo, en 2015 Argentina solo produjo 11,000 toneladas de pellets de madera, de los cuales aproximadamente la mitad se exportó [66]

En el 2015, las compañías chilenas produjeron 30 000 toneladas de pellets destinado principalmente al mercado nacional. [66] Se estima una producción anual de pellets en Chile de 100 000 toneladas. [66]

En México la producción de pellets es más baja, con 4000 toneladas de pellets por año, de los cuales 2500 toneladas son para exportación. [64]

### 5.2.2 Usos finales de los pellets de biomasa en el ámbito internacional

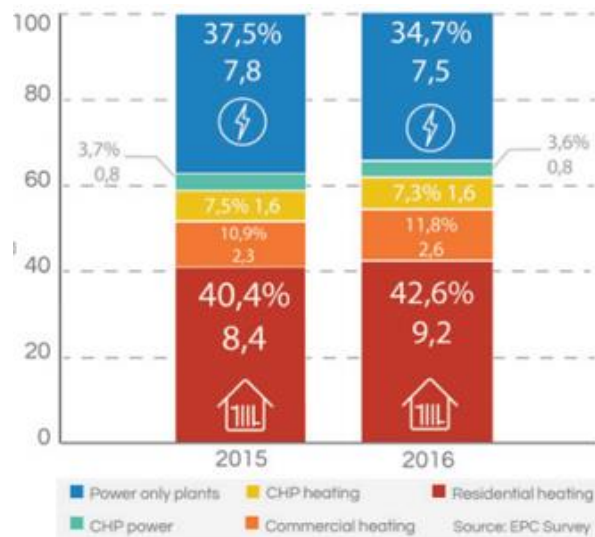
El uso final que se le da a los pellets de biomasa es para generar calor o electricidad. El sector que normalmente utiliza los pellets para generar calor es el residencial, el cual tiene actualmente estufas de pellets. El uso de los pellets para generar electricidad.

En la Unión Europea se consumieron 21,6 millones de toneladas de pellets en el año 2015, los cuales fueron destinados un 61,7% para producción de calor y el restante 38,3% para la producción de energía eléctrica. Respecto a la producción de calor, en la Unión Europea se tienen 3 mercados que consumen pellets, con una participación del 42,6% el sector residencial, un 11,8% el sector de calor comercial, y un 7,3 % en generación CHP. [63]

El mercado de calderas de pellets de mediana escala ha experimentado un crecimiento más constante recientemente que el mercado de los sistemas domésticos de calefacción de pellets. Se pueden observar tasas de crecimiento particularmente altas en Europa del Este, especialmente en Polonia.

En la siguiente grafica podemos observar el comparativo entre el 2015 al 2016 sobre el consumo de pellets en la Unión Europea

Figura 18 Consumo por sector de pellets de madera en la Unión Europea



Fuente. Informe anual AEBIOM 2017 [63]

En Brasil el consumo se desarrolla lentamente, gran parte del consumo ocurre a pequeña escala, relacionado con la necesidad de energía térmica en hoteles, parques acuáticos



entre otros. Estas aplicaciones consumen aproximadamente el 95% de la producción total nacional de pellets en Brasil. [65]

### 5.2.3 Estándares de calidad para vender pellets de biomasa en el mercado europeo

Para realizar venta de pellets para calefacción en el mercado europeo, se deben tener ciertas consideraciones de acuerdo con las normas ISO 17225-2 y 17225-6 para pellets leñosos y mixtos, respectivamente las cuales establecen unos criterios de clasificación de estos pellets, (hay que aclarar que estas normas no se certifican); en cambio, en esta región no existen normas aplicables a pellets industriales.

Tabla 7 Clases de calidad de Pellets

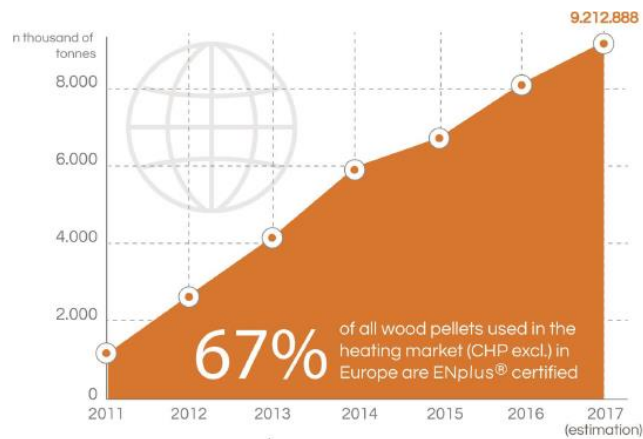
ENplus-A1	ENplus-A2	EN-B
Madera del fuste	Arboles enteros sin raíces	Forestal, plantaciones y otras maderas no usadas ni tratadas
	Madera del fuste	Residuos y subproductos de la industria maderera sin tratamientos químicos
	Residuos de tala	
Residuos de la industria maderera sin tratamientos químicos	Corteza	Madera reciclada sin tratamientos químicos
	Residuos y subproductos de la industria maderera sin tratamientos químicos	

Fuente. Adaptado del Manual para la certificación de pellets de madera para usos térmicos [25]

EN plus® fue creado inicialmente por la asociación alemana de comercio de pellets, DEPV, en 2010. A partir de 2011, el Consejo Europeo de Pellets (EPC) actualizó el esquema y comenzó a implementarlo en el resto de Europa.

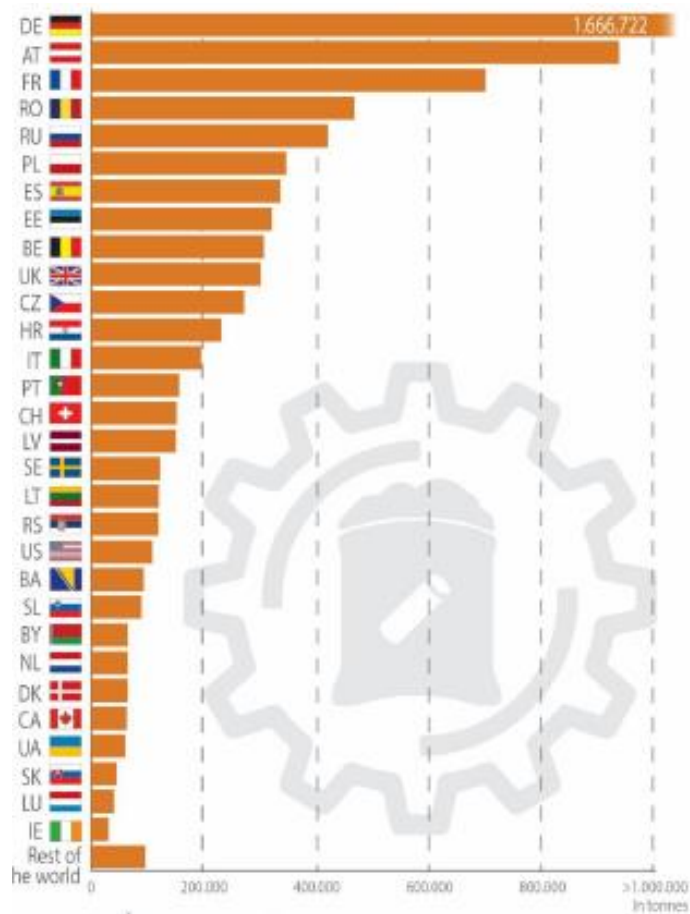
En el 2016, Alemania mantuvo el liderazgo de certificación de pellets, con una cantidad de 1,7 millones de toneladas, seguido de Austria, Francia y Romania

Figura 19 Producción mundial de pellets certificados ENplus (Desde el 2011 hasta el 2017, en miles de toneladas)



Fuente. ENplus Certification Statistical Overview 2017 [67]

Figura 20 Volumen de pellets de madera ENplus certificados por país (2016, en toneladas)



Fuente. ENplus Certification Statistical Overview 2017 [67]

## 5.3 Sustitución de cultivos de uso ilícito

### 5.3.1 Proceso de sustitución de cultivos de uso ilícito en el ámbito internacional

De acuerdo a J. Windle (2016), realiza un análisis comparando a siete países que combatieron los cultivos ilícitos, entre los cuales se encuentran: China, Irán, Turquía, Tailandia, Paquistán, Vietnam y Laosy determina los 5 factores claves que explican la disminución de los cultivos ilícitos:

1. Los gobiernos asumieron la reducción de los cultivos como una prioridad
2. Los Estados establecieron una fuerte presencia en las áreas de producción de cultivos ilícitos
3. Los estados brindaron incentivos para que los cultivadores abandonaran los cultivos ilícitos, a través de beneficios específicos
4. Los Estados tuvieron la capacidad de monitorear los cultivos ilícitos
5. Todas las intervenciones fueron acompañadas por medidas de fuerza

Los procesos de sustitución de cultivos ilícitos se dan principalmente por dos vías: la erradicación forzosa por parte del Estado, o la sustitución voluntaria mediante acuerdos entre el Estado y los cultivadores.[68]

En Vietnam, por ejemplo, a finales de los años 90 y comienzos del 2000, se desarrolló una política de erradicación forzosa de cultivos de opio,[69] no obstante, estas políticas solo pueden ser exitosas si el Estado tiene autoridad sobre la mayoría de las zonas de cultivos ilícitos.

Tailandia por otra parte utilizó la combinación de las dos estrategias de sustitución anteriormente mencionadas, la erradicación forzosa y sustitución voluntaria. Se desarrolló una encuesta con los cultivadores de opio, y encontraron que ellos dejarían de cultivar opio a cambio de ingresos alternativos.[70] Según Windle *“El éxito de Tailandia se reduce al establecimiento de la autoridad estatal en áreas anteriormente aisladas y la extensión de los incentivos a los agricultores, seguida de la creación de un entorno de alto riesgo para el cultivo y la producción de drogas ilícitas.”*

En Bolivia actualmente realizan procesos de erradicación forzosa, acorde al informe final del 2017 realizado por la Fuerza especial de lucha contra el narcotráfico en Bolivia, 7236 hectáreas de cultivo de coca fueron erradicadas. [71]

### 5.3.2 Proceso de sustitución de cultivos de uso ilícito en el ámbito nacional

El cultivo de coca en Colombia está ligado a una mala distribución en la tierra, ya que se encuentra concentrada en pocas manos y muchas veces se obtiene mediante violencia y

coerción. Colombia es uno de los países más desiguales en términos económicos en el mundo y el más desigual de Latinoamérica con un Gini de 0,6, y esto se debe a una débil gobernabilidad del Estado. Existen personas que viven en zonas donde la presencia del estado es muy débil y no se puede distinguir fácilmente entre lo legal y lo ilegal, por lo tanto, existe una gran problemática humanitaria en la cual se encuentran muchos campesinos los cuales son obligados a trabajar la tierra con cultivos ilícitos, ya sea por procesos coercitivos o económicos, teniendo en cuenta que cada integrante de hogar podría recibir alrededor de 1.180 dólares al año. [72]

La Oficina de las Naciones Unidas para Contra la Droga y el Delito (UNODC) apoya el monitoreo de cultivos de coca en Colombia desde 1999 y ha producido dieciocho censos anuales, en el cual se evidencia un aumento del 52% de área cultivada con respecto al año 2015. El Gobierno de Colombia ha venido desarrollando diferentes estrategias para enfrentar el problema de ilegalidad en los territorios y en particular el problema de la producción de drogas. Varias de ellas se han centrado en los cultivos ilícitos que se han enfrentado a través de herramientas que van desde el desarrollo alternativo hasta la aspersión aérea de cultivos. [5]

Históricamente Colombia ha afrontado la problemática de los cultivos ilícitos mediante la sustitución forzosa, o erradicación forzosa, utilizando plaguicidas, como el Glifosato, seleccionado por su alta efectividad. En Colombia se realizaba aspersión aérea de Glifosato, hasta el 20 de marzo del 2015 en el cual la Agencia Internacional de Investigación sobre Cáncer (IARC) declaró como potencialmente cancerígeno al Glifosato [73] cambiando el modelo a la erradicación forzosa manual según la UNODC y el ODC en el 2016 fueron erradicadas 18.227 hectáreas.

De acuerdo a Daniel Rico, la erradicación forzosa manual, es una de las estrategias más costosas e inhumanas que ha podido tomar el Estado, ya que se está jugando con la vida de las personas que están en estos procesos de erradicación. Víctimas sin sentido en zonas donde probablemente ya hubo resiembra de estos cultivos. [74]

El proceso de sustitución de cultivos en Colombia comienza oficialmente en 1994 a través del Programa Nacional de Desarrollo Alternativo (PLANTE). El Departamento Nacional de Planeación (DNP) expone cómo se comenzó con este proceso: -“ La estrategia de erradicación usada fue la de erradicación paulatina, a través de acuerdos con los pequeños productores, estrategia que llevó a lo que denominaron -desarrollo con coca-, donde se sustituían cultivos y a la vez se cultivaba coca” [75] . El proyecto contó con dos fases, pero no fue exitoso, ya que en las dos fases, se encontraron falencias como por ejemplo en la primera fase se encontraban problemas de gestión, lo que lo hizo prácticamente inviable, y en la segunda fase no hubo conocimiento de las características sociales del problema de cultivos ilícitos.[76]

El siguiente proceso para sustitución de cultivos ilícitos fue más agresivo, el Plan Colombia, el cual contaba con un componente principal militar y un eje social secundario. El sector rural quedó en medio del fuego entre la guerra que se generó por la erradicación forzosa de los cultivos.

En el 2006 se generó el Plan Nacional de Consolidación territorial cuyo objetivo estaba “concentrado en la generación de condiciones y oportunidades lícitas para el empleo productivo y sostenible de la mano de obra rural”. [77].

Actualmente se está implementando el PNIES (programa nacional integral de sustitución de cultivos de uso ilícitos) el cual está contemplado en el numeral 4 del acuerdo de paz *Solución al Problema de drogas ilícitas*. El acuerdo de paz no busca solamente la erradicación de los cultivos ilícitos, sino cambiar el uso final de la tierra, brindar alternativas de cultivos y ayudar a la población rural a tener mejores oportunidades.

Según un informe por la Agencia de prensa rural, a partir del año 2017 que se inició el Programa Nacional Integral de sustitución de cultivos ilícitos PNIES, se unieron 54 mil familias al proceso, las cuales hicieron los pasos correspondientes de erradicación de cultivos, pero aun no cuentan con las condiciones que el gobierno prometió. [78]

Para el año 2017, 36 municipios de Colombia cumplieron con la sustitución de cultivos ilícitos, pero se evidencia que la tasa de homicidios en las zonas donde se desarrollan los programas de sustitución de cultivos ha aumentado, indicando una falta de presencia del Estado nacional para proteger a las familias que se han acogido a estos programas [79]

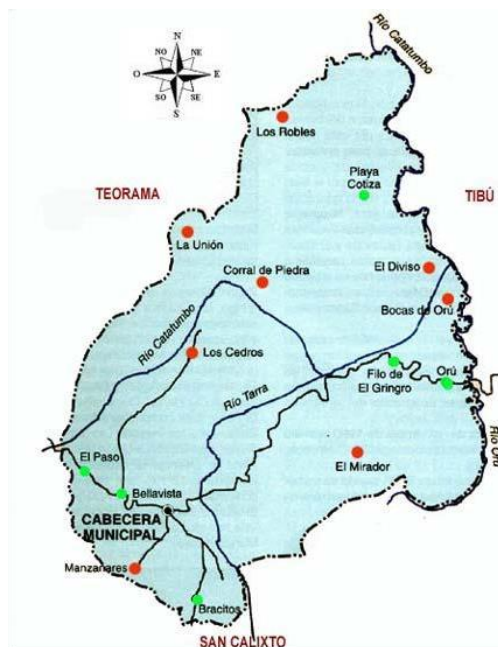
## **5.4 Cultivos de uso ilícito en El tarra**

### *5.4.1 Ubicación geográfica del tarra*

El Tarra es un municipio del Norte de Santander, ubicado al norte del departamento y con una población de 12 766 habitantes, de las cuales aproximadamente el 74% vive en zonas urbanas y el 26% restante en zonas rurales. Está localizado a una altitud de 270 metros sobre el nivel del mar y su extensión es de 675 km<sup>2</sup>. Sus coordenadas geográficas son: Longitud al oeste de Greenwich 73° 59' y latitud Norte 8°35'. [80]

Limita al norte y el oriente con Tibú, al sur con San Calixto y al occidente con Teorema. El Tarra, en lenguaje Motilón Bari significa “*entre ríos*”, [81] ya que esta entre los ríos Catatumbo, el Tarra y Orú.

Figura 21 Mapa de El Tarra



Fuente: Datos Generales El Tarra Norte de Santander 2012 [82]

#### 5.4.2 Descripción del Tarra

El Tarra comprende los corregimientos Orú, Filogringo, Bellavista y el Paso. Ocupa la región más lluviosa del Catatumbo con precipitaciones que superan los 6000 ms. [81]

La región del Catatumbo estuvo rodeada por numerosas familias de indígenas motilonas desde los tiempos primitivos, que formaban grupos constituidos por aproximadamente 50 personas; estos habitaban comunidad de casa o bohíos. [82]

La totalidad del municipio se encuentra dentro de la reserva forestal de la serranía de los Motilonas, pero esto no le ha impedido en desarrollar sus actividades agropecuarias, desarrollar redes viales, acueductos, líneas de transmisión entre otros.

El municipio cuenta con suelos jóvenes o poco evolucionados. De acuerdo al plan de manejo Parque Nacional Natural Catatumbo Bari, los posibles usos de acuerdo a sus características son *“aptos para cultivos de arroz, caña, sorgo, palma africana maíz y yuca. También se encuentran condiciones de los suelos aptos para cultivos transitorios (leguminosas y maíz), permanentes (cacao, palma africana), ganadería extensiva y semiintensiva”*

La economía del municipio se basa en la agricultura, ejemplo siendo los principales cultivos el maíz, cacao, plátano, yuca, café y frijol. El sector pecuario se caracteriza por el ganado bovino de doble propósito, avicultura, piscicultura y porcicultura. La Cachama predomina

en los cultivos alevinos por su importancia en el mejoramiento de la línea alimenticia y nutricional de la población.

El cultivo de la cachama es el engranaje productivo de la economía de El Tarra, son aproximadamente 120 familias que se reunieron para empalmar los procesos de piscicultura ASOPISTAR (asociación de piscicultores de El Tarra).[83] El Tarra se encuentra en medio del proyecto de la vía del carbón que conecta los municipios del Tibú y Convención. Acorde a la Federación Nacional de Cacaoteros (Fedecacao) El Tarra es uno de los mayores municipios productores de Cacao en el departamento con más de 1000 hectáreas de este fruto. [84]

EL rio tarra es una arteria de comunicación, aunque no es considerado navegable, el municipio tiene aproximadamente 200 kilómetros de carretera, de los cuales 40 kilómetros corresponden a la vía del carbón, la cual no se encuentra en buen estado, generando dificultades en el transporte. En el municipio existe un peaje ilegal para poder mantener en buen estado la carretera debido a la ausencia del Estado. El puente Rojo es el principal acceso del Tarra, ya que comunica con la capital, con Tibú, aproximadamente con 38 veredas de la zona 2 de El Tarra, Filogringo y la parte baja del Catatumbo. [85]

Después de 18 días de protestas campesinas en el Norte de Santander debido a la fuerte crisis social, económica y humanitaria generada por una agresiva campaña de erradicación forzosa de cultivos de uso ilícito, la cual el gobierno no brindo alternativas económicas [86] el 27 de junio del 2017 se instaló la Mesa de interlocución y acuerdo (MIA) en el Catatumbo, que puede generar acuerdos para realizar sustituciones voluntarias de cultivos, siendo este un punto que se estableció en los acuerdos de la MIA.[86] Adicional también se llevaron a cabo acuerdos para establecer oportunidades de acceso a los municipios que por falta de acompañamiento del Estado se han encontrado a merced de grupo armados al margen de la ley. Uno de estos proyectos fue el nuevo Puente Rojo [87] el cual ya está en uso y une al Tarra con los demás municipios del Catatumbo y con Ocaña, los trabajos formales empezaron en el 2014 y finalizaron el 2016, pero para el 2017 se entregó el puente con las vías de acceso pavimentadas.

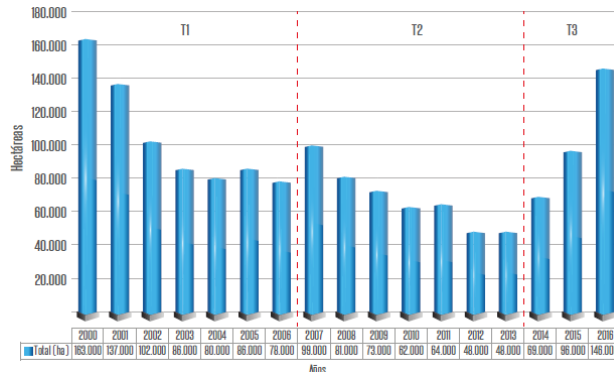
En el Catatumbo hubo un paro armado en el cual grupos al margen de la ley se definen el territorio, paro armado que afecta a 11 municipios del Catatumbo,[88] entre ellos el Tarra, lo que ha generado que se frenen las obras publicas.[89]

#### *5.4.3 Cultivos de uso ilícito*

Colombia aumento un 52% de hectáreas de cultivos de coca del 2015 al 2016 según el informe desarrollado por la ODC y la UNODC mediante el Sistema Integral de Monitoreo de Cultivos ilícitos (SIMCI). Según el reporte de drogas de Colombia del 2017 realizado por la ODC se divide desde el 2000 hasta el 2017 a Colombia en 3 periodos de la tendencia de cultivos de coca. El primer periodo que comprende entre el 2000 y el 2006 trata de una

disminución de los cultivos de coca, principalmente por el desarrollo del Plan Colombia y la desmovilización de las autodefensas, para el segundo periodo que comprende entre el 2007 y el 2013 indica un crecimiento de los cultivos de coca, debido a la aparición de bandas criminales provenientes de las disidencias de las autodefensas, y finalmente un tercer periodo entre el 2014 y el 2016 en el cual se evidencia un incremento acelerado, triplicando los valores del 2013. [90]

Figura 22 Tendencias de los cultivos coca en Colombia 2000 – 2016



Fuente. Reporte de drogas de Colombia 2016[90]

En Colombia el 72% de los cultivos ilícitos se concentra en 4 departamentos, y entre ellos se encuentra Norte de Santander el cual aumentó en el 2016 un 115% del área plantada para cultivos ilícitos con respecto al 2015.

El 48% de los cultivos ilícitos plantados en Colombia se encuentran entre 10 municipios, en los cuales se encuentra El Tarra con una participación de 3 683 hectáreas, junto con Sardinata y Tibú siendo este último el de mayor participación entre los tres municipios de Norte de Santander. [72]

De acuerdo al informe realizado por la UNODC, una de las posibles causas del incremento de los cultivos de coca en la zona del Catatumbo es la restricción en el 2010 del uso de aspersión aérea para erradicación de cultivos ilícitos, los diálogos realizados en la MIA que se estableció en el 2013 y los acuerdos llegados con los campesinos para la sustitución y erradicación de cultivos de coca gradual.[5]

Teniendo en cuenta que los cultivos de uso ilícito buscan zonas de difícil acceso, los cocaleros deben desforestar la zona para plantar sus cultivos, lo cual genera una degradación en la tierra, debido a que la tierra no recibirá la misma protección que genera la capa espesa de árboles, adicional pueden acabar con especies forestales que solo se pueden cultivar en dicha zona, a continuación se presentan imágenes de diferentes zonas del país, en las cuales se evidencia el daño ambiental que genera los cultivos de uso ilícito.



Figura 23 Deforestación para siembra de coca



Fuente: Características agroclimáticas de los cultivos de coca en Colombia 2005-2010[91]

#### 5.4.4 Acuerdo de paz. Punto 1 y 4

El acuerdo de la paz firmado en el 2017, se establecen criterios importantes del manejo de la tierra, como el punto 1 llamado Reforma Rural Integral. También establece los parámetros necesarios en el punto 4 para la sustitución de cultivos de uso ilícito.

Para que estos acuerdos puedan conllevar un desarrollo pleno en Colombia, el Gobierno debe ser consciente que es primordial la participación ciudadana para la toma de decisiones de acuerdo a los territorios que se están reformando, incluyendo comunidades y asociaciones de comunidades organizadas a nivel local y municipal para el adecuado manejo de la tierra y el programa de sustitución de cultivos de uso ilícito.

La reforma rural integral dice específicamente que, para poder realizar una verdadera transformación de la tierra en Colombia, es necesario el conocimiento pleno del uso adecuado de la tierra, identificando el manejo, cuidado del suelo, saber que se produce en términos económicos (agro, forestal, ganadero, entre otros) en esa zona y apoyar su cultivo. El Gobierno mediante el acuerdo de paz propone desarrollar un Fondo de Tierras, el cual debe adquirir en el transcurso de 12 años 3 millones de hectáreas las cuales distribuirá de forma gratuita a los campesinos y a la población que ha sido víctima del conflicto armado y que ha sufrido las consecuencias del abandono por el Estado. [9]

De acuerdo a un documento realizado por el Concejo Nacional de Política Económica y Social llamado, “*Política para la adopción e implementación de un catastro multipropósito rural-urbano*”, se identificó una gran dificultad para resolver el problema de la gestión de la tierra, ya que el 28% del territorio nacional no cuenta con formación catastral y existe un 64% del área con catastros desactualizados [92]

Uno de los objetivos dentro de los Planes de Desarrollo Rural, es la construcción de las vías terciarias para generar la conectividad de los territorios rurales, y permitir la fácil distribución de sus cultivos por las vías de bajo desarrollo. [9]

El acuerdo de paz, en su punto 4, tenía como objetivo la eliminación para el 2017 de 50 000 hectáreas de cultivos de uso ilícito, el cual fue muy ambicioso, teniendo en cuenta que según el informe realizado por la ODC el 2017 indica que en el 2016 hubo 18 227 hectáreas de cultivos ilícitos erradicadas forzosamente. Actualmente se espera el informe del 2018 de la OCD para identificar si se cumplió el objetivo.

El acuerdo de paz brinda la priorización de erradicación de cultivos de uso ilícito de manera voluntaria, brindando oportunidades de desarrollo alternativo, pero también establece que, si no existe algún acuerdo suscrito entre la comunidad y el Gobierno, entonces se procederá a una erradicación de cultivo de uso ilícito forzosa, dando como primera opción la erradicación manual forzosa en las zonas donde lo permita. [9]

La historia demuestra que en la guerra contra los cultivos de uso ilícito no es suficiente el uso de la fuerza, puesto que se necesitan tener diferentes estrategias de tipo político, económico y social para poder solucionar esta problemática, los casos de éxito anteriormente mencionados como Tailandia, Vietnam y Bolivia pueden ser estudiados para determinar la viabilidad de sus métodos para ser aplicados en Colombia, de modo que se le puedan brindar alternativas a los campesinos, para que mediante un proceso lento pero seguro, se eliminen los cultivos de uso ilícito y se replacen por cultivos legales, que adicionalmente haya presencia del Estado en estas zonas y se generen las oportunidades necesarias como la tercerización de vías, una infraestructura adecuada para que los cultivos legales sean distribuidos de las zonas rurales a las urbanas, y con esto eliminar en gran parte los cultivos ilícitos

La UNODC indica lo siguiente en un informe desarrollado en el 2015: “Un proceso para prevenir y eliminar el cultivo ilícito de plantas que contienen sustancias narcóticas y psicotrópicas a través de medidas de desarrollo rural específicamente diseñadas en el contexto de crecimiento sostenido nacional y de los esfuerzos de desarrollo sostenible en países que luchan contra las drogas, reconociendo las características socioculturales particulares de las comunidades y grupos objetivo dentro del marco de una solución completa y permanente del programa de las drogas ilícitas”. [93] Estos aspectos los contempla el acuerdo de paz en el numeral 4, teniendo en cuenta que la eliminación de cultivos de uso ilícito va de la mano con un desarrollo alternativo de las tierras y la presencia del Estado en las zonas afectadas por la presencia de grupos armados ilegales.

### 5.4.5 PNIS y PDET

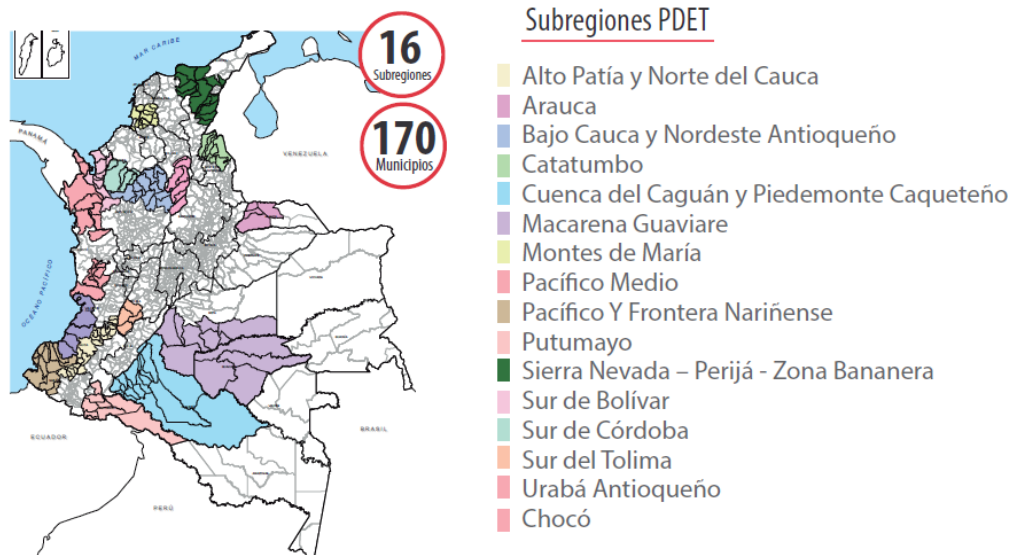
El Plan de desarrollo con enfoque territorial (PDET), el cual es tratado en el punto 1 del acuerdo de paz, sobre la reforma rural, para darle prioridad a las zonas que han sido afectadas por el conflicto armado y han tenido poca o nula presencia del Estado.

Algunos de los objetivos del PDET son: la conversión del campo en un escenario de reconciliación, protección de la riqueza pluriétnica y multicultural y el desarrollo de la economía campesina y otras formas de economía propia, están ligadas a un cambio estructural de la política social y económica que ha tenido Colombia durante años, enfocando sus esfuerzos el manejo territorial.

Las temáticas principales del PDET son ocho pilares, que van desde el ordenamiento territorial, pasan por la educación y salud, hasta la infraestructura vial. [94]

La figura 24 muestra las regiones que se priorizaron en la implementación de los PDET en Colombia, teniendo en cuenta que durante la última década son las subregiones que más afectaciones por cultivos de uso ilícito y conflicto armado han tenido:

Figura 24 Zonas donde se implementa el PDET en Colombia



Fuente. Alta Consejería para el Posconflicto, los Derechos Humanos y la Seguridad [94]

La figura 25 muestra un proceso de socialización por parte del gobierno sobre los PDET en Morelia Caquetá

Figura 25 Evidencia de la socialización de los PDET en Morelia Caquetá



Fuente. [http://www.renovacionterritorio.gov.co/especiales/especial\\_PDET/](http://www.renovacionterritorio.gov.co/especiales/especial_PDET/) [95]

El Plan nacional integral de sustitución de cultivos ilícitos (PNIS) el cual se contempla dentro del punto 4 del acuerdo de la paz y el cual trata acerca de la sustitución de cultivos ilícitos mediante un acuerdo entre la población y el gobierno, para erradicar de forma voluntaria los cultivos de uso ilícito bajo una compensación económica, como por ejemplo un subsidio de un millón de pesos mensuales por 12 meses para la manutención de las comunidades que se suscriban a este plan nacional de sustitución de cultivos, adicional les aportara un millón ochocientos mil pesos por única vez para proyectos de auto sostenimiento y ocho millones de pesos por única vez para proyectos de ciclo corto, tales como piscicultura, avicultura entre otros.

Actualmente en la zona del Catatumbo, solo se ha firmado un PNIS para el municipio de Tibu, el cual fue firmado a los 28 días de enero del 2017. [7]

En el Tarra, los procesos de sustitución de cultivos o planes de desarrollo, no son nuevos, desde 1998 se plantearon las acciones comunales, las asociaciones de campesino y el gobierno con propuestas para la sustitución de cultivos y no la erradicación, pero pasaron 15 años y no se vieron los resultados, ya que el Estado no realizo una labor de reconocimiento de la zona, no hubo presencia y no brindo las alternativas suficientes para remplazar los cultivos de uso ilícito, por lo tanto en el año 2013 el 11 de junio, los campesinos del Catatumbo generaron una movilización de casi 17 000 personas durante 53 días, los cuales exigían cumplimiento a lo pactado, y para su respectiva mediación se generó la MIA tal como se mencionó anteriormente, los cuales se pactaron 13 exigencias. [96], [86]

## 5.5 Homer Software

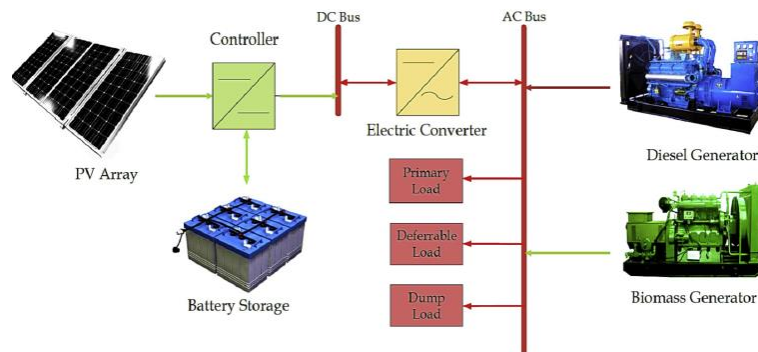
### 5.5.1 Micro-redes usando generación de energía a partir de la biomasa

En Suecia realizaron un estudio, mediante 3 posibles combinaciones de generadores de energía, determinar si es posible abastecer una población que se encuentra aislada de la

red eléctrica en Bangladesh (Sur de Asia), en el cual utilizaron HOMER para realizar el análisis tecno-económico, y determinar la opción más viable que permite abastecer la demanda. Los diferentes sistemas energéticos que se utilizaron fueron: energía solar, energía de la biomasa, generador diésel y baterías de almacenamiento. [97]

El sistema híbrido propuesto fue el siguiente:

Figura 26 Sistema híbrido propuesto en Homer



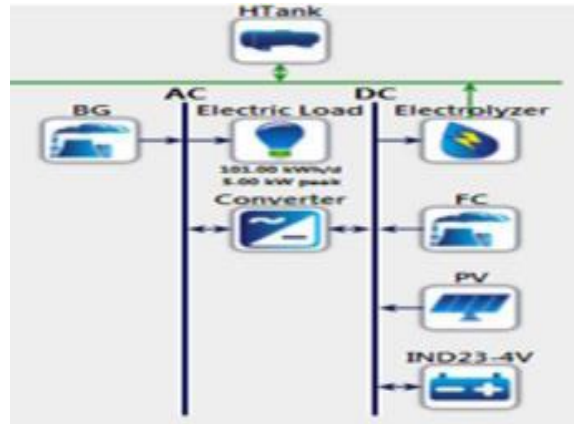
Fuente. A thorough investigation on hybrid application of biomass gasifier and PV resources to meet energy needs for a northern rural off-grid region of Bangladesh: A potential solution to replicate in rural off-grid areas or not? [97]

En el estudio se considera que una de las mejores opciones es implementar un sistema híbrido que incluye energía solar, biomasa y combustibles fósiles, sin descartar que para la mayoría de las zonas aisladas en Bangladesh podría ser utilizada una micro red de energía solar y energía de la biomasa. Además, se determina en el estudio que en el sistema óptimo, diseñado utilizando el software HOMER, la energía generada por la biomasa es la más representativa, teniendo una participación del 54,6% de la generación para abastecer la demanda. [97]

En la India, desarrollaron un artículo sobre una micro red que tendría un generador que se alimenta de gas de síntesis de biomasa, un sistema fotovoltaico y una celda de combustible, la cual alimentaría al Instituto Nacional de Tecnología de Maulana Azad, en el cual mediante un sistema de un conjunto de Gasificador-Generador de biomasa de 5kW, un sistema fotovoltaico de 5kW y una celda de combustible de 5kW podrían alimentar sin ninguna interrupción la demanda de este instituto. [98]

A continuación, se puede observar el modelo del sistema híbrido de energía utilizado en el estudio.

Figura 27 Modelo para simulación de un sistema híbrido de energía



Fuente. Computational Simulation & Optimization of a Solar, Fuel Cell and Biomass Hybrid Energy System Using HOMER Pro Software [98]

## **6. IDENTIFICACIÓN DEL ÁREA OBJETIVO.**

### **6.1. Panorama nacional.**

La identificación de la zona para evaluar el potencial dendroenergético para peletización se basa en el informe anual obtenido por la ODC y UNODC, en los cuales reportan los incrementos anuales de las hectáreas de cultivos de uso ilícito, en el cual, como se ha mencionado anteriormente se incrementó un 52% desde el 2015 al 2016, y de acuerdo al censo realizado, se identifica que la Región central tuvo una variación de cultivos de uso ilícito de 147% respecto al año 2015 con 40526 hectáreas sembradas para el año 2016.

De acuerdo al informe de la UNODC “El mayor crecimiento de los cultivos de coca se presentó en las zonas que ya tenían la mayor cantidad de coca en 2015 y que han tenido coca constantemente durante los últimos 10 años” en los cuales Nariño, Putumayo y Norte de Santander son los departamentos que van liderando el Ranking de los departamentos con más hectáreas de cultivos de uso ilícito en Colombia, siendo Nariño el primer departamento, Putumayo el segundo y Norte de Santander el tercero. [5]

Entre los 3 departamentos mencionados anteriormente Norte de Santander tiene un incremento del 115% de cultivos de uso ilícito entre el 2015 y 2016 a comparación de Nariño con un 43% y Putumayo con un 25%.

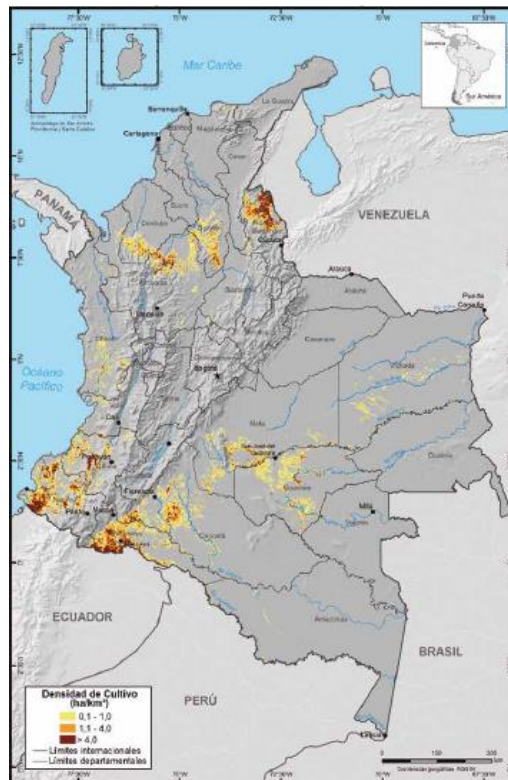
En el mapa de la figura 28 se pueden ver las zonas en Colombia donde se encuentra los cultivos de uso ilícito, mostrando una densidad de cultivo en hectáreas por cada kilómetro cuadrado y es posible evidenciar que en la zona Norte del departamento Norte de Santander presenta una gran cantidad de cultivos de uso ilícito.

El informe desarrollado por la UNODC utiliza un Índice de amenaza para determinar a relación entre los cultivos de uso ilícito y la violencia generada en la zona, este índice de amenaza el cual consiste en la articulación de tres dimensiones (hectáreas cultivadas, área geográfica afectada y permanencia del cultivo) se mide de forma porcentual y se encuentra en el informe de la UNODC que en el Norte de Santander los municipios de Sardinata, Tibú y el Tarra tienen un índice de amenaza del 46%, 63% y 24% respectivamente. [5]

Por lo tanto, teniendo en cuenta que la Región central fue la que mayor variación de hectáreas de cultivos de uso ilícito tuvo entre el 2015 y 2016, dentro de la cual Norte de Santander represento un 115% de variación entre el 2015 y 2016, y los 3 municipios con mayor presencia de cultivos de uso ilícito son Tibú, Sardinata y el Tarra, se seleccionó el municipio de El Tarra como área de influencia para este proyecto, debido a su índice de amenaza menor, ya que esto representa una permanencia del cultivo menor a los municipios aledaños y por ende, menor formación de grupos armados al margen de la ley,

lo que permitiría teóricamente una implementación viable de proyectos de sustitución de cultivos de uso ilícito. [5]

Figura 28 Densidad de Cultivos de coca en Colombia, 2016



Fuente: Gobierno de Colombia - Sistema de monitoreo apoyado por UNODC. Los límites, nombres y títulos usados en este mapa no constituyen reconocimiento o aceptación por parte de las Naciones Unidas. [5]

## 6.2 Identificación del área objetivo en el municipio de El Tarra

Para identificar las hectáreas que remplazarán los cultivos de uso ilícito por cultivos dendroenergéticos, se verifica la cantidad de hectáreas reportadas por la SIMCI en el informe anual de drogas del 2017.

SIMCI es un proyecto conjunto la UNODC y el Gobierno de Colombia, el cual es un desarrollo de carácter tecnológico e investigativo en el que se utiliza un satélite georeferencial que realiza un monitoreo de la superficie de Colombia, sin tener en cuenta el área de San Andrés y Providencia.

Para realizar este proceso SIMCI realiza una identificación de imágenes del territorio nacional, una corrección geométrica, mejoramiento espacial, identificación de diferentes



tipos de vegetación, identificación manual y visual, corrección de efectos de nubosidad, verificación de campo y control de calidad.

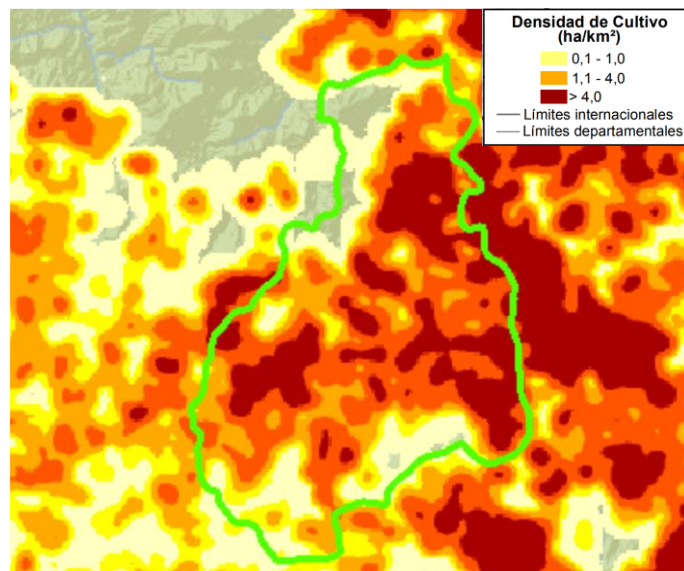
La determinación de los cultivos de uso ilícito los desarrolla un experto en análisis de imágenes, el cual tiene un profundo conocimiento del área.

Existen dos variedades de cultivos de uso ilícito en Colombia, de las especies *Erythroxylum coca* y *Erythroxylum novogranatense*, comúnmente llamadas Tingo María y Caucana, respectivamente. Estas variedades tienen diferentes cosechas las cuales varían desde tres (3) a seis (6) cosechas por año. Adicionalmente, en la mayoría de casos los cultivadores de coca realizan estos cultivos de manera continua, por lo que no se tiene un patrón de cultivo definido y se dificulta la identificación de los mismos. [99]

Para diciembre del 2016 el Norte de Santander presentó 24 831 hectáreas de cultivo de uso ilícito, de las cuales 3 683 hectáreas pertenecen al municipio de El Tarra, distribuidas entre las siguientes veredas: Martillo Bajo, Martillo Alto, Isla del Cedro, Los Robles, Filo de la Virgen, Brisas del Catatumbo, Playa Cotiza, Unión Catatumbo, La esperanza, San Martín, El Diviso, Puerto Catatumbo, Bocas de Orú, Tres Aguas, Nuestra Señora del Carmen y Bello Horizonte.

La Figura 29 relaciona la densidad de cultivos ilícitos en el municipio de El Tarra.

Figura 29 Densidad de cultivos de coca en el municipio de El Tarra, 2016



Fuente: Adaptado de Gobierno de Colombia - Sistema de monitoreo apoyado por UNODC. [5]

## **7 Identificación de las alternativas de sustitución.**

Las determinaciones de los esquemas de sustitución de cultivos ilícitos vienen dadas por el análisis de las características del territorio, las prácticas de silvicultura a implementar y las características propias de cada especie.

### **7.1 Características del territorio**

La zonificación agroecológica es una metodología de análisis de compatibilidad terreno/cultivo utilizada en el desarrollo de proyectos de la FAO [100], específicamente para la planeación y selección de cultivos. Esta metodología se basa en la clasificación de las zonas de estudio en pequeñas áreas individuales, diferenciadas unas de otras a partir de la distribución del suelo, la superficie de la tierra y el clima y las cuales deben tener condiciones similares de productividad e impacto ambiental.

Para este estudio se utilizarán los principales parámetros establecidos en la zonificación agroecológica con el objetivo de caracterizar el territorio objetivo y posteriormente lograr valorar, desde el punto de vista medioambiental y productivo, el cultivo energético que se integre de mejor manera a las condiciones locales.

#### **A. Distribución del suelo y superficie de la tierra.**

El Instituto Geográfico Agustín Codazzi es la autoridad nacional colombiana encargada de la cartografía del territorio nacional, entre sus funciones se encuentra la elaboración de los mapas cartográficos de suelos. La distribución de los suelos en el municipio del tarra se muestra en la

Figura 3030.

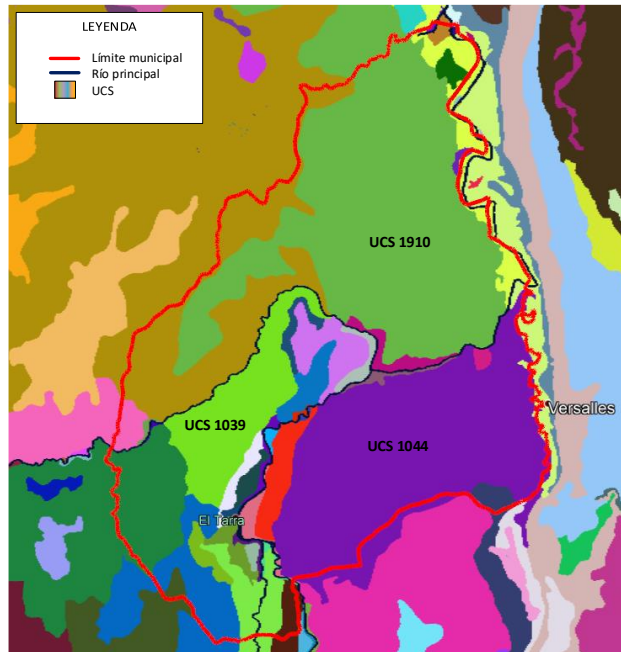
La clasificación de los suelos es realizada con base en el paisaje (Montaña, lomerío, piedemonte, planicie y valle), el clima, los contenidos poblacionales de suelos, los rangos de pendientes, la erosión y la pedregosidad. Las áreas suficientemente homogéneas son agrupadas en unidades cartográficas de suelos (UCS).

La

Figura 3030 presenta las UCS presentes en el municipio del El Tarra, señaladas como áreas de diferentes colores e identifica (UCS con nomenclatura) las tres (3) UCS del municipio de El Tarra que se corresponden con el área de mayor concentración de cultivos ilícitos (ver Figura 299). Las características de estas UCS se presentan en la Tabla 8, la Tabla 9 y la Tabla 10.

En términos generales, los suelos del municipio se encuentran en zonas montañosas, con características poco profundas, buen drenaje y de textura arenosa franca y franco arcillo arenosa. Por lo que, dadas las anteriores condiciones, los suelos objeto de estudio pertenecen a la subclase de capacidad de uso 7e-1 [101]–[103].

Figura 30. Clasificación de los suelos en el municipio de El Tarra.



Fuente: Mapa elaborado en Google Earth® a partir de información agrológica propiedad del IGAD [101].

Tabla 8. Características de la UCS 1910.

Ítem	Descripción
ID	1910
N° UCS	UCS_1910
Tipo UCS	MUE
UCS Extendido	MUEe1
Paisaje	Montaña
Relieve	Crestones homoclinales
Clima	Cálido, muy húmedo
Litología	Arenisca
Procesos geológicos	Deslizamientos, desprendimientos de roca
Características	Muy superficial a profundos, bien drenados, de textura arenosa franca y franco arcillo arenosa. Fertilidad muy baja
Componentes	Complejo: Lithic Troporthents; Typic Troporthents
Perfil	C-06
Porcentaje	60, 40

Área en ha	26494.1
------------	---------

Fuente: Instituto Geográfico Agustín Codazzi

Tabla 9. Características de la UCS 1039.

Ítem	Descripción
ID	1039
N° UCS	UCS_1039
Tipo UCS	MUC
UCS Extendido	MUCf1
Paisaje	Montaña
Relieve	Filas y vigas
Clima	Cálido, muy húmedo
Litología	Granito y gneis
Procesos geológicos	Deslizamientos, reptación
Características	Moderadamente profundos, bien a excesivamente drenados, de textura franco arcillo arenosa. Fertilidad natural muy baja
Componentes	Consociación: Typic Dystropepts; Typic Troporthents
Perfil	NS-67; NS-142
Porcentaje	80, 20
Área en ha	4852.92

Fuente: Instituto Geográfico Agustín Codazzi

Tabla 10. Características de la UCS 1044.

Ítem	Descripción
ID	1044
N° UCS	UCS_1044
Tipo UCS	MUE
UCS Extendido	MUEe1
Paisaje	Montaña
Relieve	Crestones homoclinales
Clima	Cálido, muy húmedo
Litología	Arenisca
Procesos geológicos	Deslizamientos, desprendimientos de roca
Características	Muy superficial a profundos, bien drenados, de textura arenosa franca y franco arcillo arenosa. Fertilidad muy baja
Componentes	Complejo: Lithic Troporthents; Typic Troporthents
Perfil	C-06
Porcentaje	60, 40
Área en ha	17022.2

Fuente: Instituto Geográfico Agustín Codazzi

## B. CLIMA

El clima es el conjunto fluctuante de las condiciones atmosféricas, caracterizado por los estados y evoluciones del estado del tiempo, durante un periodo de tiempo y un lugar o región dados, y controlado por los denominados factores forzantes, factores determinantes y por la interacción entre los diferentes componentes del denominado sistema climático (atmósfera, hidrosfera, litosfera, criósfera, biosfera y antropósfera) [104].

Dado que el clima se relaciona generalmente con las condiciones atmosféricas, representadas en variables denominadas elementos climáticos, es posible definir el clima en función de la temperatura y la precipitación, lo que permite la directa relación entre este y los requerimientos de los cultivos.

El cálculo de temperatura y precipitaciones es realizado mediante la selección de una localización representativa para cada uno de los tres (3) UCS principales, las cuales son analizadas a través del software Meteonorm 7<sup>®</sup>. La caracterización de las localizaciones representativas se presenta en la Tabla 11.

Tabla 11. Localizaciones representativas para las UCS principales. Coordenadas en WGS84.

UCS	Coordenadas
1910	8,7181 N; -72,9856 E
1039	8,628 N; -73,107 E
1044	8,6285 N; -72,963 E

La temperatura media anual para la región nororiental del municipio de El Tarra (UCS 1910) es de 28,8 °C, con un punto de condensación de 22,7 °C y una precipitación mensual que varía desde 2 mm/mes hasta 95 mm/mes. La Figura 311 presenta las condiciones de temperatura y precipitación para la UCS 1910.

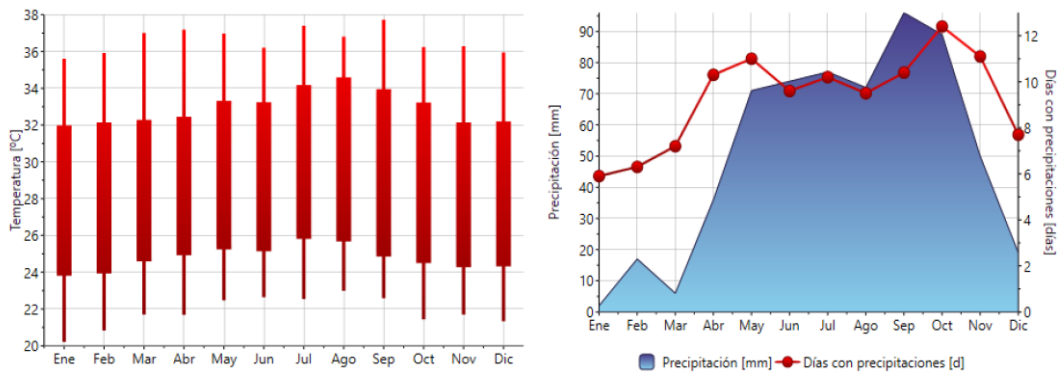
La temperatura media anual para la región occidental del municipio de El Tarra (UCS 1039) es de 22,1 °C, con un punto de condensación de 15,2 °C y una precipitación mensual que varía desde 5 mm/mes hasta 95 mm/mes. La Figura 322 presenta las condiciones de temperatura y precipitación para la UCS 1039.

La temperatura media anual para la región nororiental del municipio de El Tarra (UCS 1044) es de 22 °C, con un punto de condensación de 13 °C y una precipitación mensual que varía desde 5 mm/mes hasta 96 mm/mes. La Figura 333 presenta las condiciones de temperatura y precipitación para la UCS 1044.

Acorde a los datos presentados, la temperatura en la región no presenta variaciones considerables a lo largo del año, obteniéndose variaciones mensuales menores a 5 °C para todos los casos analizados. No obstante, dadas las características montañosas de la región se presentan variaciones en la temperatura relacionadas con la altura, de tal modo que para

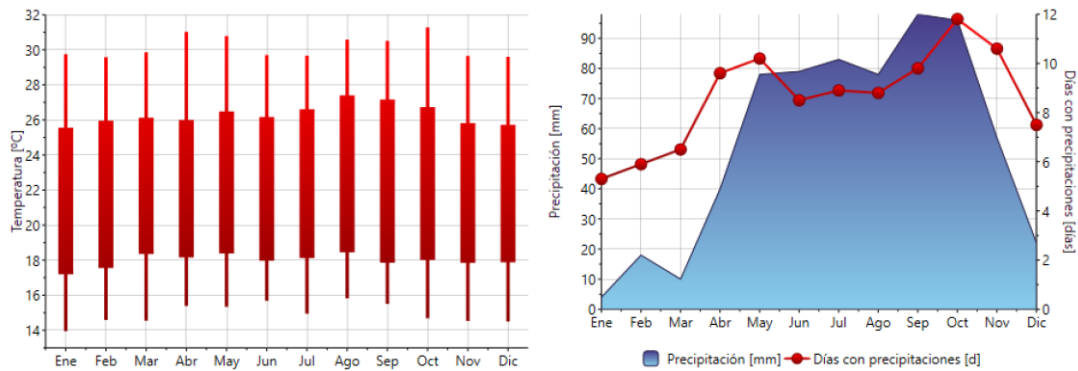
las locaciones estudiadas existe un diferencial en la temperatura de hasta 7 °C. Si se considera también una variación de hasta 5 °C en la temperatura por externalidades e incertidumbres, es posible deducir que para la región objetivo del municipio El Tarra, es posible encontrar temperaturas que varían desde los 17 °C hasta los 34 °C, por lo que la resiliencia a la temperatura y la altitud se configura como un factor determinante para la selección de los cultivos.

Figura 31. Temperatura y precipitación mensual de la localización representativa para la UCS 1910. Izquierda: Temperatura; derecha: Precipitación



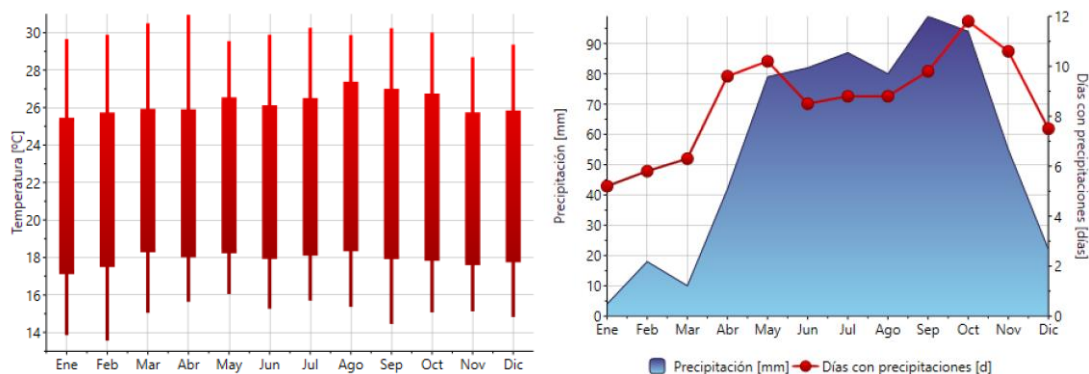
Fuente: Gráficos realizados mediante el software y base de datos de Meteonorm 7®

Figura 32. Temperatura y precipitación mensual de la localización representativa para la UCS 1039. Izquierda: Temperatura; derecha: Precipitación



Fuente: Gráficos realizados mediante el software y base de datos de Meteonorm 7®

Figura 33. Temperatura y precipitación mensual de la localización representativa para la UCS 1044. Izquierda: Temperatura; derecha: Precipitación



Fuente: Gráficos realizados mediante el software y base de datos de Meteonorm 7®

La precipitación se comporta de manera homogénea entre las tres localizaciones de manera independiente a la altitud de las mismas. Sin embargo, existe una fuerte variación en las precipitaciones durante las épocas de sequía y lluvias. En este sentido el Plan de Ordenamiento Territorial de El Tarra describe al municipio como el de mayores precipitaciones en el departamento, alcanzando los 7.000 mm/año [105]; si se considera que, durante los meses de enero y marzo, las precipitaciones pueden reducirse hasta en 90% y los terrenos objetivos son altamente drenables, es necesario considerar la resiliencia de los cultivos a las sequias como un factor técnico y económico fundamental para la selección del cultivo.

## 7.2 Clasificación de las especies herbáceas y forestales.

El mercado internacional de pellets separa claramente aquellos provenientes de fuentes maderables de los mixtos. Los primeros, son aquellos productos de los procesos de poda y procesamiento de la industria maderera, y representan prácticamente la totalidad del comercio internacional de pellets. Por otro lado, los pellets mixtos son todos aquellos cuya composición no corresponde 100% a fuentes maderables, sino que puede provenir de residuos agrícolas o cultivos energéticos de tipo herbáceo [64].

La principal diferencia entre pellets maderables y mixtos radica en las características energéticas y medioambientales del producto, mientras los pellets maderables presentan mayor densidad energética y menores contenidos de ceniza, los pellets mixtos suelen provenir de fuentes con menor tiempo de rotación y permiten el aprovechamiento de los residuos agrícolas [106].

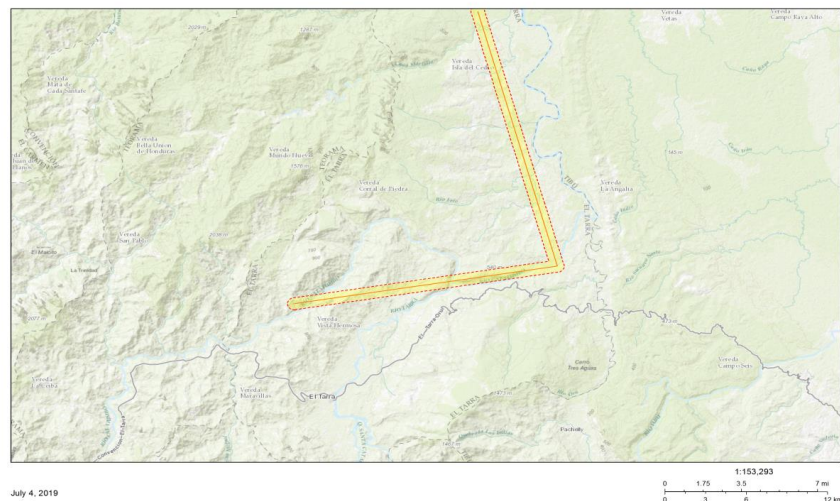
Este capítulo presenta entonces, las principales fuentes forestales y herbáceas para la producción de pellets maderables y mixtos; las cuales han de cumplir con las siguientes características: ser especies endógenas de la zona, ser especies adaptables a las

variaciones de temperatura y precipitaciones presentadas en el capítulo anterior y no afectar negativamente las características medioambientales de la región.

### 7.2.1 Identificación de las especies endógenas.

La caracterización de los ecosistemas presentes en las áreas afectadas por cultivos ilícitos se realizó mediante el uso de la herramienta de Reporte de Alertas Tempranas de Biodiversidad del software Tremarctos Colombia 3.0® [43] al trazar una línea geométrica que comprende las áreas de mayor densidad de cultivos ilícitos en el municipio de El Tarra, tal como se muestra en la Figura 344.

Figura 34. Área de influencia analizada para la identificación de ecosistemas en la herramienta Tremarctos Colombia 3.0



Fuente: Tremarctos Colombia 3.0

La longitud lineal trazada es de 41,57 km con un radio de influencia de 500m, con lo que el área cubierta es de 4278,686 ha. El informe obtenido de la herramienta se encuentra en el Anexo 1 de este documento.

El análisis de los datos permite identificar que el 77% del territorio estudiado se encuentra dentro de los límites de la Reserva Natural de la Serranía de los Motilones y 11% dentro de los límites del Parque Natural Catatumbo Barí. Adicionalmente, se identificó que 32,4% del territorio corresponde a bosques naturales del orobioma bajo de los Andes.

Dados los datos anteriores se obtuvo la caracterización forestal de la reserva natural a partir del Esquema de Ordenamiento Territorial de El Tarra [105]. Las principales especies identificadas para este territorio se muestran en el Anexo 2.



Adicionalmente, se analizó la flora presente en el Parque Natural Catatumbo Barí, a partir de la información presentada en el Plan de Manejo del Parque Nacional Natural Catatumbo Barí [107], la cual se presenta en el Anexo 3.

De igual manera, Dueñas A et al.[108] establecen las principales familias presentadas en el parque natural, resaltando la predominancia de la familia Aracaceae, cuyas especies son comúnmente conocidas como palmas [109]. Otras familias como Rubiaceae, Burseraceae y Lauraceae también tienen una presencia relevante en el parque (véase la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.2**)

Tabla 12 Especies predominantes Parque Nacional Natural Catatumbo Barí.

Familias	No. especies	Densidad relativa (%)	Dominancia relativa (%)	Diversidad relativa (%)	IVF/300
Arecaceae	6	27.0	8.3	5.5	40.8
Rubiaceae	10	11.0	5.7	9.2	25.9
Burseraceae	3	3.6	18.8	2.8	25.1
Lauraceae	13	6.3	6.3	11.9	24.5
Moraceae	5	4.9	7.7	4.6	17.1
Melastomataceae	9	5.0	2.4	8.3	15.7
Caesalpiniaceae	1	3.1	10.4	0.9	14.5
Marantaceae	2	7.2	5.2	1.8	14.3

Fuente: Tomado de [108].

Por otro lado, el orobioma bajo de los Andes comprende las áreas de piedemonte de la cordillera andina en un rango de alturas de los 800 a 1500 msnm, lo que significa que, en la mayoría de los casos se encuentra en la zona de vida del bosque húmedo tropical, siendo este y el bosque muy húmedo tropical, los de mayor representación en el municipio de El Tarra, tal como se aprecia en la Tabla 133.

Tabla 13. Zonas de vida municipio de El Tarra

Zona de Vida	Condiciones Climatológicas Características	Área	%
Bosque húmedo tropical <b>bh – T</b>	Precipitación 2000 - 4000 mm Temperatura > 24°C 0 – 668 msnm	16029.024	24.04
Bosque muy húmedo premontano <b>bmh – PM</b>	Precipitación 2000 - 4000 mm Temperatura 17 a 24°C 668 a 1702 msnm	15761.079	23.63
Bosque muy húmedo tropical <b>bmh – T</b>	Precipitación 4000 – 8000 mm Temperatura > 24°C 0 – 668 msnm	31198.963	46.78
Bosque pluvial tropical <b>bp – T</b>	Precipitación mayor 8000 mm Temperatura > 24°C 0 – 668 msnm	3331.249	5
Bosque seco tropical <b>bs – T</b>	Precipitación 1000 - 2000 mm Temperatura > 24°C 0 – 668 msnm	301.677	0.55
Total		66684	100

Fuente: Esquema de Ordenamiento Territorial El Tarra, 2005.

Acorde a lo descrito por Dueñas A et al.[108] es muy probable encontrar una distribución vegetal similar entre los diferentes bosques húmedos tropicales del continente, con lo que es posible realizar una correlación de especies entre diferentes orobiomas bajos de los Andes, siempre y cuando estos se encuentren en la zona de vida del bosque húmedo tropical. De este modo, se seleccionaron dos estudios de referencia, el primero corresponde a la caracterización de la flora en la región de la composición florística de la bioflora de la serranía del Perijá [110] y la segunda al estudio de impacto ambiental para la construcción de la segunda calzada túnel – San Jerónimo [111]. La Tabla 144 y la Tabla 155 presentan las principales especies vegetales en el orobiomas bajos de los Andes.

Tabla 14. Presencia de especies por familias en la franja subandina baja, Serrania de Perijá.

FAMILIA	ESPECIES
Lejeuneaceae	11
Lepidoziaceae	4
Radulaceae	2
Ceocalycaceae	4
Metzgeriaceae	3
Calypogeiaceae	1
Pallaviciniaceae	0
Porellaceae	2
Aneuraceae	2
Marchantiaceae	1
Cephaloziaceae	1

Amhocerotaceae	0
Balantiopsaceae	0
Helbertaceae	0
Monocleaceae	1
Ricciaceae	0
Dendrocerotaceae	1
Jubulaceae	0

Fuente: Tomado de [110]

Tabla 15. estructura vertical en el Bosque fragmentado con vegetación secundaria del Orobioma bajo de los Andes

FAMILIA	ESPECIE
Fabaceae	Albizia carbonaria
Malvaceae	Ceiba pentandra
Bignoniaceae	Crescentia cujete
Malvaceae	Guazuma ulmifolia
Hernandiaceae	Gyrocarpus americanus
Chrysobalanaceae	Licania sp. 1
Fabaceae	Machaerium biovulatum
Sapindaceae	Melicoccus bijugatus
Fabaceae	Platymiscium hebestachyum
Fabaceae	Platymiscium pinnatum
Fabaceae	Pseudosamanea guachapele
Myrtaceae	Psidium guajava
Bignoniaceae	Tabebuia rosea
Meliaceae	Trichilia martiana
Fabaceae	Zygia sp. 1

Fuente: Tomado de [111]

Acorde a los estudios analizados, las familias de mayor presencia en la zona son: Bignoniaceae, Apocynaceae, Bombacaceae, Moraceae, Sterculiaceae, Tiliaceae, y Flacourtiaceae, por lo que se priorizan aquellas especies que pertenezcan a estas familias y sobre las cuales se pueda obtener un rendimiento energético viable.

### 7.2.2 Clasificación de las especies.

La Tabla 166 presenta las especies representativas para las principales familias vegetales en el municipio de El Tarra, clasificadas como forestales (maderables) o herbáceas (no maderables)

Tabla 16. Clasificación de las principales especies endógenas en función de su tipo (maderable, no maderable) y su aparición en la literatura internacional.

Familia	Nombre Científico	Nombre Común	Tipo	Referencia en la literatura
Bignoniaceae	Tabebuia dugandi	Cañaguata	Forestal	NO
Bignoniaceae	Jacaranda caucana	Gualanday	Forestal	NO
Bignoniaceae	Tabebuia rosea	Gualanday	Forestal	SI
Bignoniaceae	Tabebuia sp.	Guayacán	Forestal	NO
Bignoniaceae	Tabebuia chrysantha	Guayacán Polvillo	Forestal	NO
Bignoniaceae	Jacaranda copaia	Pavito, quitasol	Forestal	SI
Bignoniaceae	Crescentia cujete	Jícara	Forestal	NO
Apocynaceae	Couma macrocarpa	Perillo	Forestal	NO
Apocynaceae	Tabernaemontana	Turma de perro	Herbáceo	NO
Bombacaceae	Bombacopsis quinatum	Ceiba Tolúa	Forestal	NO
Bombacaceae	Ceiba pentandra	Ceiba	Forestal	SI
Moraceae	Chlorophora tinctoria	Dinde	Forestal	NO
Moraceae	Brosimum rubescens	Guáimaro	Forestal	NO
Moraceae	Trophis Racemosa	Lecheros	Forestal	NO
Sterculiaceae	Calophyllum mariae	Cachicamo	Forestal	NO
Sterculiaceae	Guazuma ulmifolia	Guazuma	Forestal	NO
Tiliaceae	Apeiba membranacea	Malagano	Forestal	NO
Tiliaceae	Apeiba tiborbou	Peine Mono	Forestal	NO
Tiliaceae	Belotia sp.	Vareboba	Herbáceo	NO
Flacourtiaceae	Laetia procera	Varecasa	Forestal	NO

Fuente: Autoría propia

Las especies representativas fueron cotejadas con las principales bases de datos de la literatura internacional con el objeto de establecer la referencia de su aplicación previa con fines energéticos. Aunque se obtuvieron resultados de las consultas para todas las especies, en la mayoría de los casos los estudios comprendían la modificación de las semillas o aplicaciones medicinales de las especies, únicamente tres especies devolvieron resultados directamente relacionados con el aprovechamiento energético: el gualanday, el pavito o quitasol y la ceiba.

En el caso del gualanday se estudió el aprovechamiento de las hojas del árbol para la producción de biogás en; el estudio, realizado por Jagadish K et al., concluye que es posible la producción de biogás a través de la descomposiciones de las hojas de múltiples especies de árboles, aunque aclaran que es necesario clasificar aquellas cuya descomposición es lenta y ralentiza la reacción [112].

Por otro lado, existe en la literatura una amplia variedad de artículos académicos, especialmente de origen asiático, que describen las características de producción y optimización del biodiesel obtenido a partir de la *Ceiba Pentandora* [113]–[115]; considerándose esta como una fuerte alternativa al biodiesel comercial obtenido de palma.

Finalmente, Lenis Y et al. realizan varios estudios sobre las condiciones de producción de gas de síntesis en un gasificador de lecho fijo usando como materia prima chips y aserrín de *Jacaranda Copaia* [116], [117].

Dado lo anterior, de diecinueve (19) especies representativas de la región se obtuvo que tan solo tres (3) de estas presentan condiciones para su aprovechamiento energético y únicamente una (1) ha sido considerada para procesos de gasificación.

Debido a que solo se identificó una especie endógena con potencial para la producción de pellets, se incluyen en este estudio dos (2) especies foráneas extras, como alternativas para la sustitución de cultivos ilícitos.

En primer lugar, el Plan de desarrollo para Norte de Santander 2016-2019 [118], prioriza seis (6) especies forestales para el desarrollo de cultivos comerciales en el departamento; entre estas se encuentra la Melina (*Gmelina arbórea*), una especie forestal tropical originaria de India y el sudeste asiático de rápido crecimiento [119]; dadas sus características fisicoquímicas el estudio de esta especie como alternativa para peletización ha aumentado considerablemente en la última década [120]–[122]

Adicionalmente, de acuerdo con la Guía para Plantaciones forestales Comerciales en el Norte de Santander desarrollado por la CONIF [123], la especie forestal Melina (*Gmelina arbórea*) es una de las especies de mayor potencial en proyectos de reforestación y desarrollo, obteniendo rendimientos entre 4,2 a 22,6 ton/ha y de 53,2 a 499 GJ/ton/ha para un caso de estudio en Costa Rica. [124]

Más aun, en el XII congreso Forestal Mundial desarrollado en el 2013 en la ciudad de Quebec, Canadá, se determina a la Melina (*Gmelina arbórea*) como una de las especies forestales potenciales para la sustitución de cultivos ilícitos [125].

Por otro lado, el *Gynerium Sagittatum* es una especie herbácea representativa del departamento de Córdoba y perteneciente a la familia de las Poáceas o Cañas. De manera similar al Arundo Donax, una especie de la misma familia y una de las principales fuentes herbáceas para la producción de pellets mixtos; el *Gynerium sagittatum* presenta tiempos de crecimiento y recolección cortos, es resiliente a cambios de temperatura y permite la plantación en terrenos inundables y poco fértiles; no obstante, al tratarse de una especie endógena, los riesgos sobre el medio ambiente son menores al Arundo Donax.

A nivel latinoamericano, Tenorio C et al. describieron la producción de pellets a partir de múltiples cultivos energéticos, aunque el *Gynerium Sagittatum* no es la especie con mayor densidad energética, si presenta el menor contenido de cenizas [126]. En Colombia, en el año 2017 se realizó un proyecto piloto liderado por ELECTROVICHADA SA ESP para la gasificación de *Gynerium Sagittatum* en la vereda de Santa Bárbara, municipio de Hato Corozal, departamento de Casanare [127].

Un estudio desarrollado en el trayecto de línea de transmisión de ISA, entre Carmen de Bolívar – San Jacinto – San Juan de Nepomuceno y el Parque Santuario de los Colorados, determino mediante un análisis de 2 especies herbáceas y una forestal su contenido bromatológico y balance energético con 3 tecnologías de generación de energía (gasificación, pirolisis y combustión). [128]

Las dos especies herbáceas estudiadas fueron la *Gynerium sagittatum* y la *Hura crepitans*; la especie forestal fue la *Pedilanthus tithymaloides* la Tabla 177 presenta el contenido bromatológico de cada especie, resaltando que la especie herbácea *Gynerium sagittatum* tiene un alto porcentaje de Celulosa y Lignina y un bajo valor de Hemicelulosa y cenizas.

Tabla 17 Contenido bromatológico

Materia prima de origen	Celulosa (%)	Hemicelulosa (%)	Lignina (%)	Energía bruta (Kcal/kg)	Cenizas totales (%)	Materia seca (%)
Pedilanthus Tithymaloides	27,97	21,45	11,46	3.674	12,13	10,76
Gynerium sagittatum	40,93	10,94	23,43	4.026	6,41	69,96
Hura crepitans	34,36	22,3	21,66	4.255	8,43	61,93

Fuente: Adaptado de [128]

Adicionalmente, esta especie cumple con todos los requerimientos de la FAO, puesto que con un crecimiento de 4 a 5 metros de altura, es una especie de corta rotación (aproximadamente 6 meses), con alto poder calorífico, la cual puede cultivarse en suelos degradados, como lo muestra el estudio sobre la capacidad fitorremediadora de la caña flecha (*Gynerium Sagittatum*) sobre los suelos contaminados por Mercurio[129].

La Tabla 1818 presenta las características generales de las tres (3) alternativas principales para la sustitución de cultivos ilícitos en El Tarra.

Tabla 18. Principales características de las alternativas para la sustitución de cultivos ilícitos.

Ítem	Unidades	Jacaranda Copaia	Gmelina arbórea	<i>Gynerium sagittatum</i>
Tipo		Forestal	Forestal	Herbácea
Origen		Endógeno	Foráneo	Foráneo
Hábitat		Bosque húmedo y muy húmedo	Bosque húmedo y muy húmedo	Bosque húmedo, muy húmedo
Altura	metros	45	30	15
Crecimiento	años	2	4	2
Rendimiento del cultivo	ton/ha-año	7,5-18,2	7,6-13,3	40-60
Tipo de suelo		Franco-Arcillosos, bien drenados, profundos	Suelos profundos, húmedos, bien drenados, franco arenosos	Aluviales, húmedos, ricos en materia orgánica, con el nivel freático superficial
Altura (msnm)	msnm	0-1400	0-1000	0-1900
Temperatura	C	21-26	22-27	22-27
Precipitación	mm	1200-2400	1000-4500	1100-3400
Resiliencia		Media	Media	Alta
Impacto ambiental		Positivo	Positivo	Negativo

Fuente: Adaptado de [130]–[132]

Acorde al UCS de los suelos propios de la zona de influencia, se identificó que la capacidad de uso del suelo corresponde a la categoría 7, sobre la cual el IGAC hace la siguiente aclaración “*Las tierras de clase 7 presentan limitaciones fuertemente severas, que las hacen inadecuadas para cultivos; tienen aptitud forestal; el bosque tiene carácter protector, pero cuando las condiciones del relieve o la topografía y los suelos ofrecen suficiente profundidad efectiva para el anclaje y el desarrollo normal de las raíces de las especies arbóreas se puede hacer un uso sostenible del recurso forestal de tipo productor*” [103].

Desde el punto de vista medio ambiental, el *Gynerium sagittatum* representa una especie nociva para la zona de influencia. En primer lugar, al tratarse de una zona mayormente en pendiente, con suelos superficiales y arcillosos, es altamente propensa a la erosión y los deslizamientos de tierra; en este aspecto las características morfológicas del *Gynerium sagittatum* no provee de un área horizontal de sombra ni un enraizamiento profundo que afirme la cohesión entre las diferentes capas de los suelos, por lo que durante las épocas de lluvias la poca protección hacia el impacto directo de las gotas, la tensión creada por el peso del cultivo y el agua de escorrentía que recorre las capas del suelo bien drenada generarían riesgos de deslizamientos. Por otro lado, al tratarse de un cultivo ribereño, presenta altos requerimientos de agua y nutrientes, con lo que, durante los meses de

verano, como se presentó con anterioridad, las lluvias pueden reducirse hasta en 90% sería necesaria la captación de agua para el cultivo, la cual no se mantendría por más de 10 minutos en el subsuelo al tratarse de suelos bien drenados.

Las especies forestales Jacaranda Copaia y Gmelina arbórea presentan condiciones similares de rendimiento, hábitat natural e impacto ambiental. De igual manera ambos recursos requieren de suelos profundos, franco arcillosos y bien drenados; desde el punto de vista de resiliencia, ambas especies soportan rangos de temperaturas similares, aunque el Gmelina arbórea soporta un rango de precipitaciones más amplio y el Jacaranda Copaia una variación en la altura más amplia. No obstante, la diferencia fundamental en la que radica la mejor alternativa para El Tarra, se encuentra en origen de la especie; mientras que la Gmelina arbórea es una especie importada que requiere suelos fértiles [130], la Jacaranda Copaia se encuentra adaptada a las condiciones locales de los suelos, con lo que es más posible realizar un cultivo exitoso de esta especie sobre las otras dos alternativas.



## 8. POTENCIAL DENDROENERGÉTICO

Con el fin de tener un orden de magnitud de potencial dendroenergético de la zona podemos considerar que, según Lezcano [133], el potencial exergético de la biomasa en Colombia es de 0,34 MW/ha. Si se tiene en cuenta que en el municipio del El Tarra existen 3.683 ha de cultivos ilícitos [134], el potencial teórico de sustitución sería de 1.252,22 MW siendo este un valor indicativo, pero este depende del tipo de biomasa que se use y la cantidad de hectáreas que se deseen intervenir.

No obstante, las condiciones logísticas como son: vías de acceso, distancias de transporte y recursos naturales limitan el área geográfica sobre la cual es viable intervenir, mientras que las características propias del cultivo limitan la disponibilidad de materia prima.

Por lo tanto, este capítulo presenta el potencial real para la sustitución de cultivos ilícitos en el municipio de El Tarra teniendo en cuenta las externalidades y las características de cultivo del Jacaranda Copaia.

### 8.1. Área objetivo.

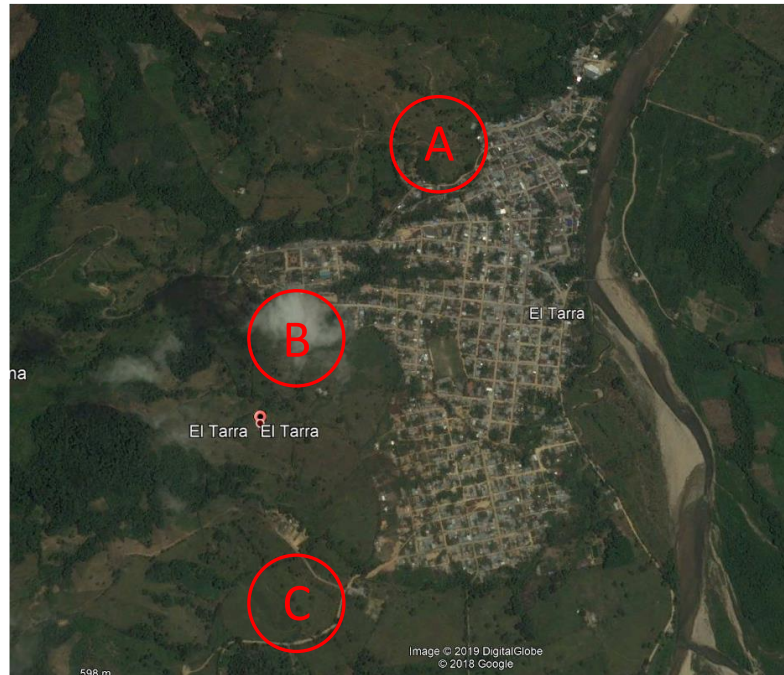
El municipio de El Tarra tiene una extensión de 675 km<sup>2</sup>, por lo que aproximadamente el 5,5% del territorio se encuentra afectado por cultivos ilícitos, los cuales se encuentran dispersos a lo largo de virtualmente la totalidad del municipio, tal como se muestra en la Figura 299.

Sultana et al. [135] y otros autores [136]–[138], describen la importancia del transporte de la materia prima en la cadena logística de la producción de pellets. Particularmente, en los casos de pellets maderables producidos a partir de residuos de la industria maderera, las plantas peletizadoras suelen localizarse junto a los aserraderos, mientras que, en el caso de pellets mixtos, las plantas son ubicadas en las inmediaciones del cultivo. Estas medidas responden a la necesidad de disminuir los costes de transporte de materia prima, el cual es a su vez una de las razones principales de la densificación de la biomasa.

De igual forma es necesario asumir que la planta peletizadora ha de localizarse sobre una vía de acceso que permita el rápido despacho del producto y el fácil acceso de los equipos durante la etapa constructiva. Dadas las pobres condiciones de terreno del municipio de El Tarra, se considera que la planta peletizadora ha de ubicarse en las inmediaciones de la cabecera municipal en un terreno plano, con poca vegetación y sobre una vía principal.

La Figura 355 presenta el mapa en vista satélite de las inmediaciones de la cabecera municipal del municipio de El Tarra; en base a las imágenes satelitales se seleccionaron tres posibles localizaciones sobre las cuales sería factible la construcción de la central peletizadora.

Figura 35. Localizaciones potenciales para la central peletizadora en el municipio de El Tarra.



Fuente: Adaptado de Google Earth ®

La ubicación A se encuentra al norte de la cabecera municipal, por lo que, si se considera que la mayor parte de los cultivos ilícitos se encuentra en esta dirección, es la localización con mayor cercanía al área de sustitución. No obstante, se encuentra alejada de la vía principal Ocaña-El Tarra, por lo que el transporte de los equipos durante la etapa constructiva, así como la biomasa requiere un mayor trayecto y atravesar parte del casco urbano.

La ubicación B se encuentra al occidente de la cabecera municipal sobre la vía principal Ocaña-El Tarra, lo que le da acceso tanto a los cultivos del área occidental del municipio como a un fácil despacho de la materia prima.

La ubicación C se encuentra al sur de la cabecera municipal, a diferencia de las otras dos locaciones, esta se encuentra más alejada del casco urbano, lo que facilita el transporte de la mercancía y facilita los tramites y licencias necesarias para la posible implementación del proyecto. Sin embargo, está ubicado en la locación más alejada de los cultivos y, por la disposición de las vías, es necesario el transporte a través del casco urbano.

Dadas las condiciones particulares de cada ubicación potencial, se considera que el área B es la más adecuada para una futura implementación del proyecto de sustitución de cultivos.

De igual manera que la localización de la planta peletizadora, es necesario que el cultivo energético cuente con acceso a vías de transporte que faciliten su transporte hasta la planta de procesamiento.

Considerando que la planta peletizadora se ubica sobre la vía Ocaña – El Tarra, y es esta la vía principal del municipio, atravesándolo de Occidente a Oriente; el área de mayor aprovechamiento para la sustitución de cultivos ilícitos es al occidente de la cabecera municipal.

La acotación del área disponible también es dependiente del difícil acceso a la zona; considerando que el área definida como potencial es de características montañosas con pendientes pronunciadas se considera un radio de 400 m sobre la vía principal como viable para la sustitución de cultivos. Adicionalmente la distancia máxima desde la central peletizadora se define como 5 km, teniendo en cuenta las anteriores condiciones del terreno.

Dado lo anterior se definió un área probable de 323 hectáreas, las cuales son susceptibles a un posible programa de sustitución de cultivos ilícitos, tal como se presenta en la Figura 366.

Figura 36. Area potencial para la sustitucion de cultivos ilícitos en el municipio de El Tarra.



Fuente: Adaptado de Google Earth®

## 8.2 Condiciones del cultivo

De igual manera que las distancias y condiciones del terreno limitan en gran medida el área potencial para el aprovechamiento dendroenergético, las características silviculturales de la especie energética limitan el rendimiento neto por hectárea de la misma.

El espaciamiento del cultivo determina la distribución y distancia entre cada árbol [139]. Tal como la mayoría de especies maderables [140], el cultivo de Jacaranda Copaia puede realizarse en configuraciones de 3 x 3 metros (111 árboles/hectárea) o 4 x 4 metros (625 árboles/hectárea) [141] obteniendo en Colombia cultivos de 7 años con un crecimiento anual de 2,7 m en altura y 2,6 cm en diámetro [132].

Respecto al último ítem, si bien es posible contar con una configuración de 625 árboles/ha, la disponibilidad de biomasa de los mismos dependerá de su tiempo de crecimiento y el tiempo de aprovechamiento. En este sentido es necesario considerar si se realizara un aprovechamiento únicamente residual de la biomasa (residuos de poda) o si la totalidad del cultivo será utilizado con fines comerciales, en cuyo caso sería requerido determinar si se articulara la industria peletizadora como un adjunto al crecimiento de un mercado maderero o si se utilizara la totalidad de la biomasa para peletización.

Acorde a las condiciones de la especie; esta puede ser utilizada para varios usos de la industria maderera entre los cuales destacan: construcciones livianas, carpintería corriente, ebanistería corriente y piezas para muebles [141]. Al considerarse que se trata de un cultivo de rápido crecimiento (aproximadamente dos años) y catalogado como una especie priorizada para la reforestación [132], el potencial de aprovechamiento de Jacaranda Copaia va más allá del aprovechamiento energético.

Dado lo anterior se considera que la mejor manera de implementar un esquema de sustitución de cultivos a partir de Jacaranda Copaia en el municipio de El Tarra, debe considerar el impulso a la económica maderera local, mediante el uso del recurso para carpintería, ebanistería y la fabricación de piezas para muebles; mientras que los residuos producto de la poda y el procesamiento de la madera pueden ser aprovechados para la producción de pellets.

Bajo estas condiciones, existen dos características fundamentales que limitan la disponibilidad de biomasa para peletización. En primer lugar, al tratarse de un proyecto de reforestación y recuperación de las capacidades productivas de los suelos, es necesario determinar las áreas de corte anuales que permitan un aprovechamiento sostenible del recurso; y, en segundo lugar, es necesario determinar la relación de residuos que se producirían por el procesamiento de la madera.

### *8.2.1. Rotación del cultivo*

La comparación entre el área identificada en la Figura 366 y la densidad de cultivos presentada en la Figura 299 permite determinar una densidad de cultivos ilícitos promedio de 1,1 a 4 ha/km<sup>2</sup>. Dadas la escala utilizada para la realización del monitoreo de cultivos ilícitos, es imposible determinar a mayor nivel de detalle la densidad de cultivos ilícitos para el área determinada; por lo que se seleccionó un valor conservador de 2 ha/km<sup>2</sup>. De este modo, se plantea un área potencial de sustitución de cultivos de 6,46 ha.

A partir de los datos presentados anteriormente, se plantea dividir el área total objetivo en siete (7) subregiones de aproximadamente 1 ha, sobre las cuales se determinará el modelo de rotación de cultivos que presente mayor beneficio económico y ambiental para la zona.

La rotación de cultivos usualmente hace referencia a cultivar durante un periodo determinado de tiempo cierta especie para posteriormente dar un tiempo de “descanso” a la tierra. Para el escenario forestal, este término se relaciona con el área de bosque la cual es posible talar de manera simultánea sin que afecte la sostenibilidad del ecosistema [142].

Este estudio plantea el aprovechamiento maderable de una única subregión de manera simultánea, dejando un espacio de reforestación natural del terreno de un año tras la tala de la totalidad del área. Adicionalmente el periodo de tala no podrá ser menor a un año, por lo que el área de sustitución de cultivos tendrá un tiempo de rotación de siete (7) años.

Lo anterior se fundamenta en el ciclo de crecimiento del Jacaranda Copaia, el cual alcanza su maduración en un periodo de siete (7) años [141] y en el fortalecimiento de los suelos regionales [143]. Al explotar un área de tan solo una hectárea anualmente, se permite a la plantación prolongar los efectos de cohesión y fortalecimiento del terreno. No obstante, aunque la anterior propuesta valora en mayor medida los efectos ambientales del programa de sustitución de cultivos ilícitos, se ve altamente perjudicada la disponibilidad de materia prima para la industria maderera y los procesos de peletización. Al respecto, sería posible desarrollar un modelo con mayor intensidad en la explotación de la biomasa, pero se vería gravemente afectado el componente ambiental del mismo, con lo que futuros estudios podrían realizar un análisis comparativo sobre las fortalezas y debilidades de estas dos perspectivas.

De este modo, se acota que el área máxima aprovechable anual es de 1 ha, lo que representa la explotación de 625 árboles al año con una edad media de siete (7) años.

### *8.2.2. Disponibilidad de Residuos*

El establecimiento del cultivo es el periodo de tiempo que abarca desde la siembra del mismo hasta la obtención de una dinámica agrícola estable que permita determinar con cierto nivel de certeza las características y volúmenes de cosecha esperada a obtener. Para el caso de recursos maderables, este periodo corresponde al periodo desde el momento de la siembra hasta la tala de los árboles.

Particularmente, para la especie y área analizada en este estudio, el establecimiento del cultivo es de siete (7) años. Durante este periodo la disponibilidad del cultivo no será homogénea, sino que se comportará acorde a las características propias de crecimiento del Jacaranda Copaia.

Durante los primeros dos años de crecimiento de la especie se determinará el éxito del cultivo, por lo que será la etapa donde se realicen mayores inversiones en fertilizantes y suministro de agua. Al tratarse de una especie que puede alcanzar hasta los 45 metros de altura con hojas opuestas, bipinnadas, se establece los requerimientos de luminosidad del mismo, particularmente durante su etapa de crecimiento [141]. Referente a la biomasa aprovechable durante esta etapa, aunque se pueden producir residuos de las podas de las ramas, se considera que los volúmenes son despreciables.

A partir de los dos años hasta los siete años, se presenta el periodo de crecimiento del árbol joven, durante el cual es posible aprovechar los residuos tanto de la poda artificial como natural de la planta. Este periodo puede extenderse hasta los 20 años permitiendo un crecimiento anual de 2,7 m de alto y 2,3 cm de diámetro [132]. El volumen de residuos puede variar enormemente, y no es un dato que se encuentre claramente estipulado en la literatura, por lo que se establece un valor de 5% sobre el peso total del árbol por año.

A partir del séptimo año, se esperaría obtener especímenes con 30 metros de alto y diámetros de 30 cm [144], por lo que se puede establecer un volumen de 9 m<sup>3</sup> y un peso de 4.500 kg si se considera una densidad de 500 kg/m<sup>3</sup> [141].

Según la FAO, para actividades de aprovechamiento forestal, la tasa de uso del recurso es en promedio del 60%, entre los cuales se encuentra una tasa de residuos (virutas, costeros, recortes, aserrín y menudos) de 24,5% [145]. Por lo que, por árbol talado, se presenta una disponibilidad de materia prima para peletización de 1.102,5 kg, la cual aumentaría a 2.700 kg si se usara el 100% del material aserrado para la producción de pellets.

### 8.3 Potencial dendroenergético para procesos de peletización.

La siguiente ecuación permite determinar el potencial dendroenergético para peletización en función del área disponible y la cantidad de residuos

$$B_n = W_n * D_n(A_{p,n} * P + A_{c,n} * C)$$

Donde,

B = disponibilidad de biomasa en kg

W = peso promedio de un árbol, establecido como 4.500 kg para el año siete (7) y calculado mediante una interpolación lineal a partir del segundo año para un rango de peso entre 0 y 4.500 kg.

D= densidad espacial del cultivo, establecido como 625 árboles/ha

A<sub>p</sub>= Área de influencia de poda, establecida como 7 ha para el periodo de años 1 a 6, y como 6 ha a partir del séptimo año.

P= Porcentaje del peso total del árbol representado en los residuos de poda, establecido en 5%.

A<sub>c</sub>= Área de influencia de la tala, establecida a partir del séptimo año como 1 ha.

C= Porcentaje del peso total del árbol representado en residuos del procesamiento de la madera, establecido en 24,5%

n= año de estudio

Adicionalmente, la siguiente formula permite relacionar la disponibilidad de biomasa para peletización en unidades de masa con la disponibilidad en unidades energéticas.

$$B_{e,n} = B_n * PC$$

Donde,

B<sub>e</sub>= disponibilidad de biomasa en MJ

PC= Poder calorífico del Jacaranda Copaia, establecido en 19,7 MJ/kg [146].

De este modo, la Tabla 1919 presenta el potencial dendroenergético de la biomasa para sustitución de cultivos ilícitos en el municipio de El Tarra acorde al año de implementación del cultivo.

El potencial máximo posible estaría dado por el uso de la totalidad del material aserrado para los procesos de peletización, por lo que el factor C sería igual a 60% [145], dando un potencial máximo anual de 2'531.250 kg/año o 49'865.625 MJ/año.

Tabla 19. Potencial dendroenergético en el municipio de El Tarra.

Año	POTENCIAL		
	Peso base W (kg/árbol)	Masa (kg/año)	Energía (MJ/año)
2	0	0	0
3	900	196.875	3.878.438
4	1800	393.750	7.756.875
5	2700	590.625	11.635.313
6	3600	787.500	15.513.750
7 y en adelante	4500	1.532.813	30.196.406



## 9. EVALUACIÓN DE UNA SOLUCIÓN ENERGÉTICA USANDO HOMER PRO

Acorde al sistema de información eléctrico colombiano SIEL, 100% de la población tanto urbana como rural del municipio de El Tarra se encuentran conectados al sistema de transmisión nacional [147] a través de la subestación de 115 kV ubicada en el municipio de Concepción [148]. Dado lo anterior, se descarta la opción de un sistema de generación aislado y se evidencian tres posibles alternativas para la generación eléctrica a partir de pellets maderables.

Para las tres alternativas seleccionadas se supone la implementación de una planta peletizadora en el municipio de El Tarra, tal como se describe en la sección anterior.

La primera alternativa consiste en el coquemado de pellets y carbón en la central térmica Termotasajero en una proporción energética de 5/95, respectivamente. Esta opción se fundamenta en el análisis desarrollado por la Agencia Internacional de Energía (IEA por sus siglas en inglés) [149], bajo el cual se concluye que una central térmica a carbón puede ser reconvertida a biomasa asumiendo solo costos menores en la instrumentación siempre y cuando la proporción energética de este último no sobrepase el 5%. De este modo, sería posible el uso de los pellets maderables producidos en el municipio de El Tarra para la generación eléctrica de esta central. No obstante, se presentan dos aspectos negativos en esta alternativa. En primer lugar, la distancia entre las dos localidades es de 176 km por la vía Astilleros – Tibú, la cual por situaciones de orden público y estado de la vía podría no ser la alternativa más segura para el despacho de los pellets obligando el uso de la vía Ocaña-Cúcuta por la cual la distancia aumentaría a 281 km. Sea cual fuese el caso, se incurre en costos de transporte considerables. Por otro lado, el precio de venta de pellets maderables (tasado en el mercado internacional en aproximadamente 120 USD/ton [150]) no es competitivo con el precio del carbón (tasado en el mercado internacional en 58 USD/ton [151]), por lo que sin un marco regulatorio claro que promueva la biomasa o castigue el uso de carbón en centrales térmicas, se dificulta la viabilidad de esta opción.

Las siguientes dos alternativas consisten en la instalación de centrales de generación de biomasa, las cuales pueden ubicarse en dos locaciones diferentes. En la primera locación es posible la implementación de la central generadora en el municipio de Concepción, en terrenos aledaños a la subestación de 115 kV. Esta alternativa permitiría el acceso directo a la subestación del sistema de transmisión local, aunque dependería de la disponibilidad de potencia y bahías de conexión en la subestación. Por otro lado, también se incurriría en costos de transporte de los pellets hasta la central de generación.

La tercera opción, seleccionada para este estudio, consiste en la implementación de una central generadora a partir de biomasa en el municipio de El Tarra. Esta alternativa

aprovecharía el hecho que la línea de 115 kV Concepción – Tibú recorre el municipio de El Tarra con lo que sería posible la conexión de la central al sistema de transmisión regional a través de una subestación de potencia. De igual manera, al encontrarse en el mismo municipio que la central peletizadora, se reducirían considerablemente los costos de transporte.

De este modo, la alternativa evaluada en este estudio consiste en el aprovechamiento de los residuos maderables de un cultivo forestal mixto (Jacaranda Copaia) cuyo objeto primordial será la sustitución de cultivos ilícitos, la recuperación de los suelos, el impulso a la industria maderera local y el aprovechamiento energético; profundizando en este último ítem, para el cual se propone la implementación de una central peletizadora en el municipio de El Tarra la cual proveerá de materia prima a una central generadora a partir de biomasa conectada al sistema de transmisión local en el nivel de tensión 4 [152].

### **9.1. Peletización de la biomasa**

El proceso de peletización tiene como objeto reducir los costes de transporte de la biomasa y proporcionar un combustible homogéneo y con alto poder calorífico para la generación eléctrica, de esta manera a través de este proceso se determina la cantidad de combustible disponible para la generación, lo que a su vez permite dimensionar los equipos y la producción de energía esperada.

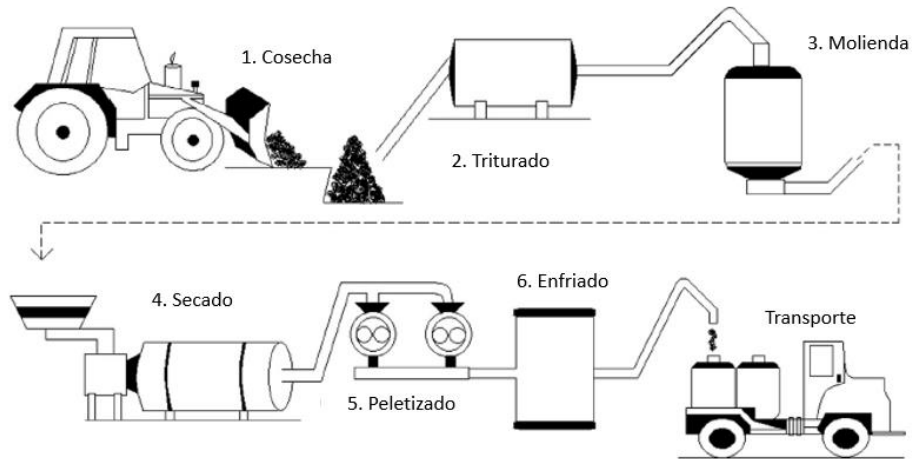
Se define como peletización a la transformación físico-mecánica, con o sin aditivos, de la materia lignocelulosa de granulometría fina y densidad baja, en sólidos de forma y tamaño regulares y densidad elevada [54]. Normalmente el proceso de peletización se basa en la presión ejercida por una serie de rodillos sobre el material biomásico en una matriz metálica dotada de orificios con el diámetro característico. A la salida de la matriz se encuentran unas cuchillas que cortan los cilindros en la longitud requerida.

Antes de introducir la biomasa en la peletizadora, es necesario contar con ciertas características físicas que permitan el proceso de densificación de la biomasa más adecuado, cumpliendo con las normas internacionales de pellets.

Estas características son: la humedad de la biomasa, el tamaño de la partícula después del proceso de molienda y el poder calorífico

A continuación, se evidencia en la Figura 377 un flujo de peletización de acuerdo a la empresa Agrep Forestal S. A de Costa Rica, el cual muestra que existe 4 procesos que anteceden la peletización de la biomasa, tales como la cosecha de la biomasa, el triturado, para reducir el tamaño de la biomasa, la molienda, para conseguir un tamaño de partícula más pequeño y el secado para disminuir la humedad presente.

Figura 37 Proceso de fabricación de pellets de madera en Agrep Forestal S.A.



Fuente. Production and quality analysis of pellets manufactured from five potential energy crops in the Northern Region of Costa Rica [33]

#### 9.1.1. Cosecha.

El proceso de cosecha corresponde a la recolección y transporte de la biomasa, desde la fuente de recolección hasta la central peletizadora.

Para el escenario de análisis de este estudio, este proceso de recolección se puede dividir en dos: recolección de residuos de poda y recolección de residuos de aserrín.

Los residuos de poda, como los son ramas y cortezas son obtenidos de dos localizaciones, en primer lugar, se encuentra el mantenimiento del bosque artificial en cuyo caso será necesario la recolección y transporte de estos materiales desde el área de cultivo hasta la central peletizadora. La segunda localización corresponde a los aserraderos, bajo el esquema planteado en este análisis, dichos aserraderos han de encontrarse en el mismo predio que la central peletizadora, por lo que es posible el transporte de estos residuos a través de banda transportadora.

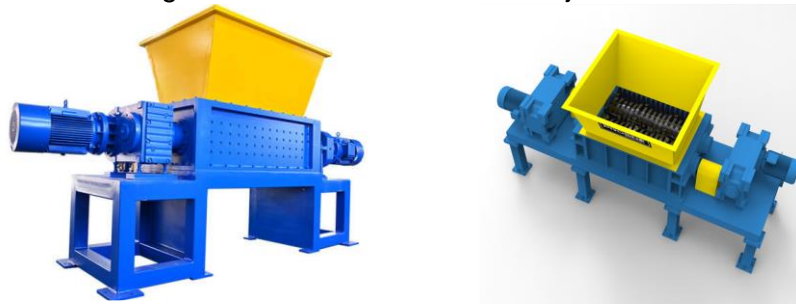
Los aserrines producidos por el proceso de corte y transformación de la biomasa para su aprovechamiento en la industria maderera son producidos en los aserraderos, por lo que al igual que el ítem anterior, es posible y recomendable, la instalación de un sistema de bandas transportadoras que permitan el rápido transporte de los residuos.

No obstante, se propone la instalación de dos bandas separadas para residuos de poda y aserrín, tal como se expondrá en la siguiente sección.

### 9.1.2. Triturado.

El proceso de triturado busca reducir los tamaños de partícula de la materia prima hasta un tamaño adecuado para el ingreso al proceso de molienda, normalmente estos tamaños de aceptación suelen encontrarse en los 25 mm [153]–[156]. Respecto a la tecnología de aprovechamiento, para fuentes con alta resistencia mecánica y baja humedad (como lo es la biomasa maderable) las trituradoras de corte de tijera son usualmente utilizada para estas aplicaciones, con ángulos típicos entre los 30° y 40° [157]–[162]. La Figura 388 presenta un esquema ilustrativo de los tipos de trituradoras más comunes para el proceso de peletizado.

Figura 38. Trituradora de doble eje



Fuente: Adaptado de Metal Recycling Machines y Prosino Shredders.

Este proceso únicamente sería necesario para los residuos de poda, ya que los llamados “chips” y el aserrín presentan características adecuadas para la molienda directa. Por lo tanto, se considera la instalación de una banda de alimentación a la trituradora y una segunda banda directamente a la molienda.

### 9.1.3. Molienda.

El proceso de molienda en la peletización tiene como objetivo homogenizar los tamaños de partícula de la materia prima con tamaños que pueden variar desde los 10 mm hasta los 2 mm [28], [34]–[36], [40], [163]–[167]. No obstante, para fuentes forestales el tamaño de molienda más ampliamente utilizado es el de 4 mm [28], [33], [36], [168]–[170].

Por otro lado, la tecnología más ampliamente utilizada para este proceso son los molinos de martillos, los cuales permiten desintegrar fácilmente materiales con alta resistividad mecánica, tal como lo es la madera [28], [36], [159], [171], [172]. La Figura 399 presenta un molino de martillos.

Figura 39. Molino de martillos.



Fuente: Indiamart.com

Aunque el aserrín podría cumplir las características necesarias para no requerir del proceso de molienda, esto varía de acuerdo a los procesos realizados en los aserraderos, de igual manera el aserrín puede encontrarse acompañado por otros materiales particulados de mayor tamaño, por lo que se considera para este análisis que toda la materia prima tendrá que ser molido.

### 9.1.3. Secado.

El objetivo del proceso de secado es homogenizar el contenido de humedad de la biomasa y llevarlo al punto óptimo para el proceso de peletización, el cual varía entre 10% y 15% (peso húmedo) [173]–[175].

Existen dos tipos principales de secado para el proceso de peletización. El secado natural consiste en la acumulación del material triturado en pilas, las cuales bajo procesos de conducción y convección permiten el secado del material al aire libre [176]. Sin embargo, tal como se identificó con anterioridad, el municipio de El Tarra se encuentra en una zona de bosque húmedo y muy húmedo, con precipitaciones anuales de hasta 7000 mm/año; si bien es posible proteger la materia prima a través de estructuras de cobertura, los vientos producidos durante las lluvias representan un alto riesgo de pérdida de masa.

El secado forzado implica la utilización de intercambiadores de calor y otras maquinarias para reducir la humedad de la biomasa hasta el punto deseado. En esta área se utilizan dos tecnologías principalmente, el secador rotativo de baja residencia (ver Figura 4040) y el secador de baja temperatura (ver Figura 41).

Figura 40. Secador rotativo.



Fuente: Lippel.com

Figura 41. Secador de baja temperatura (de banda continua).



Fuente: alvanbranchgroup.com

Cada una de las tecnologías presenta ventajas y desventajas respecto a la otra. Mientras que el secador rotativo permite un secado de la biomasa en corto tiempo a un precio de inversión menor, el secador de baja temperatura permite un secado con menor consumo y de mayor eficiencia [177].

Para este análisis se decidió trabajar con un secador rotativo al primar la baja inversión y no existir suficiente volumen de biomasa para compensar una mayor inversión con una mayor eficiencia.

#### 9.1.4. Peletización

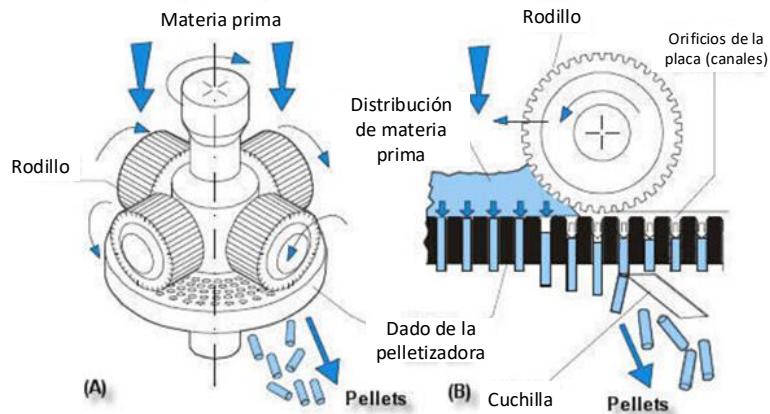
Para proceso industriales existen dos tecnologías principales de peletización, las peletizadoras de dado plano y aqueddas de dado de anillo.

Ambas tecnologías utilizan el mismo principio para la densificación de la materia prima. Mientras la biomasa es ingresada a la recamara de la peletizadora, unos rodillos giratorios van forzando las partículas hacia unas cavidades dispuestas geométricamente sobre la

superficie de la recámara, de tal modo que los rodillos fuerzan tanta biomasa en las cavidades cómo es posible [178]. Paralelamente, dentro de las cavidades la fricción entre las partículas genera calor, que a su vez activa las características aglutinantes de la lignina y permite, en conjunto con un contenido adecuado de humedad, la cohesión entre la biomasa. De este modo, para una unidad peletizadora sin sistema de enchaquetado o de control artificial de la temperatura, es común encontrar temperaturas de peletización entre 110 y 130 °C [179].

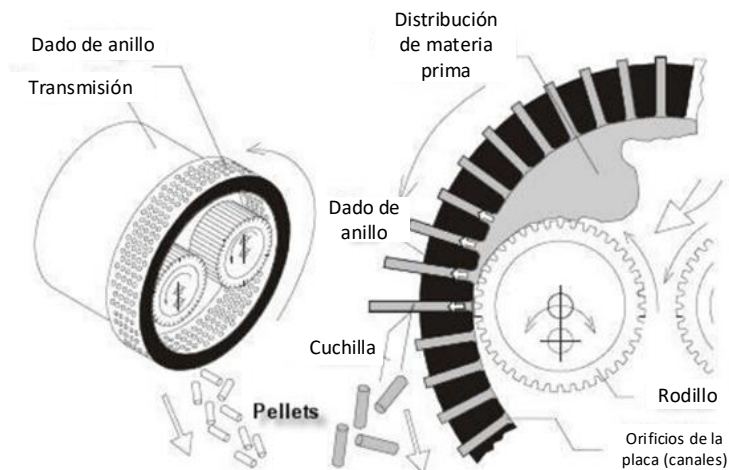
La diferencia entre las tecnologías radica entonces, en la disposición geométrica de los orificios o el dado. Mientras que el dado plano corresponde a una placa plana sobre la cual los rodillos fuerzan la biomasa (ver Figura 422), el dado de anillo corresponde a una placa anular sobre la cual los rodillos fuerzan la biomasa de manera radial (ver Figura 433) [180].

Figura 42. Principio de densificación para peletizadoras de dado plano.



Fuente: Adaptado de [180]

Figura 43. Principio de densificación para peletizadoras de dado de anillo.



Fuente: Adaptado de [180]

En términos generales las peletizadoras de anillo plano suelen ser utilizadas para aplicaciones semindustriales ya que su diseño requiere menor inversión y mayor facilidad en el mantenimiento, aunque se limita en la producción máxima de pellets. Dadas la disponibilidad de biomasa para este proyecto, se seleccionó una peletizadora de anillo plano como mejor alternativa.

#### *9.1.5. Enfriado.*

Debido a que el pellet es producido a una temperatura típica de 85 °C, durante su proceso de enfriamiento es posible que se presenten resquebrajamientos producto de un rápido proceso de contracción térmico del mismo, de igual manera es posible que si el ambiente es demasiado húmedo, el pellet absorba humedad suficiente para restringir los enlaces cohesivos de la lignina. Por lo tanto, se recomienda un enfriamiento forzado de los pellets, con temperatura y humedad controlada, usualmente a través de ventiladores, con un periodo de residencia de 8 a 10 minutos [181].

#### *9.1.6. Transporte*

Tras el almacenamiento del pellet es necesario transportarlo hasta su destino final. En este caso se trata de una central generadora a base de biomasa, la cual se encuentra localizada en las inmediaciones de la planta peletizadora, con lo que el mecanismo de transporte de mayor eficiencia es la instalación de una banda transportadora desde los silos de almacenamiento hasta la tolva de alimentación de la central generadora.

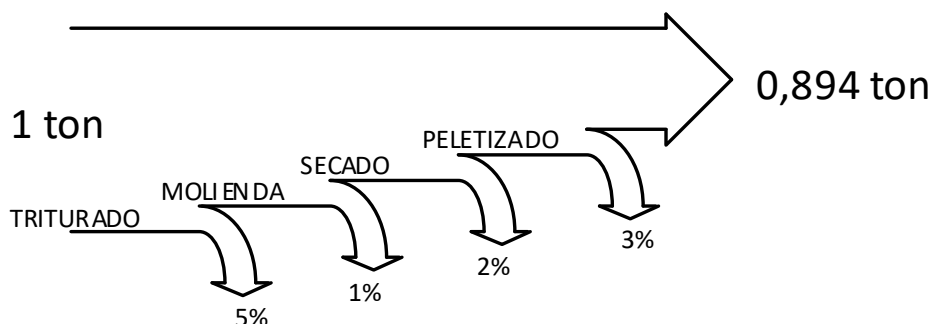
### **9.2. Pérdida de masa en el proceso de peletización.**

Durante el proceso de peletización se generan pérdidas de masa en la materia prima; estas pérdidas pueden responder a procesos evaporativos o pérdida de material particulado durante el transporte y afectan directamente la cantidad de biomasa disponible para la generación eléctrica.

A continuación, se presentan las pérdidas en peso esperadas para el proceso de peletización planteado, acorde a la literatura.



Figura 44. Pérdidas de masa durante el proceso de peletización.



El proceso de triturado puede representar hasta 7,5% en la pérdida de masa [182], no obstante dicho valor es descrito para fuentes herbáceas con mayor contenido de humedad, con lo que se asume una pérdida de masa para este estudio de 5% esto se debe tanto a la reducción de las partículas que puede provocar que las mismas sean llevadas en el aire, como al calor generado por la fricción de las partículas que ocasiona pérdidas de humedad.

La molienda conlleva una pérdida relativamente marginal y ocasionada principalmente por la producción de finos o partículas que se quedan en el tambor de la maquinaria [183]. Para este estudio se asume un valor de 1%

El secado de la biomasa busca reducir el contenido de humedad, lo que directamente reduce la masa de la biomasa, acorde a wood products [184] es posible establecer la humedad de la madera en función de la temperatura y la humedad relativa del lugar donde esta se encuentra; de tal modo que, para las condiciones ambientales presentes en El Tarra [185], [186], la madera del Jacaranda Copaia contiene un porcentaje de humedad entre 16 y 17% peso húmedo. Tal que, si se desea llegar a 15% peso húmedo para el proceso de peletización, la pérdida de masa será de 2%.

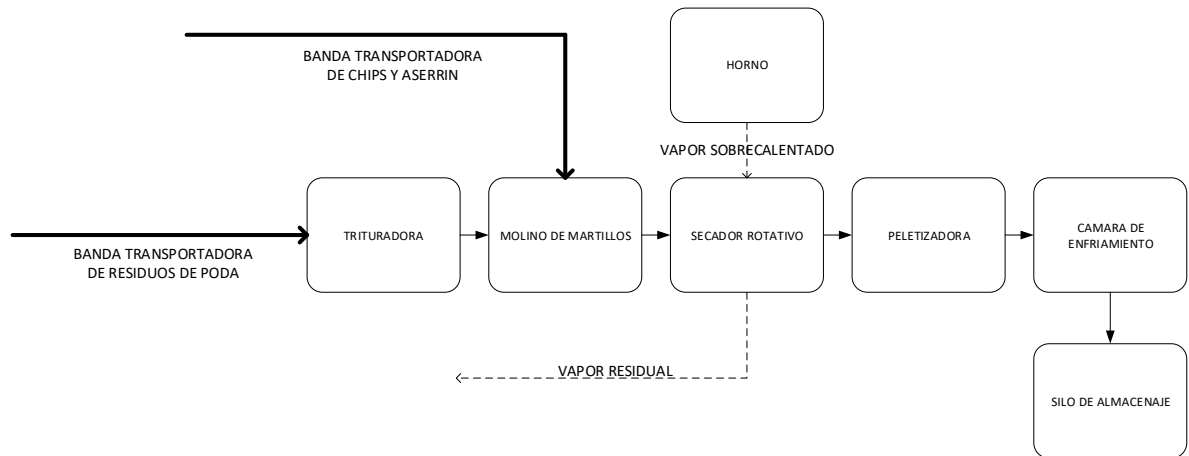
Finalmente, Crawford N et al. [168] realizan un análisis de la producción de pellets de diferentes fuentes de biomasa evidenciando que la pérdida de masa por evaporación en el proceso de peletizado puede variar desde 4,97% hasta 1% acorde a la especie, para este estudio se tomó un valor medio de 3%.

Dado lo anterior, por cada tonelada de materia prima utilizada para la peletización, es posible producir 0,894 toneladas de pellets.

### 9.3. Dimensionamiento de la planta peletizadora.

La Figura 455 presenta el esquema general de la planta peletizadora propuesta

Figura 45. Diagrama conceptual de la planta peletizadora.



Durante los primeros seis (6) años de establecimiento del cultivo forestal, la planta peletizadora funcionara únicamente con los residuos de poda producto del mantenimiento del cultivo. No obstante, el factor de diseño ha de ser la carga esperada a partir del año séptimo, ya que será esta la disponibilidad de recurso nominal del proyecto. Por lo tanto, la biomasa disponible será la siguiente: 843,75 ton/año de residuos de poda y 689,06 ton/año de chips y aserrín. Considerando 8760 horas laborables y un factor de planta de 0,8, la disponibilidad horaria de biomasa sería de 120,4 kg/h de residuos de poda y 98,3 kg/h de chips y aserrín. De este modo y dadas las perdidas establecidas en la Figura 444, la Figura 466 presenta el flujo másico para la planta peletizadora.

La producción de pellets esperada es de 200,15 kg/h o 1.402,65 ton/año, respecto a las características fisicoquímicas se esperaría obtener pellets con una durabilidad mecánica mayor a 97%, una densidad aparente mínima de 650 kg/m<sup>3</sup> [164], [169], [170] y unas dimensiones de 6x20 ms. De este modo la densidad energética de los pellets producidos a partir de Jacaranda Copaia es de 12.805 MJ/m<sup>3</sup>.

La Figura 477 presenta, acorde a las condiciones dadas, las capacidades y consumos de las principales maquinarias involucradas en el proceso de peletización. Teniendo en cuenta las capacidades industriales disponibles para compra, se evidencia que la mayoría de los equipos se encuentran diseñados para flujos másicos mayores a los previstos, esto resulta en ineficiencias en los consumos energéticos, los cuales sin tener en cuenta los equipos auxiliares (bandas transportadoras, ventiladores, etc.) suman 33 kWh.

Figura 46. Flujo másico de la biomasa a través del proceso de peletización.

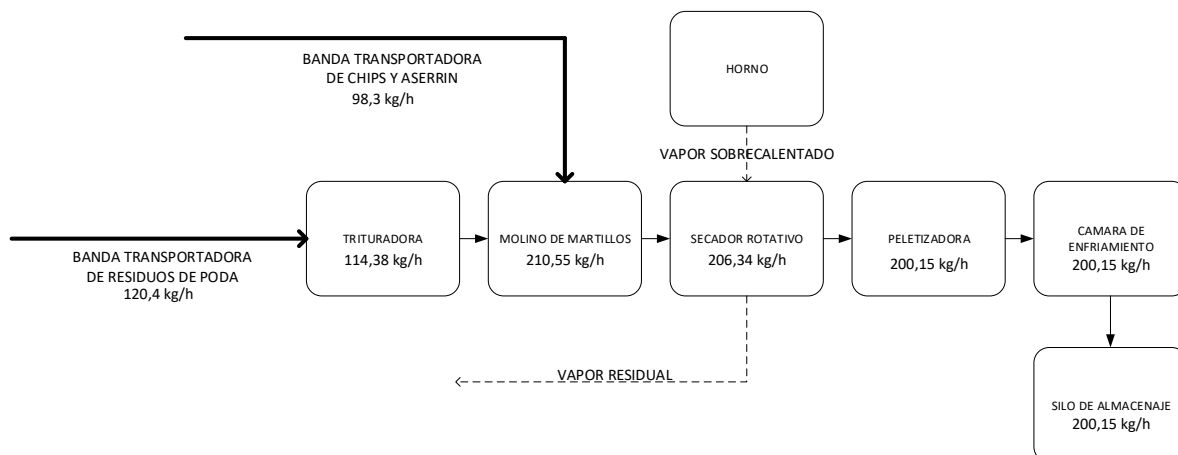
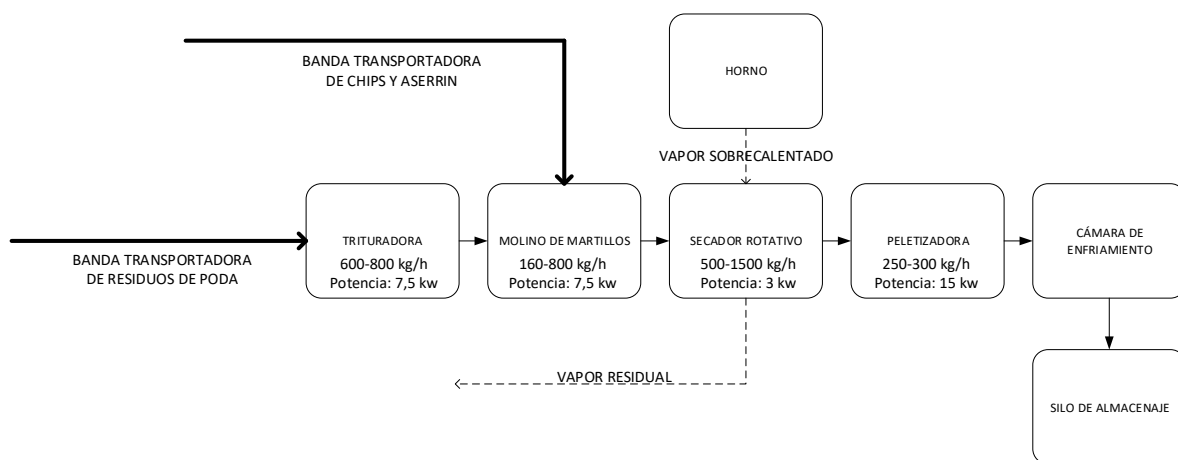


Figura 47. Capacidad y potencia de los principales equipos del proceso de peletización.



Referente a los precios de los equipos analizados, estos se encuentran cotizados en el mercado internacional a 14.551 USD, los cuales se estiman puedan ascender a 20.000 USD si se tienen en cuenta las obras civiles y los equipos auxiliares. Las características generales de los equipos analizados se encuentran en la Tabla 200.

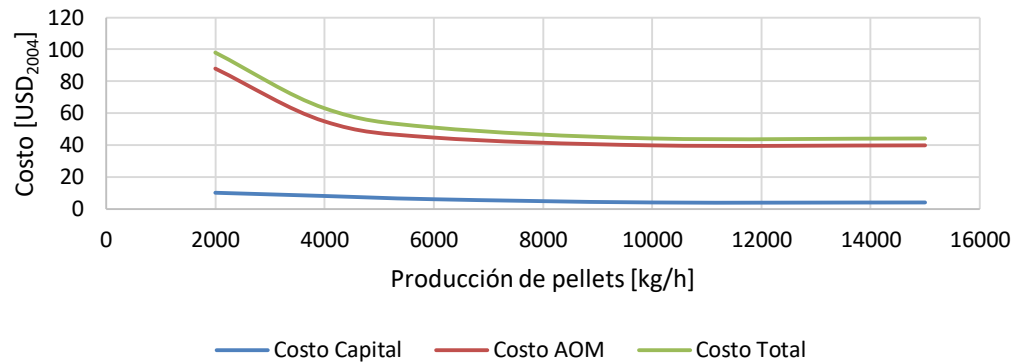
Tabla 20. Características de los equipos principales para el proceso de peletización

Equipo	Modelo	Capacidad en kg/h	Potencia en kW	Precio en USD	Referencia
Trituradora	YY204	600-800	7,5	400	[187]
Molino de martillos	LWF-40	160-800	7,5	5000	[188]
Secador rotativo	YKRD06 06	500-1500	3	8151	[189]
Peletizadora	9PK-250	250-300	15	1000	[190]

Los consumos energéticos (eléctricos) del horno y la cámara de enfriamiento se consideran despreciables respecto a los demás equipos.

Al respecto de los costos de producción S. Mani et al. describen la relación entre la producción de la planta y los costos capitales y de administración, operación y mantenimiento (AOM) [191], tal como se muestra en la Figura 488.

Figura 48. Relación entre la producción de pellets y los costos de producción.



Fuente: Adaptado de [191]

El análisis de la curva planteada por S. Mani permite determinar una ecuación polinómica que describe la curva con un  $R^2=1$ , la ecuación se presenta a continuación

$$CT = 2P^4 * 10^{-14} - 6P^3 * 10^{-10} + 9P^2 * 10^{-6} - 0,0546P + 176,78$$

Donde,

CT= costo total en USD<sub>2004</sub>

P= producción de pellets en kg/h

Dado lo anterior, para una planta peletizadora de 200,15 kg/h el costo de producción es de 166,19 USD<sub>2004</sub>; si se incluye una tasa de descuento de 12% [192] (usualmente utilizada para los proyectos públicos) y se tienen en cuenta los efectos inflacionarios del dólar durante los últimos años [193], el precio de venta estimativo de pellets sería de 253,68 USD<sub>2019</sub>/ton.

## 9.4. Generación Eléctrica.

### 9.4.1. Tecnología de conversión

La biomasa requiere ser transformada para poder ser utilizada como energético en la producción de electricidad, estos procesos se reducen a cuatro principales vertientes: biodigestión, combustión directa, gasificación y pirolisis; de estas cuatro se descarta la

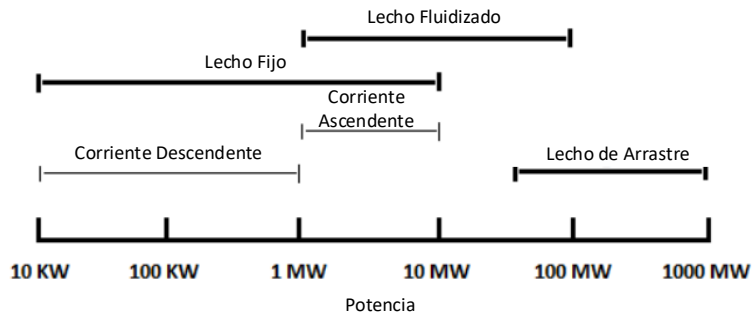
biodigestión ya que se utiliza principalmente residuos pecuarios y la pirolisis ya que es una tecnología en desarrollo de la cual no se cuenta con mayor experticia a nivel nacional fuera de la producción de carbón vegetal.

Por otro lado, la combustión directa y la gasificación son dos tecnologías previamente aplicadas en el ámbito nacional, el mayor exponente de la primera son los procesos de cogeneración en los ingenios azucareros, mientras que en el segundo se pueden destacar dos proyectos pilotos, el primero es el gasificado de madera de Necoclí y el segundo es la planta gasificadora de Santa Bárbara, ambos proyectos liderados por el Instituto de Promoción y Planificación de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas.

Sin embargo, Diosa et al. [194] realizan un análisis comparativo entre las diferentes alternativas de generación eléctrica a partir de biomasa lignocelulosa concluyendo que para una central de 1 MW la tecnología de mayor eficiencia es la gasificación al consumir menor cantidad de materia prima por unidad de energía producida. Más aun, el producto del proceso de gasificación es un gas pobre o gas de síntesis el cual puede ser almacenado, quemado o usado para generación eléctrica a través de múltiples tecnologías, dotando a esta alternativa de una mayor versatilidad en el uso del vector energético. Logísticamente, esto también representa una gran ventaja, ya que el proceso de combustión directa requiere el acoplamiento de turbinas a vapor, las cuales cuestan más y ocupan mayor volumen que los motores alternativos utilizados para el gas de síntesis [195]. Desde el punto de vista ambiental, la gasificación produce menores cantidades de ceniza y emisiones que la combustión directa, por lo que se considera esta alternativa como la más adecuada para la conversión de la materia prima. No obstante, es necesario hacer claridad en que no existe dominancia tecnológica en el ámbito nacional de esta tecnología y los proyectos pilotos realizados previamente fueron infructuosos, por lo que se considera como parte fundamental de esta tecnología la asesoría de personal especializado internacional.

Aunque se considere la gasificación como alternativa para la generación eléctrica, existen varios métodos de aprovechamiento en esta tecnología. Al respecto, La Rovere et al. [196] clasifican las mejores tecnologías de aprovechamiento en función de la potencia esperada, tal como se muestra en la Figura 499. De este modo, es necesario obtener un estimativo de la potencia esperada para lograr definir la tecnología de gasificación más apropiada para el proyecto.

Figura 49. Tecnologías de gasificación de acuerdo a la potencia instalada



Fuente: Adaptado de [196]

Para determinar la potencia estimativa esperada, es necesario considerar los procesos a los cuales se verá sometida la biomasa para lograr la generación eléctrica. En primera instancia los pellets serán gasificados, siendo este un proceso térmico en el que se incluyen procesos de combustión, gasificación y pirolisis es posible estimar una eficiencia energética de 75% [197]. Posteriormente el gas será utilizado en un motor alternativo transformando la energía térmica de la combustión del gas en energía mecánica hacia los pistones del motor, este proceso puede tener una eficiencia típica de 20% [198], finalmente la transmisión de la energía mecánica en el eje del motor hacia el generador puede llegar a 92% [199]. De este modo, por cada kW bruto contenido en los pellets, es posible obtener 0,264 kWe. Finalmente, si se cuenta con una producción de 200,15 kg/h y una densidad energética de 19,7 MJ/kg; el potencial de los pellets sería de 1095,264 kW, mientras la central de generación se encontraría en el orden de los 151 kWe y por lo tanto requeriría el uso de gasificadores de lecho fijo y corriente descendente.

#### 9.4.2. Dimensionamiento

La Tabla 211 presenta las características del combo gasificador-generador PowerMax® DFBG200, el cual se ajusta a las condiciones de producción de pellets definidas con anterioridad.

Nótese que el gasificador seleccionado permite una generación mayor a la estimada anteriormente con el mismo flujo de biomasa, por lo que se presupone que estos sistemas se encuentran optimizados para este tipo de procesos.

Tabla 21. Especificaciones técnicas del sistema de generación de energía de gasificación DFBG 200.

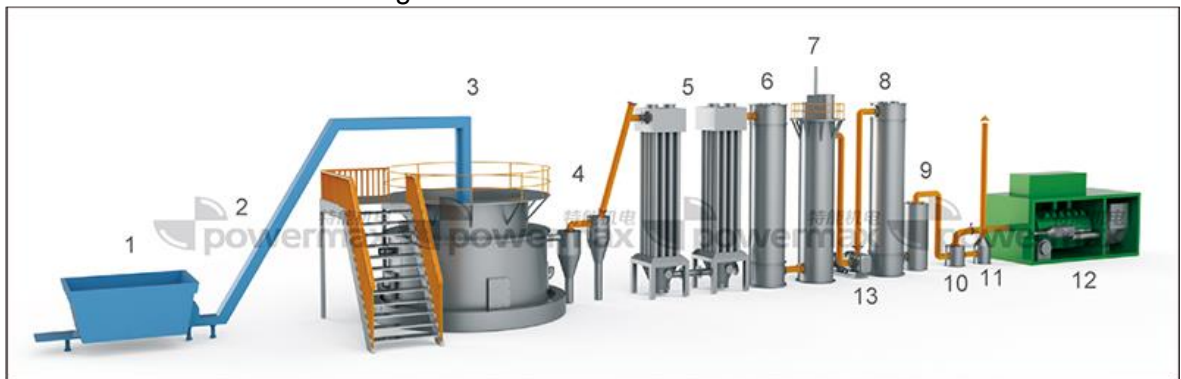
Ítem	Valor
Potencia nominal (kW)	200
Frecuencia nominal	50/60 Hz
Voltaje nominal (V)	220/400/440/6300/6600/11000/13800
Tipo de gasificador	Gasificador de lecho fijo y corriente descendente

Requerimiento de humedad de la biomasa	≤16% (base húmeda)
Tamaño de partícula de la biomasa requerida	Menor a 1 cm
Consumo de biomasa (kg/h)	200-400
Producción de gas (Nm <sup>3</sup> /h)	500-600
Tipo de descarga de cenizas	Ceniza seca
Tipo de purificación del gas	Sistema de purificación de gas tipo seco
Poder calorífico del gas	≥1100kcal/Nm <sup>3</sup>
Composición del gas	CO-15~20%, CO <sub>2</sub> -8~12%, CH <sub>4</sub> -hasta 4% H <sub>2</sub> -10~15% N <sub>2</sub> -45~55%
Modelo de generador	100GFLS
Cantidad de generadores	2

Fuente: Adaptado de [200]

La Figura 5050 presenta un esquema representativo del sistema de gasificación-generación DFBG 200.

Figura 50. Gasificador DFBG 200.



- |                            |                              |                               |  |
|----------------------------|------------------------------|-------------------------------|--|
| 1. Tolva de almacenamiento | 4. Ciclón colector de arena. | 7. Decantador electroestatico | 10. Tanque de reserva.                     |
| 2. Cinta de alimentación   | 5. Enfriador de aire.        | 8. Engrizador de gas.         | 11. combustión del gas.                    |
| 3. Gasificador             | 6. Enfriador de gas.         | 9. Secador de gas.            | 12. Juegos de generadores a partir de gas. |

Fuente: Adaptado de [200]

Referente al costo de inversión y AOM para la gasificación y generación, G. Fracato et al. [201] establecen los costos nivelados de para una central generadora a partir de biomasa en Brasil. De este modo, los costos capitales de producción son: 782,7 USD/kWe para el gasificador, 361,6 USD/kWe para el generador y 1.224,4 USD/kWe para la central generadora, por lo que la inversión total para la planta generadora de 200 kW sería de 474.780 USD.

Por otro lado, los costos AOM anualizados son calculados como 4.032 USD/año para la mano de obra y 2.846 USD/año para el mantenimiento.

## 9.5. Análisis de la alternativa de generación energética con apoyo del software Homer PRO

### 9.5.1. Variables de entrada.

Se definió la disponibilidad de biomasa tal como se muestra en la Figura 511. La disponibilidad del recurso diario se obtuvo mediante la multiplicación del flujo de pellets diario por veinticuatro (24) horas por el factor de operación de la planta (0,8). El contenido de carbón de la biomasa se obtuvo acorde a datos de la literatura para fuentes maderables [28], [40]. El radio de gasificación fue calculado de tal manera que se conservara el poder calorífico por unidad de masa en el gas de síntesis (este es 19,7 MJ/kg) dado que el fabricante no presenta estos datos. Finalmente, el poder calorífico se asumió como 19,5 MJ/kg para el gas de síntesis, dato obtenido por aproximación matemática al utilizar un factor de gasificación de 0,59 kg/kg para tratar de mantener el valor más cercano al poder calorífico de la biomasa.

Figura 51. Recurso de biomasa.



La Figura 522 presenta la ventana principal del generador a base de biogás de 200 kW, en él se incluyen los costos capitales del generador, el gasificador y la central de generación, así como los costos de reemplazo del generador y los costos de operación y mantenimiento (todas las unidades en US dólares). De este modo, el costo capital de la central de generación es de USD 474.780 con un costo de reemplazo del generador de USD 72.320 y un costo O&M de 0,63 USD/h.

La Figura 533 presenta el consumo de combustible del generador en términos másicos, asumiendo que la densidad del gas de síntesis es de 0,236 kg/Nm<sup>3</sup>, lo que resulta en un consumo nominal de 118 kg/h acorde a la tabla de consumo provista por Powermax®.



Figura 52. Ventana principal generador 200 kW gen.

**GENERATOR** Name: 200 kw gen Abbreviation: Gen200

**Properties**

Name: **200 kw gen**

Abbreviation: **Gen200**

Manufacturer: **Generic**

[www.homerenergy.com](http://www.homerenergy.com)

Notes:

**Costs**

Capacity (kW)	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/op. hr)
200	\$474,780.00	\$72,320.00	\$0.63

Click here to add new item

Multiplier:

**Sizing**

Size (kW)

0

200

**Site Specific Input**

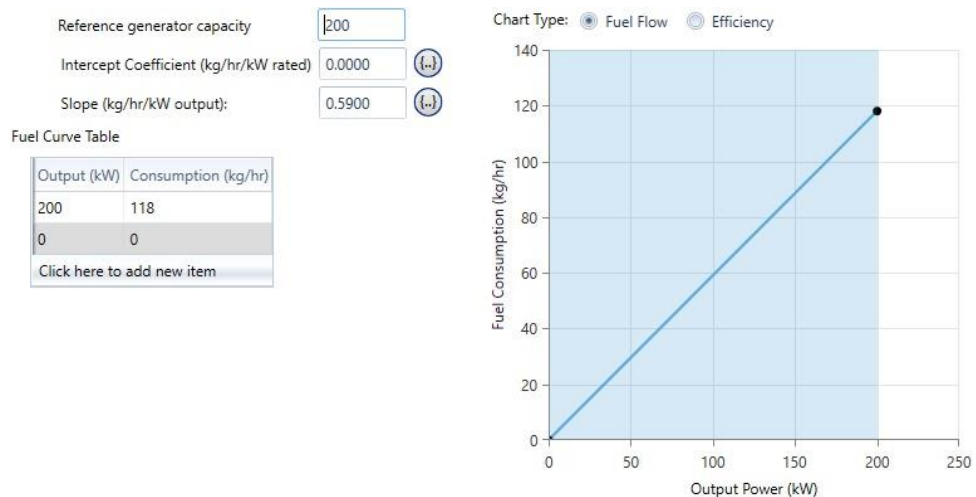
Minimum Load Ratio (%): 0.00  CHP Heat Recovery Ratio (%): 0.00  Lifetime (Hours): 15,000.00

Minimum Runtime (Minutes): 0.00  Biogas Fuel Price (\$/kg): 1.000

**Electrical Bus**

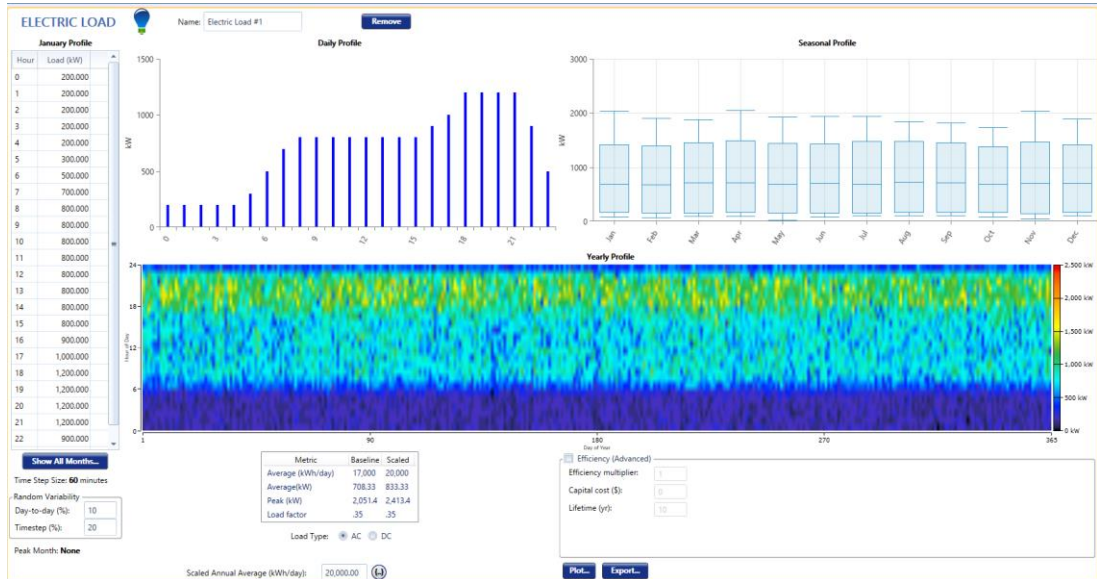
AC  DC

Figura 53. Curva de consumo de combustible para el generador 200 kW gen



Adicionalmente se asume una carga de 17 MW como una demanda representativa para el sistema de transmisión regional de la zona evaluada según datos del operador nacional XM (véase Figura 544), y se toma un precio de la energía de la red de 498,6 COP/kWh [202] o 0,1473 USD/kWh si se asume una tasa representativa del mercado de 3.384,09 COP/USD [203].

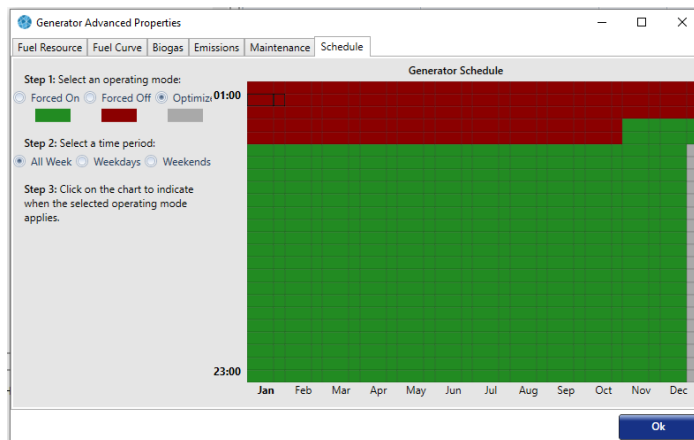
Figura 54. Carga eléctrica representativa



### 9.5.2. Simulación de la solución energética.

El sistema planteado se encuentra integrado por la red, la carga representativa y el generador a base de biomasa. Con fines de simular la alternativa planteada se estipuló una carga mínima para el generador a base de biomasa de 100% y se determinó un factor de operación de 0,8, tal como se muestra en la Figura 555.

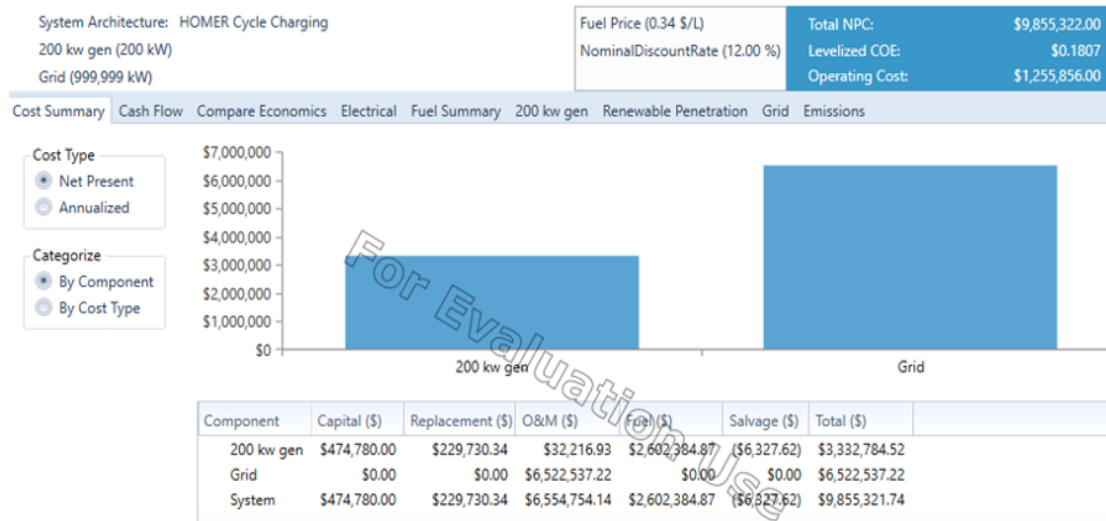
Figura 55. Horario de funcionamiento para el generador a partir de biomasa.



Dadas las condiciones planteadas y una vida útil del proyecto de veinte (20) años, a una tasa de descuento de 12%, los costos del generador a base de biomasa ascienden a 3'332.784,22 USD, mientras que los costos de la red serían de 6.522.537,22 USD, por concepto de O&M, tal como se muestra en la Figura 566.

Por otro lado, el costo nivelado de la energía sería de 0,1807 USD/kWh o 611,55 COP/kWh, alto para el sistema interconectado, pero a la par de los costes para otras centrales térmicas del país.

Figura 56. Balance general de costos



Referente al consumo de combustible, se evidenció un factor de planta de 78,4% con un consumo medio de combustible de 3,76 t/día (véase Figura 577) y un costo marginal de generación de 0,254 USD/kWh o 859 COP/kWh.

La Figura 588 también permite evidenciar como siendo utilizado el mayor tiempo posible, la eficiencia del sistema es de tan solo 31,4%, lo que en conjunto con los altos precios de generación contrarían las capacidades de aprovechamiento para el potencial dendroenergético del municipio de El Tarra.

Figura 57. Consumo de combustible

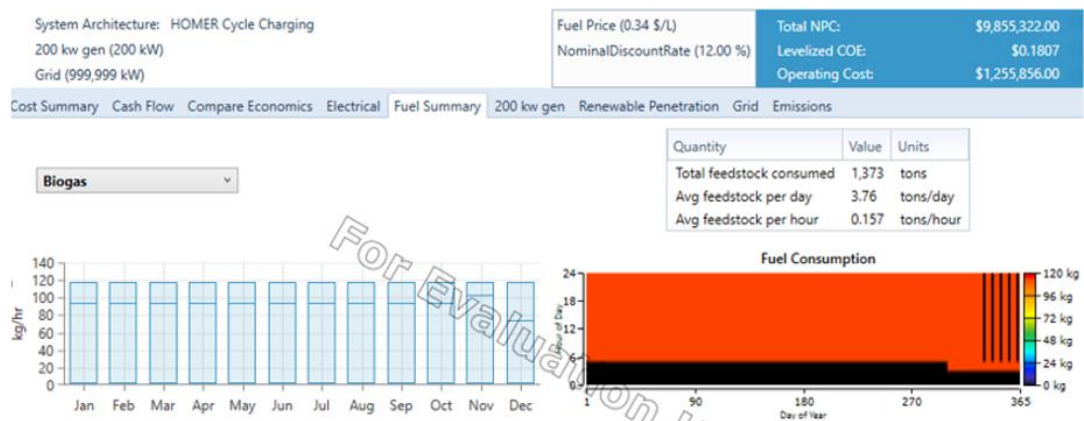


Figura 58. Generación del generador a base de biomasa.

System Architecture: HOMER Cycle Charging 200 kw gen (200 kW) Grid (999,999 kW)			Fuel Price (0.34 \$/L) NominalDiscountRate (12.00 %)	Total NPC: \$9,855,322.00 Levelized COE: \$0.1807 Operating Cost: \$1,255,856.00				
Cost Summary	Cash Flow	Compare Economics	Electrical	Fuel Summary	200 kw gen	Renewable Penetration	Grid	Emissions
Quantity	Value	Units	Quantity	Value	Units	Quantity	Value	Units
Hours of Operation	6,867	hrs/yr	Electrical Production	1,373,400	kWh/yr	Fuel Consumption	1,373	tons/yr
Number of Starts	365	starts/yr	Mean Electrical Output	200	kW	Specific Fuel Consumption	0.590	kg/kWh
Operational Life	2.18	yr	Minimum Electrical Output	200	kW	Fuel Energy Input	4,377,903	kWh/yr
Capacity Factor	78.4	%	Maximum Electrical Output	200	kW	Mean Electrical Efficiency	31.4	%
Fixed Generation Cost	5.45	\$/hr						
Marginal Generation Cost	0.254	\$/kWh						

### 9.5.3 Comparación de alternativas.

Se incluyó para el análisis comparativo un generador diésel de tamaño automático con un coste de combustible de 2.331,06 COP/l y se permitió al sistema elegir la opción más adecuada para la generación.

En comparación con la red, tanto el generador diésel como el generador a base de biomasa, tienen precios de generación caros. Por lo tanto, al permitir la elección de la mejor alternativa al sistema, este selecciona la red como la mejor alternativa, y aunque considera la instalación de las plantas a modo de respaldo, en ninguno de los escenarios considerados por el sistema es posible generar energía bajo otro medio, tal como se ve en la Figura 599.

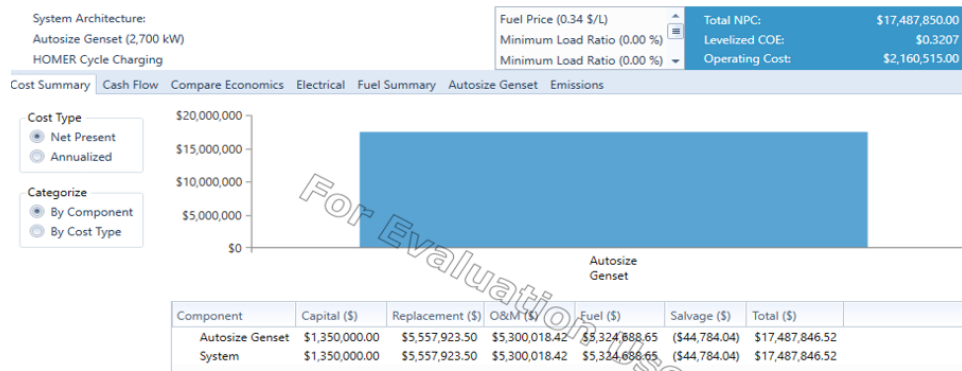
Figura 59. Alternativas seleccionadas por el sistema

Architecture	Gen200 (kW)	Gen (kW)	Grid (kW)	Dispatch	NPC (\$)	COE (\$/kWh)	Operating cost (\$/yr)	Initial capital (\$)	Ren. Frac. (%)	Simple Payback (yr)	Hours	Production (kWh)	Fuel (kg)	OBM Cost (\$/yr)	Fuel Cost (\$/yr)	Hours	Production (kWh)	Fuel (\$)	OBM Cost (\$/yr)	Fuel Cost (\$/yr)	Energy Purchased (kWh)	Energy Sold (kWh)	
	200	999,999	CC		\$8,03M	\$0.147	\$1,08M	\$0.00	0		6,867	0	0	4,313	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	200	2,700	999,999	CC	\$9,24M	\$0.170	\$1,06M	\$1,35M	0		6,867	0	0	4,313	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	200	2,700	999,999	CC	\$9,98M	\$0.183	\$1,09M	\$1,82M	0		6,867	0	0	4,313	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Con la finalidad de evitar la fuerte intervención de la red en la evaluación de los sistemas, se suprimió esta de las fuentes de energía, dejando únicamente el generador a partir de biomasa y el generador diésel.

La Figura 6060 presenta la comparativa entre la generación diésel y la generación con biomasa. Acorde a los datos presentado por Homer Pro se da prioridad a la generación diésel sobre la biomasa, tal como se aprecia en la Figura 6060

Figura 60. Escenario solo diesel.



El costo presente neto para la producción a partir de diésel es de USD 17'487.846,52, mientras que para el sistema combinado seleccionado por el sistema este valor aumenta a USD 18'185.210,14 (véase la Figura 611), a pesar que el factor de planta para la generación a partir de biomasa es únicamente de 0,224% (véase la Figura 622)

Figura 61. Escenario diesel y biomasa

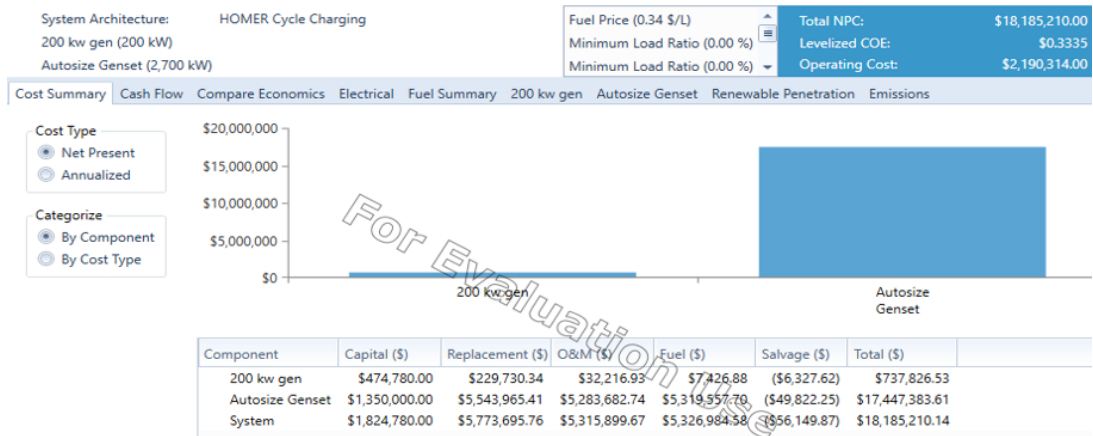
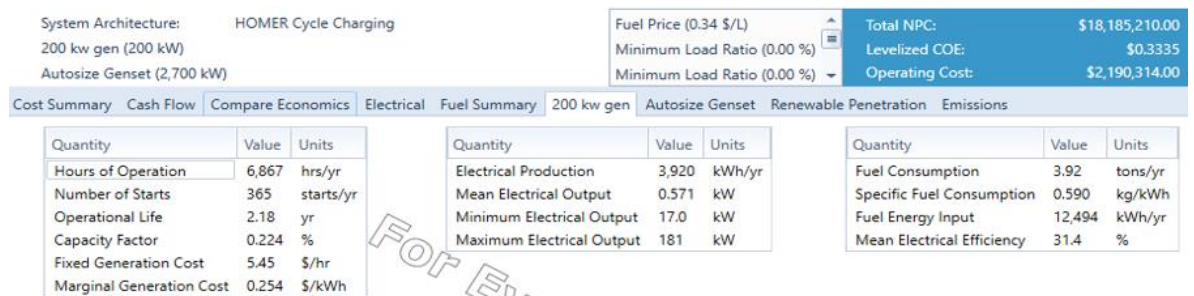


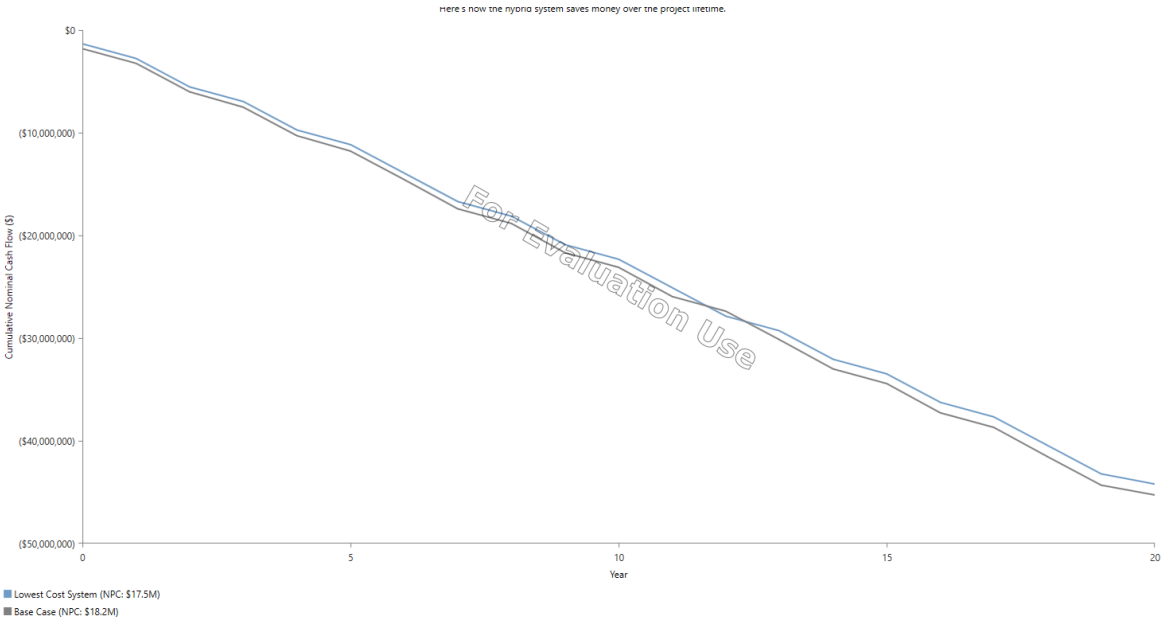
Figura 62. Generación a partir de biomasa para el escenario diesel y biomasa.



Finalmente la Figura 633 permite realizar la comparativa económica entre los dos escenarios anteriores, en el cual se evidencia que por mínima que sea la participación de

la biomasa en el sistema, este se ve perjudicado económicamente, lo que se debe principalmente al alto precio de los pellets que no rentabiliza la operación.

Figura 63. Comparativa económica de la alternativa solo diesel y diesel-biomasa



## 10. DISCUSIÓN.

Los departamentos de Norte de Santander y Putumayo son los más afectados por la plantación de cultivos ilícitos, si bien esta problemática comprende todas las áreas de pobreza multidimensional y requiere un enfoque social y de presencia del estado para asegurar la no repetición, el gobierno nacional ha desarrollado múltiples programas para dar solución a esta problemática desde dos aspectos fundamentales: la erradicación de los cultivos ilícitos como parte de la lucha contra las drogas, y el mejoramiento de la calidad de vida de las comunidades como respuesta a la problemática social que incentiva el cultivo de especies ilícitas. Este estudio analizó una alternativa con potencial de abordar ambas problemáticas: la sustitución de cultivos ilícitos por cultivos energéticos.

El análisis del municipio de El Tarra permitió caracterizar que su topografía es primordialmente de suelos húmedos y muy húmedos bien drenados con baja fertilidad, lo que dificulta la producción de los principales cultivos energéticos (Arundo Donax, Eucalyptus, etc.). No obstante, el análisis de múltiples estudios en la zona, identificó una especie endógena con características adecuadas para su aprovechamiento dendroenergético. El Jacaranda Copaia es una especie forestal de rápido crecimiento, la cual puede alcanzar hasta 35 metros de altura en un periodo de 7 años, la cual se encuentra catalogada como una especie objetivo para proyectos de restitución y fortalecimiento de suelos.

De este modo, desde el punto de vista dendroenergético se encontró la viabilidad técnica de sustitución de cultivos. Sin embargo, un análisis más profundo de las características de la especie forestal evidencia que dadas las características aromáticas de la madera permite el aprovechamiento maderero de la misma. Este aspecto permitió diseñar un proyecto multidimensional, en el cual no únicamente se busca el aprovechamiento energético del recurso, sino también su integración a los programas de reforestación y fortalecimientos de suelos, así como su aprovechamiento por la industria maderera (la cual genera una economía satélite en las comunidades productoras y produce mayores ingresos que el aprovechamiento energético).

La acotación del área de influencia se realizó en un trayecto de 5 km sobre la vía Ocaña-Concepción con un radio de acción de 400 m. Si bien esta área fue escogida arbitrariamente por el autor, el objeto de la misma es reducir tanto como sea posible los costos de transporte de la materia prima. Para definir el área óptima de aprovechamiento es necesario realizar un análisis multivariable de las diferentes alternativas de transporte basados en los costos reales de la zona.

Dadas las condiciones planteadas se identificó un potencial de sustitución de 6,46 ha con una producción de pellets probable de 253,68 USD/ton, aproximadamente 100 USD/ton

más caro que las referencias internacionales. Esto se debe a que el proceso planteado apenas alcanza los límites mínimos de un proceso semindustrial.

Se determinó que la mejor opción para la generación eléctrica es la construcción de una central gasificadora de 200 kW en el municipio de El Tarra. La cual, acorde a los resultados de Homer Pro, no es económicamente competitiva con un costo nivelado de la energía de 0,1807 USD/kWh o 611,55 COP/kWh y un costo marginal de generación de 0,254 USD/kWh o 863,6 COP/kWh.

No obstante, en este último aspecto es necesario acotar dos aspectos fundamentales. El Banco Interamericano de Desarrollo establece que el objeto de los proyectos públicos no ha de ser el beneficio público sino el mejoramiento de la calidad de vida, por lo que no es posible evaluarlos económicamente mediante el uso del VPN, sino que se propone una estructura de beneficios económicos ocultos relacionados con los cambios de divisas, la inversión en proveedores locales y el mejoramiento en la calidad de vida de las personas, estos aspectos se condensan en el denominado VPN social [204], el cual habría de tener en cuenta el beneficio que se generaría al departamento por el fortalecimiento de suelos y el beneficio a la comunidad por el fomento de empleos y una industria maderera.

En segundo lugar, es claro que el principal factor para la baja rentabilidad del proyecto es el alto coste de la materia prima, es decir los pellets, derivado de la baja disponibilidad de biomasa para este proceso; dicha disponibilidad está condicionada a que el proyecto prioriza la producción maderera sobre la producción de pellets, por lo que si se quisiera tener una visión integral del proyecto, sería necesario reconocer los costos y beneficios de esta actividad.



## 12. CONCLUSIONES

Se evaluó el aprovechamiento dendroenergético como una alternativa para la sustitución de cultivos ilícitos. Al respecto se concluye lo siguiente.

Entre los principales municipios afectados por esta problemática se concluye que aquel con mayor probabilidad de éxito en la implementación de estos proyectos es el municipio de El Tarra, Norte de Santander; seleccionado en base a su bajo índice de permanencia de cultivos, un factor estrechamente ligados con la presencia de grupos criminales organizados. No obstante, cabe notar que durante los últimos años se ha evidenciado un aumento en la actividad criminal de la región del Catatumbo, potenciada por la lucha territorial entre diversas bandas criminales.

El municipio de El Tarra se encuentra localizado en una zona de bosques húmedos y muy húmedos, donde los terrenos son arcillosos, bien drenados y poco fértiles. Por lo que, la presencia de cultivos ilícitos no solo representa una problemática de orden público, sino también ambiental, al acelerar los procesos de erosión de la tierra y debilitar la cohesión entre las diferentes capas del terreno, provocando deslizamientos. De este modo, es necesario incorporar una alternativa que no únicamente considere el aprovechamiento energético sino también los efectos sobre los deteriorados suelos.

La especie forestal Jacaranda Copaia se presenta como la mejor alternativa para sustitución de cultivos ilícitos. Se trata de un árbol de rápido crecimiento, el cual tiene un tiempo de rotación de siete (7) años, en el cual puede alcanzar hasta treinta y cinco (35) metros de altura es catalogado como una especie potencial para el fortalecimiento de suelos, y, al tratarse de una madera aromática, puede ser aprovechada para la fabricación de tablonés, muebles, viviendas, etc.

El máximo aprovechamiento de la especie potencial viene dado al implementar un programa que involucre la restitución de los suelos, la explotación maderera y el aprovechamiento energético. De este modo, se genera una industria local maderera que se configura como la principal fuente de recursos económicos del programa, soportado por un aprovechamiento energético de los residuos a través de la producción de pellets y, un componente ambiental configurado por el establecimiento del cultivo.

El área probable de aprovechamiento en el municipio es de 6,45 ha, aproximadas por fines prácticos a 7 ha potenciales, con lo que se establece un área de aprovechamiento forestal anual de 1 ha. Desde el punto de vista dendroenergético, esto representa una producción de pellets de 200 kg/h, con un coste de producción de 253,68 USD/ton; aproximadamente 100 USD/ton por encima de las referencias internaciones para pellets Premium.

Durante los primeros 6 años del establecimiento del cultivo de Jacaranda Copaia se obtiene un potencial dendroenergético de 38.784.376 MJ debido a los residuos de poda y a partir del séptimo año el potencial dendroenergético es de 30.196.406 MJ/año ya que se incluyen los residuos del aserradero.

La alternativa más adecuada para la generación eléctrica a partir de biomasa, dadas las condiciones del proyecto, es la gasificación con lecho fijo en flujo descendente. Bajo estos parámetros es posible lograr un costo marginal de generación de 863,6 COP/kWh. En este aspecto, al comparar directamente la generación diésel a la generación a partir de biomasa Homer Pro selecciona el diésel como mejor alternativa. Sin embargo, para zonas no interconectadas, el precio reconocible para la generación diésel es de aproximadamente 1055 COP/kWh, por lo que podría considerarse como una alternativa para ciertas localidades del país.

El Tarra tiene un índice de cobertura de energía eléctrica de 99%, por lo que la energía generada ha de ser inyectada a la red local. De este modo, se simuló y comparó la generación a partir de biomasa contra la energía del sistema interconectado y la generación diésel. Bajo cualquier escenario, la energía a partir de biomasa es considerada como la peor alternativa y no se presenta como una alternativa competente para la generación eléctrica en la región. No obstante, existen externalidades a considerar que no son posibles ingresar dentro del software.

### 13. RECOMENDACIONES

El proyecto planteado no consiste exclusivamente en el aprovechamiento dendroenergético, sino que busca el máximo uso del recurso forestal. Por lo tanto, la principal fuente de ingreso no es constituido por la producción de energía sino por el aprovechamiento maderero y sus industrias satélites, de igual manera, el proyecto considera un beneficio ambiental que el software no reconoce. Por lo que se evidencia que al tratarse de proyectos multidimensionales Homer Pro no es una herramienta concluyente. Adicionalmente, al tratarse de un proyecto con un enfoque social y ambiental, existen beneficios ocultos que no son evidenciables en un análisis económico tradicional, sino que requiere el uso del Valor Presente Neto social.

Es necesario considerar que existe una relación inversamente proporcional entre el volumen de producción de pellets y el costo de producción. De este modo, la viabilidad económica de la alternativa planteada está sujeta a los altos costos de producción de pellets, derivados de los bajos volúmenes. Por lo tanto, para lograr precios competitivos sería necesario incrementar dicha producción a 2 ton/h, con lo que podrían esperarse precios de 100 a 170 USD/ton, lo que representaría un potencial de generación eléctrica de 2 MW y requeriría la sustitución de 56 ha de cultivos ilícitos por Jacaranda Copaia.

Se debería tener en cuenta el beneficio que se generaría al departamento por el fortalecimiento de suelos y el beneficio a la comunidad por el fomento de empleos y una industria maderera.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] U. de planeación minero energética (UPME), “Potencialidades de los cultivos energéticos y residuos agrícolas en Colombia”, Colombia, 2003.
- [2] Corporación EMA, “Determinación de inversiones y gastos de administración, operación y mantenimiento para la actividad de generación en ZNI utilizando recursos renovables”, 2012.
- [3] FAO, “Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura.”, 2017.
- [4] A. Damiens, *La Biomasa: Fundamentos, Tecnologías y Aplicaciones*, 1a ed. España, 2010.
- [5] Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito, “Monitoreo de territorios afectados por cultivos ilícitos 2016”, 2017.
- [6] A. Madrid Vicente, *LA BIOMASA Y SUS APLICACIONES ENERGÉTICAS.*, 1a ed. 2012.
- [7] D. H. y S. Alta Consejería para el Posconflicto, “Programa Nacional Integral de Sustitución de Cultivos Ilícitos”, 2017. .
- [8] Ministerio de Ambiente Colombia, “SIAC Sistema de información ambiental de Colombia”. .
- [9] R. Junguito, M. Delgado, y J. J. Perfetti del Corral, “Acuerdo de Paz : reforma rural, cultivos ilícitos, comunidades y costo fiscal.”, Colombia, 2017.
- [10] J. R. Quintero González y L. E. Quintero González, “Perspectivas del potencial energético de la biomasa en el marco global y latinoamericano”, *Gestión y Ambient.*, vol. 18, núm. c, pp. 179–188, 2015.
- [11] Biomass Users Network, “Manuales sobre energía renovable: Biomasa”, 2002.
- [12] WWF, “Maderas de Colombia”, 2015. .
- [13] Fedecombustibles, “Apostarle a la bioeconomía”. .
- [14] FAO, “De la Biomasa a la Energía Renovable: Dendroenergía en Argentina”, 2017. .
- [15] L. A. Formaci *et al.*, “La Energía De La Biomasa”.
- [16] Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), “Energías Renovables: Descripción, Tecnologías y Usos Finales”, Bogotá D.C, 2010.
- [17] BESEL S.A. (Departamento de Energía), “Biomasa: Gasificación”, Madrid, 2007.
- [18] R. Giraldo, “Hidrógeno mediante reformado catalítico con vapor de subproductos líquidos de procesos”, *Thermoconversion*, 2012.
- [19] REN21, “Renewables 2017: global status report”, 2017.
- [20] C. Mondial, D. E. L. É. Gie, Y. D. Kim, L. Birnbaum, G. Ward, y C. Frei, “Recursos energéticos globales”, London, 2013.
- [21] E. Cerdá, “Energía obtenida a partir de biomasa\*”.
- [22] B. Resources, B. P. Chain, y B. C. Processes, “Module 1: Techno-economic Background”.
- [23] T. D. E. C. General, “Costos Indicativos Generación Eléctrica en Colombia”, Bogotá D.C, 2005.
- [24] E. A. Esquivel Segura, “Evaluación de la Sustentabilidad de Plantaciones Dendroenergéticas en la Región Biobío Chile”, universidad de Cocepción, 2014.
- [25] “European Pellet Council Manual para la certificación de pellets de madera para usos térmicos Versión 2.0”, 2013.
- [26] M. Ståhl, K. Granström, J. Berghel, y R. Renström, “Industrial processes for biomass drying and their effects on the quality properties of wood pellets”, *Biomass and*

- Bioenergy*, vol. 27, núm. 6, pp. 621–628, 2004.
- [27] Cemento & Cement, “‘Peletizados’ una tecnología clave para el avance de la biomasa”, 2014. .
- [28] C. Kirsten, V. Lenz, H. W. Schröder, y J. U. Repke, “Hay pellets - The influence of particle size reduction on their physical-mechanical quality and energy demand during production”, *Fuel Process. Technol.*, 2016.
- [29] C. A. Forero, C. A. Guerrero, y F. E. Sierra, “Producción y uso de pellets de biomasa para la generación de energía térmica: una revisión a los modelos del proceso de gasificación”, *ITECKNE*, vol. 9, núm. 1, pp. 21–30, 2012.
- [30] AEONOR, “UNE-EN ISO 17225-2:2014”, 2014. .
- [31] C. Luca, R. Pilu, F. Tambone, B. Scaglia, y F. Adani, “New energy crop giant cane (*Arundo donax* L.) can substitute traditional energy crops increasing biogas yield and reducing costs”, *Bioresour. Technol.*, vol. 191, pp. 197–204, 2015.
- [32] R. Moya-Roque, A. Rodríguez-Zúñiga, C. Tenorio, J. Valdez, y J. Valaert, “Evaluación de la combustión de comprimidos cilíndricos fabricados con cultivos forestales y agrícolas en Costa Rica utilizando un quemador doméstico”, *Rev. For. Mesoam. Kurú*, 2015.
- [33] S. Aragón-Garita, R. Moya, B. Bond, J. Valaert, y M. Tomazello Filho, “Production and quality analysis of pellets manufactured from five potential energy crops in the Northern Region of Costa Rica”, *Biomass and Bioenergy*, vol. 87, pp. 84–95, 2016.
- [34] J. F. González *et al.*, “Combustion optimisation of biomass residue pellets for domestic heating with a mural boiler”, *Biomass and Bioenergy*, 2004.
- [35] G. D. Gillespie, C. D. Everard, C. C. Fagan, y K. P. McDonnell, “Prediction of quality parameters of biomass pellets from proximate and ultimate analysis”, *Fuel*, vol. 111, pp. 771–777, 2013.
- [36] J. M. Castellano, M. Gómez, M. Fernández, L. S. Esteban, y J. E. Carrasco, “Study on the effects of raw materials composition and pelletization conditions on the quality and properties of pellets obtained from different woody and non woody biomasses”, *Fuel*, vol. 139, pp. 629–636, 2015.
- [37] W. Stelte, J. K. Holm, A. R. Sanadi, S. Barsberg, J. Ahrenfeldt, y U. B. Henriksen, “A study of bonding and failure mechanisms in fuel pellets from different biomass resources”, *Biomass and Bioenergy*, 2011.
- [38] Z. Liu, B. Mi, Z. Jiang, B. Fei, Z. Cai, y X. Liu, “Improved bulk density of bamboo pellets as biomass for energy production”, *Renew. Energy*, vol. 86, pp. 1–7, 2016.
- [39] A. M. Portero, “Análisis térmico del proceso de peletizado del aserrín de madera de eucalipto (*eucalyptus globulus labill*) y copal (*dacryodes olivifera* cuatrecasas) y su influencia sobre la friabilidad de los”, UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO, 2014.
- [40] J. I. Arranz, M. T. Miranda, I. Montero, F. J. Sepúlveda, y C. V. Rojas, “Characterization and combustion behaviour of commercial and experimental wood pellets in South West Europe”, *Fuel*, vol. 142, pp. 199–207, 2015.
- [41] J. Remund, S. Mueller, S. Kunz, y C. Schilter, “Meteonorm handbook part I: software”, Switzerland, Tech. Rep, 2010.
- [42] TREMARCTOS COLOMBIA, “¿Qué hace tremarctos Colombia?”, 2019. [En línea]. Disponible en: [http://www.tremarctoscolombia.org/que\\_hace.html](http://www.tremarctoscolombia.org/que_hace.html). [Consultado: 04-ago-2019].
- [43] CI Colombia y UPME, “TREMARCTOS Colombia versión 3.0”, 2015.
- [44] HOMER Energy LLC, “HOMER Pro Version 3.7 User Manual”, *HOMER Energy*, núm. August. p. 416, 2016.
- [45] Homer energy LLC, “Homer energy”. .

- [46] A. Fernandez, “Dendroenergía: la energía renovable de los bosques”, 2014. .
- [47] S. Biomass, “Solid Biomass Barometer”, Brussels, 2015.
- [48] IEA, “Progress Toward Sustainable Energy”, 2017. .
- [49] A. V. Lopera, G. Manrique, y J. Prieto, “MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA DISEÑO DE UN PROYECTO PILOTO DENDROENERGETICO Y FORMULACION DE LINEAMIENTOS DE POLITICAS , ESTRATEGIAS E INSTRUMENTOS PARA EL FOMENTO”, Santa Fe de Bogotá, 1999.
- [50] U. N. de Colombia, *CENTRO DE INNOVACION TECNOLOGICA CON ENFASIS EN GASIFICACION 2011*, 1a ed. Medellin.
- [51] A. Cuevas, “La madera que dejó de generar energía”, 2013. .
- [52] UPME (Unidad de Planeacion Minero Energética) 1, “BECO, energéticos”, 2018. .
- [53] R. Quijano, J. Dominguez, y S. Botero, “Aplicación del modelo modergis en el uso sostenible de la dendroenergía y los biocombustibles para países en via de desarrollo - caso colombia”, 2010.
- [54] R. Wiesler, “Pélets de biomasa en España”, España.
- [55] N. America, “Wood pellets A booming sector that is cost-effective, environmentally friendly and comfortable!”, pp. 78–79, 2014.
- [56] B. Insight, “Dong Energy makes Studstrup plant run on wood pellets instead of coal”, en *Media Ltd, Marshall House, 124 Middleton Road, Morden, Surrey*, 2016.
- [57] L. Ventoso, “Inglaterra sueña con que su planta energética más sucia absorba su CO2”, 2015. .
- [58] A. of W. P. Canada, “Raw Materials”, *Annex Business Media*, 2015. .
- [59] National Renewable Energy Laboratory, “International Trade of Wood Pellets”, 2012.
- [60] W. Strauss, “Industrial Wood Pellets in Japan Market Drivers and Potential Demand”, Miami Beach, FL, 2008.
- [61] B. Insight, “Japan prepares for biomass power plant surge and increases imports of wood chips”, *Woodcote Media Ltd, Marshall House, 124 Middleton Road, Morden, Surrey*, 2017. .
- [62] EIA, “Monthly Densified Biomass Fuel Report”, *US Energy Information Administration*, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.eia.gov/biofuels/biomass/#dashboard>. [Consultado: 04-dic-2018].
- [63] AEBIOM, “Key Findings. Euroepan Bioenergy. AEBIOM statistical report Outlook”, 2017.
- [64] M. Cocchi *et al.*, “Global wood pellet industry market and trade study”, *IEA Bioenergy Task*, p. 190pp, 2011.
- [65] D. P. Garcia, “O mercado e as indústrias de pellets no Brasil”, Sao Pablo, 2014.
- [66] FAO, “Forestry Production and Trade”, 2017. .
- [67] European Heat & Power, “ENplus Certification Statistical Overview 2017”, 2017.
- [68] J. Windle, *Suppressing Illicit Opium Production. Successful Intervention in Asia and the Middle East*, 1a ed. I.B.Tauris & Co. Ltd., 2016.
- [69] J. Windle, “A Slow March from Social Evil to Harm Reduction : Drugs and Drug Policy in Vietnam”, en *Suppressing Illicit Opium Production. Successful Intervention in Asia and the Middle East*, 1a ed., I.B.Tauris & Co. Ltd., 2016, pp. 1–16.
- [70] J. Windle, “Drugs and Drug Policy in Thailand”, en *Suppressing Illicit Opium Production. Successful Intervention in Asia and the Middle East*, 1a ed., I.B.Tauris & Co. Ltd., 2016, pp. 1–16.
- [71] D. I. P. O.-F. Div. Registro y Estadística, “RESULTADOS OBTENIDOS EN LA LUCHA CONTRA EL NARCOTRÁFICO”, 2017. .
- [72] O. O. de D. de Colombia, “Reporte de drogas de Colombia 2016”, Bogota D.C, 2016.

- [73] K. Z. Guyton *et al.*, “Carcinogenicity of tetrachlorvinphos, parathion, malathion, diazinon, and glyphosate”, *Lancet Oncol.*, vol. 2045, núm. 15, pp. 1–2, 2015.
- [74] Semana, “Erradicación manual con glifosato: ¿aspirina para un cáncer?”, 2016. .
- [75] D. N. de Planeación, “GUARDABOSQUES Y GRUPO MÓVIL DE ERRADICACIÓN”, Bogotá D.C, 2012.
- [76] S. Uribe, “Desarrollo alternativo”, *Semana*, 2002. .
- [77] D. N. de Planeación, “El Consejo Nacional de Política Económica y Social, CONPES”, 2016. .
- [78] B. Ramirez, “Cultivo de coca: entre el campo y el narcotráfico”, *Agencia prensa rural*, 2018. .
- [79] F. Garcia, “Colombia: en 36 municipios se cumple sustitución de cultivos ilícitos”, *Agencia Anadolu*, 2018. .
- [80] Wikipedia, “El Tarra”, 2017. .
- [81] Alcaldía de El Tarra Norte de Santander, “Alcaldía de El Tarra Norte de Santander”, 2017. .
- [82] A. M. de E. T. N. de Santander, “Datos Generales El Tarra Norte de Santander 2012”, 2012. .
- [83] La opinión, “El Tarra, ejemplo piscícola para el Catatumbo”, 2018. .
- [84] “El Tarra, el Norte que somos”, 2012. .
- [85] TV San Jorge 15 años, “Vivimos el Tarra, corazón del Catatumbo Informe especial”, Colombia, 2013.
- [86] Asociación Campesina del Catatumbo - Ascamcat, “La crisis del Catatumbo: propuestas de solución”, 2013. .
- [87] La opinión, “Por fin será inaugurada la obra de Puente Rojo, en El Tarra”, 2017. .
- [88] El tiempo, “Evalúan nueva amenaza del Epl en Catatumbo”, 2018. .
- [89] E. Tiempo, “Las obras que están ‘varadas’ en el Catatumbo por ola de violencia”, 2018. .
- [90] E. G. Botero, C. M. Ramírez, M. P. Rosero, H. Augusto, y I. Romero, “Reporte de drogas en Colombia 2017”, Bogota D.C, 2017.
- [91] J. Wilches Director de Política contra las Drogas Actividades Relacionadas Martha Paredes Subdirectora Estratégica de Análisis *et al.*, “Características agro culturales de los cultivos de coca en Colombia 2005-2010”, 2010.
- [92] Departamento Nacional de Planeación, “Política Para La Adopción E Implementación De Un Catastro Multipropósito Rural-Urbano”, Bogota D.C, 2016.
- [93] UNODC, “Informe mundial sobre las drogas 2015 Resumen Ejecutivo”, 2015.
- [94] Agencia de Renovación del Territorio, “Alta Consejería para el Posconflicto, los Derechos Humanos y la Seguridad”, Bogota D.C, 2017.
- [95] Agencia de Renovación del Territorio, “Programas de desarrollo con enfoque territorial”, 2018. .
- [96] C. Spansky, “El desacuerdo de los coccaleros del Catatumbo”, 2017. .
- [97] M. S. Islam, R. Akhter, y M. A. Rahman, “A thorough investigation on hybrid application of biomass gasifier and PV resources to meet energy needs for a northern rural off-grid region of Bangladesh: A potential solution to replicate in rural off-grid areas or not?”, *Energy*, vol. 145, pp. 338–355, 2018.
- [98] A. Singh, P. Baredar, y B. Gupta, “Computational Simulation & Optimization of a Solar, Fuel Cell and Biomass Hybrid Energy System Using HOMER Pro Software”, *Procedia Eng.*, vol. 127, pp. 743–750, 2015.
- [99] A. D. Pantoja-bucheli, J. C. Guerrero-ordóñez, y J. F. Castillo-muñoz, “Metodología para el aprovechamiento del potencial energético con biomasa forestal en el

- departamento de Nariño : caso de estudio”, *Ing. Solidar.*, vol. 12, núm. 20, pp. 43–59, 2016.
- [100] FAO, “Agro-ecological zoning.”, *FAO*. [En línea]. Disponible en: <http://www.fao.org/3/w2962e/w2962e-03.htm>. [Consultado: 03-jul-2019].
- [101] IGAC, “Geoportal-IGAC-SIGA”, *IGAC*, 2019. [En línea]. Disponible en: [http://gis.igac.gov.co/siga\\_sig/Agrologia.seam](http://gis.igac.gov.co/siga_sig/Agrologia.seam). [Consultado: 03-jul-2019].
- [102] IGAC, “Estudio general de suelos y zonificación de Tierras.”, *Departamento de Norte de Santander*. pp. 1–500, 2009.
- [103] Grupo interno del trabajo levantamiento de suelos, “Metodología para la clasificación de tierras por su capacidad de uso”, 2014.
- [104] IDEAM, “Clima”, *IDEAM*, 2019. [En línea]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/clima>. [Consultado: 03-jul-2019].
- [105] Alcaldía de El Tarra, “Esquema de Ordenamiento Territorial Municipio el Tarra”, 2004.
- [106] I. Obernberger y G. Thek, “Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour”, *Biomass and Bioenergy*, vol. 27, núm. 6, pp. 653–669, 2004.
- [107] PNNC, “PLAN DE MANEJO PARQUE NACIONAL NATURAL CATATUMBO BARI”, 2005.
- [108] A. Dueñas-C, J. Betancur, y R. Galindo, “ESTRUCTURA Y COMPOSICIÓN FLORÍSTICA DE UN BOSQUE HÚMEDO TROPICAL DEL PARQUE NACIONAL NATURAL CATATUMBO BARÍ, COLOMBIA”, 2007.
- [109] The Plant List, “Arecaceae”, *The Plant List*, 2019. [En línea]. Disponible en: <http://www.theplantlist.org/browse/A/Arecaceae/>. [Consultado: 04-jul-2019].
- [110] C. A. Aguirre-C, Jaime; Ruiz-A, “Composición florística de la brioflora de la serranía del perijá (Cesar-Colombia): Distribución y Ecología”, *Caldasia*, vol. 23, núm. 1, pp. 181–201, 2001.
- [111] Consultoria Colombiana SA, “Estudio de impacto ambiental para la construcción de la segunda calzada túnel - San Jerónimo UF 3 y 1 del proyecto autopista al Mar 1”, 2017.
- [112] K. . Jagadish, H. . Chanakya, P. Rajabapaiah, y V. Anand, “Plug flow digestors for biogas generation from leaf biomass”, *Biomass and Bioenergy*, vol. 14, núm. 5–6, pp. 415–423, may 1998.
- [113] S. Dharma *et al.*, “Optimization of biodiesel production process for mixed *Jatropha curcas*–*Ceiba pentandra* biodiesel using response surface methodology”, *Energy Convers. Manag.*, vol. 115, pp. 178–190, may 2016.
- [114] H. C. Ong, H. H. Masjuki, T. M. I. Mahlia, A. S. Silitonga, W. T. Chong, y T. Yusaf, “Engine performance and emissions using *Jatropha curcas*, *Ceiba pentandra* and *Calophyllum inophyllum* biodiesel in a CI diesel engine”, *Energy*, vol. 69, pp. 427–445, may 2014.
- [115] H. C. Ong, A. S. Silitonga, H. H. Masjuki, T. M. I. Mahlia, W. T. Chong, y M. H. Boosroh, “Production and comparative fuel properties of biodiesel from non-edible oils: *Jatropha curcas*, *Sterculia foetida* and *Ceiba pentandra*”, *Energy Convers. Manag.*, vol. 73, pp. 245–255, sep. 2013.
- [116] Y. A. Lenis y J. F. Pérez, “Gasification of Sawdust and Wood Chips in a Fixed Bed under Autothermal and Stable Conditions”, *Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff.*, vol. 36, núm. 23, pp. 2555–2565, dic. 2014.
- [117] Y. A. Lenis, J. F. Pérez, y A. Melgar, “Fixed bed gasification of *Jacaranda copaia* wood: Effect of packing factor and oxygen enriched air”, *Ind. Crops Prod.*, vol. 84, pp. 166–175, jun. 2016.



- [118] W. Villamizar, “Plan de Desarrollo para Norte de Santander 2019-2019 &quot;Un Norte Productivo para Todos”, San José de Cucutá, 2016.
- [119] F. Rojas, D. Arias, R. Moya, A. Meza, O. Murillo, y M. Arguedas, “Manual para productores de Melina en Costa Rica”, 2004.
- [120] J. Gaitán-Álvarez y R. Moya, “Characteristics and properties of torrefied biomass pellets from Gmelina arborea and Dipterix panamensis at different times”, *Rev. Chapingo Ser. Ciencias For. y del Ambient.*, vol. XXII, núm. 3, pp. 325–337, ago. 2016.
- [121] M. Acda y E. Devera, “PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES OF WOOD PELLETS FROM FOREST RESIDUES”, *Journal of Tropical Forest Science*, vol. 26. Forest Research Institute Malaysia, pp. 589–595, 2014.
- [122] M. N. Acda, “Physico-chemical properties of wood pellets from coppice of short rotation tropical hardwoods”, *Fuel*, vol. 160, pp. 531–533, nov. 2015.
- [123] D. Roncancio, E. Vega, y G. Herrera, “Guía para plantaciones Forestales Comerciales. Norte de Santander.”, Santa Fe de Bogotá, 1998.
- [124] C. Tenorio, R. Moya, D. Arias-Aguilar, y E. Briceño-Elizondo, “Biomass yield and energy potential of short-rotation energy plantations of Gmelina arborea one year old in Costa Rica”, *Ind. Crops Prod.*, vol. 82, pp. 63–73, 2016.
- [125] L. Garcia, I. Mazo, y A. Ramirez, “PROPUESTA PARA LA SUSTITUCIÓN DE CULTIVOS ILÍCITOS MEDIANTE MODELOS AGROFORESTALES”, 2003. .
- [126] C. Tenorio, R. Moya, M. T. Filho, y J. Valaert, “Quality of pellets made from agricultural and forestry crops in costa rican tropical climates”, *BioResources*, vol. 10, núm. 1, pp. 482–498, 2015.
- [127] ELECTROVICHADA SA ESP, “Adenda 1. Solicitud Pública de Oferta No 005 de 2016”, 2016.
- [128] J. F. N. Lozano, “Potencial y beneficio socio-ambiental del uso de materiales lignocelulosicos generados en proyectos lineales. Tesis de Maestria”, Universidad Nacional de Colombia, 2011.
- [129] R. Ortega, “POTENCIAL DE BIOACUMULACIÓN DE MERCURIO (Hg) POR CAÑA FLECHA (Gynerium sagittatum) (Aubl) Beauv EN CONDICIONES IN VITRO”, SISTEMA DE UNIVERSIDADES ESTATALES DEL CARIBE COLOMBIANO, SUE-CARIBE MAESTRIA EN CIENCIAS AMBIENTALES SEDE UNIVERSIDAD DE CARTAGENA, 2011.
- [130] Ecuador Forestal, “Ficha Técnica N° 3: MELINA”, *Ecuador Forestal*, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://ecuadorforestal.org/fichas-tecnicas-de-especies-forestales/ficha-tecnica-no-3-melina/>. [Consultado: 05-jul-2019].
- [131] UICN, “Especies para Restauración- Gynerium Sagittatum”, *UICN*, 2019. [En línea]. Disponible en: [https://www.especiesrestauracion-uicn.org/data\\_especie.php?sp\\_name=Gynerium\\_sagittatum](https://www.especiesrestauracion-uicn.org/data_especie.php?sp_name=Gynerium_sagittatum). [Consultado: 05-jul-2019].
- [132] UICN, “Especies para Restauración - Jacaranda Copaia”, *UICN*, 2019. [En línea]. Disponible en: [https://www.especiesrestauracion-uicn.org/data\\_especie.php?sp\\_name=Jacaranda\\_copaia](https://www.especiesrestauracion-uicn.org/data_especie.php?sp_name=Jacaranda_copaia). [Consultado: 05-jul-2019].
- [133] D. Lezcano, “Estudio exergético para identificar y evaluar potencialidades en energías renovables en el territorio colombiano, para planeamiento energético en periodos futuros”, 2011.
- [134] Observatorio de Drogas de Colombia, “Colombia drug report 2017”, 2017.
- [135] A. Sultana, A. Kumar, y D. Harfield, “Development of agri-pellet production cost and optimum size”, *Bioresour. Technol.*, vol. 101, núm. 14, pp. 5609–5621, jul. 2010.

- [136] M. Mobini, T. Sowlati, y S. Sokhansanj, “A simulation model for the design and analysis of wood pellet supply chains”, *Appl. Energy*, vol. 111, pp. 1239–1249, nov. 2013.
- [137] Z. Miao, Y. Shastri, T. E. Grift, A. C. Hansen, y K. C. Ting, “Lignocellulosic biomass feedstock transportation alternatives, logistics, equipment configurations, and modeling”, *Biofuels, Bioprod. Biorefining*, vol. 6, núm. 3, pp. 351–362, may 2012.
- [138] S. Sokhansanj y J. R. Hess, “Biomass Supply Logistics and Infrastructure”, Humana Press, Totowa, NJ, 2009, pp. 1–25.
- [139] Ministerio de Agricultura del Gobierno de Chile y CONAF, “Guía Básica de buenas practicas para plantaciones forestales de pequeños y medianos propietarios”, 2013.
- [140] T. Fredericksen, F. Contreras, y W. Pariona, *Guía de silvicultura*. Santa Cruz: El Pais, 2001.
- [141] El semillero, “Guía de Reforestación. Chingalé, pavito. Jacaranda copaia”, 2019. [En línea]. Disponible en: <http://elsemillero.net/nuevo/semillas/chingale.html>. [Consultado: 18-jul-2019].
- [142] P. C. Silva Ingeniero Agrónomo, W. S. Vergara Lic Ciencias Agropecuarias, E. I. Acevedo Ingeniero Agrónomo, y M. Sc, “ROTACIÓN DE CULTIVOS”.
- [143] FAO, “Los bosques y suelos forestales contribuyen de manera esencial a la producción agrícola y la seguridad alimentaria mundial | FAO”, FAO, 2015. [En línea]. Disponible en: <http://www.fao.org/soils-2015/news/news-detail/es/c/285875/>. [Consultado: 18-jul-2019].
- [144] I. Orlando, M. Sánchez, L. A. Muñoz, Y. Andrea, y Á. Sierra, “Protocolo de Uso y Aprovechamiento del Canaleta en la Actividad Artesanal Jacaranda copaia Aubl”.
- [145] FAO, “Capitulo 6. APROVECHAMIENTO POTENCIAL DE LOS RESIDUOS DE MADERA PARA LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA”, FAO. [En línea]. Disponible en: <http://www.fao.org/3/T0269S/t0269S10.htm>. [Consultado: 18-jul-2019].
- [146] WWF, “Guía de procesamiento industrial: Jacaranda copaia”.
- [147] SIEL, “Cobertura de Energía Eléctrica a 2016”, SIMEC. [En línea]. Disponible en: <http://www.siel.gov.co/Inicio/CoberturadelSistemaIntercontecadoNacional/ConsultasEstadisticas/tabid/81/Default.aspx>. [Consultado: 30-jul-2019].
- [148] UPME, “Sistema Interconectado Nacional - STN - STR actual 2016”. 2017.
- [149] IEA, “Bomass for Power Generation and CHP”, 2007.
- [150] Argus Media, “Argus Biomass Markets”, 2018.
- [151] Markets Insider, “Coal PRICE Today | Coal Spot Price Chart”. [En línea]. Disponible en: <https://markets.businessinsider.com/commodities/coal-price>. [Consultado: 04-ago-2019].
- [152] Likinormas, “NIVELES DE TENSIÓN DE CONEXIÓN DE CARGAS DE CLIENTES”, ENEL. [En línea]. Disponible en: [https://likinormas.micodensa.com/Norma/otros/niveles\\_tension\\_conexion\\_cargas\\_clientes](https://likinormas.micodensa.com/Norma/otros/niveles_tension_conexion_cargas_clientes). [Consultado: 04-ago-2019].
- [153] D. J. Schell y C. Hardwood, *Milling of lignocellulosic biomass: results of pilot-scale testing*. Humana Press, 1994.
- [154] A. Sultana, A. Kumar, y D. Harfield, “Development of agri-pellet production cost and optimum size”, *Bioresour. Technol.*, vol. 101, núm. 14, pp. 5609–5621, jul. 2010.
- [155] R. Jannasch, Y. Quan, y R. Samson, “A Process and Energy Analysis of Pelletizing Switchgrass Final Report Prepared for: Natural Resources Canada, Alternative Energy Division Resource Efficient Agricultural Production (REAP-Canada)”.
- [156] V. S. P. Bitra *et al.*, “Direct mechanical energy measures of hammer mill comminution of switchgrass, wheat straw, and corn stover and analysis of their particle size

- distributions”, *Powder Technol.*, vol. 193, núm. 1, pp. 32–45, jul. 2009.
- [157] A. R. Womac *et al.*, “Shearing Characteristics of Biomass for Size Reduction”, *ASAE Paper*, núm. 56058. Tampa, 2005.
- [158] A. Kronbergs, E. Kronbergs, E. Siraks, y J. Dalbins, “Cutting properties of arranged stalk biomass.”, *Renew. Energy Energy Effic.*, pp. 145–149, 2012.
- [159] D. J. Schell y C. Harwood, “Milling of lignocellulosic biomass - Results of pilot-scale testing”, *Appl. Biochem. Biotechnol.*, 1994.
- [160] E. Kronbergs y M. Smits, “Cutting properties of common reed biomass.”, en *8th International scientific conference “Engineering for rural development”*, 2009, pp. 207–211.
- [161] J. Beniak, J. Ondruška, y V. Čačko, “Design process of energy effective shredding machines for biomass treatment”, *Acta Polytech.*, vol. 52, núm. 5, pp. 133–137, 2012.
- [162] D. Wilczyński, K. Talaśka, I. Malujda, y P. Jankowiak, “Experimental research on biomass cutting process”, *MATEC Web Conf.*, vol. 157, p. 07016, mar. 2018.
- [163] M. M. Roy, A. Dutta, y K. Corscadden, “An experimental study of combustion and emissions of biomass pellets in a prototype pellet furnace”, *Appl. Energy*, vol. 108, pp. 298–307, 2013.
- [164] M. Barbanera, E. Lascaro, V. Stanzione, A. Esposito, R. Altieri, y M. Bufacchi, “Characterization of pellets from mixing olive pomace and olive tree pruning”, *Renew. Energy*, 2016.
- [165] S. Mani, L. G. Tabil, y S. Sokhansanj, “Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses”, *Biomass and Bioenergy*, vol. 30, núm. 7, pp. 648–654, 2006.
- [166] J. F. González, B. Ledesma, A. Alkassir, y J. González, “Study of the influence of the composition of several biomass pellets on the drying process”, *Biomass and Bioenergy*, vol. 35, núm. 10, pp. 4399–4406, 2011.
- [167] I. Niedziółka *et al.*, “Assessment of the energetic and mechanical properties of pellets produced from agricultural biomass”, *Renew. Energy*, 2015.
- [168] N. C. Crawford, A. E. Ray, N. A. Yancey, y N. Nagle, “Evaluating the pelletization of ‘pure’ and blended lignocellulosic biomass feedstocks”, *Fuel Process. Technol.*, vol. 140, pp. 46–56, 2015.
- [169] N. Kaliyan y R. V. Morey, “Densification characteristics of corn cobs”, *Fuel Process. Technol.*, vol. 91, núm. 5, pp. 559–565, 2010.
- [170] C. Andrés, F. Núñez, J. Jochum, F. Emiro, y S. Vargas, “Characterization and feasibility of biomass fuel pellets made of Colombian timber, coconut and oil palm residues regarding European standards”, *Environ. Biotechnol.*, vol. 8, núm. 2, pp. 67–76, 2012.
- [171] M. A. Abdoli, A. Golzary, A. Hosseini, y P. Sadeghi, *Wood pellet as a renewable source of energy from production to consumption*. Springer, 2018.
- [172] M. T. Carone, A. Pantaleo, y A. Pellerano, “Influence of process parameters and biomass characteristics on the durability of pellets from the pruning residues of *Olea europaea L.*”, *Biomass and Bioenergy*, 2011.
- [173] K. C. Behnke, “FACTORS INFLUENCING PELLETT QUALITY”.
- [174] L. Hasznos, I. Langer, y M. Gyarmathy, “Some factors influencing pellet characteristics made by an Extrusion/Spheronisation process Part I.: Effects on size characteristics and moisture content decrease of pellets”, *Drug Dev. Ind. Pharm.*, vol. 18, núm. 4, pp. 409–437, ene. 1992.
- [175] J. S. Moritz *et al.*, “Effect of Formulation Density, Moisture, and Surfactant on Feed Manufacturing, Pellet Quality, and Broiler Performance”, *J. Appl. Poult. Res.*, vol. 11,

- núm. 2, pp. 155–163, jun. 2002.
- [176] R. Labbé, P. Carey, G. Trincado, y O. Thiers, “Natural drying of forest biomass: Effect of stack height and cover in the province of Valdivia, Chile”, *Bosque (Valdivia)*, vol. 39, núm. 3, pp. 449–456, 2018.
- [177] G. González Yánquez, “Diseño de una planta de peletización en Castilla y León”, ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID, 2012.
- [178] Bioenergy Consult, “Biomass Pelletization Process”. [En línea]. Disponible en: <https://www.bioenergyconsult.com/biomass-pelletization/>. [Consultado: 04-ago-2019].
- [179] N. Peter, K. Nielsen, D. J. Gardner, T. Poulsen, y C. Felby, “IMPORTANCE OF TEMPERATURE, MOISTURE CONTENT, AND SPECIES FOR THE CONVERSION PROCESS OF WOOD RESIDUES INTO FUEL PELLETS”.
- [180] J. Huang, “Flat die pellet mill and ring die pellet mill comparison”, *GEMCO ENERGY*, 2014. [En línea]. Disponible en: <http://www.biofuelmachines.com/flat-die-and-ring-die-pellet-mills-comparison.html>. [Consultado: 04-ago-2019].
- [181] F. J. Fairchild, “Pellet Cooling and Crumbling”.
- [182] C. M. H. C. Maail, H. Ariffin, M. A. Hassan, U. K. M. Shah, y Y. Shirai, “Oil palm frond juice as future fermentation substrate: a feasibility study.”, *Biomed Res. Int.*, vol. 2014, p. 465270, jun. 2014.
- [183] K. V Probst, R. P. K. Ambrose, R. L. Pinto, R. Bali, P. Krishnakumar, y K. E. Ileleji, “THE EFFECT OF MOISTURE CONTENT ON THE GRINDING PERFORMANCE OF CORN AND CORNCOBS BY HAMMERMILLING”, *Trans. ASABE*, vol. 56, núm. 3, pp. 1025–1033, 2013.
- [184] Wood Products, “Moisture properties of wood”, *Puuinfo*, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.woodproducts.fi/content/moisture-properties-wood>. [Consultado: 04-ago-2019].
- [185] J. Diebel, J. Norda, y O. Kretchmer, “Clima promedio en El Tarra, Norte de Santander durante todo el año - Weather Spark”, *Weather Spark*, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://es.weatherspark.com/y/24397/Clima-promedio-en-El-Tarra-Colombia-durante-todo-el-año>. [Consultado: 21-ago-2019].
- [186] Tiempo y Temperatura, “El tiempo en El Tarra (Norte de Santander, Colombia)”, *tiempoytemperatura.es*, 2019. [En línea]. Disponible en: <http://tiempoytemperatura.es/colombia/el-tarra.html#por-horas>. [Consultado: 21-ago-2019].
- [187] Alibaba, “Woodchipper Machine”, *Alibaba.com*. [En línea]. Disponible en: [https://www.alibaba.com/product-detail/woodchipper-machine\\_62057616547.html?spm=a2700.7724838.2017115.30.519e67d97wxMxO](https://www.alibaba.com/product-detail/woodchipper-machine_62057616547.html?spm=a2700.7724838.2017115.30.519e67d97wxMxO). [Consultado: 04-ago-2019].
- [188] Alibaba, “Aluminum Wheel Hammermill Type Hammer Crusher For Construction Use - Buy Aluminum Wheel Hammermill, Wheel Type Hammer Crusher, Wheel Type Hammer Crusher For Construction Use”, *Alibaba.com*. [En línea]. Disponible en: [https://www.alibaba.com/product-detail/Aluminum-Wheel-Hammermill-Type-Hammer-Crusher\\_62118926800.html?spm=a2700.7724838.2017115.40.45853030Oc33EB](https://www.alibaba.com/product-detail/Aluminum-Wheel-Hammermill-Type-Hammer-Crusher_62118926800.html?spm=a2700.7724838.2017115.40.45853030Oc33EB). [Consultado: 04-ago-2019].
- [189] Alibaba, “Hot Selling Electric Wood Powder Rotary Drum Dryer/sawdust Drum Dryer”, *Alibaba.com*. [En línea]. Disponible en: <https://www.alibaba.com/product-detail/Hot-Selling-Electric-wood-powder->

- rotary\_62126909023.html?spm=a2700.7724838.2017115.1.5d4a6d5aCw4nRt&s=p.  
[Consultado: 04-ago-2019].
- [190] Alibaba, “Ce Approved High Quality And Hot 9pk-200 Wood Pelet Mill”, *Alibaba.com*. [En línea]. Disponible en: [https://www.alibaba.com/product-detail/CE-approved-high-quality-and-hot\\_1452977752.html?spm=a2700.7724838.2017115.11.19954b9cUzcTMe](https://www.alibaba.com/product-detail/CE-approved-high-quality-and-hot_1452977752.html?spm=a2700.7724838.2017115.11.19954b9cUzcTMe). [Consultado: 04-ago-2019].
- [191] S. Mani, S. Sokhansanj, X. Bi, y A. Turhollow, “Economics of producing fuel pellets from biomass”, *Appl. Eng. Agric.*, vol. 22, núm. 3, pp. 421–426, 2006.
- [192] J. A. Castillo, “Determinación del VPN Social”. BID.
- [193] Dinero en el tiempo, “Valor actual del dólar de 2004 - Variación IPC”. [En línea]. Disponible en: <https://www.dineroeneltiempo.com/dolar/de-2004-a-valor-presente?valor=166>. [Consultado: 04-ago-2019].
- [194] F. Campuzano, F. C. Diosa, C. A. Echeverry, M. Betancur Vélez, J. Daniel, y M. Ángel, “An energetic analysis of different power generation alternatives”.
- [195] IRENA, “Biomass for Power Generation”, núm. June, 2012.
- [196] E. L. La Rovere, S. Teixeira Coelho, M. F. Gómez Galindo, O. L. Soliano Pereira, y A. Bezerra Trindade, “Biomass Residues as Energy Source to Improve Energy Access and Local Economic Activity in Low HDI Regions of Brazil and Colombia (BREA)”, *Glob. Netw. energy Sustain. Dev. by UNEP*, núm. September, 2015.
- [197] FAO, “2.2 Theory of gasification”, *FAO*. [En línea]. Disponible en: <http://www.fao.org/3/t0512e/T0512e09.htm>. [Consultado: 21-ago-2019].
- [198] D. Turlajs y D. Rusovs, “Physics Efficiency of Wood Biomass Gasification With Engines of Internal Combustion and Heat Pumps Applications”, *Heat Power Therm. Phys.*, pp. 104–108, 2008.
- [199] R. W. Wies, R. A. Johnson, y A. N. Agrawal, “Energy-Efficient Standalone Fossil-Fuel Based Hybrid Power Systems Employing Renewable Energy Sources”, *Foss. Fuels Environ.*, 2012.
- [200] Wuxi Teneng Power Machinery, “Powermax DFBG(Downdraft Fixed Bed Gasifier)-Biomass Gasifier-”, *Powermax*. [En línea]. Disponible en: <http://www.powermaxgasifier.com/index.php?ac=article&at=read&did=155>. [Consultado: 04-ago-2019].
- [201] G. P. M. Fracaro, S. N. M. Souza, M. Medeiros, D. F. Formentini, y C. A. Marques, “Economic Feasibility of Biomass Gasification for Small-Scale Electricity Generation in Brazil”, *Proc. World Renew. Energy Congr. – Sweden, 8–13 May, 2011, Linköping, Sweden*, vol. 57, pp. 295–302, 2011.
- [202] ENEL, “Tarifas de energía eléctrica reguladas por la comisión de regulación de energía y gas (CREG). Julio de 2019”, 2019.
- [203] XE, “XE: Convertir USD/COP. Dólar estadounidense a Colombia Peso”, *XE*. [En línea]. Disponible en: <https://www.xe.com/es/currencyconverter/convert/?Amount=1&From=USD&To=COP>. [Consultado: 05-ago-2019].
- [204] J. Campos y T. Serebrisky, “Tasa de descuento social y Evaluacion de proyectos”, 2016.

## ANEXO 1

### Reporte de Alertas Tempranas en Biodiversidad



Esta información es resultado del cruce de capas de información y análisis de las variables provenientes de las entidades generadoras de los datos. Conservación Internacional, el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, la CAR, la UPME y el Ministerio de Minas no se hacen responsables por la calidad, idoneidad y nivel de actualización de la información suministrada en la herramienta TREMARCTOS.

Este documento es de carácter indicativo y busca proveer al usuario de alertas tempranas, y por lo tanto no constituye un documento de carácter oficial ni equivale a una licencia ambiental. En caso de requerir un reporte oficial favor remitirse a las autoridades competentes. Ninguna autoridad ambiental se hace responsable por el uso de esta información.

Las capas de susceptibilidad a inundaciones y susceptibilidad a incendios son capas de referencia y reflejan escenarios en condiciones extremas. Para consultar la actualización de estas capas para el periodo de su interés favor remitirse al IDEAM.

Este documento fue generado por el Sistema de Alertas Tempranas en Biodiversidad Tremarctos 2015 de propiedad de Conservación Internacional con el apoyo del MADS, CAR, UPME y MinMinas. Éste material puede ser distribuido, copiado y exhibido por terceros. Las obras derivadas están bajo los mismos términos de licencia que el trabajo original.

Actualmente la cartografía oficial es la adoptada por la Resolución 0937 del 25 de mayo de 2011 “por la cual se adopta la cartografía elaborada a escala 1:250.000 proporcionada por el Instituto de Investigaciones de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt para la identificación y delimitación de los Ecosistemas de Paramos y se adoptan otras determinaciones”. Sin embargo, en la herramienta será posible consultar la capa a escala 1:100.000

El cálculo del área a compensar se realizará a través de la asignación de factores de compensación por pérdida de biodiversidad. Estos factores son definidos en el Listado Nacional de Factores de Compensación para Ecosistemas Naturales Terrestres del MANUAL PARA LA ASIGNACIÓN DE COMPENSACIONES POR PÉRDIDA DE BIODIVERSIDAD (MADS 2011).

La Autoridad Nacional de Licencias Ambientales –ANLA es la entidad que evalúa, aprueba y adopta las medidas de compensación para proyectos a ser licenciados a nivel nacional.

Las herramientas informáticas desarrolladas para la aplicación del Manual para la asignación de compensaciones por pérdida de biodiversidad son de uso opcional y no tienen un carácter vinculante.

La información de Reservas forestales de Ley 2da del 59, es la información a escala 1:100.000 y no tiene carácter vinculante.

El valor de porcentaje que aparece en el reporte, corresponde al porcentaje de área afectada respecto al área total de la entidad geográfica.

La información socioeconómica usada como: Índice de pobreza multidimensional IPM, Índice de desempeño fiscal IDF, Índice de desempeño Integral IDI son tomados del DNP, 2014. Otros como Población vulnerable se toma la información DANE, censo 2005.

Información de potencial minero para minerales estratégicos, fue generada por el SGC, en el cual se muestra las zonas de reserva para los minerales estratégicos y su potencial de acuerdo a la información disponible Tipo I, II, III.

Los estándares que se reconocen en el análisis de magnitud minera, permiten un proceso de madurez de las empresas mineras de acuerdo a la responsabilidad social y desarrollo de proyectos sostenibles, de acuerdo a su nivel de producción (NE= No tiene estándar, Fairmined- <http://www.communitymining.org>, ISO- <http://www.iso.org>, GRI-[www.globalreporting.org](http://www.globalreporting.org), GC- <https://www.unglobalcompact.org/>)





Clase	Genero	Especie	Categoría	Amenaza	Endémica	Migratoria
Mammali	Atele	hybridu	C	C	0	0
Mammali	Atele	hybridu	C	C	0	0

Detalle Compensación			
FC_Ecosistema	FC_Factor	Área Afectada	Área Compensar
Vegetación secundaria del zonobioma húmedo tropical del Catatumbo	6.75	0.8315 Ha	5.613 Ha
Bosques naturales del orobioma bajo de los Andes	6.75	5.0474 Ha	34.07 Ha
Vegetación secundaria del zonobioma húmedo tropical del Catatumbo	8	1.9241 Ha	15.3928 Ha
Bosques naturales del orobioma bajo de los Andes	8	4.3259 Ha	34.6072 Ha
Vegetación secundaria del zonobioma húmedo tropical del Catatumbo	7.75	0.2062 Ha	1.5982 Ha
Bosques naturales del orobioma bajo de los Andes	7.75	2.7934 Ha	21.6492 Ha
Pastos del zonobioma húmedo tropical del Catatumbo	6.5	0.1054 Ha	0.6848 Ha
Vegetación secundaria del orobioma bajo de los Andes	6	0.0252 Ha	0.1514 Ha
Áreas agrícolas heterogéneas del orobioma bajo de los Andes	6	8.1435 Ha	48.8608 Ha
Áreas agrícolas heterogéneas del orobioma bajo de los Andes	6.5	5.9713 Ha	38.8132 Ha
Pastos del orobioma bajo de los Andes	6.5	10.6064 Ha	68.9421 Ha
Pastos del orobioma bajo de los Andes	6	8.6216 Ha	51.7298 Ha
Bosques naturales del orobioma bajo de los Andes	6	25.3199 Ha	151.9194 Ha

Vegetación secundaria del zonobioma húmedo tropical del Catatumbo	6.5	2.8312 Ha	18.4027 Ha
Vegetación secundaria del orobioma bajo de los Andes	6.5	63.837 Ha	414.9407 Ha
Bosques naturales del orobioma bajo de los Andes	6.5	1386.0059 Ha	9009.0383 Ha

## ANEXO 2

Especies forestales presentes en la reserva natural Serranía los Motilones (dentro de los límites del municipio de El Tarra).

Familia	Nombre Científico	Nombre Común
Anacardiaceae	Tapira sp	Algodoncillo
	Anacardium rhinocarpus	Caracolí
	Astronium sp.	Diomate
	Spondias mombin	Jobo
Apocynaceae	Couma macrocarpa	Perillo
Betulaceae	Alnus jorullensis	Aliso
Bignoniaceae	Tabebuia dugandi	Cañaguante
	Jacaranda caucana	Gualanday
	Tabebuia rosea	Gualanday
	Tabebuia sp.	Guayacán
	Tabebuia chrysantha	Guayacán Polvillo
	Jacaranda copaia	Pavito, quitasol
Bombacaceae	Bombacopsis quinatum	Ceiba Tolúa
Boraginaceae	Cordia alliodora*	Moho, pardillo, Hurapo
	Cordia sp.	Sombrerito
Burseraceae	Protium sp.	Incienso
	Protium sp.	Tatamoco
	Protium heptaphyllum	Anime
	Dacryodes occidentalis	Caraño
	Protium sp.	Caraño
	Trattinnickia aspera	Caraño
Celastraceae	Goupia glabra	Buchesapo
Combretaceae	Terminalia amazonica	Amarillón, Guayabón
	Buchenavia sp.	Mosco
Clusiaceae	Calophyllum sp.	Cucharo Colorado
Euphorbiaceae	Hieronyma sp.	Carne Toro
	Hevea sp.	Caucho Cabra
	Hieronyma sp.	Colorado
	Hieronima macrocarpa	Granadillo, tuno, Pantano
	Hieronima sp.	Mondey
Flacourtiaceae	Laetia procera	Varecasa
Lauraceae	Nectandra sp.	Amarillo
	Aniba sp.	Amarillo
	Ocotea sp.	Amarillo Canelo
	Ocotea sp.	Amarillo Loto
	Aniba sp.	Amarillo Pategallo
	Aniba sp.	Arenillo
	Ocotea barcellensis	Cascarillo
	Ocotea sp.	Canelón
	Ocotea sp.	Chulo
	Aniba sp.	Oloroso

	Ocotea sp.	Guarapo
	Ocotea sp.	Jabillo
	Ocotea sp.	Laurel Chulo
	Aniba sp.	Laurel Tuno
Lecythidaceae	Cariniana pyriformis	Abarco
	Lecythis sp	Almanegra
Magnoliaceae	Dugandiodendron mahechae	Almanegra
	Cedrela sp.	Cedro
Meliaceae	Cedrela sp.	Cedro Cebolla
	Cedrela angustifolia	Cedro Carmin
	Swietenia macrophylla	Caoba
	Adenanthera pavonica	Coral, coralite
Mimosaceae	Adenanthera pavonica	Coral, coralite
	Prosopis juliflora	Cují
	Phitecellobium dulce	Gallinero
	Pseuosamanea guachapele	Amox
	Virola sp.	Carne Vaca
Myrysticaceae	Virola sebifera	Sangretoro
	Virola sp.	Otobilla
	Chlorophora tinctoria	Dinde
Moraceae	Brosium rubescens	Guaímara
Oleaceae	Minquartia guianensis	Carbonero
Palmae	Scheelea martiana	Palma de Vino
	Erythrina fusca	Anacao
Papilionaceae	Andira inermes	Caucho Cabra
	Erythrina poeppigiana	Búcaro
	Machaerium capote	Granadillo, tuno
Podocarpaceae	Podocarpus rospigliosii	Pino Romerón
Rosaceae	Licania campestre	Carbonero
Rutaceae	Zanthoxylum tachuelo	Tachuelo
	Fagara sp.	Tachuelo
Sapotaceae	Manilkara sp.	Caimo Colorado
Sterculiaceae	Calophyllum mariae	Cachicamo
Styracaceae	Stirax sp.	Azulito
	Apeiba membranaceae	Malagano
Tiliaceae	Apeiba tiborbou	Peine Mono
	Belotia sp.	Vareboba

Fuente: Esquema de Ordenamiento Territorial El Tarra, 2004.

### ANEXO 3

Especies vegetales presentes en el Parque Nacional Natural Catatumbo Barí.

Familia	Nombre Científico	Nombre Común
Moraceae	Trophis Racemosa	Lecheros
Aracaceae		Palma
Bombacaceae	Ceiba pentandra	Ceiba
Heliconiaceae	Heliconia bihai	
	Heliconia brachyantha	
	Heliconia episcopalis	
	Heliconia hirsuta	
	Heliconia latispatha	
Gentianaceae		
Orchidaceae	Psygmorechis pusilla	
Bromaliaceae	Aechmea dactylina	
	Vriesea helenioides	
	Pitcairna cf. Brachysperma	
Rubiaceae	Warsewiczia coccinea	
	Isertia haenkeana	
	Faramea occidentalis	
	Faramea capillipes	
	Harmelia axillaris	
	Psychotria poeppigiana	
	Psychotria brachiata	
	Psychotria brachybotrya	
	Sabicea panamensis	
	Geophila macropoda	
	Hoffmania standleyi	
Tiliaceae		
Malvaceae	Heliocarpus americanus	
	Herrania albiflora	
Apocynaceae	Tabernaemanontana	Turma de perro
Fabaceae	Brownea ariza	Palo de cruz
	Mucuna altissima	Ojo de buey
Inga		Guamos
Piper		
Flacourticeae		
Violaceae	Leonia	
Myrsinaceae		
	Ardisia guianensis	

Melastomataceae	Miconia Toccoca	
	Bellucia pentamera	
hippocastanaceae	Billia rosea	
Acanthaceae	Mendoncia bivalvis	
Primulaceae	Aphelandra	
Passifloraceae	Passiflora vitifolia	
Rhamnaceae		
Erythroxylaceae	Erythroxylon coca	
	Erythroxylon citrifolium	
Olacaceae	Heisteria acuminta	
Sterculiaceae	Guazuma	
Marcgraviaceae	Marcgravia sp.	
Lecythidaceae	Cariniana pyroformes Miers	Abarco

Fuente: Adaptado de Plan de Manejo Parque Nacional Natural Catatumbo Barí, 2005.