



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO



**DIVISIÓN DE CIENCIAS ECONÓMICO-
ADMINISTRATIVAS**

DOCTORADO EN CIENCIAS EN ECONOMÍA AGRÍCOLA

**ANÁLISIS COMPARATIVO DEL POTENCIAL
ECONÓMICO DE BIOCOMBUSTIBLES FORESTALES EN
MÉXICO Y ESPAÑA.**

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN CIENCIAS EN ECONOMÍA AGRÍCOLA

PRESENTA:

IMELDA VARGAS ABASOLO



DIRECCION GENERAL ACADÉMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES

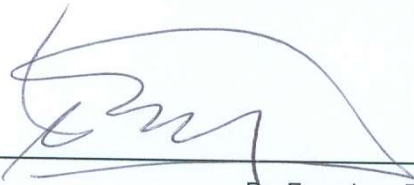
CHAPINGO, MÉXICO, DICIEMBRE DE 2016

ANÁLISIS COMPARATIVO DEL POTENCIAL ECONÓMICO DE BIOCOMBUSTIBLES FORESTALES EN MÉXICO Y ESPAÑA.

Tesis realizada por **IMELDA VARGAS ABASOLO** bajo la supervisión del
Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito
parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS EN ECONOMÍA AGRÍCOLA

DIRECTOR: 
Dr. Arturo Perales Salvador.

ASESOR: 
Dr. Francisco Pérez Soto

ASESOR: 
Dr. Manuel del Valle Sánchez

LECTOR
EXTERNO: 
Dr. Eliseo Sosa Montes

*A MIS PADRES:
ISIDRO Y REYNA*

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el financiamiento otorgado para realizar mis estudios de doctorado y esta investigación.

A la Universidad Autónoma Chapingo (UACH) y a la División de Ciencias Económico Administrativas (DICEA) por haberme permitido cursar los estudios de doctorado en su posgrado.

Al programa EULALinks de la fundación Erasmus Mundus por el financiamiento otorgado para realizar una estancia de investigación en la Universidad de Córdoba (UCO), España.

Al Doctor Arturo Perales Salvador por su colaboración en la dirección de esta tesis, por sus recomendaciones y asesoría que fueron de gran ayuda.

Al Doctor Francisco Pérez Soto y al Doctor Manuel del Valle Sánchez por su participación y apoyo brindado para la realización de esta investigación.

Al Doctor Eliseo Sosa Montes por su colaboración y asesoría durante el trabajo de laboratorio y por su participación como lector externo.

Al Maestro en Ciencias Diego Ernesto Lira González por valiosa contribución, asesoría y apoyo en esta investigación.

A la Doctora Pilar Fernández Rebollo por su asesoría y el seguimiento brindado durante la estancia de investigación.

Al Doctor Carlos Carpio de Texas Tech University por haber hecho importantes contribuciones a esta investigación.

Al Ingeniero Rafael Sánchez Domínguez por su contribución con información para esta tesis.

A la Doctora Rosa Gallardo Cobos, al Doctor Pedro Sánchez Zamora, a la Sra. Conchita Castiñeira por el apoyo brindado durante la estancia de investigación en la UCO.

Al Sr. Virgilio Olmos de la Asociación Española de Valorización Energética de la Biomasa (AVEBIOM) y a la empresa OLOGIMASA S.L. de la provincia de Jaén, por los datos e información proporcionada para la realización de esta investigación.

A los profesores de DICEA y compañeros de la UACH y de la UCO que aportaron experiencias y conocimientos que enriquecieron mi formación académica.

DATOS BIOGRAFICOS

Imelda Vargas Abasolo Nació el 21 de agosto de 1985 en Agua Linda, Jalpan, Puebla, lugar en el cual cursó la primaria y secundaria. Del año 2000-2003 Cursó la Preparatoria Agrícola en la Universidad Autónoma Chapingo. De 2003-2007 Curso la Carrera de Ingeniero Forestal Industrial y de 2008-2009 ingresó a la Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales y para el periodo de 2012-2016 realizó los estudios de Doctorado en Ciencias en Economía agrícola.

Desde su formación en la licenciatura ha trabajado en varios proyectos de plantaciones forestales, relacionados con cosecha forestal mecanizada y establecimiento de las mismas con fines madereros y energéticos para la producción de biomasa sólida. También ha adquirido experiencia en la cosecha forestal de eucalipto en plantaciones del sureste mexicano y en el levantamiento de información en inventarios forestales.

Respecto a la investigación ha presentado ponencias y artículos en congresos relacionados con su área de experiencia profesional, como el XIV Congreso Forestal Mundial en septiembre de 2015. También ha participado en la publicación de artículos y capítulos de libros.

En 2015 realizó una estancia de investigación de 5 meses al departamento de economía aplicada de Texas Tech University y en ese mismo año obtuvo una beca de la fundación Erasmus Mundus para realizar una estancia de Investigación de un año en la Universidad de Córdoba, España. Actualmente es estudiante del Doctorado en Ingeniería Agraria, Alimentaria, Forestal y del Desarrollo Rural Sostenible en la Universidad de Córdoba, España.

ANÁLISIS COMPARATIVO DEL POTENCIAL ECONÓMICO DE BIOCOMBUSTIBLES FORESTALES EN MÉXICO Y ESPAÑA.

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE ECONOMIC POTENTIAL OF FOREST BIOFUELS IN MEXICO AND SPAIN

Imelda Vargas Abasolo¹, Arturo Perales Salvador²

Resumen

Esta investigación es un análisis sobre producción de energía renovable, enfocada hacia el uso de madera de plantaciones forestales y residuos de la industria forestal para biomasa sólida. En España el pellet es más económico que el gasóleo, el mercado se enfoca hacia pellet doméstico y es considerado como un bien complementario. Se aplicó una encuesta a las fábricas de pellet de madera de ese país, para conocer los factores que implican su producción y consumo y se hizo un análisis para México donde se propone la transformación de la astilla de madera a pellet, el cual presenta ciertas ventajas económicas, la producción se enfocaría hacia pellet industrial con el aprovechamiento de los desperdicios de la industria forestal. En laboratorio se hizo un análisis proximal de las principales especies de plantaciones forestales de México para determinar cuáles son aptas para biomasa. Se construyó un modelo nacional de oferta de madera para biomasa que determinó las variables que influían en su producción y su comportamiento respecto al combustóleo. Las especies más aptas son *Acacia mangium* y *Eucalyptus urophylla*, porque tienen mayor incremento medio anual en kilocalorías y son de rápido crecimiento. De acuerdo al modelo de oferta, la astilla de madera actúa como un bien complementario, se consume en bajos porcentajes y existe preferencia por el combustóleo. Las variables elásticas fueron la TIIE, el valor del consumo de diesel y combustóleo, el salario mínimo y producción de combustóleo. La astilla puede llegar a ser un bien sustituto en un largo plazo con la implementación de políticas que difundan y promuevan su uso en la industria.

Palabras clave: Energía, pellet, biomasa, residuos.

Abstract

This research is an analysis of renewable energy production, focused on the use of wood from forest plantations and forest industry residues for solid biomass. In Spain, the wood pellet is cheaper than diesel, the market is focused on domestic pellet and is considered as a complementary good. A survey was applied to Spanish wood pellet plants to determine the factors involved in their production and consumption and an analysis was made for Mexico, where the processing of wood chips into pellets, which presents certain economic advantages, is proposed. The production would focus towards industrial pellets with the use of forest industry waste. In the laboratory, a proximal analysis was made of the main species grown in forest plantations in Mexico to determine which are suitable for biomass. A national biomass wood supply model was constructed, which determined the variables that influenced its production and its behavior with regard to fuel oil. The most suitable species are *Acacia mangium* and *Eucalyptus urophylla*, because they have a greater average annual increase in kilocalories and are fast growing. According to the supply model, the wood chip acts as a complementary good, it is consumed in low percentages and fuel oil is preferred over it. The elastic variables were the TIIE, the value of diesel and fuel oil consumption, the minimum wage and fuel oil production. The wood chip can become a substitute good in the long term with the implementation of policies that disseminate and promote its use in the industry.

Keywords: Energy, pellet, biomass, waste.

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	11
I. LA BASE ENERGÉTICA DEL SISTEMA PETRÓLEO Y LAS DISTINTAS FUENTES DE ENERGÍA.....	28
1.1 Situación del mercado internacional del petróleo.	28
1.2 Consumo mundial de energía primaria	28
1.3 Panorama nacional	33
1.4 Clasificación de las energías renovables.....	36
II. CONSTRUCCIÓN DE LOS MODELOS ECONOMÉTRICOS.....	42
III. ASPECTOS DE PRODUCCIÓN Y COMERCIALIZACIÓN DEL PELLET DE MADERA.....	58
3.1 Mercado mundial del pellet de madera.	58
3.2 Políticas europeas en materia de energía	61
3.3 La producción de pellet en España.....	63
3.4 El mercado de pellet en España	79
IV. ANALISIS COMPARATIVO DE PRODUCCION DE BIOMASA, MÉXICO-ESPAÑA	86
4.1 Análisis proximal de madera de plantaciones forestales.	86
4.2 Modelo econométrico de oferta	89
4.3 Análisis de la producción de pellet de madera en España.....	96
4.4 Análisis FODA para España	106
4.5 Análisis de comparativo de oferta de energéticos de México-España 109	
4.6 Producción actual de pellet, posibilidades de producción y abastecimiento en México.	111
4.7 Legislación para la producción de pellet México-España	115
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	118
LITERATURA CITADA	120
ANEXOS	131

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Astilla de madera para el análisis proximal.....	19
Figura 2. Astilla de madera en la estufa de secado	20
Figura 3. Calorímetro	21
Figura 4. Crisoles con astilla para la prueba de cenizas	22
Figura 5. Consumo mundial de energía primaria. (Fuente: British petroleum, 2015).....	29
Figura 6. Reservas probadas de petróleo crudo.	31
Figura 7. Producción de millones de barriles diarios de petróleo por región (BP, 2012).	31
Figura 8. Producción de petróleo a nivel mundial por región en millones de toneladas (Fuente: Gráfico elaborado con datos de British Petroleum, 2012).	32
Figura 9. Precios del petróleo crudo en dólares por barril de 1861-2012, de acuerdo a los eventos ocurridos a nivel mundial.	33
Figura 10. Reservas probadas de petróleo	34
Figura 11. Producción de petróleo	34
Figura 12. Consumo de petróleo.....	35
Figura 13. Producción mundial de pellet.	58
Figura 14. Importaciones de pellet de la Unión Europea.	59
Figura 15. Producción mundial de pellet.	59
Figura 16. Consumo de pellet en el mundo.	60
Figura 17. Evolución mundial del mercado de pellets.	61
Figura 18. Clasificación de biomasa leñosa.....	65
Figura 19. Madera para aserrío de la provincia de Jaén.....	67
Figura 20. Cosecha de madera de plantación de pino en la provincia de Jaén.	68
Figura 21. Aserrín para producir pellet, obtenido de aserradero.....	68
Figura 22. Astilla de madera de aserradero.	69
Figura 23. Incorporación de la astilla para cribado y molienda.	69
Figura 24. Secador de astilla tipo trommel, que funciona por medio de una caldera de biomasa.....	70
Figura 25. Molienda de astilla seca.....	70
Figura 26. Esquema de peletizadora de matriz plana.	72
Figura 27. Peletizadora de matriz anular cilíndrica con capacidad de 2 t/h.	72
Figura 28. Esquema de peletizadora de matriz anular.....	73
Figura 29. Cámara de enfriamiento del pellet.	73
Figura 30. Dosificadora de pellet para su ensacado.	74
Figura 31. Saco de pellet de 15 kg y pallet de pellet.....	75
Figura 32. Pellet en sacos Big bags.....	75
Figura 33. Proceso de peletizado	76
Figura 34. Variación en porcentaje del precio del pellet de 2012-2015.	84
Figura 35. Evolución del precio de pellet doméstico de 2012-2015.....	85

Figura 36. Variables incluidas en el modelo.	90
Figura 37. Año de fundación de las empresas encuestadas.	96
Figura 38. Origen de la materia prima usada en el proceso de producción.	97
Figura 39. Pruebas de control de calidad de la materia prima.	98
Figura 40. Tipo de certificación de la materia prima.	99
Figura 41. Coste de la materia prima por tonelada.	99
Figura 42. Factores que han influido en la aceptación del pellet por los consumidores.....	101
Figura 43. Inversión bruta requerida para el establecimiento de las plantas.	101
Figura 44. Dificultades en la comercialización del pellet.	102
Figura 45. Capacidad de producción de las plantas.	102
Figura 46. Evolución en el volumen de producción de las plantas del primer año de operación al último periodo anual.	103
Figura 47. Inversión en maquinaria y equipo para el establecimiento de las plantas.	103
Figura 48. Coste de pellet a granel correspondiente a cada fábrica.	104
Figura 49. Coste de pellet en saco de 15 kg correspondiente a cada fábrica.	105
Figura 50. Porcentaje de la producción de las plantas destinada a la exportación.	105
Figura 51. Países importadores de pellet de España.	106
Figura 52. Pellet de madera con sabor a whiskey, una libra con un precio de 49.6 euros. Fuente: mercado libre.com	110

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Variables usadas en el modelo y unidades manejadas.....	24
Cuadro 2. Clasificación de la madera para biomasa.....	66
Cuadro 3. Precios corrientes de equipo para peletizado de madera.	77
Cuadro 4. Tipo de materia prima usada para cada tipo de calidad del pellet (ENplus).	78
Cuadro 5. Características del pellet certificado ENPLUS y DIN PLUS	79
Cuadro 6. Costes de operación de fábricas de pellet en España.	81
Cuadro 7. Costes de operación para tres con distinto precio de materia prima.	81
Cuadro 8. Departamento de biomasa y residuos.....	82
Cuadro 9. Precio de venta del pellet en España.	83
Cuadro 10. Precios constantes del pellet en España.....	83
Cuadro 11. Precios y consumo en España del pellet y combustóleo B.	84
Cuadro 12. Elasticidades del pellet-combustóleo.	84
Cuadro 13. Resumen del análisis de varianza de un solo factor, para el poder calorífico	87
Cuadro 14. Análisis de varianza de un solo factor, para el poder calorífico.	87
Cuadro 15. Comparación entre especies respecto al poder calorífico con la prueba de tukey	87
Cuadro 16: Comparación entre promedios de poder calorífico con la prueba de tukey	87
Cuadro 17. Cantidad de kilocalorías generadas por ha para cada especie en relación al incremento medio anual (IMA).....	88
Cuadro 18. Resultados de las variables estimadas y variables más significativas.....	91
Cuadro 19. Resumen estadístico de los modelos estimados.	92
Cuadro 20. Análisis Fortaleza-Oportunidad de la producción de pellet en España.....	107
Cuadro 21. Análisis debilidad-amenaza de la producción de pellet en España	108
Cuadro 22. Precios de los combustibles fósiles usados en España y México para energía térmica.....	109
Cuadro 23. Precios de los tipos de biomasa usados en España y México (a precios corrientes del año 2016).....	113
Cuadro 24. Análisis FODA, para la producción de pellet en México.....	115
Cuadro 25. Clasificación del pellet de madera.....	116

INTRODUCCIÓN

Antecedentes

El petróleo es el combustible de mayor importancia a nivel mundial al ser la base energética del sistema económico. Su demanda se encuentra en ascenso, pero al ser un recurso no renovable su agotamiento es inminente, además su consumo genera elevados costes ambientales debido a la generación de gases efecto invernadero, por lo tanto, es necesaria la búsqueda de energías alternativas que sean renovables, amigables con el medio ambiente y de bajo coste económico que lo vayan sustituyendo (De la cámara y Azqueta, 2007, p 5-16). Dentro de las energías alternativas se considera la producción de biocombustibles, que en los últimos años ha ido en aumento, principalmente en Brasil, Estados Unidos y Europa (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos-Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación, 2013).

En países productores de caña y café, los residuos de cáscara y bagazo son usados para combustión directa y para producir calor, energía y vapor. Sin embargo, la producción de biocombustibles se ha enfocado en mayor parte a los combustibles líquidos (etanol y biodiesel) para el transporte, donde se usan como materia prima cultivos agrícolas de azúcar o almidón como el maíz. A nivel mundial del total de la producción de biocombustibles líquidos el 85% corresponde al etanol, los principales países que lo producen son Brasil y Estados Unidos, representando ambos el 90 % y el resto corresponde a Canadá, China y la Unión Europea (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación, 2008).

En México el uso de biocombustibles es reciente, en 2005 y 2008 entraron en vigor leyes que promueven el desarrollo de bioenergético a partir de cultivos agrícolas. Se usa biogás proveniente de rellenos sanitarios y biomasa de combustión directa como astilla de madera y bagazo de caña.

De la diversidad de maderas que existen en el mundo no todas son aptas para la producción de biocombustibles. Para identificarlas se debe comprender el crecimiento, desarrollo de la especie y sus propiedades energéticas. El poder calorífico superior (PCS) ha sido una de las variables más estudiadas para

evaluar el potencial energético de la madera y de este modo producir biomasa (Agostinho *et al*, 2013). Estos estudios se elaboran a través de análisis proximales en laboratorio por medio de bombas calorimétricas, donde el poder calorífico expresa la cantidad de energía liberada durante la combustión completa de la biomasa. Los análisis proximales de manera son parte de estudios económicos para determinar la factibilidad de la explotación comercial de una especie forestal.

Otra herramienta útil es la formulación de modelos econométricos que ayudan a la correcta asignación de energías renovables ampliamente disponibles a nivel mundial. Los modelos de predicción se han formulado usando diferentes variables como población, ingresos, precio, factores de crecimiento y tecnología. Entre estos modelos se encuentran los modelos de energía renovable (Jebaraj e Iniyan, 2006). Con el planteamiento de estos modelos se conoce la evolución de las magnitudes agregadas básicas, como instrumentos principales para estudiar las fluctuaciones de la producción, el nivel de precios y las políticas económicas.

De la producción de astilla para combustión directa se puede evolucionar a su transformación a pellet de madera. El uso de pellet tiene cierta ventaja ya que al ser un producto compacto su transporte y almacén es más fácil y menos costoso comparado con la astilla, donde el manejo es más complejo por el mayor volumen. El pellet se puede almacenar por periodos prolongados evitando pérdidas por degradación, tiene la ventaja de limpieza y homogeneidad y es una alternativa para el uso de residuos que son una carga en las empresas para su eliminación. En México aún no se desarrolla el mercado de producción de pellet de madera, está dominado principalmente por Europa y Norteamérica. El mercado Norte Americano está comprendido por Estados Unidos y Canadá y el mercado europeo por Alemania, Suecia, Letonia y Portugal como principales productores (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos-Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación, 2014, p. 14 y 15).

El principal sector consumidor de pellet en España es el doméstico. Las empresas productoras de pellets se encargan de obtener el aserrín, compactarlo, empaquetarlo y distribuirlo a las entidades consumidoras. En menor proporción se produce pellet industrial. El consumo de estos materiales ha ido en aumento,

debido al interés en el ahorro generado con la instalación de estufas y calderas. Es más económico que el uso de combustible fósil y ofrece seguridad y sostenibilidad en el suministro.

México se encuentra en una transición energética que consiste en un cambio de enfoque del sector energético para diversificar las fuentes primarias de energía, ya que la economía depende principalmente de los hidrocarburos, al ser un país productor de petróleo (García, 2011, p 6).

En México los rubros generadores de gases efecto invernadero (GEI) son: transporte (18%); producción de energía (24%); Cambio de usos de suelo y silvicultura (14%); desechos (10%); procesos industriales (8%); manufactura e industria (8%); agricultura (7%); emisiones fugitivas (6%); y otros (5%). De los cuales la generación de energía y el transporte son los principales rubros productores de GEI (Delgado, 2011, p 8-10).

La biomasa es la energía renovable más usada en México, principalmente en comunidades rurales, que representa una cuarta parte de la población del país, se utiliza para cocción de alimentos y calefacción de viviendas a través del fogón tradicional de leña. Pero la leña también se usa en microempresas y pequeñas industrias por ejemplo la industria ladrillera y las fábricas de tableros de madera. El bagazo de caña es otro tipo de biomasa usado en los ingenios azucareros para la producción de calor y electricidad para el mismo ingenio.

Se estima que el potencial de biomasa en México oscila entre 2635 – 3771 petajoules por año (PJ/año), de los cuales del 27-54% deriva de la madera, el 26% de biocombustibles agrícolas y el 0.6% de subproductos de origen municipal. También se ha calculado un potencial para la generación de electricidad a partir del bagazo de caña superior a 3 000 000 megavatio-hora por año (MWh/año) y se estiman 73 millones de toneladas de residuos agrícolas y forestales con potencial energético (Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria, s/f, p 1).

En Monterrey, Nuevo León, se está implementando el primer proyecto de bioenergía en el país, registrado en la Junta Ejecutiva del Mecanismo de Desarrollo Limpio de las Naciones Unidas, la empresa Sistemas de Energía

Internacional S.A. de C.V. aprovecha el biogás de un relleno sanitario para producir energía eléctrica (García, 2011, p 26).

Para los proyectos de biomasa existe falta de experiencia probada en el país con poca evidencia sobre estudios técnicos y prevalece la incertidumbre sobre el abastecimiento continuo de la materia prima para la generación de energía.

En el año 2009 se realizó un estudio de caso para la producción de bioenergía a partir de aserrín, en el estado de Tabasco, en una empresa dedicada al aserrío de madera de eucalipto. Se propuso la generación de electricidad por medio de un gasificador de lecho fluidizado. Para la adquisición del equipo se requiere un alto costo de inversión, de acuerdo a las condiciones de operación del aserradero se consideró que no es apto para la operación del gasificador, ya que trabajaría al 33% de su capacidad instalada. Por lo tanto, el proyecto no es viable, además que la recuperación de la inversión se obtendrá hasta el décimo año (PérezBolde, 2009; p 84,126 y 127.)

Otro estudio del año 2011 propuso al agave para la elaboración de biocombustibles, debido a la disminución de su precio se considera una alternativa para la producción de etanol. Los estados con potencial para incrementar la superficie plantada de este cultivo son Guanajuato, Nayarit, Oaxaca, Michoacán y Jalisco. Este cultivo obtiene rendimientos superiores al maíz y a la caña de azúcar que también se usan para elaborar etanol, además requiere de menores cantidades de agua para su crecimiento (Cervantes y Ojeda, 2011; p 129, 130 y 131).

Respecto al resto de energías renovables, estudios previos señalan que México cuenta con un gran potencial, al poseer niveles altos de insolación; recursos hidráulicos para la instalación de plantas mini hidráulicas; vapor y agua para el desarrollo de campos geotérmicos; zonas con vientos prevalecientes; y grandes volúmenes de biomasa que provienen de desperdicios agrícolas y desperdicios orgánicos de las ciudades y el campo (García, 2011, p 16).

La Secretaria de Energía (SENER) estima que para 2026 México alcanzará una capacidad instalada superior a 30,000 megavatio⁸ (MW⁸) para la generación de electricidad a partir de energías renovables, liderado por la energía eólica con un 59% y por la energía hidráulica con un 28%. En el país existen 253 centrales en

operación y construcción para la generación de electricidad. Los principales estados con proyectos de energía renovable son Oaxaca para la generación de energía eólica y Veracruz para producción de bioenergía. Las principales empresas que se encuentran invirtiendo en proyectos y proveen equipo a México en materia de energías renovables son de origen europeo, principalmente español (Secretaría de Economía, 2013, p 15 y 16).

Las condiciones para generar energía eólica en México son consideradas como las mejores de Latinoamérica. Este sector empieza a desarrollarse en 2007. El recurso eólico se mide considerando el valor promedio de la velocidad anual del viento. Para la generación de energía eólica solo se aprovecha el 3.2% del potencial del país, los estados con centrales eólicas son Oaxaca, Baja California, Quintana Roo, Chiapas, Oaxaca, Tamaulipas, nuevo león y Veracruz. Oaxaca es uno de los estados más importantes, con una velocidad media del viento de 10 m/s (Secretaría de Economía, 2013, p 16-18 y García, 2011, p 17).

Respecto a la energía solar, México ocupa el tercer lugar de los países más atractivos para invertir en proyectos de esta materia, ya que forma parte del “cinturón solar” con una radiación mayor a 5 kilovatio-hora por metro cuadrado por día (kWh/m²/día). De acuerdo al Instituto de Investigaciones Eléctricas es considerado como uno de los países del mundo con mayor promedio de radiación solar anual. México se encuentra en fase incipiente en este sector para la generación de electricidad, la mayoría de las instalaciones fotovoltaicas se encuentran en comunidades rurales y son usadas para aplicaciones térmicas como la calefacción del agua (Secretaría de Economía, 2013, p 16-18 y García, 2011, p 22- 23).

Para la generación de energía geotérmica, México se encuentra dentro de los primeros cinco lugares a nivel mundial para su producción, los estados productores son Baja California, Michoacán y Puebla. Su capacidad instalada es de 964 megavatios (MW) distribuidos en cuatro centrales.

Por lo tanto, en México aún están por concretarse medidas para el aprovechamiento de las fuentes renovables de energía. En la Ley General de Cambio Climático (2012) y la Ley para el Aprovechamiento de las Energías

Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética, se establecieron metas como la generación de un 35% de la electricidad con energías renovables para el año 2024. Sin embargo, para 2016 el senado rechaza ley a favor de energías renovables, la llamada ley de transición energética, esta ley contiene los lineamientos para impulsar las energías renovables. En México se han invertido 2100 millones de dólares en proyectos de estas energías renovables, los cuales son proyectos de empresas privadas, independientes al gobierno mexicano (ecoosfera, 2016). La reforma del año 2016 priorizó en los hidrocarburos y relegó a una sola ley las energías renovables, con lo cual es difícil que se cumpla la meta que fue establecida para el año 2024.

Justificación e importancia

La biomasa siempre ha sido utilizada a lo largo de la historia, actualmente está siendo relevante por las tecnologías que la manejan y aprovechan, al surgir la necesidad de buscar otras fuentes de energía que sustituyan al petróleo que cada día va disminuyendo sus reservas.

A diferencia de todas las demás formas de energía renovable es la única que permite el almacenamiento en forma de moléculas hidrocarbonadas estable y disponible para abastecer a los equipos autónomos que consumen este tipo de energía. Porque las demás energías renovables difícilmente se pueden almacenar en grandes cantidades (Damien, 2010, p. 36). Tal es el caso del pellet de madera que es un tipo de biomasa sólida que en España se ha empezado a producir en los últimos años para uso doméstico.

Estos biocombustibles presentan ciertas ventajas con respecto al petróleo, son menos agresivos con el medio ambiente, reducen las emisiones de gases efecto invernadero y son fuente generadora de valor agregado (Castro et al, 2012).

En México el uso de madera de plantaciones forestales y desperdicios de la industria forestal como biocombustibles son una opción de aprovechamiento que generará beneficios ambientales y económicos. No afecta de forma directa la producción de alimentos para el consumo humano, ya que, para el caso de las plantaciones, se usan tierras con bajo valor agrícola para su establecimiento.

Planteamiento del problema

En los últimos cinco años México ha iniciado con la comercialización de parte de su producción maderable hacia la venta de astilla como biocombustible. Sin embargo, se desconoce que especies son las más idóneas. Esta investigación pretende proporcionar las bases suficientes para que México pueda tomar la decisión sobre qué tipo de biocombustible producir con base en su situación técnica y económica. Los países desarrollados como España van más avanzados en el sector de energías renovables, de sus sistemas de producción de biocombustibles se tomaron bases para hacer un análisis con México.

En México existe la necesidad del desarrollo de energías alternativas acorde a la situación económica existente que sea capaz de financiarlas. Para el caso de la obtención de biodiesel y etanol los costes de producción aún son elevados, debido a la escasez y costosa materia prima, que también repercute en la seguridad alimentaria, porque ciertos biocombustibles se generan a partir de cultivos agrícolas llamados de primera generación que se destinan para el consumo humano (Secretaría de Energía- Banco Interamericano de Desarrollo Cooperación Técnica Alemana, 2006). Por esta razón esta investigación se enfoca a hacer un estudio sobre las especies de madera de plantaciones forestales que son más adecuadas para el uso como biocombustible sólido en la industria que trabaja con calderas en México.

Se pretende que gradualmente la astilla de madera en un inicio vaya sustituyendo el uso del petróleo en la industria que trabaja con calderas en México y posteriormente se vaya adoptando tecnología para la producción de pellet de madera. El uso de la biomasa tendrá ciertas ventajas como la reducción de gases efecto invernadero, al ser los árboles fuentes de captura de carbono y fuente de energía renovable; se generarán empleos en las regiones plantadoras y se asignará un uso alternativo a los suelos que tienen bajo valor agrícola. Por este motivo no existirá impacto significativo en la producción de alimentos.

Objetivos

General

Analizar la producción de pellet en España para identificar y comparar las oportunidades que existen en México de transformar la madera y residuos de la

industria forestal en pellet y conocer las especies forestales más adecuadas para biomasa en México.

Específicos

1. Analizar el panorama técnico económico de pellet de madera en España,
2. Determinar las bases de transformación de la astilla para México a partir de la experiencia en España.
3. Determinar que especies forestales son más aptas para uso como biomasa sólida en la industria mexicana.
4. Realizar un análisis proximal en laboratorio de las principales especies de madera de plantaciones forestales del Sureste Mexicano.
5. Comparar los resultados obtenidos en laboratorio sobre las diferencias de las propiedades energéticas por especie forestal.
6. Construir de un modelo nacional de oferta de astilla de madera para identificar las variables de mayor impacto en la producción de biomasa.

Hipótesis

Se considera que, con base en la experiencia positiva en España, en México existen condiciones favorables para la producción de pellet de madera

Las especies propuestas en este estudio son aptas para su uso como biomasa sólida e idóneas para su transformación a pellet de madera.

Se espera que, a partir del modelo de oferta de biomasa, las variables propuestas en el modelo tengan gran influencia en la producción nacional de astilla para biomasa.

Metodología

Éste análisis está comprendido por tres etapas, en la primera se hizo un estudio técnico para conocer las propiedades energéticas de las principales especies de plantaciones forestales del Sureste Mexicano y de esta manera identificar las especies con mayor poder calorífico.

En la segunda etapa se construyó un modelo econométrico de oferta de astilla de madera, la cual es la materia prima o biomasa que se usa en la industria que trabaja con calderas, en el modelo se incluyeron variables que influyen en la

producción y bienes que actúan como sustitutos y se corrió en R para identificar las variables que tienen mayor influencia en la producción de astilla de madera a nivel nacional.

En México como biomasa sólida solo se usa astilla de madera y bagazo de caña para combustión directa, por esta razón se propone una alternativa más eficiente para aprovechar estos recursos. Por lo tanto, la etapa tres se refiere a un análisis sobre la producción de pellet de madera que se hizo en España, por medio de la aplicación de una encuesta a nivel nacional a las fábricas productoras. Al conocer las ventajas técnicas y económicas se realizó un análisis para México.

1. Análisis proximal

Para el estudio técnico se colectaron muestras de madera en plantaciones forestales de Veracruz y Tabasco, de las siguientes especies:

- *Gmelina arborea*,
- *Tectona grandis*,
- *Acacia mangium*
- *Eucalyptus urophylla*,

Los árboles fueron de entre 7 y 8 años de edad. Se usó el diseño completamente al azar. Se cortaron 10 árboles por especie, para obtener una rodaja de madera a la altura de 1.30 m, las rodajas se astillaron y se mezclaron, para obtener cuatro muestras por especie con una repetición y se guardaron en bolsas de papel para su traslado al laboratorio (figura 1).



Figura 1. Astilla de madera para el análisis proximal.

(Fuente: Archivo Fotográfico Imelda Vargas)

En laboratorio se determinó poder calorífico, contenido de humedad y contenido de cenizas de cada muestra, ya que éstas propiedades son importantes para identificar las especies aptas para biomasa. El poder calorífico es determinante porque nos muestra la capacidad de la madera para generar calor, una madera con menor contenido de cenizas es más aceptable porque el objetivo es producir la menor cantidad de residuos que dañen la caldera o que existan demasiados tiempos muertos por estar desalojando la ceniza de manera continua.

1. Contenido de humedad:

Las muestras de madera fueron colocadas en cajas de papel. Primero en una balanza digital se pesó cada caja. Posteriormente se le añadió la muestra de madera y se volvió a pesar y se colocó en una estufa a 50°C durante 72 horas (Figura 2). Una vez transcurrido el tiempo de secado se retiraron las muestras de la estufa y se volvieron a pesar. Y se aplicó la siguiente fórmula:

$$CH = ((PCMh - PCMS) / 100) / (PCMh - PC)$$

Dónde: CH=Contenido de Humedad; PCH= Peso de la caja con muestra húmeda; PCMS= Peso de la caja con muestra seca; y PC= Peso de la caja.



Figura 2. Astilla de madera en la estufa de secado

(Fuente: Archivo fotográfico Imelda Vargas)

2. Poder calorífico:

Para la determinación del poder de combustión se usó un calorímetro Marca Parr, Modelo 1266 con bomba calorimétrica de tipo isoperibol (figura 3). Primero se colocaron en la cubeta del calorímetro dos litros de agua aforados a una

temperatura de 30-32 °C. Se pesó y registro cada cápsula donde iría la muestra y se le agregó de 0.25-0.35g de madera. Se colocó la cápsula con muestra en el porta electrodos, se cortaron 10 cm de alambre fusible y se colocó en el porta electrodos haciendo que el alambre tocara la muestra pero no la cápsula. En seguida se colocó el porta electrodos dentro del cuerpo de la bomba y se aseguró con la tapa rosca. Posteriormente se inyectó oxígeno a la bomba, ubicando la salida de la manguera del tanque de oxígeno en la entrada de la bomba, hasta que el manómetro marcó de 25 a 30 atmosferas. Con suma precaución de no derramar la muestra, se trasladó la bomba al interior de la cubeta ubicada en el calorímetro y se conectaron los electrodos a la bomba. Se cerró y encendió el calorímetro y se registraron las lecturas que arrojó.

Finalmente, el poder calorífico se determinó con la fórmula siguiente:

$$H_c = (WT - e_1 - e_2 - e_3) / m$$

Dónde: H_c =Calor de combustión; W = energía equivalente del calorímetro cuando es utilizado; T = aumento de la temperatura; e_1 = Calor producido por la quema del nitrógeno del aire atrapado en la bomba para formar ácido nítrico; e_2 = el calor producido por la formación de ácido sulfúrico a partir de la reacción de dióxido de azufre, agua y oxígeno; m = masa de la muestra.



Figura 3. Calorímetro

(Fuente: Archivo fotográfico Imelda Vargas).

3. Contenido de cenizas:

Para el contenido de cenizas se utilizó aproximadamente 1g de muestra (figura 4). Las muestras fueron quemadas hasta obtener cenizas, después se

introdujeron a la mufla durante dos horas a 500 °C. Las cenizas se midieron en relación al porcentaje de madera seca, se pesó el residuo de los crisoles después de la combustión en la mufla. Se aplicó la fórmula siguiente:

$$CC = ((PCC - PC) * 100) / (PCMA - PC)$$

Dónde: CC=Contenido de cenizas; PCC=Peso del crisol con cenizas; PC= Peso del crisol; PCMA= Peso del crisol con muestra de astilla.



Figura 4. Crisoles con astilla para la prueba de cenizas
(Fuente: archivo fotográfico Imelda Vargas).

4. Análisis de la información

Para comparar los resultados de poder calorífico, se usó la prueba de Tukey ya que el número de repeticiones para cada especie era constante. Esta prueba tuvo el objetivo de comprobar las diferencias entre medias de cada especie forestal tratada.

Donde las hipótesis a evaluar fueron las siguientes, considerando la media o promedio (μ) de los valores de poder calorífico de cada especie:

$H_0 = \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4$ (Las medias son iguales)

$H_1 = \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \neq \mu_4$ (Las medias son diferentes)

Se calculó el valor crítico de todas las comparaciones por pares, obteniendo el error estándar de cada promedio, así como el valor de T_α y la diferencia de las medias para realizar comparaciones con el valor crítico.

También se estimó la cantidad de kilocalorías que se generan por ha por año en función del incremento medio anual (IMA)¹ de cada especie.

2. Modelo econométrico de oferta

Además de definir las especies de plantaciones forestales más aptas para biomasa, la elaboración del modelo econométrico de oferta permitirá cuantificar la relación que ha existido entre las variables implicadas durante el periodo analizado y de este modo puntualizar las estrategias a seguir para la producción de pellet de madera a partir de astilla de madera.

La astilla de madera que se produce en México se destina principalmente para la obtención de pulpa para papel, sin embargo, se le puede asignar un uso alternativo como materia prima para biomasa.

Se planteó un modelo econométrico de oferta a nivel nacional para determinar el comportamiento de la producción de astilla de madera ante la variación de las variables incluidas.

Para construir el modelo nacional de oferta de madera se usaron datos a nivel nacional de 30 años que corresponde al periodo de 1980-2014. La información se obtuvo del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI), Anuarios de Petróleos Mexicanos, Anuarios Estadísticos de México y Anuarios Forestales.

El modelo general planteado es el siguiente:

$$\begin{aligned} OMB_t = & \beta_0 + \beta_1PMB_{1t} + \beta_2PCR_{2t} + \beta_3PCM_{3t} + \beta_4CCM_{4t} + \beta_5VCM_{5t} + \beta_6PRCM_{6t} \\ & + \beta_7PRMR_{7t} + \beta_8PMR_{8t} + \beta_9PD_{9t} + \beta_{10}PG_{10} + \beta_{11}CD_{11t} \\ & + \beta_{12}VCD_{12t} + \beta_{13}CG_{13t} + \beta_{14}VCG_{14t} + \beta_{15}TC_{15t} + \beta_{16}TI_{16t} \\ & + \beta_{17}TIE_{17t} + \beta_{18}INPC_{18t} + \beta_{19}SMG_{19} \end{aligned}$$

En el modelo se incluyeron datos que se relacionan con el proceso de producción de la variable dependiente (oferta de madera para biomasa), es decir, insumos como precio del combustible usado y salario mínimo para la mano de obra.

También se consideró información sobre los bienes sustitutos de este tipo de biomasa que para este caso es el combustóleo industrial (Cuadro 1).

Las variables planteadas en el modelo tienen relación directa e indirecta con la oferta de madera para biomasa, algunos datos se expresan de forma general ya que no existen datos específicos para el área forestal (Anexo 1).

Se graficaron todas las variables para mostrar su comportamiento. Para facilitar la apreciación del gran conjunto de variables y sus distintas magnitudes, se hizo la conversión gráfica de valores a una escala.

Cuadro 1. Variables usadas en el modelo y unidades manejadas.

Variable	Nombre	Unidades
OMB	Oferta de madera para biomasa	Miles de m ³ r
PMB	Precio de la madera para biomasa.	Pesos/m ³ r
PCR	Producción de crudo.	Miles de barriles diarios
PCM	Producción de combustóleo.	Miles de barriles diarios
CCM	Consumo de combustóleo	Miles de barriles diarios
VCM	Valor del consumo del combustóleo.	Millones de pesos
PRCM	Precio del combustóleo	Pesos/litro
PRMR	Producción de madera en rollo	Miles de m ³ r
PMR	Precio de la madera en rollo	Pesos/ m ³ r
PD	Precio del diésel	Pesos/litro
PG	Precio de la gasolina	Pesos/litro
CD	Consumo de diésel	Miles de barriles diarios
VCD	Valor del consumo de diésel	Millones de pesos
CG	Consumo de gasolina	Miles de barriles diarios
VCG	Valor del Consumo de la Gasolina	Millones de pesos
TC	Tipo de cambio del dólar	Pesos/dólar
TI	Tasa de interés real anual	%
TIIE	Tasa de interés en porcentaje anual a 28 días	%
INPC	Índice nacional de precios al consumidor	%
SMG	Salario Mínimo General	Pesos/Jornal

Se identificaron las variables que no mantenían alguna relación y las de mayor influencia.

Se tomó de manera individual la medición de las correlaciones de cada variable, para identificar las de mayor importancia.

Efectuando la regresión mediante mínimos cuadrados en R, se corrió un modelo general donde se incluyeron todas las variables. Posteriormente se hizo estimación con corrección de heterocedasticidad.

Una vez identificadas las variables de mayor influencia se construyeron los modelos para adecuarlos a la siguiente ecuación.

$$y = \beta_0 \prod_{i=1}^n x_i^{\beta_i}$$

Posteriormente se corrieron modelos parciales simples que incluyeron sólo una variable independiente para todas y cada una de las variables independientes, y se generó la matriz de covarianzas para el modelo lineal que incluye a todas las variables y se identificaron los modelos con las variables independientes de mayor influencia (Anexo 2, matriz de covarianzas). Para posteriormente correr los modelos definidos en la matriz de covarianzas.

En la matriz de varianza – covarianza se clasificaron con colores los modelos con valor más alto de significancia. Posteriormente se procedió a construir los modelos comenzando con incluir a todos los valores recomendados y otros sin incluir algunas de las variables con menos valor.

Se corrieron 19 modelos con sus combinaciones, para elegir el de mejor ajuste. De esta manera se calcularon los coeficientes beta en R, una vez colectados todas las combinaciones y establecidos los modelos estadísticos respectivos se compararon los resultados entre ellos y de ahí se aceptó un modelo para el análisis de datos en proceso.

Al modelo aceptado se le aplicó la conversión correspondiente para eliminar o neutralizar la influencia dada por el logaritmo natural, se aplicó en ambos lados de la ecuación para obtener las elasticidades, este es el modelo llamado log-log, que es útil cuando la relación no es lineal en los parámetros y la transformación logarítmica generó linealidad.

Finalmente aplicando el concepto de elasticidad se analizó el efecto de cada variable con la variable estudiada.

3. Análisis de la producción de pellet de madera en España

Este estudio se realizó en España, considerando las 17 comunidades autónomas que lo conforman para conocer la evolución que ha tenido la industria de producción de biomasa sólida que genera de calor y electricidad. Se llevó a cabo por medio de la obtención de información cualitativa y cuantitativa en la producción de pellet de madera.

Se realizó revisión bibliográfica para conocer los factores que influían en el uso del pellet como biocombustible desde su producción hasta su consumo y para la obtención de la base de datos de su sector productivo. En dicha base de datos se consideró a las plantas peletizadoras certificadas y no certificadas (Anexo 3).

En función de los resultados obtenidos de la revisión bibliográfica y las bases de información se elaboró una encuesta sobre el panorama de la industria española del pellet (Anexo 4), considerando los siguientes aspectos:

1. Factores técnicos, económicos y ambientales que han influido en la decisión de establecer plantas para la producción de pellet de madera.
2. Montos de inversión para el establecimiento de las fábricas.
3. Verificar si las empresas productoras de pellet de madera evolucionaron desde la producción de astilla a pellet o si son empresas con el proceso implantado desde su conformación.
4. Aspectos sobre tipo de tecnología usada en el proceso de producción, mercado, precios y costes, así como limitantes y ventajas de la producción de pellet.

En total en España existen 50 fábricas de pellet, al ser una población pequeña para la obtención de información se aplicó un censo (Anexo 5). Con los resultados de la encuesta se hizo el análisis a través de la construcción de gráficos, análisis FODA y una comparación con México respecto a materia prima, aspectos económicos, técnicos y de mercado para la posible implementación de producción de este tipo de biomasa.

La tesis está conformada por cuatro capítulos. En el primero se aborda la situación energética del petróleo a nivel mundial y el panorama de México. Se

indican los tipos de energía renovable que pueden ir sustituyendo a este combustible fósil, así como la situación de dicho sector en México. Especialmente de la biomasa de madera que es el tema de esta tesis.

En el capítulo II se aborda la metodología para la construcción de modelos econométricos enfocados a biomasa, considerando ejemplos aplicados al área forestal.

En el capítulo III, se hace énfasis a la alternativa de producción de un tipo de biocombustible a partir de biomasa forestal, que presenta mejores ventajas económicas y técnicas contra el uso de astilla de madera como biocombustible sólido, en este capítulo se consideran aspectos de producción y comercialización en el mundo, principalmente Europa, y con un enfoque a España, que es uno de los precursores en la producción de este tipo de biomasa.

En el capítulo IV se reportan los resultados del análisis proximal de maderas de plantaciones forestales que se hizo en laboratorio en México, con el objetivo de conocer las especies más aptas para su uso como biomasa. También se hace énfasis a los resultados del modelo econométrico de oferta, donde se considera la influencia de cada variable estudiada en la oferta de madera para biomasa en México.

Posteriormente se reportan los resultados obtenidos sobre la encuesta que se aplicó a las empresas productoras de pellet en España, gráficos de precios, costes, aspectos de producción y comercialización, dónde a partir de esta información se elaboró un análisis de fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas (FODA) con sus posibles estrategias.

A partir de la información que se obtuvo en España se hace un análisis para México, planteando la opción de evolución de uso de astilla de madera a pellet de madera en la industria que trabaja con calderas.

I. LA BASE ENERGÉTICA DEL SISTEMA PETRÓLEO Y LAS DISTINTAS FUENTES DE ENERGÍA

1.1 Situación del mercado internacional del petróleo.

El petróleo se formó principalmente de algas y materia orgánica, producto del calentamiento global extremo, es un recurso no renovable, en regiones productoras la obtención inicia con el descubrimiento del yacimiento y finaliza cuando este se agota.

Los primeros pozos petroleros fueron perforados a mediados del siglo XIX en Pennsylvania y las costas del Mar Caspio. Con la Revolución Industrial en 1860 se empezó a usar benceno destilado de hulla como combustible en la maquinaria, posteriormente se pasó del uso del petróleo crudo al refinado. Más tarde en 1882 surgió el primer automóvil, lo que beneficio a la expansión de la industria y el comercio, acompañado de rápido crecimiento del capital financiero (paralibros, s/f).

La década de 1960 fue la cúspide del aprovechamiento petrolero, en 1981 el mundo usaba más combustible del que se hallaba en los yacimientos. Muchos países ya han pasado su mejor momento, lo que sugiere que el agotamiento del petróleo es inminente, lo cual es un asunto de gran tensión internacional. Lo que ha ocasionado el aumento gradual de los precios al ir creciendo la demanda de energía con el progreso tecnológico, por lo tanto, el acceso a las fuentes de energía renovables es cada vez mayor, un desarrollo que es impulsado por políticas públicas (Páez, 2005, p 1-11).

Debido al crecimiento económico y de población mundial se espera que la demanda de petróleo aumente. Se estima que para el año 2050 la población aumentara a 9100 millones (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2009, p 2). Esto implica una mayor demanda de servicios, vivienda, alimentos y por lo tanto mayor consumo de energía. Y también con los avances tecnológicos la población requiere de mayores servicios como transporte y comunicaciones.

1.2 Consumo mundial de energía primaria

El petróleo sigue siendo el combustible más importante a nivel mundial, representó el 33.1% del consumo para 1965. Sin embargo, la energía hidráulica

y las energías renovables han alcanzado el consumo mundial de energía primaria de 6.7% y 1.9 % respectivamente para 2012. El consumo de energía primaria a nivel mundial creció 0.9%, ha sido la cifra más baja desde el año 2009. Esto ha ocurrido debido a las modificaciones del consumo de China y Estados Unidos. Estados Unidos ha aumentado su producción de petróleo en un 15.9%, superando a Arabia Saudita que era el primer productor mundial de petróleo. Con esa producción Estados Unidos cubre el 89% de sus necesidades y por lo tanto importa menos petróleo. Para el caso de China solo aumentó 2.6% en su consumo, es considerado el incremento más bajo desde 1998, debido al abandono de ciertos sectores de producción industrial que consumen altas cantidades de energía como el acero. A pesar de esta situación China es el mayor consumidor de energía primaria a nivel mundial desde hace 14 años y es el mayor importador de petróleo (British Petroleum, 2015).

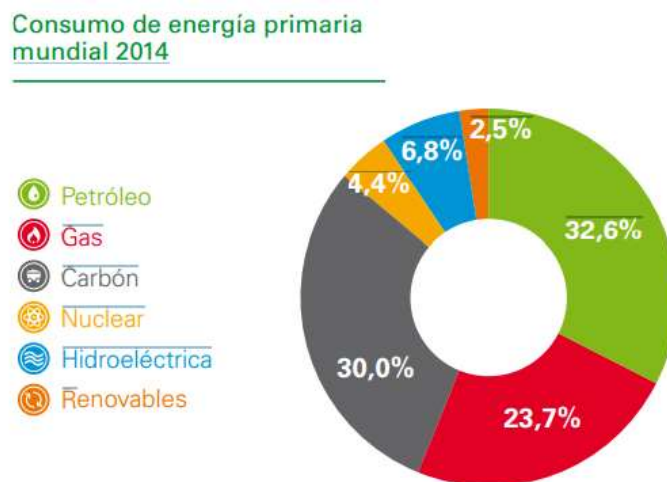


Figura 5. Consumo mundial de energía primaria. (Fuente: British petroleum (BP)¹, 2015)

Otro factor que influyó en el bajo consumo de energía para el 2014 es la situación sobre problemas medioambientales y climáticos, que obligo a China y Estados Unidos a implementar medidas que regulen el consumo de petróleo (British Petroleum, 2015).

Reservas de petróleo a nivel mundial.

La existencia real de petróleo en el subsuelo no se puede saber con certeza, los datos que se presentan son solo estimaciones, el recurso finalmente se divide

en tres categorías: la producción acumulada, las reservas descubiertas y los recursos no descubiertos.

Las reservas descubiertas a nivel mundial aumentaron de 15 mil millones de barriles a 1.669 millones de barriles en 2012. A nivel mundial, representa un aumento del 26 % respecto a la cifra del 2002, pese a una producción acumulada de 300 mil millones de barriles durante los últimos diez años. Así incorporaciones a las reservas globales ascendieron a 647 mil millones barriles entre 2002 y 2012. (Informe British Petroleum, 2013)

Mediante el análisis de datos geológicos y de ingeniería se han estimado las reservas de petróleo con un alto grado de confianza. Las reservas probadas de petróleo son aquellas que la industria considera que pueden ser recuperadas en las condiciones económicas y operativas existentes (Ministerio de Educación Política Social y Deporte, 2008, p 92).

Medio oriente es la región con mayores reservas, principalmente Arabia Saudita e Irak. El Mar de Norte y Canadá aún tienen importantes reservas, pero en estas zonas es mucho más costosa la extracción (Figura 6).

Con el avance tecnológico se han mejorado las técnicas para la extracción y refinación de petróleo, esta situación ha permitido incrementar las reservas probadas a nivel mundial.

Actualmente las compañías petroleras extraen petróleo ligero, en cambio el petróleo de las reservas es de tipo medio y pesado. Pero con el avance tecnológico actualmente existe mayor facilidad para refinarlos (OPEP citado por venelogía, 2013).

Aunque el petróleo pesado tiene un costo de refinación más elevado, ya que es más viscoso y su peso específico es mayor. Generalmente los depósitos en el subsuelo se encuentran donde hay rocas o sedimentos de lutitas y areniscas. Este recurso representa el 40% del recurso mundial de petróleo, incluido también el petróleo extra pesado (Faergestad, 2016, p 1-3).

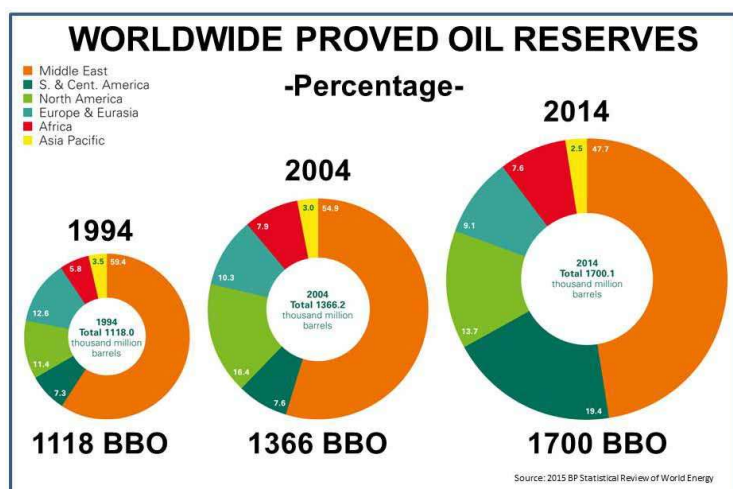


Figura 6. Reservas probadas de petróleo crudo.

(Fuente: British Petroleum (BP), 2015, revisión estadística, citado por García - Solórzano)

Producción de petróleo por región

La producción mundial de petróleo aumentó en 1,9 millones de barriles diarios en 2012, más del doble del crecimiento del consumo global. La recuperación de la producción de Libia llevó a un fuerte crecimiento de la producción africana (Figura 7).

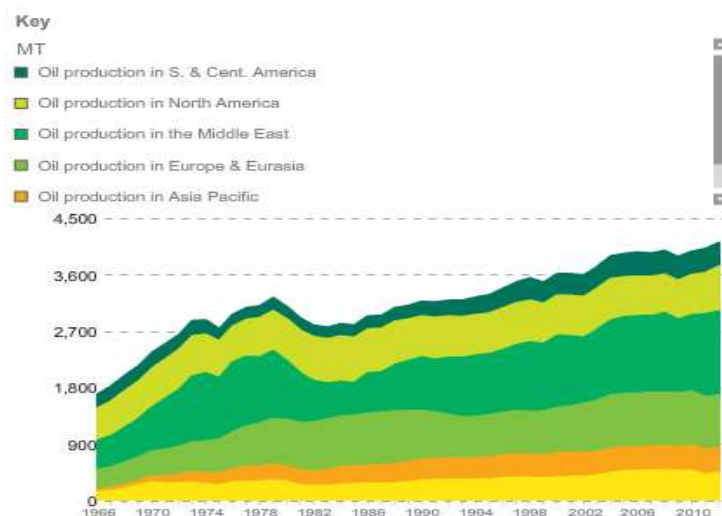


Figura 7. Producción de millones de barriles diarios de petróleo por región (BP, 2012).

Medio Oriente es el mayor productor de petróleo provee cerca de un tercio del consumo mundial. Pero Europa y Eurasia (en especial, Rusia y el Reino Unido) y Estados Unidos son también grandes productores. La diferencia es que casi toda la producción de Medio Oriente es para exportación, mientras que Estados Unidos no llega a cubrir su consumo doméstico (Figura 8).

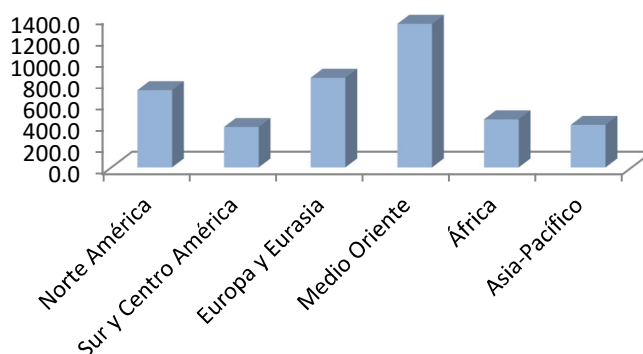


Figura 8. Producción de petróleo a nivel mundial por región en millones de toneladas (Fuente: Gráfico elaborado con datos de British Petroleum, 2012).

Si se considera la producción de petróleo por país, Estados Unidos para 2016 se reporta como el mayor productor, se le atribuye principalmente a la promoción del gobierno de Obama del uso de cierta tecnología de extracción a la cual se le denomina “fracking” o fractura hidráulica, el cual es un método agresivo para la extracción del petróleo, donde se inyecta agua arena y sustancias químicas a las rocas llamadas lutitas que son poco permeables y que impiden la extracción del petróleo. Esta situación ha ocasionada exceso de oferta de petróleo en el mercado mundial repercutiendo en la disminución de su precio. Sin embargo, se considera que el método de fractura hidráulica es agresivo con el medio ambiente, contaminando agua, suelo y aire (Garrido, 2016 y Alianza contra el fracking, 2016).

Precios del petróleo

El precio promedio del petróleo para el año 2012 fue de 111.67 dólares por barril, con un aumento de \$ 0.40 por barril desde el 2011 (Figura 9).

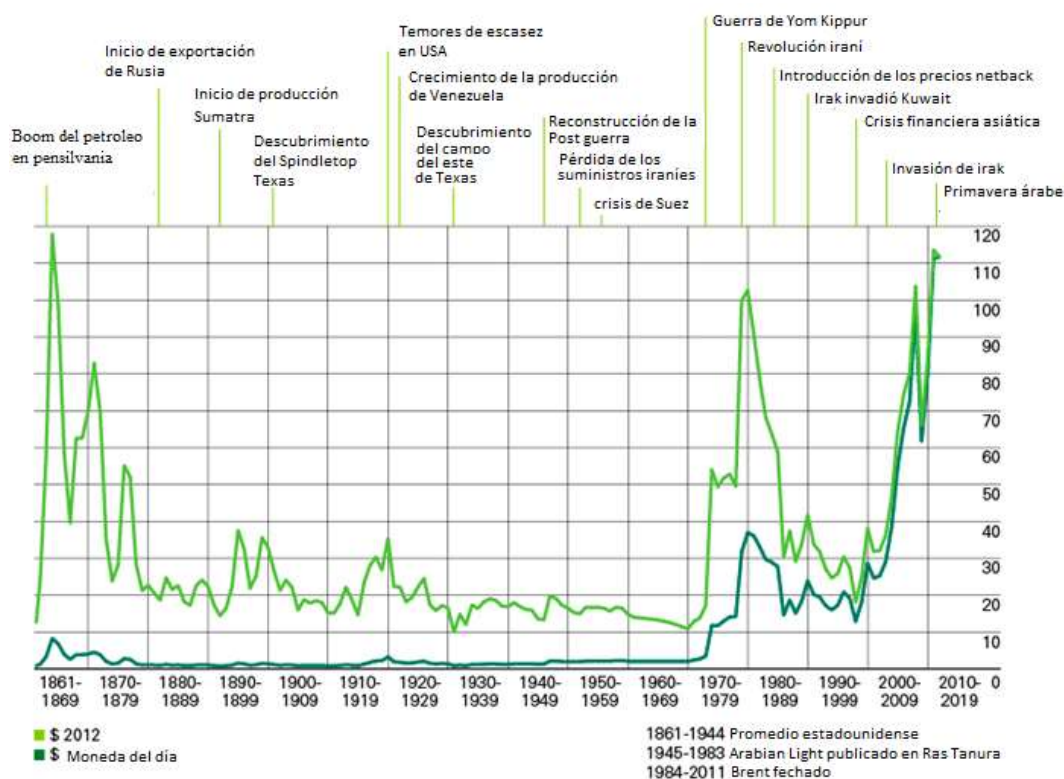


Figura 9. Precios del petróleo crudo en dólares por barril de 1861-2012, de acuerdo a los eventos ocurridos a nivel mundial.
(Fuente: British Petroleum, 2012).

Pero en el 2014 se registró una caída en los precios a nivel mundial, debido a que países que no eran miembros de la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP), principalmente Estados Unidos, producían altos volúmenes mientras que los países de la OPEP mantenían una producción fija para no sobrepasara la cuota de mercado (Informe British Petroleum, 2015).

Para 2016 la crisis del petróleo sigue latente, los precios por barril han descendido hasta a menos del 50 % de su valor original. El exceso de oferta presiona al mercado mundial, superando la demanda por 1.5 millones de barriles. Se considera que la técnica de la fractura hidráulica usada por Estados Unidos es una de las razones de la crisis del petróleo (Garrido, 2016).

1.3 Panorama nacional

El petróleo crudo es un recurso muy importante para México. Su exploración, explotación y transformación permiten satisfacer las necesidades energéticas de los sectores productivos del país. Asimismo, los ingresos petroleros son

fundamentales para el crecimiento económico del país. Las reservas de probadas de petróleo han ido en descenso en los últimos años, al igual que la producción, sin embargo, debido al continuo crecimiento económico la demanda ha ido en aumento, por lo tanto, el agotamiento de este recurso es inminente, lo que lleva a la búsqueda de otras fuentes de energía alterna (Figuras 10-12).

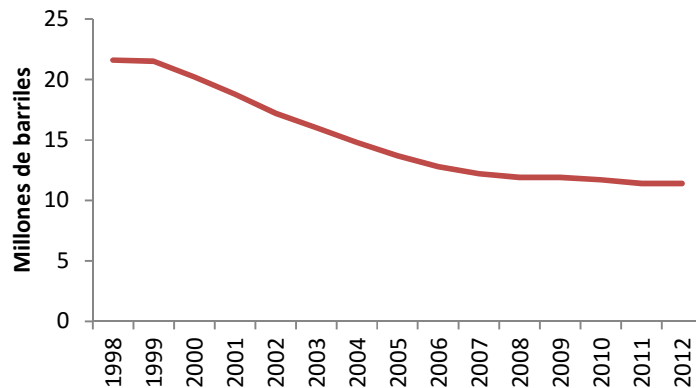


Figura 10. Reservas probadas de petróleo

(Fuente: elaboración con datos de British Petroleum, 2012).

Para el año 2015 las reservas probadas de hidrocarburos ascendían a 13017 millones de barriles de petróleo crudo equivalente, de las cuales 75% corresponde a crudo, 8% a condensados y líquidos de plata y el 17% a gas seco equivalente. El 72% de reservas probadas de crudo se encuentran en regiones marinas y el resto en campos terrestres (PEMEX, 2015, p.1).

Para el año 2015 la producción alcanzo un promedio por día de 2millones 429 mil barriles de crudo, hubo una disminución respecto al año 2014 que fue de 2 millones 522 mil barriles de crudo por día (PEMEX, 2015, p.11 y PEMEX, 2014, P. 10).

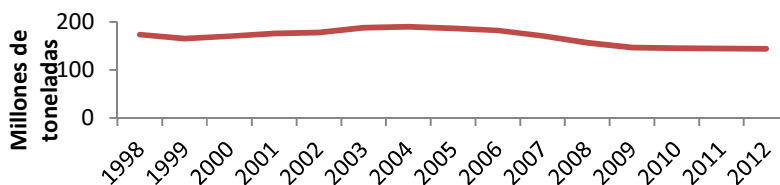


Figura 11. Producción de petróleo

(Fuente: elaboración con datos de British Petroleum, 2012).

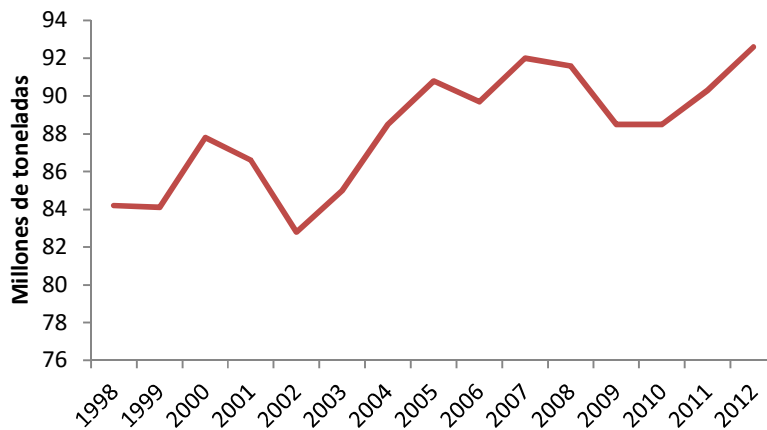


Figura 12. Consumo de petróleo.

(Fuente: elaboración propia con datos de BP, 2012).

Desde el año 2014 se ha registrado una caída del precio del petróleo a nivel mundial, situación que ha afectado a la industria petrolera mexicana. Con el auge de la producción petrolera en Estados Unidos, este país ha disminuido su importación de petróleo, generando en México un exceso de oferta y que enfrente actualmente una crisis donde el factor económico y social juegan un papel muy importante (noticias universia, 2016).

Por lo tanto, la caída de los precios del petróleo ha arruinado los planes de la reforma energética del gobierno de Enrique Peña Nieto, el cual reaccionó a la caída de los ingresos del petróleo recortando el gasto público (Forbes, 2016).

En síntesis, se destaca que en los últimos años la producción de petróleo ha ido en aumento lo que ha generado disminución de precios de exportación por la sobre oferta. Lo cual no significa que hayan descubierto más yacimientos, la razón de esta situación se debe al uso de nuevas tecnologías agresivas con el medio ambiente que permiten extraer el petróleo que en años anteriores era de difícil acceso. Lo que hace suponer que las reservas de petróleo ligero se están agotando al estar accediendo a la extracción de petróleo pesado que es de refinación más complicada debido a la gran cantidad de impurezas que presenta.

Como se mencionó anteriormente el método de fractura hidráulica también se utiliza en México pero genera severos daños al medio ambiente al contaminarlo con sustancias químicas, hasta con sustancias radioactivas que se extraen del subsuelo, esta situación es indicador que también en México es cada vez más

difícil la extracción del petróleo, además el país se ha dedicado solo a exportar y no cuenta con reservas estratégicas de petróleo como Estados Unidos, China y Japón, situación que puede ocasionar que en décadas futuras México requiera importar petróleo, por lo tanto es necesaria la sustitución de este tipo de energía no renovable por energías alternativas que sean renovables y amigables con el medio ambiente.

1.4 Clasificación de las energías renovables

Las energías renovables son todas las formas de energía cuyo potencial es inagotable y que se producen a partir de un recurso natural, que se renueva de manera continua. Las principales fuentes de esta energía son las siguientes:

Energía Geotérmica

La energía geotérmica proviene del calor que se extrae del interior de la tierra. Se usa para generar electricidad y calor. La diferencia entre la temperatura de la superficie terrestre y la del interior es muy marcada. El calor que se concentra en el interior es liberado de forma natural a través de géiseres o de fuentes hidrotermales (Schallenberg et al, 2008, p 34).

Este tipo de energía se obtiene por medio de perforaciones para extraer fluidos a alta temperatura de reservorios hidrotérmicos o de sistemas geotérmicos mejorados con trayectorias artificiales de fluido. Para el caso de los primeros ocurre cuando son permeables y la temperatura es suficientemente elevada para aprovecharlos, para el caso de los sistemas geotérmicos mejorados la temperatura no es muy elevada, pero se mejora con estimulación hidráulica (Grupo Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático, p 71 y 73).

Energía oceánica

La obtención de energía a través del mar se encuentra en una fase incipiente de desarrollo, se puede generar energía a partir del oleaje, de la amplitud de marea, de las corrientes oceánicas, de la conversión de la energía térmica de los océanos y del gradiente de salinidad (Grupo Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático, p 87).

Energía Eólica

El viento se produce por el movimiento del aire que rodea el planeta, que se genera cuando el sol calienta la tierra, que ocurre de manera desigual en diferentes zonas. Esta energía se usa para el movimiento de los barcos de vela, para los molinos que bombean agua o muelen cereales y para producir electricidad. La rotación terrestre, la presión atmosférica y la diferencia de temperatura influyen en la velocidad del viento y la densidad disminuye con la altitud (Schallenberg et al, 2008, p. 82).

La energía del viento se usa para producir electricidad por medio de turbinas y para producir energía mecánica por medio de aeromotores, se puede aprovechar en la mayor parte del mundo, su viabilidad económica está determinada por la velocidad media del viento.

Energía Hidráulica

La energía hidráulica se usa básicamente para la producción de electricidad a través de las centrales hidroeléctricas, el agua almacenada en las presas o el agua de los ríos, se deja caer por una tubería, donde se coloca una turbina a la salida, para que ésta gire con la salida del agua, el giro pone en funcionamiento el generador eléctrico para generar electricidad (Schallenberg et al, 2008, p. 98).

Aproximadamente una quinta parte de la energía eléctrica del mundo se obtiene por este medio. La cantidad de electricidad generada depende del caudal y la caída del agua, a medida que estas características son mayores la potencia de las turbinas aumenta. Los proyectos de este tipo de energía pueden estar conformados por presas con embalses o pueden estar basados en la corriente de los ríos.

En este sector se aprovecha la energía del agua en movimiento de ríos y cauces. Antiguamente se usaba principalmente para la molienda de granos o transporte de mercancías por medio de barcazas. Actualmente se usa para la generación de electricidad (Jara, 2016, p 14).

Energía Solar

El sol de forma indirecta o directa es el origen de las energías renovables, sin considerar la energía del mar y la geotérmica. El sol desprende energía por

medio de radiación electromagnética, la cual es absorbida por la atmosfera y el suelo y es reflejada al espacio desde éste último. Por lo tanto, la mitad de la radiación solar llega de manera efectiva a la superficie terrestre (Schallenberg *et al*, 2008).

En esta categoría se explota la energía irradiada por el sol para producir electricidad o energía térmica. Se usa para producir calor, refrigeración o iluminación directa, posiblemente se puede usar para producir combustibles para el transporte.

A través de los paneles solares se aprovechan estos beneficios, la energía térmica producida se usa para calefacción de agua y se aprovecha la energía solar fotovoltaica para la generación de electricidad a partir de células fotovoltaicas (Grupo Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático, p. 60).

Los niveles de radiación solar dependen de cada región, los principales aspectos que se consideran son la duración de la radiación, relieve, nubosidad y cantidad de sombra (p. 13).

Bioenergía

La materia prima para producir bioenergía se genera a partir de alimentos, productos forestales, de desechos y residuos naturales. De la agricultura se obtienen cultivos energéticos y subproductos agrícolas, de la industria de la madera se aprovechan sus residuos, se produce energía térmica a partir del carbón vegetal y biogás a partir de los residuos sólidos urbanos. Básicamente los usos de la biomasa se dividen en dos categorías. La primera es la biomasa de baja eficiencia que se usa principalmente en países en desarrollo, para iluminación, calefacción de interiores y cocción de alimentos. La segunda categoría se refiere a las tecnologías bioenergéticas que producen combustibles sólidos, líquidos y gases, para generar calor, electricidad, cogeneración (calor-electricidad) y combustible para transporte (Grupo Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático, p 46).

La implementación del uso y producción de energías renovables en el mundo alcanza un periodo dinámico hasta el año 2003, que se ha visto influenciada por

las medidas establecidas en el Protocolo de Kioto en materia de conservación del medio ambiente.

Los biocombustibles son materiales de origen biológico, no fosilizado a diferencia del petróleo. Los biocombustibles se clasifican dependiendo de varios criterios como su origen o aspecto físico. La clasificación en función del aspecto físico es de la siguiente manera.

Biocombustibles sólidos

La fuente principal de estos materiales son los bosques y plantaciones forestales, el principal producto usado es la leña en las zonas rurales como medio de calefacción y para cocción de alimentos en países como México. También en las ciudades se está empezando a implementar su consumo, debido al continuo aumento del precio de los combustibles fósiles.

Las astillas de madera son otro tipo de biocombustible sólido que proviene directamente de la explotación forestal, de ramas y troncos, o se obtienen de la industria maderera, como los aserrados que generan como desperdicios recortes de madera que es molida en máquinas astilladoras. De la industria maderera como aserrado, cepillado o taladrado, se obtienen virutas y aserrín que también son materiales para combustión.

El pellet de madera se incluye en esta clasificación, se obtiene a partir de la compresión de aserrín y astillas de madera, estos pequeños cilindros de diámetro de 5-10 mm con una longitud de 10 a 30 mm se aglutinan con la lignina que contiene la madera, únicamente con la adhesión de agua.

Otro tipo de biocombustible son los granos cosechados que son un medio para absorber los excedentes y para evitar los gastos de carburantes a los agricultores para alimentar a las calderas.

Finalmente, el carbón de madera y las pajas de los cereales como el trigo, también son materiales usados para la obtención de energía calorífica. Así como algunas plantas invasoras como el cardo (*Cynara cardunculus* L.) que después de su cosechado y secado se puede usar directamente como combustible sólido ya sea para la generación de calor o electricidad. Otra herbácea de naturaleza lignocelulosica que también tiene aplicaciones térmicas como combustible sólido es arundo (*Arundo donax* L.).

Biocarburantes y biocombustibles líquidos

Los biocarburantes son el biodiesel y bioetanol obtenidos a partir de biomasa, se usan mezclados en combinación con el petróleo. La materia prima usada para obtenerlos se clasifica como primera, segunda y tercera generación. La primera generación se obtiene directamente de cosechas que pueden destinarse al consumo humano y ganadero, tal es el caso del maíz, caña de azúcar y soja.

Los combustibles de segunda generación son los que llevan un proceso químico específico para su obtención, y no se relacionan directamente con el consumo humano, tal es el caso de aceites. Se cultivan usando áreas marginales improductivas. En este grupo se consideran los residuos forestales, agroalimentarios y plantas enteras.

Para el caso de los biocombustibles de tercera generación son de aplicación reciente y se obtienen a partir de algas y micro algas.

Biocombustibles gaseosos

El biogás es un combustible que se obtiene a partir de tratamientos biológicos para la degradación de la biomasa y de sus desechos, se aplica a la materia orgánica fermentable. De igual manera el biohidrógeno y el biogás de síntesis se pueden obtener a partir de la biomasa.

Con el uso de biocombustibles no aumenta la concentración de gases efecto invernadero en la atmosfera, porque el CO₂ que se emite durante el proceso de combustión es el mismo que el absorbido por la planta durante el proceso fotosintético, es decir es un balance neutral.

Pero en otro parte de acuerdo a Russi 2007 en un análisis más detallado del ciclo de vida de los biocombustibles señala que los combustibles fósiles son utilizados en toda la fase de la cadena productiva de los biocombustibles, como producción, procesamiento y transporte. Por lo tanto, la disminución de gases efecto invernadero con el uso de estos materiales es menor de lo que se cree.

Las energías renovables se están implementando en todo el mundo, han presentado un crecimiento rápido principalmente en el sector eléctrico. El cual tuvo el mayor incremento anual de la historia para 2015. La energía eólica y fotovoltaica representó el 77% de las nuevas instalaciones. Por lo tanto, la

capacidad de energía renovable en 2015 abasteció el 23.7% de la electricidad mundial, donde se considera para la generación de electricidad principalmente la energía hidráulica (Energías renovables, 2016, p 6-7).

Para 2015 los países miembros del G20, incluido México aumentaron el porcentaje de electricidad generada a partir del sol y viento en más del 70% en cinco años. Principalmente Alemania genera electricidad a partir de estas fuentes, Reino Unido, Italia y Francia generaron más del 19% de su electricidad con fuentes renovables, Australia y Brasil alcanzaron el 11% y 13%, respectivamente (El cronista, 2016).

De esta manera el uso de energías renovables ha ido en aumento, lo que implica que cada vez el nivel de conciencia respecto a la conservación de los recursos naturales es más evidente. No solo el uso de biomasa es una alternativa viable, las demás fuentes de energía renovable también son opciones de energía limpia que pueden ir sustituyendo gradualmente al petróleo.

Para el caso de México es un país que tiene un gran potencial para la implementación de todos los tipos de energía renovable. Al presentar las características básicas para la generación de electricidad y energía térmica principalmente. Sin embargo, aunque se están desarrollando, el crecimiento aún es incipiente, al ser México un país petrolero donde las políticas que se establecen le dan prioridad a este sector al ser la base de la economía. Pero en un largo plazo se requerirá de este tipo de energías renovables al irse agotando las reservas petroleras y será necesaria la inversión en tecnología por parte del gobierno, ya que principalmente en el país existe inversión de empresas extranjeras para la producción de energía renovable.

II. CONSTRUCCIÓN DE LOS MODELOS ECONOMÉTRICOS

La energía es un factor importante para el desarrollo social y económico de cualquier nación, cada vez más necesarias con el incremento de las actividades agrícolas e industriales. La formulación de un modelo econométrico ayuda a la correcta asignación de energías renovables ampliamente disponibles a nivel mundial.

Los modelos pueden ser de tipo explicativo o predictivo, miden el impacto de una variable sobre otra y permiten dar consejos de política ante resultados deseables.

Los modelos de predicción se han formulado usando diferentes variables como población, ingresos, precio, factores de crecimiento y tecnología. Entre estos modelos se encuentran los modelos de energía renovable (Jebaraj e Iniyan, 2006, p 281 y 292).

Un modelo es la representación de un fenómeno en un sistema actual o proceso, para explicarlo, predecirlo o controlarlo. A través del análisis estructural, predicciones y evaluación de políticas, respectivamente (Intriligator, 1978, p 14).

Los modelos pueden ser de tipo crítico si las constantes se estiman por medio de consulta de acervo bibliográfico; de tipo ingenieril si las constantes se obtienen de estudios de caso de pequeña escala y tipo econométrico si las constantes se estiman a través de una serie histórica de datos para lo que se está pronosticando (Werbos, 1990, p 215).

Por lo tanto, un modelo econométrico es un tipo especial de modelo algebraico estocástico, que incluye una o más variables aleatorias. Puede ser lineal o no lineal, se encuentra conformado por una serie de ecuaciones o fórmulas que se pueden usar para hacer predicciones. En la cual todos los parámetros pueden ser estimados por métodos econométricos, basados en datos empíricos (Intriligator, 1978, p 22 y 23).

Todos los modelos econométricos contienen variables endógenas donde los valores de estas variables son simultáneamente determinados por el modelo. En cambio, las variables exógenas son valores que son determinados fuera del modelo, pero influyen en él.

Los modelos pueden ser explicativos y predictivos para la oferta y demanda de los principales tipos de energéticos.

Algunos modelos econométricos como las funciones de producción se plantean para determinar la relación que existe entre el producto obtenido y los factores que se usan para obtenerlo. Estas funciones son usadas a nivel macro y a nivel micro. La técnica de dependencia más usada para la generación de funciones de producción es la regresión múltiple que puede ser lineal y no lineal.

A pesar de que los modelos econométricos son eficientes para la explicación y predicciones de variables, tienen ciertas limitaciones:

1. Significancia económica y estadística: se presentan problemas de eficiencia cuando en el modelo se existe multicolinealidad, hay mayor posibilidad de cometer errores en la estimación de parámetros, es difícil compatibilizar cuando una variable que puede ser relevante a criterio del investigador no es significativa.
2. Error de especificación: este problema puede presentarse cuando al plantear el modelo se omitan variables relevantes que se relacionan con las variables incluidas, esto originara inconsistencia y sesgo en las estimaciones MCO de los parámetros del modelo.
3. Errores en las variables: se refiere a los errores en las observaciones y medidas de las variables explicativas (Balacco, 2011, p1-7).

Los métodos de estimación de los parámetros de un modelo dependen de la relación de dependencia de las variables como del tipo de modelo, generalmente en las funciones de producción la dependencia surge en la relación con una variable dependiente métrica y un conjunto de variable independientes métricas o no métricas, tal como se muestra a continuación (Toro *et al*, s/f).

$$Y_1 \leftarrow (X_1, X_2, X_3, \dots, X_m)$$

(Métricas) (Métricas, no métricas)

La regresión lineal múltiple es la técnica más utilizada la cual puede ser lineal y no lineal y los principales métodos para estimar los parámetros se señalan más adelante.

Por ejemplo, si se considera el siguiente modelo para predecir población:

$$POP(t + 1) = c * POP(t)$$

Dónde la población en el año t+1 es igual a la constante “c” multiplicada por la población en el año t. este modelo puede ser un modelo critico o modelo de ingeniería (Werbos, 1990, p 215).

La primera etapa de la construcción de un modelo, es revisar los datos y conceptos disponibles de cómo se construirá y elegir el paquete informático con el que se trabajará como SAS, R, TROLL y LOTUS, que tengan la capacidad para simular el modelo.

Cuando se trabaja con SAS primero se tiene que usar el comando GML para estimar el valor de las constantes, en el caso de la ecuación anterior sería c. La forma más común de estimar un modelo complejo en econometría es el uso del método de mínimos cuadrados ordinarios, estos métodos se señalan más adelante.

Modelo de regresión lineal simple.

El objetivo principal de esta técnica es determinar la relación funcional entre dos o más variables, por medio del ajuste de un modelo matemático, donde se usa una sola variable de regresión, como el modelo de línea recta.

El siguiente modelo refleja una relación lineal simple; $Y_t = \beta_1 + \beta_2 X_t + u_t$, donde solo existe una variable explicativa. Pero si tenemos T observaciones de la variable Y ($Y_1, Y_2, \dots, Y_T$) y las correspondientes observaciones de X ($X_1, X_2, \dots, X_T$), haciendo extensiva la ecuación anterior con la relación de observaciones. La ecuación sería de la siguiente forma; $Y_t = \beta_1 + \beta_2 X_t + u_t \quad t= 1, 2, \dots, T$.

Donde el objetivo principal es la estimación de β_1 y β_2 que puede ser a través del método de mínimos cuadrados (Jiménez, s/f, p 5).

Modelos de regresión lineal múltiple.

Los modelos de regresión lineal múltiple se pueden aplicar a datos de corte transversal y a datos de series temporales. Donde el regresando es una función lineal de k-1 regresores, con una perturbación aleatoria y un regresor ficticio correspondiente al termino independiente (Toro *et al*, s/f, p 16).

La perturbación aleatoria refleja todos los factores distintos de X que influyen sobre la variable endógena, pero ninguno de ellos es relevante individualmente.

Un modelo de regresión lineal múltiple es el siguiente:

$$Y_t = \beta_1 + \beta_2 X_{2t} + \dots + \beta_K X_{Kt} + u_t \quad t = 1, 2, \dots, T$$

Donde la relación que existe entre los parámetros de los regresandos y regresores es lineal.

Los modelos pueden ser de la forma lineal, cuadrática, cúbica e hiperbólica, las cuales son relaciones funcionales usadas en funciones de producción.

La función lineal corresponde a dos o más variables, donde la dependiente es determinada a partir de las independientes x s, del valor de término independiente α , del coeficiente β y del error, el error y β son independientes de X y Y . De tal manera que se plantea como sigue: $Y_t = \alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \varepsilon$ (Toro, et al, s/f, p17-20).

Para el caso de las funciones cúbicas se usan para representar funciones de producción de un factor que tienen un rango de rendimientos crecientes, seguido por una etapa de rendimientos crecientes y posteriormente por resultados negativos. Las funciones hiperbólicas presentan mayor dificultad para su ajuste, la productividad marginal es creciente y después decreciente (Toro, et al, s/f, p17-20).

Modelos no lineales

Un modelo no lineal se presenta cuando en los parámetros aparecen productos, cocientes y otras operaciones distintas a la suma o la resta. En los modelos econométricos lineales, debe aparecer un solo parámetro por cada regresor que figure en el modelo. Es decir, un modelo de regresión no lineal es un ajuste a cualquier modelo diferente del modelo de una línea recta. Los más comunes son los modelos potenciales, exponenciales y polinomiales.

Los modelos de tipo exponencial se incrementan lentamente y después más rápido, estos son del tipo $Y = \beta_0 X^{\beta_1}$; el modelo exponencial basado en el logaritmo natural $Y = \beta_0 e^{X\beta_1}$, se aplica en situaciones donde el aumento de los valores es muy acelerado; y el modelo polinomial $Y = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 X^1 + \beta_3 X^2 + \beta_4 X^3 \dots + \beta_n X^n$, se basa en elevar la variable explicativa a diferentes potencias, en el cual el mismo valor de X se repite únicamente elevando a diferente potencia

y cada potencia va aumentando una nueva curva a la gráfica del modelo (Quispe, s/f, p 316-327 y Minnaard, 2010, p 20-28).

La función Cobb-Douglas es un tipo de modelo no lineal, que a través de transformaciones matemáticas se transforman a modelos lineales, conocidos estos tipos de modelos como modelos no lineales linealizables.

El modelo Cobb-Douglas fue definido por Cobb y Douglas en 1928, corresponde a uno de los modelos más utilizados para determinar funciones de producción. Su forma general se expresa como:

$$Y = A \prod_{i=1}^{i=n} V_i^{\alpha_i}$$

Dónde: Y es la cantidad de salidas obtenidas en el programa de análisis, A es el parámetro constante de eficiencia, α_i los parámetros de elasticidad y V_i las cantidades de los factores productivos empleados ((Toro *et al*, s/f, p 26).).

Esta función en su forma estocástica se expresa como:

$$Y_i = \beta_1 X_{2i}^{\beta_2} X_{3i}^{\beta_3} e^{u_i}$$

Dónde: Y= producto; X_2 = insumo trabajo; X_3 = insumo capital; u= término de perturbación estocástico; e= base del logaritmo natural.

Como la ecuación anterior es no lineal, se transforma a lineal mediante la función logaritmo y se obtiene:

$$\begin{aligned} \ln Y_i &= \ln \beta_1 + \beta_2 \ln X_{2i} + \beta_3 \ln X_{3i} + u_i \\ &= \beta_0 + \beta_2 \ln X_{2i} + \beta_3 \ln X_{3i} + u_i \end{aligned}$$

Donde $\beta_0 = \ln \beta_1$. Por lo tanto el modelo se transforma a un modelo de regresión lineal, al ser lineal en los parámetros β_0 , β_2 y β_3 por los logaritmos que presenta (Gujarati, 2004, p 215).

Las propiedades que presenta esta función son las siguientes:

1. β_2 mide el cambio porcentual en la producción debido a una variación del 1% en el insumo trabajo, manteniendo el insumo capital constante.
2. β_3 es la elasticidad del producto con respecto al insumo capital, manteniendo constante el insumo trabajo.

3. La suma de $(\beta_2 + \beta_3)$ proporciona información de rendimientos a escala, refiriéndose a la respuesta del producto en un cambio proporcional en los insumos. Si $(\beta_2 + \beta_3) = 1$ existen rendimientos constantes a escala (la duplicación de insumos duplicara el producto); si $(\beta_2 + \beta_3) < 1$ existen rendimientos decrecientes a escala (se duplican los insumos y el producto crece menos del doble); y si $(\beta_2 + \beta_3) > 1$ existen rendimientos crecientes a escala (la duplicación de insumos aumentara el producto en mas del doble) (Gujarati, 2004, p 215).

Métodos de estimación de parámetros

Mínimos cuadrados.

Este método es considerado uno de los métodos más eficaces para el análisis de regresión. Consiste en proporcionar estimadores de los parámetros que minimicen la suma de los cuadrados de los errores, donde se construye una función objetivo en términos de la suma de los cuadrados de los errores y por optimización se obtienen las fórmulas de cálculo de los estimadores.

De acuerdo a Gujarati (2005), los estimadores de MC se obtienen a partir de la siguiente función de regresión muestral:

$$\begin{aligned} Y_i &= \beta_1 + \beta_2 X_i + u_i \\ &= \hat{Y}_i + \hat{u}_i \end{aligned}$$

Donde $\hat{Y}_i$, es el valor estimado, es decir la media condicional de Y_i .

La suma del cuadrado de los errores se expresa de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \sum \hat{u}_i^2 &= \sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \\ &= \sum (Y_i - \hat{\beta}_1 - \hat{\beta}_2 X_i)^2 \end{aligned}$$

De acuerdo al principio de mínimos cuadrados ordinarios:

$$\min \sum \hat{u}_i^2 = \min \sum (Y_i - \hat{\beta}_1 - \hat{\beta}_2 X_i)^2$$

Al resolver las ecuaciones normales se encuentran los estimadores de los parámetros de regresión:

$$\begin{aligned}\widehat{\beta}_1 &= \frac{n \sum X_i Y_i - (\sum X_i)(\sum Y_i)}{n \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2} = \frac{\widehat{Cov}(X, Y)}{\widehat{Var}(X)} \\ &= \widehat{Y} - \widehat{\beta}_2 \bar{X}\end{aligned}$$

Las propiedades estadísticas de los estimadores MCO son las siguientes:

Los estimadores MCO pueden ser calculados fácilmente porque se expresan en términos de las cantidades observables.

Dada la muestra cada estimador proporcionara un solo valor del parámetro poblacional relevante.

Una vez que se obtienen los estimadores MCO de la muestra la recta de regresión obtenida pasa a través de las medias muestrales X y Y. También el valor promedio del Y estimado = $\widehat{Y}_l$ es igual al valor medio del Y real para:

$$\widehat{Y} = \widehat{\beta}_l + \widehat{\beta}_2 X_i$$

Mínimos cuadrados generalizados

En un modelo con perturbaciones no esféricas el estimador por MCO es lineal e insesgado, pero no existe la certeza de que sea óptimo. Por lo tanto, es necesaria la búsqueda de estimadores alternativos, como el caso de los Mínimos cuadrados generalizados (MCG). El cual consiste en transformar un modelo con perturbaciones no esféricas en otro con perturbaciones esféricas, para que al aplicarle el MCO se genere un estimador lineal, insesgado y óptimo (Gallego, 2008, p 131-134).

De acuerdo a Gallego (2008), el estimador de MCO en el modelo de transformación se denomina estimador de mínimos cuadrados generalizados, para hallar el modelo transformado, se premultiplica el modelo lineal general con perturbaciones no esféricas por una matriz P no estocástica.

$$Py = PX\beta + Pu \rightarrow y_* = X_*\beta + C$$

Donde $y_* = Py$, $X_* = PX$ y $u_* = Pu$.

El término de error en el modelo transformado u_* cumple las siguientes propiedades:

$$E(u_*) = E(Pu) = PE(u) = 0$$

$$E(u_*u_*') = E(Puu'P') = PE(uu')P' = \sigma_u^2 P\Omega P$$

Si la matriz P es tal que $\sigma_u^2 P\Omega P' = \sigma_u^2 I$, entonces el modelo transformado contiene los parámetros de interés β y σ_u^2 y cumple las hipótesis básicas.

Para determinar el estimador de MCG de β es necesaria la matriz Ω , la cual es desconocida, al ser los errores aleatorios no observables, por lo tanto, se tiene que estimar Ω .

El estimador de MCG factible de Ω es:

$$\hat{\beta}_{MCGF} = (X'\hat{\Omega}^{-1}X)^{-1}X'\hat{\Omega}^{-1}y$$

Donde $\hat{\Omega}$ es una estimación de Ω .

Para el cálculo del estimador MCG es necesario invertir la matriz Ω de orden $n \times n$. Esto se puede evitar cuando la matriz tiene determinada estructura.

Máxima verosimilitud.

Este método consiste en encontrar los valores de los parámetros que maximizan la probabilidad de obtener la muestra observada.

La función de verosimilitud de la muestra es la función de densidad conjunta de la muestra haciéndola depender de los parámetros desconocidos.

De acuerdo a Gallego (2008), los estimadores de máxima verosimilitud de los parámetros desconocidos β y σ_u^2 son los valores $\hat{\beta}$ y $\hat{\sigma}_u^2$ que maximizan la función de verosimilitud $L(\beta, \sigma_u^2/y, X, \Omega)$. Las derivadas parciales de $l(\beta, \sigma_u^2)$ respecto de β y σ_u^2 son:

$$\frac{\partial l(\beta, \sigma_u^2)}{\partial \beta} = -\frac{1}{\sigma_u^2}(-X'\Omega'y + X'\Omega^{-1}X\beta)$$

$$\frac{\partial l(\beta, \sigma_u^2)}{\partial \sigma_u^2} = -\frac{n}{2\sigma_u^2} + \frac{1}{2\sigma_u^4}(-y - X\beta)'\Omega^{-1}(y - X\beta)$$

Bajo condiciones de regularidad se demuestra que los estimadores de máxima verosimilitud tienen propiedades de asintóticamente insesgados, consistentes, asintóticamente eficientes, asintóticamente normales e invariancia.

Violación de los supuestos al modelo.

Multicolinealidad

La multicolinealidad se presenta cuando las variables explicativas se encuentran correlacionadas entre sí. Cuando existe multicolinealidad los parámetros se distorsionan al mezclarse los valores, ocasionando que no se pueda medir el impacto real de las variables explicativas del modelo. También los estadísticos “t” no son significativos, al ser las desviaciones estándar más grandes que si no se presentara multicolinealidad. Si consideramos el siguiente modelo, $Y = \beta_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3$, el cual no presenta problema de multicolinealidad, al incorporar la variable X_4 , se tiene que $X_4 = f(X_2, X_3)$, $X_2 = f(X_4, X_3)$, $X_3 = f(X_4, X_2)$, por lo tanto con la inclusión de X_4 al modelo se presentará multicolinealidad (Quispe, s/f, p 200 y 2001).

Existen dos tipos de multicolinealidad la perfecta y la imperfecta. En la primera los coeficientes de regresión permanecen indeterminados y sus errores estándar son infinitos. En la imperfecta las desviaciones estándar de los estimadores son muy pequeñas. Cuando se presenta multicolinealidad los estimadores de MCO presentan varianzas y covarianzas que hacen difícil la estimación precisa, los intervalos de confianza tienden a ser más amplios, generando una aceptación más fácil de la hipótesis nula y también se presenta una R^2 elevada. La multicolinealidad se puede corregir aumentando el tamaño de muestra o utilizando datos nuevos. O por medio de la transformación de las variables, ya sea transformando a logaritmo natural cada una de ellas o combinando las que ocasionan multicolinealidad (Gujarati, 2004, p 327-348).

Autocorrelación

La autocorrelación ocurre en las variables perturbadoras cuando existe relación entre ellas, violando uno de los supuestos para estimar el modelo, sobre la independencia que deben presentar estas variables. Se presenta principalmente en datos con series de tiempo, porque las observaciones siguen un orden respecto al tiempo y puede ocurrir que las observaciones sucesivas presenten intercorrelaciones, principalmente si el intervalo de tiempo entre observaciones es corto (Gujarati, 2004, p 425 y 426).

La autocorrelación se puede detectar por métodos gráficos de los residuos frente al tiempo o con la combinación de métodos gráficos y contrastes. Para el caso de contrastes estadísticos, para su elaboración utilizan los residuos obtenidos en la estimación de MCO y en la hipótesis nula se plantea la ausencia de autocorrelación y la hipótesis alternativa plantea distintos procesos de correlación entre las perturbaciones, uno de los contrastes usados es la prueba de Durbin-Watson (Cavero, Lorenzo y Prieto, 2011, p 21-23).

Para la corrección de la autocorrelación, supongamos que se tiene el siguiente modelo de regresión:

$$Y_i = \beta_1 + \beta_2 X_t + u_t$$

Y suponiendo que el término del error es el siguiente:

$$u_t = \rho u_{t-1} + \varepsilon_t \quad -1 < \rho < 1$$

Considerando que 1) se conoce ρ , y 2) no se conoce ρ .

Cuando se conoce ρ , el problema de autocorrelación se resuelve fácilmente multiplicando ρ en ambos miembros de la ecuación. Cuando ρ no es conocida se aplican diferentes métodos para su estimación como el método de la primera diferencia, por métodos iterativos o ρ basada en el estadístico d de Durbin-Watson (Gujarati, 2004, p 459-464).

Heterocedasticidad

El modelo lineal general se refiere a que las varianzas de las perturbaciones sean las mismas (homocedasticidad). En cambio, la heterocedasticidad se refiere a que las varianzas de las perturbaciones son diferentes, afecta la elaboración de la banda de confianza para la predicción de la variable endógena. Se presenta generalmente en datos de corte transversal (Quispe, s/f, p 247).

Dentro de las razones por las que las varianzas de u_i no son iguales se puede deber a que a medida que se mejoren las técnicas de recolección de información es probable que la varianza (σ_i^2) se reduzca; también la heterocedasticidad puede surgir por la presencia de factores atípicos, es decir, una observación hecha en una población distinta que genera las observaciones muestras restantes, cuando se incluyen observaciones de este tipo se pueden alterar los resultados del análisis de regresión; otra de las causas ocurre cuando algunas

variables importantes son omitidas en el modelo, por ejemplo en una función de demanda de un bien si se omiten los precios de los bienes complementarios la varianza obtenida en la regresión puede ser que no sea constante; también se considera que influye en la heterocedasticidad la asimetría en la distribución de las variables incluidas en el modelo (Gujarati, 2004, p 373-377).

La heterocedasticidad se puede detectar a través de métodos gráficos y a través de métodos formales como la prueba de Park, prueba de Breusch-Pagan-Godfrey, y la prueba general de heterocedasticidad de White. Para su corrección cuando σ_i^2 es conocida se usa el método de mínimos cuadrados ponderados y cuando σ_i^2 es desconocida se puede aplicar el método White (Gujarati, 2004, p 400-403).

Elasticidades.

La formulación de los modelos permite introducir los conceptos de elasticidad de la función Y (demanda, oferta, producción, etc.).

La elasticidad es la relación que existe entre las variaciones porcentuales observadas en las cantidades ofertadas o demandadas, derivadas de los cambios porcentuales introducidos en los precios. Se expresa como el cociente entre el precio y la cantidad multiplicada por la pendiente de su curva. El comportamiento de la elasticidad se puede dar de tres formas: Si $E > 1$ la oferta o demanda es elástica. Si $E = 1$, la oferta o demanda es unitaria y si $E < 1$, la oferta o demanda es inelástica (Varian, 2006, p 279).

De acuerdo a Fernández (2007) con base en las siguientes ecuaciones, las elasticidades se expresan como sigue:

Elasticidad cruzada:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{\partial x_i}{\partial p_j} * \frac{\bar{p}_j}{\bar{x}_i} = \phi(Z_{it}v_i) * \left[\beta_{ij} - \gamma_i * \left(\alpha_j + \sum_{k=1}^K \beta_{kj} \bar{p}_j \right) \right] * \frac{\bar{p}_j}{\bar{x}_i}$$

Elasticidad ingreso:

$$n_i = \frac{\partial x_i}{\partial y} * \frac{\bar{y}}{\bar{x}_i} = \phi(Z_{it}v_i) * \gamma_i * \frac{\bar{y}}{\bar{x}_i}$$

Elasticidad precio:

$$\varepsilon_{ii} = \frac{\partial x_i}{\partial p_i} * \frac{\bar{p}_i}{\bar{x}_i} = \phi(Z_{it}v_i) * \left[\beta_{ii} - \gamma_i * \left(\alpha_i + \sum_{k=1}^K \beta_{ki} \bar{p}_i \right) \right] * \frac{\bar{p}_i}{\bar{x}_i}$$

Donde $i, j, k = 1, \dots, K$; siendo K el número de ecuaciones del sistema.

Si la elasticidad cruzada es negativa, los bienes son complementarios, si es positiva son sustitutos y si es cero los bienes son independientes.

Si la elasticidad ingreso es mayor 1 el bien es de lujo, si está entre 0 y 1 es un bien necesario, y si es menor a cero es un bien inferior.

Para cualquiera de las elasticidades todas las demás variables permanecen constantes (*ceteris paribus*).

Los elementos principales que determinan la oferta para un bien o producto determinado en el mercado son el nivel de producción, precios actuales y rezagados del producto, costos de producción actuales y rezagados del producto y cambios en la estructura tecnológica (Marcillo y López, 2012, p 87-90).

Aplicación de modelos econométricos a estudios forestales.

En Brasil (Moreira, 2012) se realizó un estudio para determinar el precio de la madera para la producción de celulosa, se utilizó un modelo econométrico estimado por el método de mínimos cuadrados ordinarios, con la forma funcional logarítmica. Se trabajó con un periodo de datos de 19 años, conformados por precio de exportación de las variables de la celulosa, precio de la madera en rollo destinada para otros fines y con la capacidad instalada de la industria.

Se aplicó el siguiente modelo:

$$\ln Y_t = \beta_0 + \beta_1 \ln K_t + \beta_2 \ln PMT_t^{outra} + \beta_3 \ln PE_t^{celu} + \beta_4 \ln TJ_t + \beta_5 \ln Q_t^{defasada} - \mu_i$$

Dónde:

Y_t = Precio de la madera en rollo para pulpa

K_t = Capacidad instalada de la industria de la celulosa en Brasil

PMT_t^{outra} = Precio de la madera en rollo para otros fines

PE_t^{celu} = Precio FOB de exportación de la celulosa en Brasil

TJ_t = Tasa de interés SELIC overnight anual

QMT_t^{defasa} = Cantidad total de madera comercializada el año anterior

μ_t = Error de la ecuación de precios a largo plazo

$\ln$ = Base del logaritmo natural; e

β_t = Parámetros a estimar

Para la verificación de las hipótesis y significancia de los coeficientes se adoptó la prueba de F, posteriormente se aplicó la prueba “t” de student. Se determinó R2 para evaluar el grado de ajuste del coeficiente de regresión y se emplearon pruebas econométricas verificando la simultaneidad, multicolinealidad, autocorrelación, prueba de heterocedasticidad y raíz unitaria.

Las variables fueron sensiblemente inelásticas, positivas, confirmando que los determinantes usados de la madera en rollo tienen relación directa con el precio de la madera y se confirma que el sector de la madera en rollo está influenciado por el Mercado exterior.

En Brasil (Nascimento, Angelo, Leodoro y Caballero, 2009) se realizó un análisis econométrico del mercado de trocería para procesamiento mecánico, de un periodo de 16 años, donde el objetivo fue identificar y estimar la elasticidad de las principales variables que afectan el mercado. Las ecuaciones de oferta y demanda aplicadas fueron las siguientes, mediante el método de mínimos cuadrados en dos etapas.

Modelo de demanda de madera en rollo;

$$Q_t^D = \alpha_0 + \alpha_1 P_t^S + \alpha_2 RI_t + \alpha_3 PO_t + \alpha_4 PR_t^{Fe} + \alpha_5 PR_t^{PI} + \alpha_6 PR_t^{NP} + \alpha_7 PR_t^{NA} + \alpha_8 J_t + \alpha_9 C_{t-x} + \alpha_{10} RM_t + \alpha_{11} PEX_t^{PM} + w_t$$

Donde: Q_t^D = Cantidad de madera demandada; P_t^S = Precio de la madera para procesamiento mecánico; RI_t = Ingreso nacional; PO_t = Población interna; PR_t^{Fe} = Precio del hierro; PR_t^{PI} = Precio del plástico; PR_t^{NP} = Precio de la madera nativa de Paraná; PR_t^{NA} = Precio de la madera nativa de la Amazonía; J_t = Tasa de interés de referencia en el corto plazo; C_{t-x} = Tipo de cambio; RM_t = Ingreso mundial; PEX_t^{PM} = Precio pagado por las exportaciones de la industria de procesamiento mecánico y w_t = Error de la ecuación de demanda.

$$Q_t^O = \beta_0 + \beta_1 P_t^S + \beta_2 PA_t^C + \beta_3 PA_t^E + \beta_4 AR_{t-x}^D + \beta_5 SM_t + \beta_6 PRO_t^P + \varepsilon_t$$

Modelo de oferta de madera en rollo;

Dónde: Q_t^O = Cantidad de madera ofrecida por el productor forestal; PA_t^C = Precio de la madera para celulósico; PA_t^E = Precio de la madera para energía; AR_{t-x}^D = Área reforestada con retraso; SM_t = Costo de cosecha; PRO_t^P = Productividad del pino; ε_t = Error

La elasticidad precio de la demanda de Paraná, junto con la insignificancia estadística de materiales como el hierro y el plástico, confirmaron la dificultad de encontrar buenos sustitutos de la madera en rollo en el procesamiento mecánico.

La elasticidad precio de la demanda fue de 0.55, sus valores son similares a los encontrados en Estados Unidos y ligeramente por debajo de las cifras de Suecia y Finlandia. En estos países nórdicos es posible que exista mayor impacto del precio de la madera en los costos de producción. Donde la estructura de mercado de la madera es menos concentrada y de bosques de baja productividad, lo que puede dar lugar a una mayor apreciación de la madera.

La elasticidad precio de la oferta fue de 0.97 y la elasticidad precio pagado por los sustitutos fue de -0.98, la elevada elasticidad posiblemente se deba a la rápida rotación de los bosques brasileños, lo que permite una respuesta más corta a los incentivos de precios.

La capacidad de respuesta de la oferta a los precios refleja una mayor capacidad para responder a la oferta de incentivos de precios para los propietarios de los bosques en el estado.

En otro estudio (Fuentes, García y Hernández, 2006), realizado en México, se usó un modelo de ecuaciones simultáneas conformado por ecuación de oferta (1), ecuación de demanda (2), ecuación de transmisión de precios (3) y una ecuación identidad (4), para analizar el comportamiento de producción y consumo de la madera aserrada de pino ante las variaciones en el precio. El modelo usado fue el siguiente:

$$PM_t = \hat{a}_{10} + \hat{a}_{11}PMAA_t + \hat{a}_{12}PMRA + \hat{a}_{13}SMG_t + \hat{a}_{14}TIR_t + \hat{a}_{15}CAPIN_t + \hat{a}_{16}CAPUT_t + e_{1t} \quad (1)$$

$$CN_t = \hat{a}_{20} + \hat{a}_{21}PMAM_t + \hat{a}_{22}IRP_t + \hat{a}_{23}CNAMA_{t-1} + e_{2t} \quad (2)$$

$$PMAM_t = \hat{a}_{30} + \hat{a}_{31}PMAA_t + \hat{a}_{32}PIM_t + e_{3t} \quad (3)$$

$$SC_t = CNAM_t - PM_t \quad (4)$$

Los datos incluidos en el modelo correspondieron a un periodo de 23 años, para la ecuación de oferta se usó producción de madera aserrada, su precio real, salario mínimo general, tasa de interés, capacidad instalada y capacidad utilizada de la industria del aserrío. Para la demanda se incluyó el consumo nacional y consumo nacional aparente de madera aserrada, precio medio real de venta e ingreso per cápita. En la ecuación de transmisión de precios se usó el precio medio real de la madera aserrada de venta al consumidor y el precio de importación. Y finalmente en la ecuación identidad se usó el saldo de comercio exterior. El modelo se estimó usando el método de mínimos cuadrados en dos etapas, con el procedimiento SYSLIN del paquete SAS, con diferentes corridas cambiando la base de los deflatores. Donde los resultados fueron consistentes de acuerdo a la teoría económica, oferta y demanda presentaron los signos esperados.

También (Fuentes, García, Zamudio y Matus, 2008) en México, aplicaron un modelo de programación no lineal Para determinar los factores que pueden revertir la tendencia sobre la pérdida de competitividad de la madera aserrada nacional frente a la madera importada y de esta manera determinar las políticas que afectan la producción nacional. La información analizada correspondió al periodo de tres años. Se formuló un modelo de equilibrio espacial de madera aserrada, donde se supone la existencia de diferentes mercados de madera. Con el modelo se determinaron la producción, consumo, importaciones y las movilizaciones de madera, maximizando el valor social neto. El modelo de programación cuadrática aplicado fue el siguiente:

$$VSN = \sum_{d=1}^8 \left[\lambda_d y_d + \frac{1}{2} \omega_d y_d^2 \right] - \sum_{s=1}^{10} \left[\frac{1}{2} (v_s + n_s x_s) (x_s - \theta_s) \right] - \sum_{m=1}^9 [p_m x_m] \\ - \sum_{d=1}^8 \sum_{s=1}^{10} [p_{sd} x_{sd}] - \sum_{d=1}^8 \sum_{m=1}^9 [p_{md} x_{md}]$$

Donde se consideró producción de madera aserrada en las regiones estudiadas, costos de transporte, costos de precio y cantidad de madera importada.

En el modelo se probaron tres escenarios, reducción del 30% en el costo de producción de madre aserrada; reducción del 20% de los costos de transporte de las rutas comerciales internas; e imposición de un arancel del 6% de las

importaciones. Donde la producción y consumo de madera aserrada fueron sensibles al establecimiento de aranceles y en menor grado al cambio en los costos de producción y transporte.

En el Oeste de Estados Unidos, se trabajó con un modelo agregado regional sobre la oferta de madera en rollo Para determinar los precios de la madera en pie y los volúmenes de cosecha. Los elementos endógenos usados en la oferta fueron el precio de oferta, volumen de venta y volumen no vendido, volumen no cortado bajo contrato, volumen cosechado y precio de cosecha. Donde se trabajó con un modelo de regresión lineal, y estimaron proyecciones para estimar los pies cúbicos de madera a cosechar de quince años (Adams y Haynes, 1989, p 417-421).

Respecto a esta investigación para conocer el comportamiento de la oferta de madera para biomasa respecto a una serie de variables se hará uso de un modelo no lineal de la forma

$$y = \beta_0 \prod_{i=1}^n x_i^{\beta_i}$$

Ya que es el más usado en funciones de producción y por practicidad permite obtener de manera directa las elasticidades con la aplicación de logaritmos.

III. ASPECTOS DE PRODUCCIÓN Y COMERCIALIZACIÓN DEL PELLET DE MADERA.

El pellet de madera es una alternativa para transformar los residuos de las industrias o madera de plantaciones, son una opción viable principalmente en industrias donde los desperdicios de madera llegan a ser entre 20-50% del total que se procesa para otros fines como madera aserrada.

3.1 Mercado mundial del pellet de madera.

En el año 2013 la producción mundial de pellet de madera presentó su máximo histórico, creció un 12%, alcanzando 22 millones de toneladas (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2014). Impulsada por las políticas y objetivos de consumo bio energético europeo. El mercado de pellet está dominado por Europa y Norteamérica, con 48 y 32 % en producción, y con 81 y 15 % en consumo respectivamente, el resto corresponde a países asiáticos (Figura 13). El mercado Norte Americano está comprendido por Estados Unidos y Canadá y el mercado europeo por Alemania, Suecia, Letonia y Portugal como principales productores (Granath ,2015). La producción de pellets en la Unión Europea se había incrementado principalmente al elevado precio de los combustibles fósiles y a la iniciativa de conservación del medio ambiente con este tipo de energía que es renovable y menos contaminante.

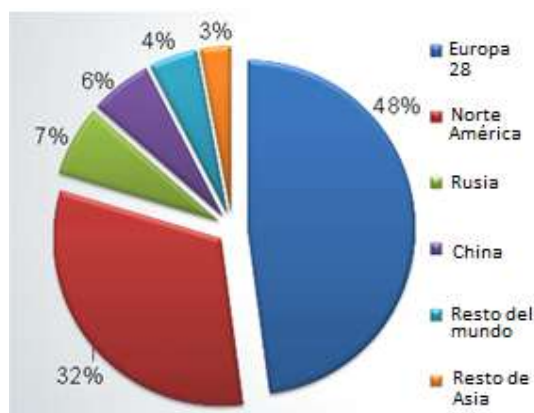


Figura 13. Producción mundial de pellet.
Fuente: (Granath ,2015)

El mercado mundial se encuentra en continuo crecimiento, debido a la competitividad que presenta el uso de pellet en comparación con los combustibles fósiles.

Las importaciones de pellet de la Unión Europea, para el año 2014 representaron cerca de 5 millones de toneladas. Más del 50% de dichas importaciones provienen de Norte América, el 19% proviene de Canadá y se exportó principalmente a Reino Unido (Figura 14).

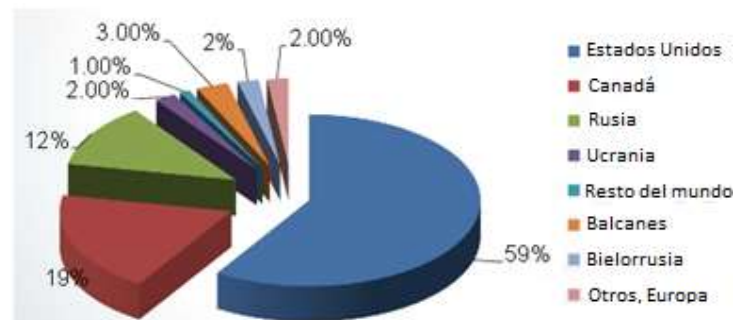


Figura 14. Importaciones de pellet de la Unión Europea.
Fuente: (Granath, 2015)

Por lo tanto, el mercado más grande de pellet es el europeo, aunque Norte América puede llegar a superarlo, porque la demanda de este producto sigue en crecimiento. De acuerdo a Wood pellet report para el año 2014 la producción de pellet a nivel mundial se incrementó 8%, las estadísticas aún no se encuentran completamente disponibles, pero se estima que se alcanzaron aproximadamente 25 millones de toneladas (figura 15).

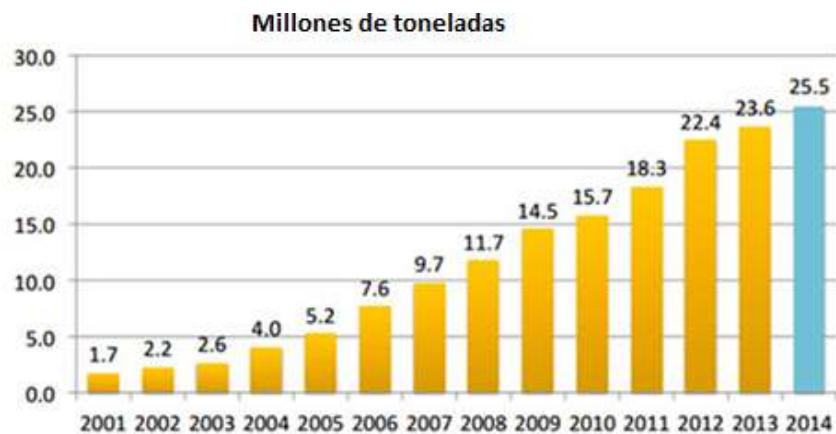


Figura 15. Producción mundial de pellet.
(Huang, 2015).

La demanda mundial de pellet se ha incrementado principalmente en la Unión Europea y América del Norte. Para Asia representada por Japón, Corea del Sur y China, se estima un incremento de 0.6 millones de toneladas a 10 millones para el 2020. Por otra parte, el mercado de América Latina, África y Oceanía tiene un crecimiento muy pobre (Huang, 2015).

El objetivo principal es la producción de calor y electricidad, y el pellet más demandado es para uso doméstico.

A nivel mundial el consumo de pellet va en aumento, Europa del Este continúa incrementando su consumo. Norte América va creciendo en el sector de pellet residencial. También en los países asiáticos se está viendo un crecimiento emergente.



Figura 16. Consumo de pellet en el mundo.
Fuente: FOEX Indexes Ltd.

A partir del año 2006 la unión europea fue incrementando el mercado de pellet considerablemente con respecto a años anteriores. Para 2007 incrementó el consumo de pellet al doble con respecto al año anterior. Esto se debe principalmente al establecimiento de nuevas políticas europeas en materia de energía, lo cual se expone a continuación (Figura 17).

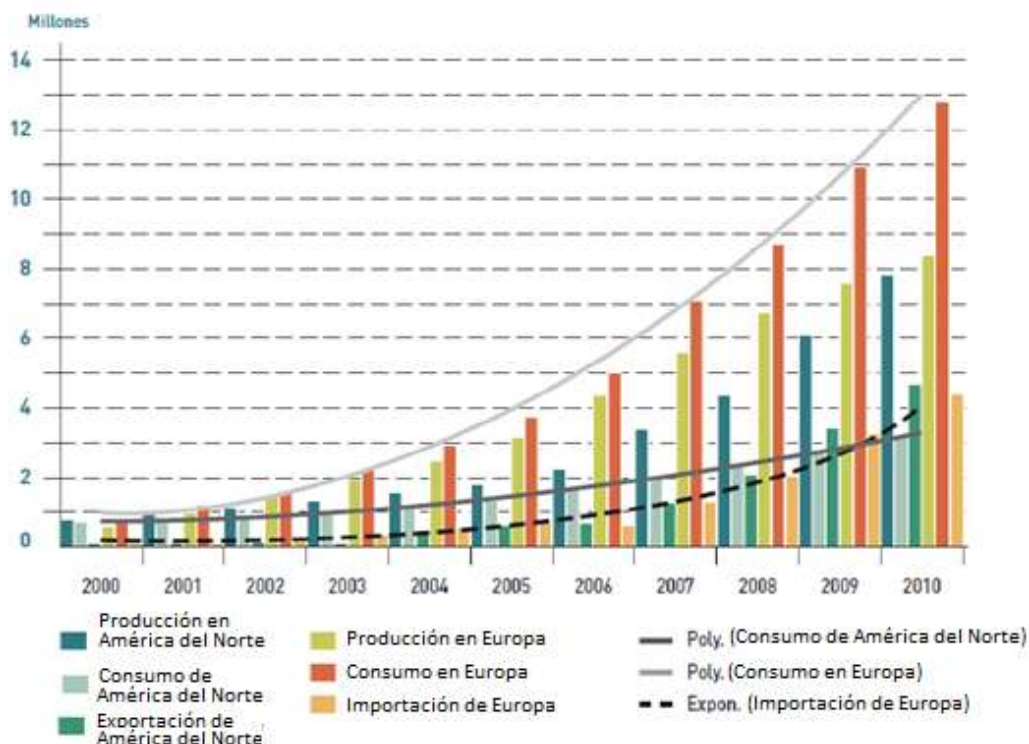


Figura 17. Evolución mundial del mercado de pellets.

Fuente: IDEA citado por González, 2012.

3.2 Políticas europeas en materia de energía

El protocolo de Kioto entró en vigor en el año 2005, se estableció un acuerdo entre países de reducir las emisiones de CO₂ de un 8% en el periodo 2008-2012 usando como base de referencia el año 1990, y para 2020 reducir las emisiones de gases efecto invernadero en un 20%, con el propósito final de disminuir los estragos que ha venido ocasionando el cambio climático (Agencia Andaluza de la Energía, s/f).

La Unión Europea al firmar el acuerdo del Protocolo de Kioto, para marzo de 2007 aprobó la estrategia conocida como 20-20-20, que establece los siguientes objetivos:

1. Reducción de gases efecto invernadero en un 20% respecto a 1990.
2. Alcanzar el 20% de las fuentes renovables en el consumo energético en 2020 y un 10 % en el sector transporte.
3. Ahorrar 20% del consumo energético respecto a las proyecciones para el año 2020 (Agencia Andaluza de la Energía, s/f).

Cada país de la Unión Europea se encuentra adoptando medidas para cumplir ésta política. Existen algunos países europeos que ya han alcanzado la meta como Suecia (Bioenergy International, 2013). Otros países como Reino Unido aun no cumplen con estos objetivos y están implementando procedimientos para lograrlo, por esta razón se ha convertido en el consumidor número uno de pellet de madera de la unión europea. En los últimos años el gobierno inglés ha incentivado la conversión de las centrales eléctricas de carbón a biomasa.

En el Protocolo de Kioto no se establecieron sanciones económicas para los países que no cumplan con los objetivos fijados, pero impone una multa del 30% del exceso emitido, que se reducirá en el siguiente periodo establecido.

Sin embargo, la Unión Europea estableció normas internas con sanciones económicas a los países que sobrepasen el límite establecido de emisión de gases efecto invernadero, la multa para el 2013 fue de 100 euros por tonelada de más emitida.

Para determinar estas emisiones se han establecido factores de emisión para cada tipo de combustible, tales factores se encuentran en el repositorio de factores para la conversión de gases efecto invernadero del departamento de medioambiente, alimentación y asuntos rurales del Reino Unido, que se aplican a la cantidad de combustible consumido por país.

Para controlar las emisiones la unión europea estableció los derechos de emisión que es el derecho de emitir una cantidad determinada de gases efecto invernadero a la atmosfera, estos derechos son transferibles a través de la compra-venta entre las industrias. Cierta porcentaje de los derechos es asignado gratuitamente por el gobierno y el resto es subastado. Anualmente las empresas deben entregar un informe de sus emisiones validado por un verificador acreditado y en caso de no entregar suficientes derechos para cubrir sus emisiones son penalizadas (Comisión Europea, 2013, p 2-4).

Por lo tanto, de acuerdo a lo anterior el consumo de pellet de madera irá en aumento a nivel mundial para los próximos años, ya que es una fuente de energía renovable y amigable con el medio ambiente. A pesar de que principalmente se consume pellet doméstico existe la posibilidad de expandir el

mercado hacia la producción de pellet industrial, como es el caso de Inglaterra que es el principal consumidor de esta clase de pellet.

Para el caso de México que parte de la astilla que produce se usa para biocombustible de combustión directa, la transformación a pellet de madera trae más beneficios energéticos ya que por ser madera densificada genera un poder calorífico mayor.

3.3 La producción de pellet en España.

España al igual que el resto del mundo depende altamente de los combustibles fósiles, consume energías renovables, pero en bajos porcentajes, en el 2009 la cuota de energías renovables fue de 9.4% del total del consumo de energía primaria para ese país. Este porcentaje se divide entre la biomasa y los residuos en un 41.5%, la energía eólica representa el 25.5%, la hidráulica 18.1%, los biocarburantes 8.5%, la energía solar 5.3% y la energía geotérmica 0.1%. La biomasa y los residuos es el recurso renovable que más se utiliza (energiza, s/f).

En España el mercado se encuentra en expansión a nivel interno. Las fábricas de pellet comercializan su producto con grandes distribuidores, en el año 2010 se pasó de consumir 100,000 toneladas de pellets a 380,000 toneladas en el 2013 y se estima que para el 2020 se supere las 1,100,000 toneladas (RETEMA, 2014).

Se producen diferentes clases de pellet, actualmente los consumidores prefieren el pellet certificado ENPLUS como referencia de calidad para sus instalaciones.

Proceso de peletizado

La desventaja del uso de la astilla para biomasa de combustión directa se debe a su baja densidad física y energética. Por lo tanto, el proceso de densificación para la formación de pellet contribuye a disminuir los espacios vacíos entre las partículas, elevando la densidad y el poder calorífico (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2012, p 8).

Se considera que el rendimiento del pellet es más eficiente que la leña porque su estructura y humedad es más uniforme. Su uso presenta ciertos beneficios como ser más económico que los combustibles fósiles, el ahorro en calefacción que llega alcanzar hasta un 60% y es más ecológico.

- Materia prima

En España la biomasa forestal se obtiene de cuatro principales fuentes productoras:

Residuos forestales. Estos se obtienen de los aprovechamientos de madera para la industria forestal y de las cortas o tratamientos que se le hacen al bosque para su mantenimiento, como las actividades de limpieza y podas. Donde se obtienen material de tamaño homogéneo para su transporte ya sea en cortas dimensiones o en astilla.

Residuos agrícolas y leñosos. Este tipo de biomasa proviene de las podas de olivo para el caso de Andalucía, de viñedos para el caso de La Rioja de la que se obtiene biomasa de la poda de sarmientos, semillas y raspones (estructura leñosa de los racimos) y finalmente las podas de los árboles frutales también son fuente de bioenergía.

Residuos agrícolas herbáceos. Se obtiene de la paja de cereales y de la caña del maíz.

Residuos de industrias forestales y agrícolas. La biomasa forestal proviene de industrias de primera y segunda transformación se obtiene padería de madera, corteza y aserrín. Y de las industrias agroalimentarias se obtienen residuos como cascaras, aceite y huesos, por ejemplo, los desechos de la aceituna (López, García, Juárez y Doménech 2011, p 1455-1457).

La cadena de producción de biocombustibles es trazada sobre la cadena de producción maderable, de acuerdo a la norma europea EN14961-1 los combustibles sólidos se clasifican en biomasa leñosa, herbácea, biomasa de frutales y biomasa de combinaciones y mezclas de varios orígenes (Figura 18).

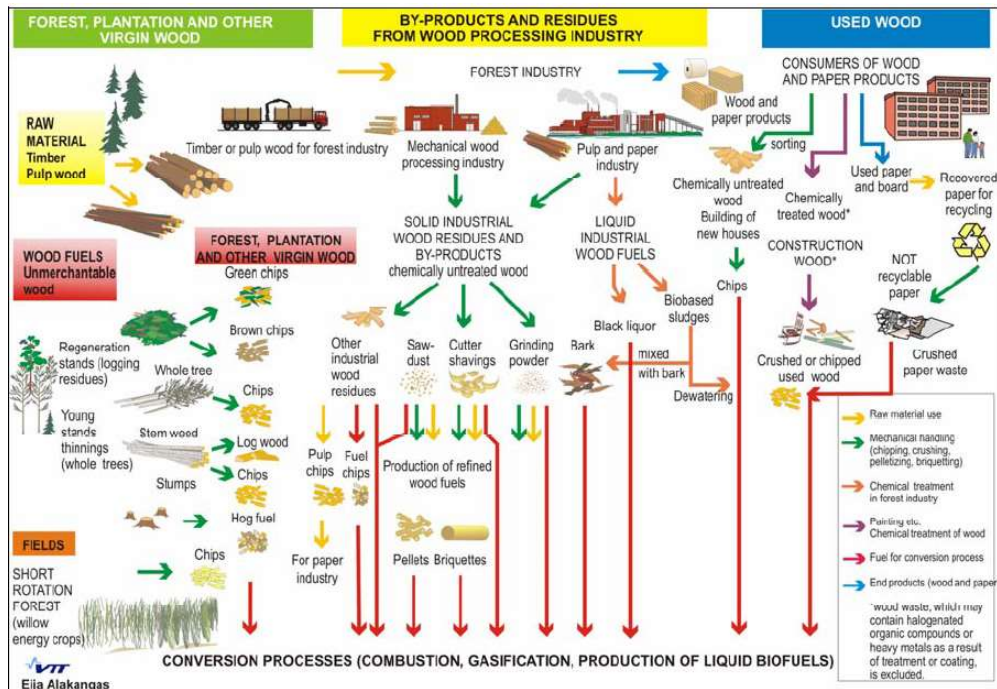


Figura 18. Clasificación de biomasa leñosa
(Fuente New European Pellets Standard-EN 14961-1).

La materia prima puede provenir de residuos sólidos de la industria, de plantaciones forestales energéticas, de madera no comercializable como residuos de regeneraciones, raleos de plantaciones jóvenes y tocones.

Hay biomasa que se obtiene de la limpieza del monte al aprovechar residuos forestales y agrícolas, donde los costos de obtención se reducen al ser asumidos en otros procesos convirtiéndolo en una actividad rentable.

1. Calidad de la materia prima

La Norma Europea EN-14961-1, para la clasificación de biomasa considera la madera proveniente de bosque, de plantaciones forestales y madera usada y de procesos industriales (Cuadro 2).

El pellet certificado solo se elabora con materia prima proveniente de materiales leñosos, ya sea de árboles o arbustos, aunque también en España se fabrica pellet de orujillo. El orujillo son restos de productos agrícolas como huesos, semillas, pulpa y cáscaras de aceituna y vid.

Cuadro 2. Clasificación de la madera para biomasa

1.1 Biomasa leñosa procedente del monte, plantación y otra madera virgen.	1.1.1 árboles completos sin raíces	1.1.1.1 Dicotiledóneas
		1.1.1.2 Coníferas
		1.1.1.3 Rodales de corta rotación
		1.1.1.4 Arbustos
		1.1.1.5 Combinaciones y mezclas
	1.1.2 Árboles completos con raíces	1.1.2.1 Dicotiledóneas
		1.1.2.2 Coníferas
		1.1.2.3 Rodales de corta rotación
		1.1.2.4 Arbustos
		1.1.2.5 Combinaciones y mezclas
	1.1.3 Fuste	1.1.2.1 Dicotiledóneas
		1.1.2.2 Coníferas
		1.1.2.3 Rodales de corta rotación
		1.1.2.5 Combinaciones y mezclas
	1.1.4 Residuos de corta	1.1.4.1 Frescas/verdes, dicotiledóneas (incluye hojas)
		1.1.4.2 Frescas/verdes, coníferas (incluye acículas)
		Almacenada, dicotiledóneas.
		Almacenada coníferas
		Combinaciones y mezclas
	1.1.5 tocones/raíces	1.1.5.1 Dicotiledóneas
		1.1.5.2 Coníferas
		1.1.5.3 Rodales de corta rotación
		1.1.5.4 Arbustos
		1.1.5.5 Combinaciones y mezclas
		1.1.6 Descortezada (de operaciones forestales)
		1.1.7 madera segregada de jardines, parques, de mantenimiento de caminos, viñedos y huertos frutales.
1.2 Por productos y residuos de madera de procesos industriales	1.2.1 Residuos y subproductos de madera no tratada químicamente.	1.2.1.1 Sin corteza, dicotiledóneas
		1.2.1.2 Sin corteza, coníferas
		1.2.1.3 Con corteza, dicotiledóneas
		1.2.1.4 Con corteza, coníferas.
		1.2.1.5 Corteza (de operaciones industriales)
	1.2.2 residuos de madera con tratamientos químicos, fibras y constituyentes de madera	1.2.2.1 sin corteza
		1.2.2.2 Con corteza
		1.2.2.3 Corteza (de operaciones industriales)
		1.2.2.4 Fibras y constituyentes de madera
		1.2.3 combinaciones y mezclas
1.3 Madera usada	1.3.1 Madera sin tratamiento químico	1.3.1.1 Sin corteza
		1.3.1.2 Con corteza
		1.3.1.3 Corteza
	1.3.2 Madera con tratamiento químico.	1.3.2.1. Sin Corteza
		1.3.2.2 Con Corteza
		1.3.2.3 Corteza
		1.3.3 Combinaciones y mezclas
1.4 Combinaciones y mezclas		

Fuente: New European Pellets Standard-EN 14961-1

El hueso de aceituna también se usa como biomasa industrial, empresas productoras de aceite lo destinan para este fin, su uso doméstico no es muy

recomendado por ser muy corrosivo. Pero con un tratamiento de secado y aspiración de impurezas, se puede reducir este defecto y llegar a certificar.

2. Poder calorífico de la materia prima

La propiedad más importante que se considera para destinar o no una madera para la producción de pellet es su poder calorífico.

Los proveedores forestales de materia prima manejan especies de coníferas y hojosas, que tienen un promedio de poder calorífico superior de 4580 kcal/kg, el cual varía dependiendo de la especie forestal de que se trate, así como de la parte del árbol de donde provenga.

▪ Recepción de la materia prima

El proceso de fabricación del pellet inicia desde la recepción de la materia prima, generalmente proviene de residuos de la industria de la madera, como subproductos del aserrío, de trocería que se usa para obtener pallets o tarimas. La madera se obtiene de montes municipales y privados (Figuras 19 y 20).



Figura 19. Madera para aserrío de la provincia de Jaén.
Fuente: archivo fotográfico Imelda Vargas.



Figura 20. Cosecha de madera de plantación de pino en la provincia de Jaén.
Fuente: Archivo fotográfico, Imelda Vargas.

- Descortezado y Astillado

Para que la madera sea incorporada al proceso, primero debe ser descortezada, para no disminuir la calidad del pellet.

Se puede usar aserrín y madera sólida proveniente del aserrío. Cuando se recibe madera en troza o costeras se hace un primer astillado (Figura 21).



Figura 21. Aserrín para producir pellet, obtenido de aserradero.
Fuente: Archivo fotográfico, Imelda Vargas.

Cuando se usan las tablas costeras del aserrío, estas se envían directamente a una astilladora, que muele la madera para ser incluida al proceso de peletizado (Figura 22).



Figura 22. Astilla de madera de aserradero.
Fuente: Archivo fotográfico Imelda Vargas.

- Cribado y reastillado

Cuando en la materia prima existe astilla y aserrín, ambos se mezclan y se envían a una cribadora de manera dosificada para eliminar las piezas más grandes y los materiales ajenos como piedras, arena, metales y vidrio (Figura 23).

En esta etapa se mezclan varias especies, cuando el tamaño de la astilla es muy des uniforme se recurre a una segunda molienda a través de un molino de martillos.



Figura 23. Incorporación de la astilla para cribado y molienda.
Fuente: Archivo fotográfico, Imelda Vargas.

- Secado de la biomasa

Una vez que se tiene un tamaño uniforme de partículas se pone a deshidratar la biomasa en un secador tipo trommel. Para obtener una astilla con un contenido de humedad del 12% (Figura 24).



Figura 24. Secador de astilla tipo trommel, que funciona por medio de una caldera de biomasa.

Fuente: Archivo fotográfico, Imelda Vargas.

- Molienda

La biomasa seca es enviada a un vibro tamiz con mallas de 6 a 8 mm, el material más fino se almacena y el material grueso se envía a un segundo molino de martillos con una malla de 6 mm para su refinado (Figura 25).



Figura 25. Molienda de astilla seca.

Fuente: Archivo fotográfico, Imelda Vargas.

- Prensado de astilla

El proceso de peletizado consiste en la compactación de la biomasa a través de una prensa de extrusión que empuja el material hacia una matriz con orificios de calibre variable, la materia prima se va comprimiendo y atravesando la matriz simultáneamente. A la salida de la matriz los cilindros de madera formados son cortados por cuchillas a la longitud establecida (BioPlant, s/f, p 17).

Generalmente para el pelletizado no se usa aglutinante, en ocasiones se llega a agregar, pero únicamente para consumo industrial.

Los aglutinantes pueden ser los siguientes:

1. Lignina: la lignina se encuentra en la madera de forma natural, confiere densidad y durabilidad al pellet.
2. También se suele usar agua como aglutinante, ayuda a aumentar la adhesión dentro del pellet y la presión de la materia prima en los agujeros de la matriz, pero el agua en exceso puede bloquear la matriz.
3. Aceite vegetal. Se usa principalmente para reducir la resistencia cuando la madera atraviesa los agujeros de la matriz, también puede actuar como aglutinante, el uso en exceso puede afectar la densidad del pellet.
4. Almidón. Actúa como adhesivo disuelto en agua caliente. Ayuda a mejorar la calidad del pellet, evita descomposiciones y reduce el consumo de energía (plantadepellets.com, 2016).

En el prensado se aplica una temperatura de 70 grados centígrados, plastificando la lignina que actúa como aglomerante, se llega a aplicar agua o vapor. Se pueden agregar aglutinantes naturales que no contaminen durante la combustión y debe ser inferior al 2%. Se usa aglutinante cuando se destina a consumo industrial.

El tipo de peletizadora a usar depende principalmente de la capacidad de producción, puede ser de matriz plana o de matriz anular cilíndrica.

1. Peletizadora de matriz plana

La matriz plana es más económica que la matriz anular, su capacidad de producción es de 80-1000 kg/h. Para su alimentación, la madera entra directamente y de forma uniforme, impulsada por su peso a través de la tolva

(Figura 26). La presión de la matriz es ajustable de acuerdo a las necesidades (plantas peletizadoras.com).



Figura 26. Esquema de peletizadora de matriz plana.
Fuente: Amandus Kahl Ibérica S.L, maquinaria.

2. Peletizadora de matriz anular cilíndrica

La matriz anular se usa para producción a gran escala, tienen una capacidad de 0.8-2 ton/h. la alimentación de la madera es forzada por la matriz hacia la cámara de peletizado, donde se distribuye a través de las rasquetas de alimentación rotatorias de alta velocidad (Figuras 27 y 28).



Figura 27. Peletizadora de matriz anular cilíndrica con capacidad de 2 t/h.
Fuente: Archivo fotográfico, Imelda Vargas.

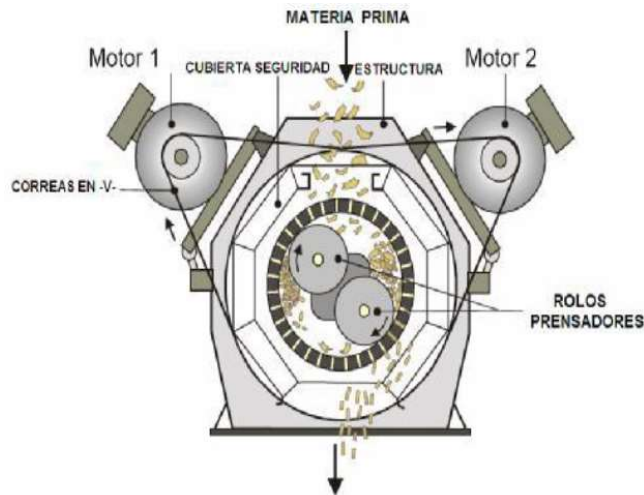


Figura 28. Esquema de peletizadora de matriz anular.

Fuente: Jornadas Forestales de Entre Ríos, 2006, citado por González, 2012.

- Enfriado del pellet

Esta fase aumenta la dureza y resistencia del pellet, que ocurre cuando se enfría la lignina. El pellet se coloca en cámaras enfriadoras donde se aplica aire por medio de ventiladores (Figura 29).



Figura 29. Cámara de enfriamiento del pellet.

Fuente: Archivo fotográfico, Imelda Vargas.

- Tamizado

El tamizado consiste en la eliminación de impurezas como el polvo por medio de vibración. El cual es reincorporado al proceso.

- Almacenamiento en silos

Después del tamizado el pellet se transporta a silos de almacenamiento para su empacado.

- Ensacado o empacado

De los silos de almacenamiento el pellet es enviado a la máquina dosificadora que se encarga de ir dosificando de acuerdo a la cantidad que fue programada (Figura 30).



Figura 30. Dosificadora de pellet para su ensacado.

Fuente: Archivo fotográfico, Imelda Vargas.

El ensacado se realiza en bolsas de 15-20 kg y en sacos de 500-1000 kg (llamados big bags o bolsas grandes), o se distribuye a granel en contenedores o en camiones cisterna (Figuras 31 y 32).

También la venta se hace en pallet de de sacos de 15 kg, generalmente los pallets se conforman de una tonelada.



Figura 31. Saco de pellet de 15 kg y pallet de pellet.

Fuente: Archivo fotográfico, Imelda Vargas.



Figura 32. Pellet en sacos Big bags.

Fuente: Archivo fotográfico, Imelda Vargas.

En resumen, para en el proceso de peletizado la materia prima se puede recibir en forma de astilla, trocería, aserrín o viruta. El tratamiento posterior depende del tipo de materia que se recibe, para ser enviada al molino o al tamizado (Figura 33).

Generalmente cuando se trabaja con tracería se produce pellet certificado, ya que debido a las exigencias de las normas de calidad el pellet debe estar libre de impurezas y materiales extraños que puedan afectar las calderas, siendo este los hogares el mercado donde se distribuye este material al producirse pellet para uso doméstico.

[illegible]

- Precios estimados del equipo.

Para las peletizadoras de matriz anular su precio supera los 35 mil euros, las peletizadoras de matriz plana tienen una capacidad de entre 50-250 kg/hora y su precio oscila desde los 5-15 mil euros.

76

Cuadro 3. Precios corrientes de equipo para peletizado de madera.

Precios de la maquinaria para pellet de madera	Características	Precio en €
Molino de martillos	Diámetro del rodillo de cuchillas: 1050 mm Velocidad del rodillo de cuchillas: 926 rpm. Capacidad: 20-60 t/h. Diámetro máximo de corte: < 600 mm Certificación Ce.	5405
Pelletizadora de matriz plana		
Peletizadora de 50-90 kg/h	Diámetros de matriz: 6-8 mm Voltaje: 380 V-7.5 kW. Duración de la matriz y rodillos: 1000-2000 h	5100
Peletizadora 90-130 kg/h	Diámetros de matriz: 6-8 mm Voltaje: 380 V-15 kW. Duración de la matriz y rodillos: 1000-2000 h	8228
Peletizadora 130-180 kg/h	Diámetros de matriz: 6-12mm. Voltaje: 380 V-22kW Duración de la matriz y rodillos: 1000-2000 h	11616
Peletizadora 180-250 kg/h	Diámetros de matriz: 6-30 mm Voltaje: 380 V- 30 kW. Duración de la matriz y rodillos: 1000-2000 h	14253
Pelletizadora de matriz anular		
Pelletizadora 400-600 kg/h	Numero de rodillos:3 Voltaje: 380 V- 55 kW	34 990
Ensambladora de pellet	Ensambladora de pellet manual. Sacos recomendados: 40 x 70 cm (Sacos de 15 kg.). Capacidad de la tolva: 1000 kg.	1999

Fuente: Elaboración con información de plantasdepellets.com

▪ Normas de calidad del pellet

El pellet de buena calidad tiene mayor rendimiento durante la combustión y es importante para la conservación de los sistemas de calderas, porque llegan a ser corrosivos y dañar los equipos disminuyendo su vida útil.

En Europa la calidad del pellet se regula bajo ciertas normas establecidas sobre los criterios de clasificación de la madera para biomasa y los criterios de clasificación de calidad del pellet de acuerdo a sus características principales. Las normas son EN14961-1 y EN19961-2, respectivamente, aprobadas en 2011.

Sin embargo, la Asociación Española de Normalización y Certificación, se encuentra en constante actualización y en noviembre de 2014 publica una nueva versión de la norma UNE-EN ISO 17225:2 referente a biocombustibles sólidos.

Para garantizar al consumidor final el cumplimiento de dichas normas, se han implementado sistemas de certificación de calidad del pellet. Para que la producción se rija bajo parámetros particulares.

El sistema de certificación de calidad más común es el ENplus del Consejo europeo de pellet (EPC por sus siglas en inglés) regulado en España por AVEBIOM, otro sistema es el DINplus de la matriz de certificación alemana DIN CERTCO.

El sistema ENplus mantiene el mismo criterio de clasificación del pellet que la norma EN 14961-2 y certifica a productores y distribuidores. Por otro lado, DINplus solo certifica la clase A1 y a productores (click renovables, s/f).

Basándose en la norma anterior la certificadora ENplus, que es la más importante de España, certifica las calidades de pellet A1, A2 y B. Aceptan niveles insignificantes de pegamento y de protectores contra el ataque de insectos y excluye la madera de demolición (Cuadro 4).

Cuadro 4. Tipo de materia prima usada para cada tipo de calidad del pellet (ENplus).

ENplus A1	ENplus A2	ENplus B
1.1.3 Fuste.	1.1.1 árboles completos sin raíces.	1.1 Biomasa leñosa procedente del monte, plantación y otra madera virgen.
1.2.1 Residuos y subproductos de madera no tratada químicamente.	1.1.3 Fuste.	1.2.1 Residuos y subproductos de madera no tratada químicamente.
	1.1.4 Residuos de corta.	1.3.1 madera usada no tratada químicamente.
	1.2.1 Residuos y subproductos de madera no tratada químicamente.	

La clase A1 está comprendida por pellet de madera de origen forestal y residuos de madera sin tratar químicamente con bajos niveles de ceniza, nitrógeno y cloro.

La clase A2 incluye pellet con niveles mayores a la clase anterior referente a

contenido de cenizas, nitrógeno y cloro y la clase B admite también el uso de madera proveniente de reciclaje (Cuadro 5).

Cuadro 5. Características del pellet certificado ENPLUS y DIN PLUS

PROPIEDAD	UNIDAD	EN-PLUS (FprEN 14961-2)			DIN PLUS/DIN51731
Origen		A1 Madera no tratada químicamente	A2 Madera no tratada químicamente	B Cualquier tipo de madera o corteza	-
Diámetro	Mm	6(±1) y 8 (±1)	6(±1) y 8 (±1)	6(±1) y 8 (±1)	4 ≤ D ≤ 10 (±10%)
Longitud	mm	3.15 ≤ L ≤ 40	3.15 ≤ L ≤ 40	3.15 ≤ L ≤ 40	≤ 5 x D
Densidad granel	a Kg/m³	≥600	≥600	≥600	
Humedad	% (b.h.)	≤10	≤10	≤10	≤10
Durabilidad	% (b.h.)	≥97.5	≥97.5	≥97.5	≥97.7
Ceniza	% (b.h.)	≤0.7	≤ 1.5	≤ 3.0	≤ 0.5
Finos	% (b.h.)	≤ 1	≤ 1	≤ 1	≤ 1
Aditivos	% (b.h.)	≤ 2	≤ 2	≤ 2	
PCI	Mj/kg (b.h.)	≥ 16.5	≥ 16.3	≥ 16	≥ 18
N	%(b.s.)	≤ 0.3	≤ 0.5	≤ 1.0	≤ 0.30
S	%(b.s.)	≤ 0.03	≤ 0.03	≤ 0.04	≤ 0.04
Cl	%(b.s.)	≤ 0.02	≤ 0.02	≤ 0.03	≤ 0.02
As	mg/kg (b.s.)	≤ 1	≤ 1	≤ 1	≤ 0.8
Cd	mg/kg (b.s.)	≤ 0.5	≤ 0.5	≤ 0.5	≤ 0.5
Cr	mg/kg (b.s.)	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 8
Cu	mg/kg (b.s.)	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 5
Pb	mg/kg (b.s.)	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Hg	mg/kg (b.s.)	≤ 0.1	≤ 0.1	≤ 0.1	≤ 0.05
Ni	mg/kg (b.s.)	≤ 10	≤ 10	≤ 10	
Zn	mg/kg (b.s.)	≤ 100	≤ 100	≤ 100	≤ 100

(Soluciones Bioenergéticas Integrales, s/f)

3.4 El mercado de pellet en España

Producción y consumo

Las plantas productoras de pellet presentan la limitante de no poder trabajar al 100% de su capacidad instalada porque el mercado consumidor no absorbe la totalidad de la producción, por lo tanto, un porcentaje considerable se exporta al

resto de Europa y del mundo. Otra limitante es la existencia de una red de distribución subdesarrollada que aumenta los costos de transporte.

El pellet de calidad doméstica es exportado principalmente a Portugal, Irlanda, Reino Unido, Italia y Francia. Italia es el principal importador de pellet de España, cubre el 60% de la producción anual de España, se abastece de pellet de sacos de 15kg. El mercado de pellet Industrial se encuentra principalmente en Reino Unido, Bélgica y Suecia (Amandus Kahl Ibérica S.L.², s/f).

Se estima que existen aproximadamente 45,000 referencias de instalaciones de calderas consumidoras de biomasa, para conocer la cantidad de consumidores se implementó el proyecto observatorio nacional de calderas de biomasa, que incluye calderas domésticas e industriales (Asociación Española de valorización energética de la biomasa², s/f).

La capacidad de producción de las plantas de pellet es pequeña de aproximadamente 35,000 toneladas anuales si se compara con la producción de otras plantas de la Unión Europea. Las fábricas se enfocan principalmente a la producción de pellet doméstico, la producción de pellet industrial es mínima ya que existen otras alternativas de biomasa más económicas como olivo, paja y cascaras.

En Andalucía las calderas trabajan principalmente con huesos de aceituna, torta de olivo y astilla de madera de podas de olivo y pino.

En España se promueven las buenas prácticas agrícolas relativas a la industria forestal que promueve el manejo responsable de los bosques, gestionados de manera sostenible, los productos portan la etiqueta ecológica del Consejo de Administración Forestal (FSC) y bajo Programa de Aprobación de la Certificación Forestal (PEFC).

Precios y costes

Los costes de operación y mantenimiento en promedio para la producción de una tonelada de pellet son establecidos por el mercado, y son difíciles de controlar, la materia prima y el combustible para el año 2014 se encontraba alrededor de los 35-45 euros por tonelada, los costes de electricidad entre 9 cent. €/kWh, se considera que los costes de producción son altos, debido

principalmente a los costes electricidad. Respecto a los costes de transporte son de 8 €/t (Valle, 2014, p. 5 y 11).

Cuadro 6. Costes de operación de fábricas de pellet en España.

Actividad	costos de operación
Materia prima	35-45 €/t
Combustible	35-45 €/t
Electricidad	9 cent. €/kWh
Transporte	8 €/t

Fuente: Valle, 2014, p. 11.

Por otra parte, los costes de personal y mantenimiento de una planta de pellet son dos factores que tienen impacto considerable en la capacidad productiva, ambos representan en los costes de producción, 22% para plantas pequeñas y 8% para plantas grandes. El transporte para una planta de pellet doméstico se considera en un radio de 100 km para no comprometer la rentabilidad.

Para optimizar los costos de producción de pellet, se deben de considerar criterios como ubicación de la planta, selección de la tecnología apropiada, diseño de zonas intermedias de almacén, optimización del espacio, automatización y eficiencia energética. Los costes de la materia prima representan del 60-70% de los costes de explotación, se maneja un contenido de humedad del 50%. Es importante la correcta operación de la planta durante los primeros años de producción, debido a que generalmente su gestión es ineficaz porque solo operan al 30% de la capacidad total (Valle, 2014, p. 12-19).

En tres casos de producción de pellet de madera en España, con diferente precio de materia prima, y con un precio de venta del pellet a 190 €/t, los costes de producción varían de 119 a 141 euros por tonelada (Cuadro 7).

Cuadro 7. Costes de operación para tres con distinto precio de materia prima.

Hipótesis	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Capacidad de producción	100,000 t/año	100,000 t/año	100,000 t/año
Precio de la materia prima	35 €/t	40 €/t	45 €/t
Costes de explotación	119 €/t	120 €/t	141 €/t

Fuente: Valle, 2014, p. 15-18.

Los costes de explotación se refieren a los costes de producción del pellet sin considerar la inversión que implicó el establecimiento de la planta por ejemplo tecnología, obra civil y permisos.

Desde mediados del año 2015 la demanda de pellet tuvo una baja temporal debido a una disminución en el precio del gasóleo para calefacción. Lo que ocasionó también una reducción en su precio. La leña y el hueso de aceituna a granel son los combustibles que subieron de precio el último trimestre del año 2015, asociado al comienzo de la temporada fría.

El pellet no certificado se considera que no cumple con los requisitos de calidad establecidos por las normas, generalmente en el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) solo se reportan precios de pellet certificado incluyendo el coste de transporte sin IVA.

Cuadro 8. Departamento de biomasa y residuos.

Producto	Valores medios de precios para cada producto		
	Precio Segundo Trimestre 2015 (euros/t)	Precio Tercer Trimestre 2015 (euros/t)	
Leñas	108.82	123.18	
Astilla elaborada	99.86	96.98	
Pellet A1 ensacado	196.59	187.72	
Pellet A1 granel	180.06	174.96	
Pellet no certificado empacado	188.69	No disponible	
Pellet no certificado a granel	175.50	164.44	
Hueso de aceituna empacado	141.73	141.12	
Hueso de aceituna a granel	100.92	116.19	
Cascaras de fruto a granel	No disponible	61.18	

Fuente: IDAE y Dirección de Energías Renovables, 2015.

El precio de los biocombustibles varía dependiendo de la calidad y del tipo de producto. El pellet A1 es el de mejor calidad y de precio más elevado, al ser pellet certificado cumple con las normas para uso doméstico.

La astilla y el hueso de aceituna son los productos de menor precio. La astilla como el pellet también se usa para combustión directa. El hueso de aceituna por presentar sustancias corrosivas solo tiene uso industrial.

En España se manejan precios de tres presentaciones de pellet. Sacos de 15 kg, pallet de pellet (€/t) y pellet a granel (€/t). El pallet de pellet está constituido por bolsas de 15 kg (Cuadro 9).

Cuadro 9. Precio de venta del pellet en España.

Precios corrientes del pellet en España				
AÑO	PMB (Pellet 15kg) €/Saco	sacos	Pallet de pellet (€/t)	Pellet granel volquete (€/t)
2012	4.13		264.61	229.29
2013	4.24		273.86	243.19
2014	4.35		280.98	247.18
2015	4.21		269.88	233.44
2016 (Primer trimestre)	3.98		262.43	229.87

Fuente: AVEBIOM

Para apreciar de una manera más clara la variación de los precios, se deflactaron con respecto al índice de precios al consumidor (IPC) de España, usando como año base el 2011 (Cuadro 10).

Cuadro 10. Precios constantes del pellet en España.

Precios constantes del pellet.						
Año	IPC	IPC PARA DEFLACTAR	PMB (Pellet 15kg) €/Saco	Pallet de pellet (€/t)	Pellet granel volquete (€/t)	Pellet a granel cisterna (€/t)
2012	2.45	102.45	4.03	258.28	223.81	225.27
2013	1.425	101.425	4.18	270.01	239.77	241.15
2014	-0.1416666	99.85	4.36	281.38	247.53	253.86
2015	-0.5	99.5	4.23	271.24	234.61	246.27
2016 (Primer trimestre)	-0.6333333	99.36	4.01	264.10	231.34	240.33

Fuente: Elaboración con datos de AVEBIOM del año 2016.

En general, sin considerar la inflación, los precios se mantienen volátiles en un muy bajo porcentaje, varían entre 3-4%.

Estos precios incluyen 21% de IVA y un transporte promedio de 100 km en formato a granel.

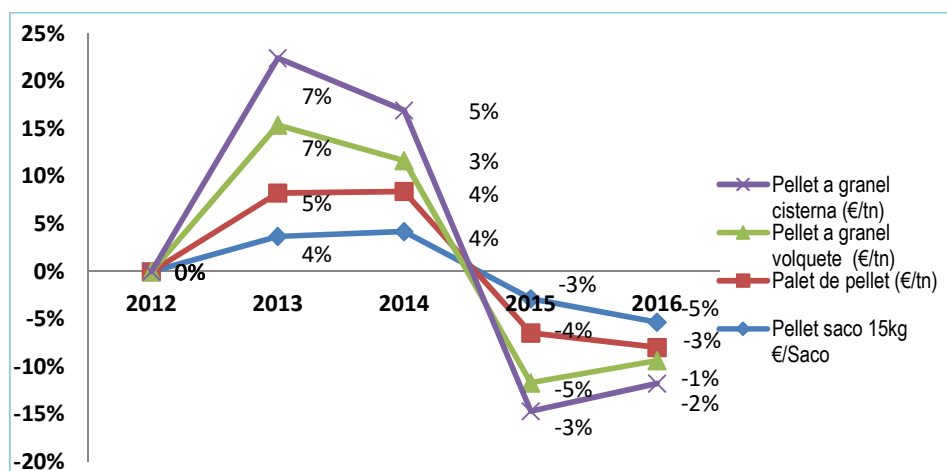


Figura 34. Variación en porcentaje del precio del pellet de 2012-2015.
Fuente: Elaboración con datos de AVEBIOM.

De acuerdo a AVEBIOM el consumo del pellet ha aumentado a más del 50% para el año 2016 con respecto al año 2012, el precio de la tonelada para ese periodo aumentó en 15 euros para el 2016 respecto al 2012, sin considerar la inflación. Para el caso del combustible fósil, el precio por tonelada ha disminuido, pero esto se debe al bajo precio del petróleo que está ocurriendo a nivel mundial.

Cuadro 11. Precios y consumo en España del pellet y combustóleo B.

AÑO	PELLET		COMBUSTOLEO	
	CONSUMO (T)	PRECIO	CONSUMO (T)	PRECIO (T)
2012	175000	225.27	3810961	\$ 1.332,36
2013	380000	241.15	3706014	\$ 1.338,92
2014	430000	253.86	3631261	\$ 1.304,85
2015	450000	246.27	3784805	\$ 1.119,60
2016	480000	240.33	1353740	\$ 957,06

Fuente: elaboración con información que proporcionó la oficina técnica de AVEBIOM.

Cuadro 12. Elasticidades del pellet-combustóleo.

Elasticidad cruzada Pellet-combustóleo		elasticidad combustóleo		elasticidad pellet	
237,81	0,00	-5,59	0,00	16,61	0,07
-5,17	-0,03	0,79	-0,03	2,50	0,05
-0,33	-0,14	-0,30	-0,14	-1,56	-0,03
-0,46	-0,15	4,42	-0,15	-2,76	-0,02

Fuente: Elaboración con datos de AVEBIOM.

En síntesis, el pellet de madera es considerado como un bien complementario, es decir, aun no existe gran impacto en su consumo en España, al mercado consumidor no le afecta económicamente si deja de consumir pellet, es indiferente, ya que hay preferencia hacia el combustible fósil. Los precios de las distintas presentaciones de pellet en España no han presentado variaciones significativas durante el periodo 2012-2015 (Figura 35).

En general se han mantenido constantes, sin embargo, el precio del petróleo ha disminuido en los últimos años, que para el caso de España el precio de sus combustibles está en función del precio mundial del petróleo, por lo tanto, el precio del combustóleo de calefacción también disminuyó, lo que puede implicar menor consumo de pellet, que los consumidores tengan preferencia por el combustóleo al ser más económico.

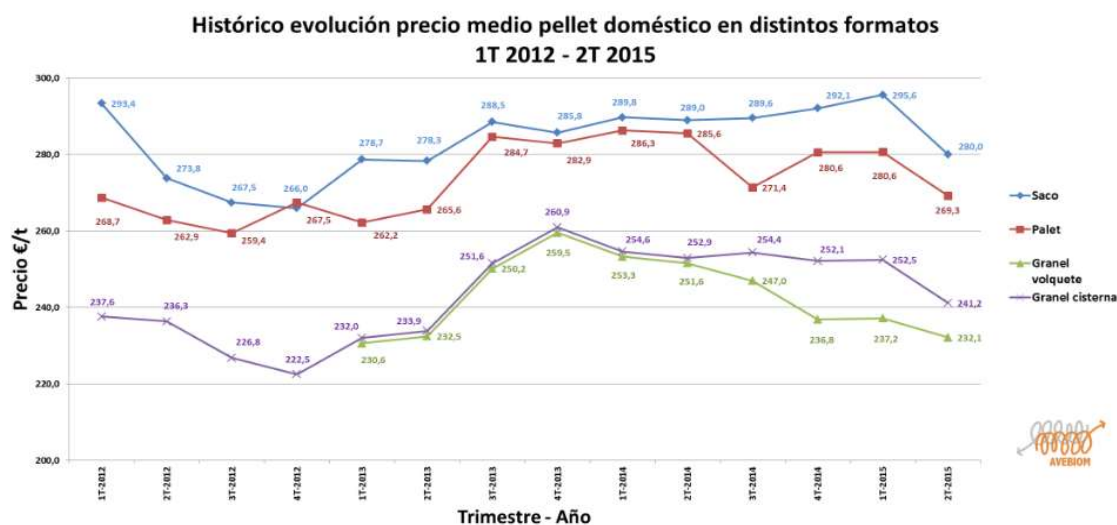


Figura 35. Evolución del precio de pellet doméstico de 2012-2015

IV. ANALISIS COMPARATIVO DE PRODUCCION DE BIOMASA, MÉXICO-ESPAÑA

4.1 Análisis proximal de madera de plantaciones forestales.

México está comenzando a destinar astilla de madera para biomasa sólida, las empresas plantadoras usan mezclas de astilla de las especies que se trabajaron en este estudio, raramente se comercializa astilla de una sola especie, esa situación se debe a que las empresas plantadoras desconocen las especies que son más aptas para este fin, el análisis proximal permitió identificar las especies forestales que tienen un poder calorífico más elevado.

Las muestras de astilla de las cuatro especies forestales que se obtuvieron en campo una vez secadas en la estufa presentaron un contenido de humedad del 6%. Este porcentaje de humedad era necesario para poder manipular la madera para los análisis posteriores.

El contenido de cenizas permitió conocer las especies que producían más residuos durante su combustión. El comportamiento de cada especie de madera durante la combustión es muy importante para tomar decisiones en los tipos de calderas que se utilizaran en la industria para que operen de manera segura y eficiente.

De acuerdo a Blas (2012), la ceniza puede causar corrosión, erosión y abrasión. Su formación depende del contenido de minerales que contenga la madera ya sea sodio, potasio, fósforo o cloro.

Las maderas que generaron menos residuos son *Acacia mangium* (acacia) y *Eucalyptus urophylla* (eucalipto) con un promedio de 0.46% y 0.49%, respectivamente. La madera de *Gmelina arborea* (Melina) presentó un promedio de cenizas del 1.33% y *Tectona grandis* (Teca) un 3.47%. Esto significa que la madera de teca es la especie que genera mayor cantidad de residuos durante su combustión y, en segundo lugar, se encuentra la madera de melina.

Para el caso del poder calorífico que es la propiedad más importante a evaluar, el análisis de varianza mostró que existen diferencias entre los promedios de poder calorífico de cada especie (Cuadro 13 y 14).

Cuadro 13. Resumen del análisis de varianza de un solo factor, para el poder calorífico

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
<i>Acacia mangium</i>	8	36932.4844	4616.56055	4191.56407
<i>Gmelina arborea</i>	8	36680.5348	4585.06685	5619.96897
<i>Eucalyptus urophylla</i>	8	35444.6431	4430.58039	995.686851
<i>Tectona grandis</i>	8	36270.3422	4533.79277	2816.46659

Cuadro 14. Análisis de varianza de un solo factor, para el poder calorífico

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	159157.743	3	53052.5809	15.5765713	0.0004%	2.94668527
Dentro de los grupos	95365.8054	28	3405.92162			
Total	254523.548	31				

Respecto a la prueba de Tukey, el poder calorífico de *Gmelina arborea* y *Acacia mangium* son estadísticamente similares, pero diferente a las otras dos especies. También se presentó similitud entre *Eucalyptus urophylla* y *Tectona grandis* (Cuadro 15 y 16).

Cuadro 15. Comparación entre especies respecto al poder calorífico con la prueba de tukey

Comparaciones	<i>Gmelina arborea</i>	<i>Eucalyptus urophylla</i>	<i>Tectona grandis</i>
<i>Acacia mangium</i>	Igual	Diferente	Igual
<i>Gmelina arborea</i>		Diferente	Igual
<i>Eucalyptus urophylla</i>			Igual

Cuadro 16: Comparación entre promedios de poder calorífico con la prueba de tukey

Resumen	Promedio (cal/g)	Diferencia
<i>Acacia mangium</i>	4617	Ac
<i>Gmelina arborea</i>	4585	Ac
<i>Eucalyptus urophylla</i>	4431	Ab
<i>Tectona grandis</i>	4534	Ab

Con el poder calorífico obtenido por especie, se determinó el incremento medio anual en kilocalorías, en función de la densidad básica y el incremento medio anual expresado en volumen. *Acacia mangium* es la especie que generará mayor poder calorífico expresado en miles de kilocalorías/ha/año con un total de 69.17, le sigue *Eucalyptus urophylla* con 57.0, *Gmelina arborea* con 27.84 y finalmente *Tectona grandis* con 24.02 (Cuadro 17).

Cuadro 17. Cantidad de kilocalorías generadas por ha para cada especie en relación al incremento medio anual (IMA)

Espece	Densidad Básica	Poder Calorífico (cal/g)	IMA Ton	IMA kcal (Miles de kcal)
<i>Acacia mangium</i>	0.450	4,616.56	14.99	69.17915982
<i>Gmelina arborea</i>	0.337	4,585.07	6.07	27.84602801
<i>Eucalyptus urophylla</i>	0.512	4,430.58	12.87	57.00632842
<i>Tectona grandis</i>	0.530	4,533.79	5.30	24.0291017

En general las cuatro especies de madera tienen poder calorífico similar, pero existen diversos factores a considerar para destinarlas a biocombustibles.

Para el caso del contenido de humedad la madera recién cortada disminuye el rendimiento calórico, ya que gran parte de la energía se pierde en evaporar de agua.

La densidad de la madera es otro factor importante, se observa en los resultados que, a mayor densidad, mayor poder de combustión. *Eucalyptus urophylla*, *Tectona grandis* y *Acacia mangium* son maderas densas. *Gmelina arborea* es la especie con la densidad más baja, pero presenta un poder calorífico elevado debido al contenido de sustancias orgánicas.

El porcentaje de cenizas generado de la combustión en la madera también es una característica que se debe considerar. El contenido de cenizas en la madera es generalmente del 1%, algunas especies de biocombustibles pueden tener un contenido de cenizas muy elevado, lo que genera menos energía. *Acacia mangium* y *Eucalyptus urophylla* tienen un contenido de cenizas menor al 1%.

En cambio, *Gmelina arborea* y *Tectona grandis* sobrepasan el 1% de contenido de cenizas, *Tectona grandis* genera un 3.47%.

A nivel de calorías generadas por gramo, acacia tiene un alto potencial para ser usada como biocombustible y eucalipto es la especie con el valor más bajo. Pero al calcular la cantidad de kilocalorías que cada especie produce por hectárea por año en función de su IMA, *Acacia mangium* es la especie que se mantiene en primer lugar, le sigue *Eucalyptus urophylla*, *Gmelina arborea* y finalmente la especie de menor crecimiento es *Tectona grandis*, esta especie al ser una madera considerada como preciosa su uso para muebles finos es más conveniente que para biomasa.

Por lo tanto, las especies más aptas para la producción de biomasa son acacia y eucalipto al ser especies de rápido crecimiento y de poder calorífico superior a las 4400 cal/g. conocer las especies más aptas para biomasa permitirá tomar decisiones correctas para el establecimiento de plantaciones con fines energéticos, sin embargo, debido a que México desde hace más de 20 años se tiene registro en las bases de datos del uso de astilla de madera con fines energéticos, astilla que proviene de bosque natural y plantaciones forestales, se le puede conferir otro uso que es el de biomasa para la producción de pellet de madera que se menciona más adelante.

Por lo tanto, se elaboró un análisis de esta oferta de astilla a nivel nacional, para conocer los factores que intervienen en su producción, lo cual ayudará a la toma de decisiones para ir implementando la producción y consumo de la biomasa sólida.

4.2 Modelo econométrico de oferta

Para el modelo de oferta se consideraron diversas variables que intervienen en la producción de la astilla de madera. Al graficar y observar el comportamiento de cada variable, la gran mayoría no cuenta con alguna tendencia. Algunas variables cuentan con una tendencia de aumento, aunque no necesariamente exponencial, estas son: valor del consumo de la gasolina, valor del consumo del consumo de diesel, valor de consumo de combustóleo, consumo de gasolina, precio de la gasolina, precio del diesel y precio del combustóleo. Similarmente

a lo anterior se identificó tendencia a decremento en TIE28días y la tasa de interés real (Figura 36).

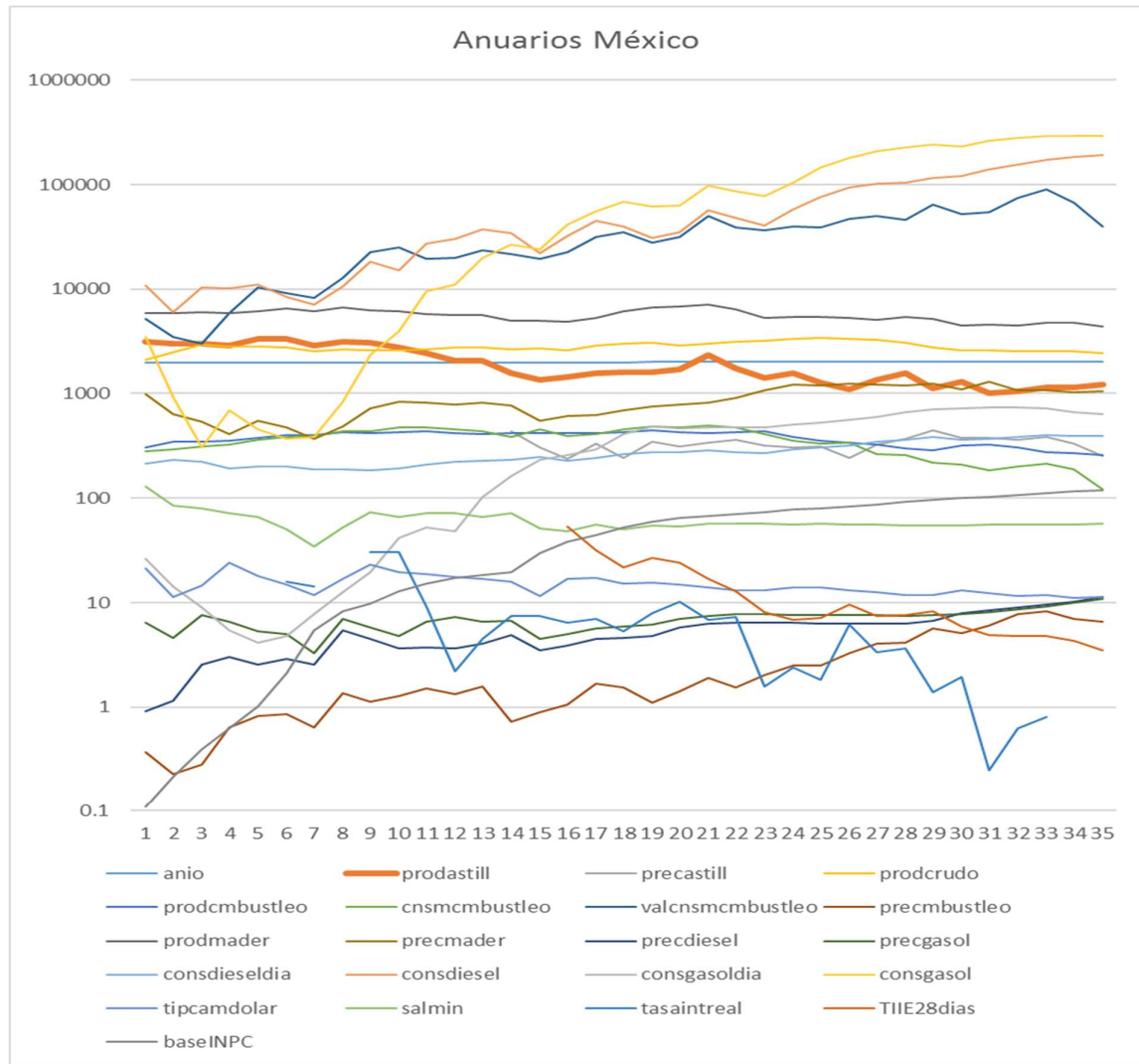


Figura 36. Variables incluidas en el modelo.

Al correr el modelo general se identificaron las variables más significativas y por lo tanto más aceptadas para la construcción el modelo, se aceptaron diez variables en cuanto a significancia y se desearon 5 variables (Cuadro 18).

Cuadro 18. Resultados de las variables estimadas y variables más significativas.

VARIABLE	COEFICIENTE	DESV.TÍP.	ESTAD T	VALOR P
Constante	1299.47	1342.24	0.968	0.34514
PCR	0.166441	0.200696	0.829	0.41722
PCM	0.891566	2.16253	0.412	0.68475
CCM	-2.72207	1.02806	-2.648	0.01588 **
VCM	-0.00576001	0.00459275	-1.254	0.22500
PRCM	241.187	76.9681	3.134	0.00547 ***
PRMR	0.590335	0.0546561	10.801	<0.00001 ***
PMR	-0.194210	0.238865	-0.813	0.42626
PD	90.3712	44.9514	2.010	0.05880 *
PG	-80.0175	44.7940	-1.786	0.09001 *
CD	-8.75731	4.26411	-2.054	0.05403 *
VCD	-0.0125445	0.00555808	-2.257	0.03598 **
CG	-2.29741	0.736551	-3.119	0.00565 ***
VCG	0.00842177	0.00408664	2.061	0.05328 *
TC	-24.7735	15.9354	-1.555	0.13654
SMG	12.8280	4.63233	2.769	0.01221 **

Por lo tanto, los valores más aceptados de acuerdo al modelo general son precio y producción de la madera en rollo, valor de consumo de diesel y consumo de gasolina, así como el salario mínimo y el consumo de combustóleo.

Estos resultados fueron necesarios para la construcción de la matriz de covarianzas, de la cual al realizar la combinación de variables para formar las ecuaciones se construyeron 19 modelos (Cuadro 19).

De esta manera se fueron seleccionando los modelos que fueron más significativos para hacer el análisis. A los modelos se les asignó una letra y número para diferenciarlos.

Los modelos recomendados son M1 y M4 dado que ambos tienen un error residual estándar (*residual estándar error*) relativamente menor en comparación con los otros modelos, demostrando con ello un ajuste con diferencias mínimas con respecto a la solución estimada del modelo.

Un segundo criterio es el uso de R^2 (correlación), M1 y M4 tienen una correlación muy elevada demostrando una buena relación entre las variables que los conforman.

Cuadro 19. Resumen estadístico de los modelos estimados.

Alia s	No. variables dependiente s	Residua l standar d error	degrres of freedo m	Multipl e R- square d	Adjuste d R- squared	p-value
M1	18	159.3	1	0.9862	0.7373	0.3785000
M2	5	528.4	29	0.6144	0.548	0.0000239
M3	8	247.4	11	0.6332	0.3664	0.0924700
M4	12	196.6	7	0.8526	0.6	0.0576600
fm1	1	305.1	20	0.0022	-0.04765	0.8344000
fm2	1	763.6	33	0.0838	0.0560	0.0916700
fm3	1	753.9	33	0.1068	0.0797	0.0553400
fm4	1	740.1	33	0.1393	0.1133	0.0272000
fm5	1	498.2	33	0.61	0.5982	0.0000000
fm6	1	586.9	33	0.4587	0.4423	0.0000078
fm7	1	586.3	33	0.4598	0.4434	0.0000076
fm8	1	569.9	33	0.4896	0.4742	0.0000029
fm9	1	530	33	0.5586	0.5453	0.0000002
fm10	1	659.4	33	0.3167	0.296	0.0004327
fm11	1	468.9	33	0.6545	0.644	0.0000000
fm12	1	538.4	33	0.5446	0.5308	0.0000004
fm13	1	391.2	33	0.7595	0.7522	0.0000000
fm14	1	515.6	33	0.5823	0.5697	0.0000001
fm15	1	640.6	33	0.3551	0.3356	0.0001587
fm16	1	715.9	33	0.1946	0.1702	0.0079850
fm17	1	714.6	33	0.0526	0.0210	0.2010300
fm18	1	292.5	18	0.161	0.1144	0.0795300
fm19	1	403.3	33	0.7444	0.7367	0.0000000

0

Finalmente, el tercer criterio es el *p-value*, la teoría indica debe ser *p-value*<0.05, en este sentido el modelo recomendado es solo M4.

Los modelos seleccionados se transformaron con los datos respectivos de sus betas de acuerdo al modelo económico siguiente:

$$y = \beta_0 \prod_{i=1}^n x_i^{\beta_i}$$

Al asignar los valores de cada beta tanto al modelo seleccionando que es el M4 y al modelo M1 que fue el segundo modelo considerado para este análisis, se obtuvieron las ecuaciones siguientes:

$$\begin{aligned} \ln y_{M1} &= \ln(-245.45569938) \\ &+ \left(\begin{aligned} &(-39.55243748)\ln x_1 + (-0.83308508)\ln x_2 + (4.68606474)\ln x_3 + \\ &(2.81337182)\ln x_4 + (1401.13311912)\ln x_5 + (0.02515954)\ln x_6 + (63.11352300)\ln x_7 + \\ &(-8.97082769)\ln x_8 + (0.02433373)\ln x_9 + (0.05995525)\ln x_{10} + \\ &(-8.13738906)\ln x_{11} + (401.36151132)\ln x_{12} + (-25.66482537)\ln x_{13} + \\ &(0.07197905)\ln x_{14} + (0.15966216)\ln x_{15} + (-0.02861739)\ln x_{16} + \\ &(0)\ln x_{17} + (0)\ln x_{18} \end{aligned} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \ln y_{M4} &= \ln(642.2343930) \\ &+ \left(\begin{aligned} &(28.8507310)\ln x_3 + (2857.5101687)\ln x_5 + (0.1442215)\ln x_6 + (0.1955664)\ln x_9 + \\ &(0.4156767)\ln x_{10} + (-5.4106856)\ln x_{11} + (3083.7105387)\ln x_{12} + (0.5221458)\ln x_{14} + \\ &(4.3590748)\ln x_{15} + (0.4266888)\ln x_{16} + (1.3438437)\ln x_{17} + (-1.8567572)\ln x_{18} \end{aligned} \right) \end{aligned}$$

Sin embargo, se aceptó el modelo M4, el cual es una transformación aplicando logaritmo natural al modelo económico requerido, tiene un R^2 de 0.9124 es decir indica una alta correlación.

En lo que respecta a las pruebas de t para cada coeficiente, únicamente la variable “SMG” no muestra un buen ajuste, esto podría sugerir una reducción del modelo si fuera eliminada.

Por lo tanto, considerando solo las variables aceptadas en el modelo M4 del análisis estadístico. El modelo aceptado es el siguiente:

$$\begin{aligned} OMB_t &= \beta_0 + \beta_1 PCM_{1t} + \beta_2 VCM_{2t} + \beta_3 PRCM_{3t} + \beta_4 PD_{4t} + \beta_5 PG_{5t} + \beta_6 CD_{6t} \\ &+ \beta_7 VCD_{7t} + \beta_8 TC_{8t} + \beta_9 SMG_{9t} + \beta_{10} TI_{10t} + \beta_{11} TIE_{11t} \\ &+ \beta_{12} INPC_{12t} + u_t \end{aligned}$$

Al aplicar logaritmos naturales para generar linealidad en los parámetros, se obtuvo la siguiente ecuación.

$$\begin{aligned} \ln OMB_t = & \ln \beta_0 + \beta_1 \ln PCM_{1t} + \beta_2 \ln VCM_{2t} + \beta_3 \ln PRCM_{3t} + \beta_4 \ln PD_{4t} + \beta_5 \ln PG_{5t} \\ & + \beta_6 \ln CD_{6t} + \beta_7 \ln VCD_{7t} + \beta_8 \ln TC_{8t} + \beta_9 \ln SMG_{9t} + \beta_{10} \ln TI_{10t} \\ & + \beta_{11} \ln TIE_{11t} + \beta_{12} \ln INPC_{12t} + u_t \end{aligned}$$

De esta manera se calcularon los coeficientes beta en R y el modelo de oferta de madera final aceptado fue el siguiente:

$$\begin{aligned} \ln Y_t = & 642.2343930 + 28.8507310 \ln PCM_{1t} + 2857.5101687 \ln VCM_{2t} \\ & + 0.1442215 \ln PRCM_{3t} + 0.1955664 \ln PD_{4t} + 0.4156767 \ln PG_{5t} \\ & - 5.4106856 \ln CD_{6t} + 3083.7105387 \ln VCD_{7t} + 0.5221458 \ln TC_{8t} \\ & + 4.3590748 \ln SMG_{9t} + 0.4266888 \ln TI_{10t} + 1.3438437 \ln TIE_{11t} \\ & - 1.8567572 \ln INPC_{12t} + u_t \end{aligned}$$

Multiplicando por la función exponencial, se obtuvo el modelo de oferta siguiente:

$$\begin{aligned} Y = & 642.2343930 PCM^{28.8507310} VCM^{2857.5101687} PRCM^{0.1442215} \\ & PD^{0.1955664} PG^{0.4156767} CD^{-5.4106856} VCD^{3083.7105387} \\ & TC^{0.5221458} SMG^{4.3590748} TI^{0.4266888} TIE^{1.3438437} INPC^{-1.8567572} u_t \end{aligned}$$

Donde las elasticidades para cada variable corresponden a las señaladas en cada exponente, propiedad específica del modelo potencial.

Las elasticidades señalan el cambio en la producción de madera para biomasa ante cambios en cada una de las variables independientes de la ecuación, en tanto que el resto se mantendrán constantes.

La función exponencial indica lo siguiente:

Ante un cambio en el 1% en la producción de combustóleo, la oferta de biomasa aumenta en un 28.8%, *ceteris paribus*. La oferta es elástica.

Ante un cambio en el 1% en el valor del consumo del combustóleo, la oferta de biomasa aumenta 2857.5 %.

Ante un cambio en el 1% en el precio del combustóleo, la oferta de biomasa aumenta en un 0.14 %, "*ceteris paribus*" manteniendo las demás variables constantes.

Ante un cambio en el 1% el precio del diesel, la oferta de madera aumenta en un 0.19%.

Ante un cambio en el 1% en el precio de la gasolina la oferta de madera aumente 0.41%.

Ante un cambio en el 1% en el consumo de diesel por día, la oferta de madera disminuye en un 5.41%.

Ante un cambio en el 1% en el valor del consumo del diesel, la oferta de madera aumente un 3083.7 %.

Ante un cambio en el 1% del tipo de cambio del dólar, la oferta de madera aumenta en un 0.52%.

Ante un cambio en un 1% en el salario mínimo la oferta de madera aumenta en un 4.35%.

Ante un cambio en un 1% en la tasa de interés real, la oferta de madera aumenta en un 0.42%.

Ante un cambio en un 1% en la TIIE a 28 días, la oferta de madera aumenta 1.34%.

Ante un cambio en un 1% en el IPC, la oferta de madera disminuye en un 1.8%

Por lo tanto, los factores que más afectan la oferta de astilla de madera son;

- ✓ la tasa de interés en porcentaje anual,
- ✓ el valor del consumo del diesel,
- ✓ el salario mínimo general,
- ✓ el valor del consumo del combustóleo y la producción de combustóleo,

Estas variables son elásticas al ser más sensibles a la oferta de astilla de madera.

La astilla de madera actúa como un bien complementario, ya que se consume, pero en bajos porcentajes, existe preferencia por el consumo de combustible fósil, en este caso el combustóleo. Puede llegar a ser un bien sustituto en un largo plazo actuando como materia prima para la producción de pellet de madera, y con la implementación de políticas para su difusión y promoción de su uso en la industria.

Por lo tanto, como en México solo se usa la madera y astilla para biomasa en la industria de forma directa, es conveniente buscar otras alternativas que le confieran más valor energético y económico a este material. Transformar estos materiales a pellet de madera es una alternativa para seguir aprovechando la biomasa para combustión directa, pero con mayores ventajas energéticas, además que con este tipo de transformación se pueden aprovechar también los desperdicios de la industria de la madera de primera y segunda transformación.

4.3 Análisis de la producción de pellet de madera en España

Esta tercera parte del análisis se realizó en España, que es un país productor y consumidor del pellet de madera, con el fin de conocer las alternativas y ventajas de la transformación de la astilla de madera mexicana a pellet.

Por lo tanto, con la encuesta que se aplicó a las fábricas productoras, se generó información importante que puede ser aplicada para México en los próximos años para ir reduciendo la dependencia al petróleo. De los resultados de la encuesta se obtuvo lo siguiente:

Del 100% de las plantas productoras de pellet, el 40% respondió satisfactoriamente, el 18% de los encuestados ha dejado de producir y se dedican exclusivamente a la distribución.

El 57 % de las fábricas de pellet son de creación reciente oscilan entre el periodo anual de 2010-2015, el 29 % oscila entre los años 2005 y 2010, solo el 14% se fundó entre el periodo 1985 a 1995 (Figura 37).

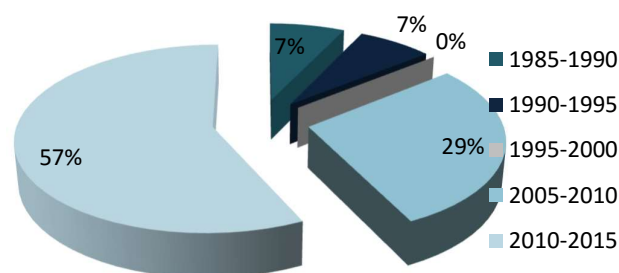


Figura 37. Año de fundación de las empresas encuestadas.

Fuente: elaboración propia con datos de encuesta.

En general el origen del capital de las empresas es nacional pero el 14 % maneja el capital mixto, que comprende a ambos nacional y extranjero.

La materia prima que se usa en el proceso de producción es de origen local, principalmente se utiliza astilla de madera en rollo descortezada, de las especies forestales usadas el pino es la fuente principal, el 100% de las empresas encuestadas lo incluye en el proceso productivo, también utilizan madera de abedul, chopo, roble y castaño, en porcentajes más bajos.

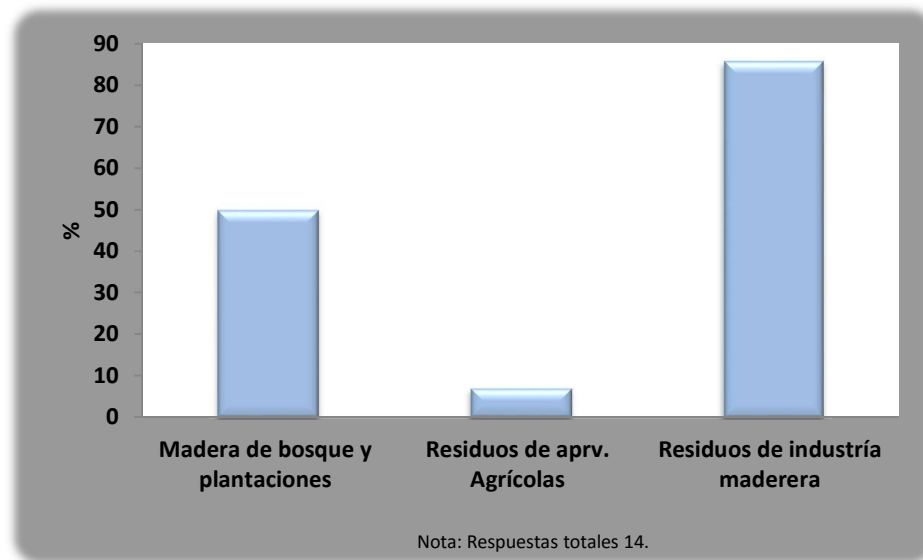


Figura 38. Origen de la materia prima usada en el proceso de producción.

Fuente: elaboración con datos de encuesta.

La materia prima proviene de diferentes tipos de aprovechamiento, que es una mezcla entre madera proveniente de bosque y plantaciones, residuos de aprovechamientos agrícolas y residuos de la industria maderera. El 50% de las empresas trabaja con madera de bosque y plantaciones, pero la materia prima más empleada proviene de la industria maderera, que corresponde al 80% de las empresas encuestadas. Los residuos de aprovechamientos agrícolas se usan en menor cantidad solo el 7% de las empresas lo incorporan al proceso productivo, las exigencias en las normas de certificación del pellet es la razón por la que solo se use exclusivamente materiales leñosos como materia prima. Las empresas certificadas, son rigurosas en los tipos de materia prima que usan. Solo el 15% de las empresas emplea materia prima de árboles completos que

corresponde a fuste y ramas y el 85% del total usa materia prima proveniente de trocería (Figura 38).

Antes de ser incorporada la materia prima al proceso, se realiza un control de calidad donde se determina la densidad, el contenido de humedad, contenido de cenizas, análisis visual y porcentaje de finos. Ya que se recibe madera en dos presentaciones troza y astilla (Figura 39).

El análisis visual se refiere a la ausencia de suciedad, corteza y madera descompuesta, que pueda afectar la calidad del pellet.

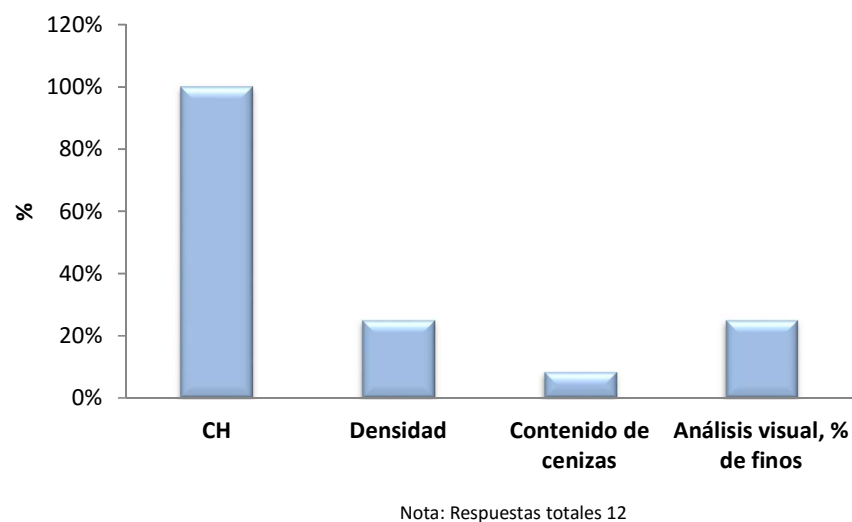


Figura 39. Pruebas de control de calidad de la materia prima.

Fuente: elaboración propia con datos de encuesta.

La materia prima que se utiliza esta certificada principalmente por Pan European Forest Certification (PEFC) que corresponde al 73% de las empresas encuestadas, el PEFC es el sistema de certificación más implantado en España, el 90% de los bosques certificados españoles están certificados bajo este procedimiento.

Por otra parte, el 27% de las industrias estudiadas cuenta con el sistema (FSC), el 18% usa materia prima sin certificación, y el 9% trabaja solo con una proporción de materia prima certificada. En España solo el 7% de los bosques están certificados con el sistema FSC (Figura 40).

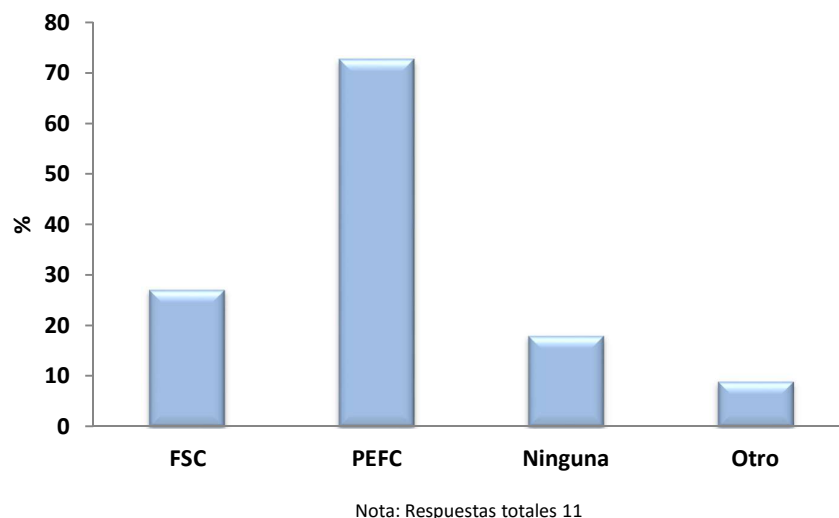


Figura 40. Tipo de certificación de la materia prima.

Fuente: elaboración con datos de encuesta.

El coste de la materia prima es muy variable, desde los 35€/t y supera los 100 €/t. En promedio se llega a requerir de 1.5-2 toneladas de madera sólida para producir una tonelada de pellet.

En promedio el coste de materia prima es de 56 €/t, con una desviación estándar de 21.41 €. Sólo el 17 % de las empresas encuestadas utilizan materia prima con un coste superior a 100 €/t (Figura 41).

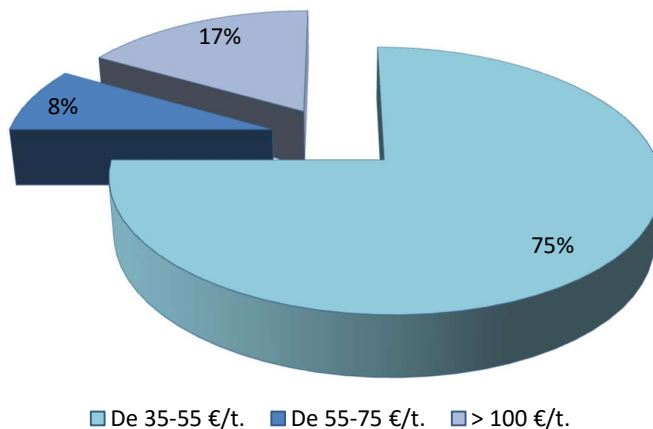


Figura 41. Coste de la materia prima por tonelada.

Fuente: elaboración con datos de encuesta.

El mercado de pellet en España se enfoca principalmente a la producción de pellet doméstico, al ser el más demandado para la calefacción de espacios cerrados en hogares y espacios públicos. El 73 % de las empresas encuestadas se dedican a su producción y el 27% producen ambos tipos de pellet industrial y doméstico.

En el proceso de producción el pellet se elabora con peletizadoras de matriz plana y de matriz anular cilíndrica. El 82% de las plantas trabaja con matriz anular, el 9 % con peletizadora de matriz anular y el resto una combinación de ambos.

El 91% de las plantas productoras opera con 1 a 2 máquinas peletizadoras, solo el 9 % opera con un número de máquinas entre 3 y 4. El 64% de las plantas opera tres turnos, el 27% dos turnos y el 9% un turno.

Más del 80% de las plantas mantienen la certificación ENplus, siendo esta la más común, para el caso de DINplus, menos del 20% la utiliza.

La producción de las plantas de pellet depende principalmente de los pedidos del cliente y de la capacidad de producción que tienen. El 9% de los encuestados mantiene un inventario mínimo de producción y el 18% se basa en el pronóstico de la demanda del pellet.

Los principales problemas que se presentan en el proceso de producción son dificultad en el abastecimiento de la materia prima y altos costes de reparación de maquinaria. Un 30 % reportó fallos en la maquinaria como las principales dificultades. Y un 10% reportó ausencia de problemas en el proceso de producción. Dentro de problemas ajenos al proceso productivo, también existen problemas en el precio de venta del pellet al ser precios muy bajos.

El 91% de las empresas encuestadas ha producido pellet desde su fundación, únicamente el 9 % cambio el tipo de producción de madera aserrada a pellet de madera.

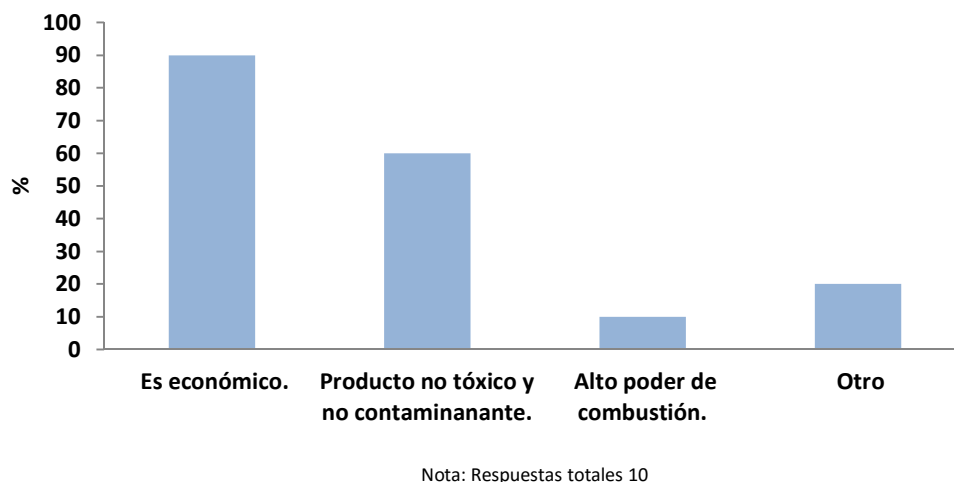


Figura 42. Factores que influyen en aceptación del pellet por consumidores.

Fuente: elaboración con datos de encuesta.

Los motivos que han impulsado a la producción de pellet es fundamentalmente porque es más económico y el cliente busca rentabilidad, aunque también está la parte medioambiental al ser una alternativa para usar los desperdicios maderables y ser un producto no tóxico que no contamina y es renovable (Figura 42).

El 70% de las empresas señalaron que es necesario un mercado más grande para distribuir el pellet. El 30% está conforme con el tamaño de mercado.

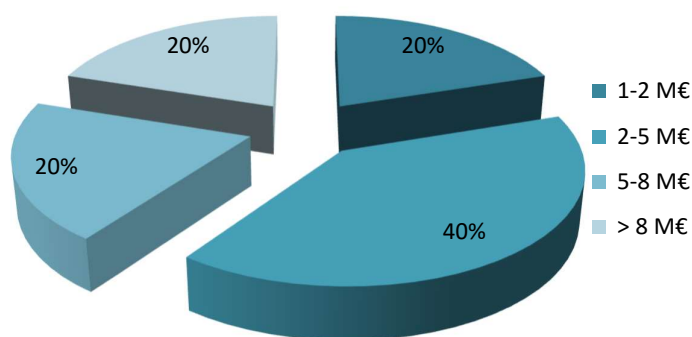


Figura 43. Inversión bruta requerida para el establecimiento de las plantas.

La inversión bruta es el gasto total de bienes de capital considerando la amortización y la depreciación, el 40% de las empresas invirtió entre 5-8 millones

de euros. El 20% entre 1-2 millones de euros y entre 5-8 millones de euros, el 20% restante tiene una inversión superior a los 8 millones (Figura 43).

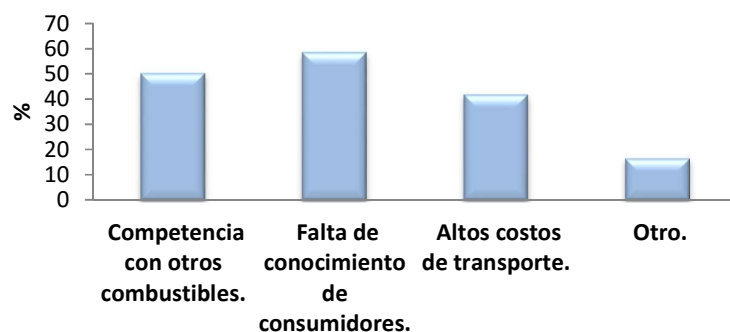


Figura 44. Dificultades en la comercialización del pellet.

Fuente: elaboración con datos de encuesta.

Dentro de las dificultades para la comercialización del pellet el 58% de las empresas encuestadas señalan que los consumidores no tienen el conocimiento sobre la existencia y ventajas del uso del pellet de madera. También la competencia con otros combustibles principalmente los fósiles es otra limitante en el mercado (Figura 44).

El alto costo de transporte del pellet también influye en el precio, lógicamente a mayor precio el consumidor opta por otras alternativas. Otros aspectos que también influyen en el volumen de comercialización son la baja demanda durante los inviernos cálidos. Por otro lado, un 17% de los encuestados señalaron que se generan pérdidas al vender el producto sin IVA.

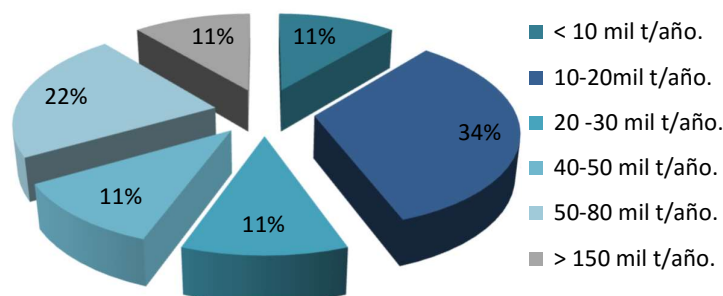


Figura 45. Capacidad de producción de las plantas.

Fuente: elaboración con datos de encuesta.

La capacidad de producción es muy variable de hasta más de 150 mil t/año, el mayor porcentaje que corresponde a 34% representa las empresas con una capacidad de producción de entre 10-20 mil t/año (Figura 45).

El volumen de producción de las empresas ha aumentado a más del doble de la cantidad de los primeros dos años. Las empresas que son de creación reciente han mantenido su nivel de producción (Figura 46).

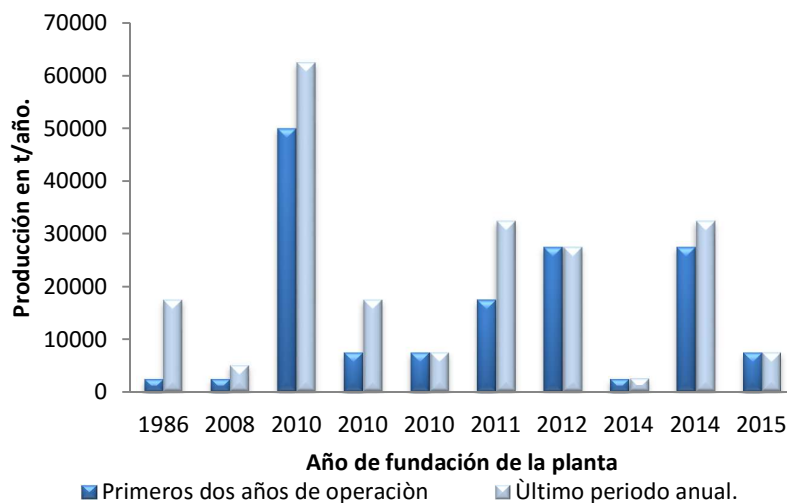


Figura 46. Evolución en el volumen de producción de las plantas del primer año de operación al último periodo anual.

Fuente: elaboración con datos de encuesta.

El precio promedio actual del pellet a granel se encuentra en los 175 euros/t y el precio del pellet en saco de 15 kg en promedio 180 euros/ton. En promedio las empresas cuentan con 9 empleados para su operación y administración.

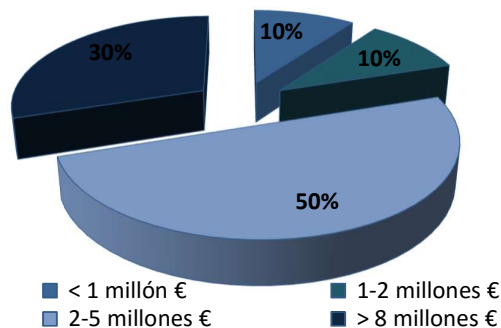


Figura 47. Inversión en maquinaria y equipo para el establecimiento de las plantas.

Fuente: elaboración con datos de encuesta.

El 50% de las plantas han invertido en maquinaria entre 2-5 millones de euros y el 30% con inversiones superiores a los 8 millones de euros.

El coste de producción del pellet a granel por tonelada, ha aumentado del 5 al 35% desde el establecimiento de las plantas productoras hasta el último periodo anual.

Únicamente en el 12.5 % de las plantas el coste disminuyó en un 5%, para el 37.5% el coste se ha mantenido, correspondiente a plantas creadas entre el periodo anual de 2008-2014 (Figura 48).

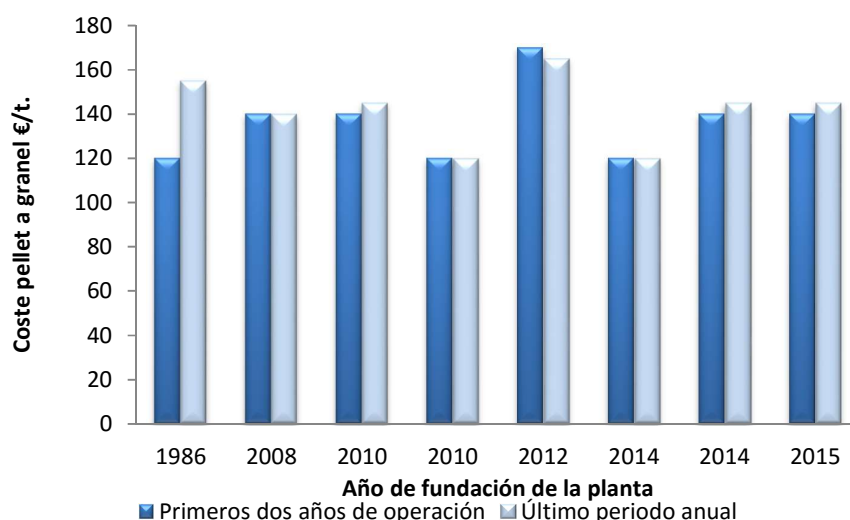


Figura 48. Coste de pellet a granel correspondiente a cada fábrica.

Fuente: elaboración con datos de encuesta.

Para el caso del pellet en saco de 15 kg el coste ha aumentado del 7-38% con base en el coste de los primeros dos años de operación. Para empresas creadas entre el año 2012 y 2015 el coste de producción se ha mantenido (Figura 49).

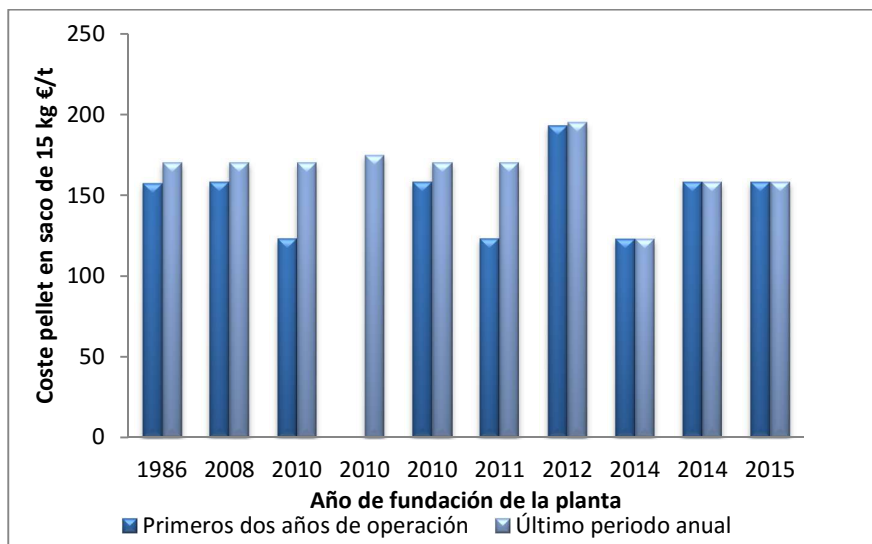


Figura 49. Coste de pellet en saco de 15 kg correspondiente a cada fábrica.
Fuente: elaboración con datos de encuesta.

El 60% de las plantas produce pellet para exportación. El 17% de las plantas exportan menos del 10% del total de su producción, el 50% exporta entre el 10-25% y el 33% restante exporta entre el 25-50%.

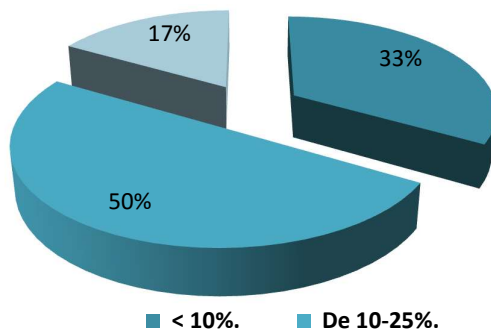


Figura 50. Porcentaje de la producción de las plantas destinada a la exportación.
Fuente: elaboración con datos de encuesta.

El pellet se exporta principalmente a Francia e Italia, con el 50 y 30 % de las empresas exportadoras respectivamente, y finalmente el 10% de las empresas exportan a Alemania, Reino Unido e Israel.

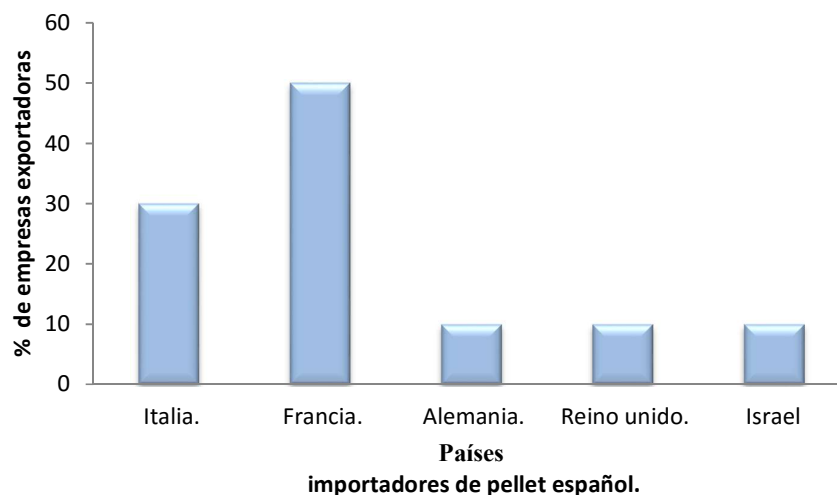


Figura 51. Países importadores de pellet de España.

Fuente: elaboración con datos de encuesta.

Se exporta principalmente pellet doméstico correspondiente al 83% de las empresas, y el 17% exporta ambas presentaciones, pellet doméstico e industrial (Figura 51).

Ninguna empresa recibe subvenciones a la producción, sin embargo, han recibido para el establecimiento y puesta en marcha de las plantas. El 60% de las fábricas obtuvieron ayuda económica, los montos fueron variables, representando hasta el 60% de la inversión total inicial.

La administración española o europea, para la creación y puesta en marcha de la planta.

4.4 Análisis FODA para España

Con los resultados de la encuesta se obtuvo el diagnóstico de la situación actual de la producción y comercialización del pellet en España, se plantean estrategias usando las fortalezas y aprovechando las oportunidades del panorama del pellet.

Cuadro 20. Análisis Fortaleza-Oportunidad de la producción de pellet en España.

Análisis FO			
No.	Fortaleza	Oportunidad	Estrategia
	El pellet tiene elevada demanda.	Mercado nacional de pellet doméstico emergente.	Nuevos canales de marketing, para que el mercado consumidor conozca la existencia y beneficios del uso del pellet.
	Es de menor coste comparado con los combustibles fósiles, hasta 40% más bajo. Su uso no depende de la volatilidad de precios de los combustibles fósiles.	En España domina la producción de pellet doméstico, la producción de pellet industrial se hace en muy baja escala.	Se puede gestionar la exportación de pellet industrial hacia Inglaterra que está cambiando la infraestructura de su industria para el uso de biomasa.
	Apoyo económico de la unión europea con un determinado porcentaje para la instalación de las plantas productoras.	Hay oportunidad de expansión hacia el mercado extranjero, hacia países europeos y resto del mundo.	Gestionar la exportación a mercados asiáticos e ingleses, ya que Inglaterra es el principal consumidor a nivel mundial.
	Tiene un poder calorífico más elevado que la astilla, es fácil de manipular y almacenar.	Sustitución gradual de los derivados del petróleo como el combustóleo usado para producir calor y electricidad.	Mayor divulgación sobre los beneficios del uso del pellet contra el uso de los combustibles fósiles, haciendo énfasis en que el uso del pellet es más económico.
	Es un recurso renovable y menos contaminante que los combustibles fósiles, su uso es más seguro, las emisiones de CO ₂ son neutrales. Las cenizas que se producen no son tóxicas.	La certificación del pellet garantiza y da seguridad al cliente de la buena calidad del producto para su consumo.	Inclusión de las ventajas del uso del pellet certificado en el plan de marketing.
	Reduce la dependencia energética de los combustibles fósiles.	Se aprovechan los residuos de madera de la industria y del bosque, reduciendo el riesgo de incendios forestales.	

También se presentan las estrategias, con el fin de minimizar la debilidad y evitar la amenaza (Cuadro 21).

Cuadro 21. Análisis debilidad-amenaza de la producción de pellet en España

Análisis DA			
No.	Debilidad	Amenaza	Estrategia
1.	Inversión inicial Elevada.	Competencia con otras clases de biomasa de menor precio como el hueso de aceituna y cascara de almendra	El pellet tiene la ventaja de no ser corrosivo para las calderas, a diferencia de los materiales con los que compite, esto se puede incluir al plan de marketing.
2.	Parte del posible mercado consumidor de pellet no tiene conocimiento de las ventajas de su uso.	Competencias con otros combustibles, principalmente los fósiles.	Incluir en el plan de marketing las ventajas ambientales y económicas del uso del pellet
3.	Mayor exigencia de pellet certificado.		La gestión de la certificación del pellet, garantiza la calidad del producto. El tipo de certificadora a usar depende del mercado consumidor. La certificadora ENPLUS es la más reconocida en la unión europea por European Pellet Council (EPC). La certificadora DINPLUS está basada en las normas de la industria alemana, por su origen alemán. Se usa también por productores de Francia, Bélgica y Suiza.
4.	Costes de transporte elevado y altos costes de producción del pellet	Competencia con otros países productores de la unión europea y América de Norte	Aumentar la eficiencia en las empresas con la gestión de inventarios, para evitar almacenar la producción por largo tiempo, gestionar los cobros y pagos, analizar el proceso y actividades administrativas para evitar desperdicios de tiempo e insumos. Para tener una producción ajustada.
5.	Fallos en la maquinaria y altos costes de reparación.		Llevar un programa de mantenimiento preventivo de la maquinaria, con revisiones periódicas.
6.	Dificultades en el abastecimiento de la materia prima.		Se debe establecer bajo parámetros muy específicos la ubicación precisa de la industria, que cuente con buenas vías de comunicación por carretera, cercana a los asentamientos urbanos para la distribución del pellet.
7.	En inviernos cálidos la demanda de pellet disminuye.		
8.	Precio de venta del pellet, bajo.		

4.5 Análisis de comparativo de oferta de energéticos de México-España

Combustibles fósiles

En México debido a los subsidios y tradición petrolera, existe una preferencia económica y cultural por los combustibles fósiles sobre los biocombustibles. Principalmente porque son más accesibles al ser México un país petrolero.

En México para la generación de energía térmica en la industria, generalmente se usa combustóleo y gas licuado, ambos son de poder calorífico elevado superior a las 10 000 kcal/kg. Por otro lado, en España para la calefacción doméstica se usa Gasoil o diesel y para las plantas térmicas de producción eléctrica se utiliza carbón mineral, el gasoil tiene un poder calorífico inferior al combustóleo de México, este último al ser de uso industrial genera mayor porcentaje de impurezas durante su combustión. Los precios de estos combustibles presentan una diferencia marcada en precio entre España y México.

Cuadro 22. Precios de los combustibles fósiles usados en España y México para energía térmica

Actividad	Poder calorífico Kcal/Kg	Precio México	Precio España
Gasoil calefacción o diesel (litro)	8800	0,671 €/litro	0.790 €/litro
Carbón mineral (Plantas térmicas de producción eléctrica)	7300	-----	951.86 €/t
Combustóleo	10038	0,164 €/litro	-----
Gas licuado	10938	0,725 €/kg	-----

Fuente: Elaboración con datos revisión bibliografía, tipo de cambio (28 mayo de 2016)
1 Eur= 20,5097 mxn; (a precios corrientes del año 2016).

Biocombustibles

En México existe una gran tradición de consumo de biocombustibles, pero no es a nivel industrial, se usa en áreas rurales, marginadas y de extrema pobreza. En esos lugares la leña juega uno de los papeles más importantes como combustible para estufas. Se estima que más de 23 millones de habitantes la emplean para la cocción de alimentos, calefacción e iluminación (Alatorre, 2015).

Existen algunos restaurantes tradicionales que emplean la leña y carbón como combustible para la preparación y comercialización de alimentos. Para estos casos en México a través de páginas electrónicas, se está implementando la comercialización de pellet de madera confiriéndole ciertas características que incrementan su valor. Como la producción de pellet con sabores característicos para la cocción de alimentos, por ejemplo, el pellet color negro con sabor a whiskey para la producción de alimentos en los hogares (Figura 52).



Figura 52. Pellet de madera con sabor a whiskey, una libra con un precio de 49.6 euros. Fuente: mercado libre.com

El uso en la industria como fuente de energía para calderas aún es poco común, esto debido a la baja conciencia ambiental que existe en México y al bajo costo de los combustibles fósiles, los cuales dejan fuera de mercado a los biocombustibles, principalmente por los elevados costos de transporte y elaboración de materias primas, pues la recolección de residuos requiere un elevado costo de mano de obra y los precios no son atractivos para incentivar el uso de estos.

Existen algunos intentos por parte de la iniciativa privada para iniciar el reemplazo de combustibles fósiles por biocombustibles, sin embargo, la demanda aún es poca y la oferta aún menor y a precios poco competitivos, a pesar de que en México existen las condiciones necesarias para poder iniciar el cambio de forma casi inmediata.

Actualmente no existen en México plantas de producción de pellets de madera, solo hay empresas comercializadoras que importan el pellet de Norte América y abastecen la pequeña demanda nacional, la cual es principalmente industrial. En México el pellet no se usaría para calefacción de los hogares como en España, porque las condiciones climatológicas son completamente diferentes, predomina el clima tropical y templado, por lo tanto, la demanda para consumo en los hogares sería nula o baja. Y los hogares que consumen leña tienen poca capacidad adquisitiva a diferencia de España. En México hasta el momento no se ha concretado el establecimiento de industrias para producir pellet.

4.6 Producción actual de Pellet, posibilidades de producción y abastecimiento en México.

Fuentes de Materia Prima

En México existen diversas fuentes de materia prima, tanto agrícolas como forestales. En el ciclo 2015-2016 se estima que se cosecharán casi 800 mil ha de caña de azúcar, de las que se puede obtener una cantidad considerable de bagazo de caña que llegará a más de 35 millones de toneladas, de las cuales el mayor porcentaje es consumido por los mismos ingenios azucareros y algunas industrias aledañas como la industria de la construcción, que la utiliza sin procesamiento alguno, únicamente con secado al aire libre (Suárez, 2009).

Otras fuentes alternas de energía son los aprovechamientos de frutales y hule, cuando los árboles que han cumplido su ciclo productivo son eliminados, sin embargo, la preferencia de industrialización de estas materias primas es para la elaboración de embalajes (cajas y tarimas). Lo cual nos deja sólo con los residuos de aserraderos, que muchas veces son empleados como fuente de leña por restaurantes de la región, alimentación de las calderas de secado de madera o bien para habitantes de la región.

En México se aprovechan en promedio un total de 8 millones de metros cúbicos de madera, como el coeficiente de aserrío en México es de alrededor de 0.5%, significa que aproximadamente el 50% serán desperdicios susceptibles a ser transformados en pellet, lo que representa un estimado de 4 millones de toneladas (Orta y Juárez, 2000).

Las fuentes de obtención de materias primas para la producción de pellet en México son abundantes y se estima que en conjunto con la materia prima agrícola y forestal se puede tener acceso a más de 40 millones de toneladas, la mayoría con origen en las actividades agrícolas, principalmente la caña de azúcar.

Costes de Abastecimiento

El costo de transporte en México oscila en los 60-70 centavos por tonelada/kilometro cuando se desplaza más de 500 km y de 1.20 a 1.50 cuando se desplaza menos de 100 Km, lo cual hace que los costos de transporte sean una barrera económica para poder transportar los residuos, ya que estos ocupan demasiado espacio y es complicada la carga y descarga (Transporte. Mx, s/f). Por tanto, se recomienda que las acciones de transformación sean cerca de los puntos de aprovechamiento a no más de 100 km

Para el caso de España el coste de transporte es mucho mayor de 8 € euros/tonelada/ km, en un radio no mayor a 100 km.

Respecto a la mano de obra los costes en México son mucho menores, pues el salario mínimo en 2016 está fijado en \$73.04/día mientras que en España es de \$451.56/día, lo cual representa más de 6 veces de diferencia, esto hace atractiva la producción en México, dado que una de las principales preocupaciones es el uso intensivo de mano de obra y su costo (Servicio de Administración Tributaria y El país).

Para el caso de la energía eléctrica el coste en México es mucho menor, pues mientras que en España se encuentra en \$1.902/kWh en México es de \$1.3618/kWh, que representa aproximadamente un 30% menos (Comisión Federal de Electricidad y Red Eléctrica de España).

Potencial de Mercado de la Producción de Pellets de México-España.

- Mercado Nacional
- 1. Pellet Industrial

Hasta el momento México no reporta consumo confirmado de pellets de forma industrial, pues existen alternativas bioenergéticas de bajo coste que permiten sustituir el consumo de combustibles fósiles, empleando principalmente astilla de madera, residuos de aserraderos y bagazo de caña. Aunque el consumo para la generación de calor para la industria es abastecido principalmente por el combustóleo.

Para el desarrollo y adopción de estas tecnologías en la industria mexicana se requerirá primero un abasto constante y una gran difusión de los beneficios operativos que tiene el pellet, además de que tiene que ser competitivo económicamente a las alternativas actuales.

En México las alternativas de biocombustibles para combustión directa son la astilla de madera y el bagazo de caña. El precio de la astilla de madera es 50% más bajo comparado con el precio de España.

El bagazo de caña es más económico, oscila entre 7 €/t. Sin embargo, estos dos productos son la materia prima para la producción de pellet de madera, considerando que el pellet de madera tiene un poder calorífico más elevado.

En España en calderas industriales se usa también hueso de aceituna, es más económico que el pellet, pero es altamente corrosivo por su contenido de aceite, en México no se produce aceituna en gran escala para que sea rentable su uso como biocombustible.

Cuadro 23. Precios de los tipos de biomasa usados en España y México (a precios corrientes del año 2016).

Materia prima	Poder calorífico Kcal/Kg	Precio México	Precio España
Hueso de aceituna	4600	-----	152.53 €/t
Pellet de madera	4600	-----	229.87 €/t
Astilla de madera	3.200	53.64 €/t	110.17 €/t
Bagazo de caña	4120	7.313 €/t	

Fuente: Elaboración con datos obtenidos de industrias mexicanas y españolas, Tipo de cambio (28 mayo de 2016) 1 Eur= 20,5097 mxn

2. Pellet Doméstico

El pellet doméstico, al igual que el pellet industrial no se consume en México, en primer lugar, por la cultura generalizada del uso de leña como fuente de calor y también no se tiene la cultura de utilizar calderas dentro de los hogares, aunado a que sólo la región norte del país es la que presenta climas con fríos extremos, y con pocas probabilidades de nevada, por tanto, hace que sea poco atractivo el consumo de bioenergéticos de uso doméstico como el pellet.

En este segmento se destaca que existe una barrera cultural de uso de leña, que además sólo tiene costo de recolección en la mayoría de los casos, la cual tendrá que ser superada con gran dificultad, porque tiene implicaciones culturales y económicas ya mencionadas.

- Mercado Internacional

El mercado más atractivo para la producción nacional potencial para México será el internacional, abasteciendo a los principales mercados consumidores y que se prevé van a tener crecimiento en su consumo, que son Europa, Estados Unidos, China y Japón. Ya que han tenido crecimientos en su consumo de 2010 a 2015 mayor al 18% anual, pasando de 16 a 37 millones de toneladas anuales (Granath ,2015).

Las proyecciones a 2020 prevén un crecimiento de 9.8% anual estimando el consumo global de pellet en 59 millones de toneladas, dónde la unión europea tendrá crecimientos de 7.8% anual y Estados Unidos de 8.4%, mientras que China y Japón comenzarán el consumo (SERRAGO, 2013 y Ordoñez, s/f).

México se situación geográfica en una posición estratégica para atender la demanda mundial al contar con la materia prima para la producción de pellet, así como mano de obra accesible (Cuadro 24).

Cuadro 24. Análisis FODA, para la producción de pellet en México.

Oportunidades y Fortalezas para la producción de Pellets en México.
1. Ubicación geográfica para acceder al mercado internacional 2. Posible desarrollo de consumo y producción de pellet en México 3. Mano de obra, combustibles y materias primas a menor costo
Amenazas y Debilidades para la producción de Pellets en México.
1. Que las áreas certificadas no tengan interés en invertir o usar sus materias primas para producción de pellet 2. Falta de tecnología y conocimiento para la producción de pellet 3. Ausencia de mercado y producción de pellet
Estrategias para Promover la Producción de Pellet en México.
1. Subsidios para promover el establecimiento de plantas productoras de pellet 2. Campañas de aprovechamiento integral de residuos en áreas certificadas por la FSC 3. Desarrollo de mercado nacional con campañas publicitarias de conciencia 4. Facilidades de crédito para inversión en proyectos de producción de pellet

Fuente: Elaboración con datos de encuestas y revisión bibliográfica.

4.7 Legislación para la producción de pellet México-España

Certificación

En México la certificación que se tiene es la promovida por la FSC, la PEFC no tiene ningún valor dentro del territorio nacional dado que es una regulación específica de España.

A la fecha se cuenta con un potencial de superficie certificada de 704,799 h., la cual es susceptible de aprovechamiento de residuos forestales para la producción de pellets integrando ésta en la producción local de la industria forestal.

Legislación Fiscal

De acuerdo a la miscelánea fiscal vigente la producción de pellets de madera causa un 16% de Impuesto al Valor Agregado (IVA), tanto para el producto terminado como para la materia prima que se emplee para su producción, exceptuando aquellas materias primas provenientes de aprovechamientos agrícolas pues estas tienen una tasa de 0%, al igual que la madera proveniente de aprovechamientos forestales y de frutales, siempre y cuando no tenga algún proceso de dimensionado o escuadría previo al proceso, esto mismo no le aplica a los desechos provenientes de los procesos mencionados.

Cuando se trabaje con materias primas rollizas se tendrá la ventaja de que al adquirirlas no se tendrá que pagar IVA, sin embargo, tampoco se podrá deducir, pues al momento de vender se tendrá que cobrar el IVA y pagarlo integró al SHCP, además de que esto causará un encarecimiento de la producción en un 16% por este concepto.

Lo anterior es un caso contrario a lo que se presenta en España, pues en este país se presenta el IVA en las materias primas y no en el pellet, por tanto, se tiene un encarecimiento en la adquisición de estas. Como recomendación general sería un gran logro para incentivar el consumo de estos productos considerar cambios en la miscelánea fiscal, a fin de evitar el IVA y poner en un precio más atractivo a estos materiales respecto a los combustibles fósiles, o bien generar estrategias de deducción de impuestos por el uso de estos combustibles amigables con el ambiente para poder incentivar de forma significativa su uso.

Legislación arancelaria

Los pellets de madera se encuentran clasificados en el apartado 44-01-39-99, dónde se considera a los desperdicios de madera incluso aglomerados.

Cuadro 25. Clasificación del pellet de madera

Datos de Clasificación	
Código	Nomenclatura
44	Madera, carbón vegetal y manufacturas de madera.
4401	Leña; madera en plaquitas o partículas; aserrín, desperdicios y desechos, de madera, incluso aglomerados en leños, briquetas, bolitas o formas similares.
440139	Aserrín, desperdicios y desechos, de madera, incluso aglomerados en leños, briquetas, "pellets" de madera o formas similares: -- Los demás.
44013999	Los demás.

Fuente: Confederación Latinoamericana de Agentes Aduanales, A. C.

Debido a los tratados de libre comercio que México ha realizado con otros países, la mayoría de ellos se encuentran exentos del Impuesto General de Importación (IGI), y del impuesto General de Exportación (IGE) respecto a la comercialización de pellets de madera producidos o importados a México, tanto

para comercio nacional como exterior; aunque no se encuentra exento del IVA a la tasa del 16%.

Esta exención de impuestos permitirá tener acceso a los mercados internacionales sin encarecer el producto, y a su vez no encarecer las importaciones de pellet, que pueden requerirse para el desarrollo del mercado nacional en las primeras etapas de producción en México. Pero también existe la ventaja del crecimiento de la demanda, se puede importar a estados unidos y Canadá que son países productores y consumidores.

En conclusión, los desperdicios de la industria forestal, la madera de plantaciones y la astilla de madera que se ha venido produciendo en los últimos años en México son posible fuente de materia prima para la producción de pellet de madera. Material se puede destinar para consumo industrial.

Por otro lado, las especies analizadas en el análisis de laboratorio son una opción para el establecimiento de plantaciones con fines energéticos.

El modelo de oferta permitió conocer las variables que tienen más influencia en la producción de la astilla de madera a nivel nacional, lo que en años próximos puede ayudar a la toma de decisiones para su uso como materia prima para biomasa sólida.

El estudio de España permitió tener un panorama más claro sobre la transformación de la astilla de madera a pellet, que tienen más ventajas respecto a su uso, sin embargo, requiere inicialmente de una inversión elevada, misma que en México puede ser subsidiada por el gobierno, sin embargo, las políticas actuales se enfocan a la producción de petróleo. Pero esta es una posible alternativa, cuando la producción de petróleo vaya declinando.

En México solo se usa la madera y astilla para biomasa en la industria de forma directa, es conveniente buscar otras alternativas que le confieran más valor energético y económico a este material. Transformar estos materiales a pellet de madera es una alternativa para seguir aprovechando la biomasa para combustión directa, pero con mayores ventajas energéticas, además que con este tipo de transformación se pueden aprovechar también los desperdicios de la industria de la madera de primera y segunda transformación.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se espera que en los años próximos el consumo de pellet de madera continúe creciendo, debido a la preocupación sobre el cambio climático que ha sido impulsado por el protocolo de Kioto, principalmente en los países de la unión europea, tal es el caso de España que su producción de pellet ha sido muy notoria desde el año 2010.

El uso de pellet de madera en España es más económico que el combustóleo de calefacción. Sin embargo, es necesaria mayor difusión sobre la existencia, uso, ventajas ambientales y económicas de ésta biomasa hacia el mercado consumidor.

En España la inversión inicial para el establecimiento de una planta productora de pellet se encuentra entre uno y dos millones de euros, pero la Unión Europea ha llegado a otorgar subsidios que cubren cierto porcentaje del establecimiento.

El mercado español produce principalmente pellet doméstico, por lo tanto, cuando existen inviernos cálidos, la demanda disminuye. Tiene la posibilidad de enfocar la producción hacia pellet industrial principalmente para exportación a otros países europeos, porque en España en la industria de calderas utilizan hueso de aceituna.

El pellet de madera es considerado como un bien complementario, es decir aún no existe gran impacto en su consumo en España, al mercado consumidor no le afecta económicamente si deja de consumir pellet, es indiferente, ya que hay preferencia hacia el combustible fósil.

En México a diferencia de España los costes de inversión para el establecimiento de plantas de pellet son más bajos, al ser la materia prima, mano de obra y transporte más económicos.

México también tiene la posibilidad de producir pellet para exportación por ser vecino de Estados Unidos que se encuentra dentro de los principales países productores y consumidores. Pero también existe la alternativa de exportar a Inglaterra que a nivel mundial es el primer consumidor de pellet para la industria.

Los residuos agrícolas son una opción de materia prima para pellet, en España se usa en porcentajes muy bajos debido al riguroso control de calidad, en México

se puede usar esta materia prima, como el bagazo de caña, porque se propone la producción de pellet industrial. A diferencia de España, México no requiere calefacción para sus hogares y el control de calidad para el pellet industrial sería menos riguroso comparado con el pellet doméstico.

México tiene tres principales fuentes de suministro de materia prima para producir pellet, que es madera de plantaciones forestales de especies de eucalipto y acacia (que son las maderas que producen mayor poder calorífico anual de acuerdo a este estudio); la astilla de madera que se usa como leña en la industria y para celulosa; y los residuos de la industria forestal.

Sin embargo, para que el establecimiento de las plantas sea eficiente tanto en ambos países se deben de instalar a una distancia de la materia prima de 100 km a la redonda.

Las variables que más afectan la oferta de astilla de madera en México son la tasa de interés anual, el valor del consumo del diesel y el salario mínimo general, variables que tienen que ver con los insumos para su producción. También influye el consumo y producción de combustóleo, que son los bienes sustitutos de la biomasa, estas variables son elásticas al ser más sensibles a la oferta de astilla de madera.

La astilla de madera actúa como un bien complementario, ya que se consume, pero en bajos porcentajes, existe preferencia por el consumo del combustóleo. Puede llegar a ser un bien sustituto en un largo plazo actuando como materia prima para la producción de pellet de madera, y con la implementación de políticas para su difusión y promoción de su uso en la industria.

LITERATURA CITADA

- Adams, D.M., Haynes, R.W. 1989. A Model of National Forest Timber Supply and Stumpage Markets in the Western United States. *Forest Science*, 35(2), 401-424.
- Agostinho D., Otomar B., Sanquetta C., Behling A., Schmidt D., Bamberg R., Eloy E. y Dalla A. P. 2014. Ecuaciones para estimar el poder calorífico de la Madera de cuatro especies de árboles. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. Vol. 20 N.2
- Alatorre, A. 2015. Permanece uso de fogones en comunidades. Periódico Reforma. Disponible en: <http://www.reforma.com/aplicacioneslibre/articulo/default.aspx?id=648503&md5=40eaf2786f126a8b04f15334f589c283&ta=0dfdbac11765226904c16cb9ad1b2efe> [acceso en 29.11.16]
- Alianza Mexicana contra el FRACKING. 2016 ¿Qué es el fracking? Disponible en: <http://nofrackingmexico.org/que-es-el-fracking/> [acceso en 27.11.16]
- Almeida, A., Ângelo, H., Silva J., Caballero B. 2009. Análise econométrica do mercado de madeira em tora para o processamento mecânico no Estado do Paraná. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, v. 37, n. 84, p. 377-386.
- Amandus Kahl Ibérica S.L.² Construcción de máquinas y plantas. Disponible en: <http://www.akahl.es/Prensa.html> [acceso en 29.11.16]
- Amandus Kahl Ibérica S.L. Construcción de máquinas y plantas. Disponible en: <https://www.akahl.de/es/noticias/prensa/> [acceso en 10.06.16]
- Archer, D. y Rahmstore, S. 2010. The climate crisis. Cambridge University Press, U. K. and New York. USA. 3 p.
- Asociación Española de valorización energética de la biomasa²(AVEBIOM). s/f. Observatorio Nacional de Calderas de Biomasa. Disponible en: <http://www.avebiom.org/es/que-hacemos/List/listing/observatorio-nacional-calderas-de-biomasa-152/1> [acceso en 27.11.16]
- Balacco, H. R. 2011. SOBRE ALGUNAS POSIBLES LIMITACIONES DEL ANALISIS ECONOMÈTRICO. Facultad de Ciencias Económicas, Universidad de Cuyo. Argentina. 27 p. Disponible en: http://bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/4058/balaccoeconometria.pdf [acceso en 09.11.16]

- Blas, M. 2012. Comportamiento de cenizas y su impacto en sistemas de combustión de biomasa. Memoria de Trabajos de Difusión Científica y Técnica, núm. 10 (2012): 69. p 69-82. Disponible en: http://www.um.edu.uy/docs/6_comportamiento_de_cenizas_y_suimpacto_en_sistemas_de_%20combustion_de_biomasa.pdf [acceso en 29.11.16]
- British Petroleum. 2013. Statistical Review of World Energy 2013. BP. Disponible en: http://www.bp.com/es_es/spain/prensa/notas-de-prensa/2013.html [acceso en 23.07.14]
- British Petroleum. 2015. Informe mundial sobre mercados energéticos. BP. Disponible en: http://www.bp.com/es_es/spain/prensa/notas-de-prensa/2015/bp-presenta-bp-statistical-review-2015.html [acceso en 08.11.16]
- British Petroleum. 2015. Statistical Review of World Energy 2015. British Petroleum (BP). Disponible en: http://www.bp.com/content/dam/bpcountry/es_es/spain/documents/downloads/PDF/Infografia%20Statistical%20Review%202015.pdf [acceso en 08.11.16]
- British Petroleum. 2015. Statistical Review of World Energy 2015. British Petroleum (BP). Disponible en: http://www.bp.com/es_es/spain/prensa/notas-de-prensa/2015/bp-presenta-bp-statistical-review-2015.html [acceso en 08.11.16]
- Camps, M. y Marcos, F. 2008. Los biocombustibles. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. 382 p.
- Carrasco, J. 1990. Aspectos medioambientales de la producción y uso de biomasa. Junta de castilla y León. CIEMAT. Madrid. 24 p.
- Castro, C., Beltrán, L., Ortiz, J., 2012. Producción de Biodiesel y Bioetanol: ¿Una alternativa sustentable a la crisis energética? Ra Ximhai 8 (3): 93-100
- Cavero, J., Lorenzo, C. y Prieto, M. Curso 2011-2012. Material Docente de Econometría. Universidad de Valladolid. España. 54 p. Disponible en: http://www3.uva.es/econometria-ADE/material_2011-12/Material2_teoria_ADE_11-12.pdf [acceso en 17.10.16]
- Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria (CEDRSSA). s/f. Bioenergéticas en México. 6 p. Disponible en:

- file:///C:/Users/Pc/Downloads/BIO%20Mexico%20estuio%20Sener%20etanol.pdf [acceso en 25.11.14]
- Cervantes, C. G y J. R. Ojeda. 2011. Etanol a partir de agave como una alternativa viable de biocombustibles en México. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 140 p.
- Clickrenovables. Disponible en: <http://www.clickrenovables.com/> [acceso en 10.06.16]
- Comisión Federal de Electricidad. Tarifas para el suministro y venta de energía eléctrica (2015-2016). Disponible en: http://app.cfe.gob.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/Tarifas/tarifas_industria.asp [acceso en 29.11.16]
- Confederación Latinoamericana de Agentes Aduanales, A. C. Normas arancelarias. Disponible en: http://www.aduanas-mexico.com.mx/cgi-bin/ctarnet/ctarnet.exe/creahtml?num_frac=44013999&TF_cca=&jusuario=C LAA [acceso en 14.05.16]
- Curt, D. 2009. Cultivo de caña común (*Arundo donax* L.) para producción de biomasa. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Hojas divulgadoras. Núm. 2129 HD
- Damien, A. 2010. LA BIOMASA: Fundamentos, Tecnologías y Aplicaciones. AMV Ediciones y Mundi-Prensa. Madrid, España. 267p.
- Delacámara G., Azqueta D. 2007. Análisis económico de los costos externos ambientales de la generación de energía eléctrica. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). Santiago de Chile. 109 p
- Delgado, G.C. 2011. Petróleo, medio ambiente, cambio climático y seguridad: Macondo, otra advertencia más. Revista Crítica de Ciencias Sociales y Jurídicas. 30:2.
- Du Melle, F. 1998. The global and urban environment: the need for clean power systems. Journal of Power Sources. 71:7-11
- Ecoosfera. 2016. Senado de México rechaza ley a favor de energías renovables. Disponible en: <http://ecoosfera.com/2016/06/senado-de-mexico-rechaza-ley-a-favor-de-energias-renovables/> [acceso en 25.09.16]
- El cronista. 2016El uso de energías renovables se incrementó un 70% a nivel mundial. Disponible en: <http://www.cronista.com/financialtimes/El-uso-de->

- energias-renovables-se-incremento-un-70-a-nivel-mundial-20160817-0026.html [acceso en 27.11.16]
- El país. Economía: el salario mínimo sube 6.6 euros al mes en 2016, hasta 655 euros al mes. Disponible en: http://economia.elpais.com/economia/2015/12/29/actualidad/1451390924_950140.html [acceso en 29.11.16]
- Energiza. s/f. Biomasa en España. Disponible en: <http://www.energiza.org/biomasa/20-biomasa/938-biomasa-en-espa%C3%B1a> [acceso en 27.11.16]
- ESMAP.2005. Potencial of biofuels for transport in developing countries. The world bank group. Washington.
- EUREC. 2002. The future for renewable energy. Prospects and directions. Edi. EUREC. Londres. 209 p.
- Facultad de Economía. s/f. Introduction to econometrics. Universidad Nacional Autónoma de México. 96 p. Disponible en: <http://herzog.economia.unam.mx/profesores/blopez/econometria-intro.pdf> [acceso en 23.09.16]
- Faergestad, I. 2016 Petróleo pesado. 3 p. Disponible en: http://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/defining-series-spanish/Defining_HeavyOil_Jan_2016.ashx [acceso en 27.11.16]
- FAO. 2008. El estado mundial de la agricultura y la alimentación. Biocombustibles: perspectivas, riesgos y oportunidades. FAO, Roma, Italia. 162 p
- Fernández, J. 2009. Cultivo de cardo (*Cynara cardunculus* L.) para producción de biomasa. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Hojas divulgadoras. Núm. 2130 HD
- Fernández, S. 2007. Comportamiento del Consumidor y Estimaciones de demanda de alimentos. Universidad Nacional de Mar del Plata. Argentina. 69 p. Disponible en: <http://nulan.mdp.edu.ar/1384/1/01223.pdf> [acceso en 16.11.16]
- Fernández-González, J.1997. La biomasa como energía alternativa para reducir el CO2 atmosférico. Real Academia de Ciencias, Academia de Ingeniería, ETSI de Montes. Madrid, España.

FOEX Indexes Ltd. Empresa que presta servicios de autoría e índices de precios de biomasa basados en la madera. Disponible en: <http://www.foex.fi/index.php?page=pix-rcp> [acceso en 12.11.15]

Forbes.2016. 6 riesgos para la economía de México en 2016. Disponible en: <http://www.forbes.com.mx/6-riesgos-para-la-economia-de-mexico-en-2016/#gs.zYfomJI> [acceso en 27.11.16]

Fuentes, M. E., García, A., Zamudio, F. Y Matus, J.A. (2008). Políticas que afectan la competitividad de la producción de madera aserrada en México. *Madera y Bosques*, 14(2), 29-39.

Fuentes, M. E., García, J.A. Y Hernández, J. 2006. Factores que afectan el mercado de madera aserrada de pino en México. *Madera y Bosques*, 12(2), 17-28.

Gallego, J. L. Curso 2008-2009. Apuntes de Econometría. Departamento de Economía, Universidad de Cantabria. España. 12 p. Disponible en: <http://ocw.unican.es/ciencias-sociales-y-juridicas/econometria/econometria/apuntes/tema9.pdf> [acceso en 12.08.16]

García, M. 2011. El sector de las energías renovables en México. Junta de Andalucía, Agencia Andaluza de Promoción Exterior. México, D.F. 56 p

García, S. 2015. Reservas Mundiales de Petróleo en Aumento al Final del año 2014. Disponible en: <http://www.nejasayoil.com/2015/06/reservas-mundiales-de-petroleo-en.html> [acceso en 07.11.16]

Garrido, H. 2016. Las 5 causas y 10 efectos de la crisis del petróleo: ¿quién gana, quién pierde y cómo nos afecta? . 20 minutos, noticias. Disponible en: <http://www.20minutos.es/noticia/2653191/0/causas-efectos/crisis-petroleo-barato/perjudicados-beneficiados/> [acceso en 27.11.16]

Grupo Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático (IPCC). 2011. Fuentes de energía renovables y mitigación del cambio climático. Organización Meteorológica Mundial (OMM) y Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). 242 p

Gujarati, D. N. 2003. Econometría. Mc Graw Hill. México, D.F. 972 p.

Henan Kingman M&E Complete Plant Co., Ltd Disponible en: <http://www.plantaspeletizadoras.com/planta-de-peletizado.html> [acceso en http://www.revista-mm.com/ediciones/rev83/insumo_pellets.pdf [acceso en 29.11.16]

- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) Dirección de Energías Renovables. 2015. Informe de precios de la biomasa para usos térmicos. Disponible en: http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_Informe_Precios_Biomasa_Usos_T3rmicos_3T_2015_v1_0b172fba.pdf [acceso en 27.11.16]
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) y Observatorio Tecnológico de Calor y Frio. 2012. Biomasa y residuos. IDEA y Ministerio de Industria Turismo y Comercio. España. 40 p. Disponible en: http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_Calor_y_Frio_Renovables_Biomasa_11012012_global_v2_09570f12.pdf [acceso en 16.05.16]
- Jara, W. 2016. Introducción a las Energías Renovables No Convencionales (ERNC). Empresa Nacional de Electricidad S.A., Endesa, Chile. 85 p
- Jebaraj, S., & Iniyar, S. (2006). A review of energy models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 10(4), 281–311. doi:10.1016/j.rser.2004.09.004
- Jiménez, E. 2013. El modelo de regresión simple: estimación y propiedades. Universidad de Valencia. España. 49 p. Disponible en: <http://www.uv.es/uriel/2%20El%20modelo%20de%20regresion%20lineal%20simple%20estimacion%20y%20propiedades.pdf> [acceso en 17.10.16]
- Lemenih, M., Bekele T. 2004. Effect of age on calorific value and some mechanical properties of three Eucalyptus species grown in Ethiopia. *Biomass and Bioenergy* 27 (2004): 223-232
- Lozano, W. 2013. Energías renovables. Secretaría de Economía. México, D.F. 35 p
- Marcillo, G. y López, L.E. 2012. Estimación de las funciones de oferta y demanda de la papa en la ciudad de Pasto, 1999-2010. *Revista de la Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas. Universidad de Nariño*. Vol. XIII. No.2-2do. Semestre 2012, Julio-diciembre-Paginas 84-102.
- Marcos Martín, F; Izquierdo Osado, M.I.; Ruiz Castellano, J.2000. Cultivos Energéticos de Chopos. *Revista Forestal Española*, Madrid. 26:4-14.
- Méndez, R. y Moliner, R. 2011. Energía sin CO₂, realidad o utopía. CSIC y Edi. CATARATA. España. 267p.
- Ministerio de Educación Política, Social y Deporte. 2008. FUENTES DE ENERGIA PARA EL FUTURO. Secretaría General Técnica. España. 205 p.

- Minnaard, C. 2010. Modelos de regresión lineales y no lineales: su aplicación en problemas de ingeniería. Segundo Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica. Páginas 20-29. Disponible en: <http://www.soarem.org.ar/Documentos/50%20Minaard.pdf> [acceso en 04.09.16]
- Moreira, G. (2012). Determinantes do Preço da Madeira para Produção de Celulose no Brasil. Brasília: Universidade de Brasília. 491-498
- Muñoz, R., R. Ortega, L. Acosta y R. González. 2010. Biocombustibles en Chile. II Evaluación económica de la elaboración de biocombustibles. Agrociencia 44 (7): 849-859.
- Noticias Universia. 2016. Historia y situación actual del petróleo en México. Disponible en: <http://noticias.universia.net.mx/cultura/noticia/2016/03/18/1137477/historia-actualidad-petroleo-mexico.html> [acceso en 27.11.16]
- Núñez C. 2007. Relaciones de conversión entre densidad básica y densidad seca de madera. Revista ciencia tecnológica, 9:44-50.
- OCDE/FAO.2013.OCDE-FAO Perspectivas Agrícolas 2013-2022, Texcoco, Estado de México, Universidad Autónoma Chapingo. 335 p. Disponible en: http://dx.doi.org/10.1787/agr_outlook-2013-es [acceso en 02.02.15]
- OECD.2012. The economics of climate change mitigation. Organization for Economic Co-operation and Development. 301p.
- Ordóñez, J.L. s/f. Pellets: energía limpia con buen futuro. 10 p. Disponible en: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). 2009. La agricultura mundial en la perspectiva del año 2050. FAO. 4 p. Disponible en: http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/Issues_papers/Issues_papers_SP/La_agricultura_mundial.pdf [acceso en 27.11.16]
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). 2014. La producción maderera mundial crece por cuarto año consecutivo. Disponible en: <http://www.fao.org/news/story/es/item/273212/icode/> [acceso en 16.05.16]
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos-Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación (FAO). 2014. Estadísticas de

- productos forestales: 2014 Datos y cifras globales de productos forestales. 16 p. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-i5539s.pdf>. [acceso en 25.11.16]
- Orta, V. R. y Juárez, P. 2000. Cuantificación y clasificación de desperdicios generados en la industria de aserrío de la región de bosque modelo Chihuahua. México. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. 21 p.
- Páez, A. 2005. Hacia una agenda del agotamiento del petróleo: Sostenibilidad, la construcción internacional de problemas y el Protocolo de Uppsala. Revista Theomai. Estudios sobre Sociedad, Naturaleza y Desarrollo. No.12. 15 p.
- Paralibros. s/f. El descubrimiento del petróleo y los barones de la industria. [http://www. Disponible en: paralibros.com/tm190/p19-tec/drenerpe09.htm](http://www.paralibros.com/tm190/p19-tec/drenerpe09.htm) [acceso en 27.11.16]
- Parr. s/f. Operating Instruction Manual, Isoperibol Bomb Calorimeter 1266. Parr.
- Perez A. y García, E. 2013. Energía Alterna y Biocombustibles. Innovación e investigación para un desarrollo sustentable. Biblioteca Básica de Agricultura (bba). México. 208 p.
- PérezBolde M., O. 2009. Factibilidad financiera en la producción de bioenergía, un estudio de caso en el estado de Tabasco. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 149p.
- Petróleos Mexicanos (PEMEX). 2014. Reservas de hidrocarburos al 1 de enero de 2014. Petróleos mexicanos. 21 p. página web disponible en: http://www.pemex.com/ri/Publicaciones/Reservas%20de%20Hidrocarburos%20Archivos/20140101_r_h_e.pdf [acceso en 12.11.15]
- Petróleos Mexicanos (PEMEX). 2015. Reservas de hidrocarburos al 1 de enero de 2015. Petróleos mexicanos. México. 21 p. Disponible en: http://www.pemex.com/ri/Publicaciones/Reservas%20de%20Hidrocarburos%20Archivos/20150909%20Reservas%20al%201%20de%20enero%202015_e.pdf [acceso en 24.07.16]
- Plantas de pellet. Disponible en: <https://plantasdepellets.com/> [acceso en 10.06.16]
- Prueba de diferencias de medias o comparaciones múltiples, Colegio de Posgraduados, México. Disponible en; Marques M. 2003. Disponible en: <http://colposfesgaleon.com/disenos/teoria/cap13bmj/cap13bmj.htm> [acceso en 08.04.15]

- Quispe, R. s/f. Técnicas estadísticas de predicción, disponible en: <http://renanquispellanos.com/recursos/Aporte%20Intelectual/Tecnicas%20Prediccion/> [acceso en 25.09.16]
- Ramos, D. G. 2011. Petróleo, medio ambiente, cambio climático y seguridad: Macondo, otra advertencia más. Nómadas. Revista Crítica de Ciencias Sociales y Jurídicas. 30 (2)
- Red Eléctrica de España. Disponible en: <http://www.ree.es/es/> [acceso en 29.11.16]
- RETEMA. 2014. El consume de biomasa para el uso térmico en España se dispara en tres años hasta las 380000 toneladas. Revista Técnico de Medio Ambiente. Disponible en: <http://www.retema.es/noticia/el-consumo-de-biomasa-para-uso-trmico-en-espaa-se-dispara-en-tres-aos-hasta-las-380000-toneladas> [acceso en 16.05.16]
- Rojo, J.M. 200. Regresión Lineal Múltiple. Instituto de Economía y Geografía. Madrid. 31 p. Disponible en: http://humanidades.cchs.csic.es/cchs/web_UAE/tutoriales/PDF/Regresion_lineal_multiple_3.pdf [acceso en 24.10.16]
- Russi, D. 2007. Los agrocombustibles: una solución para muchos problemas o muchos problemas sin solución. Cuaderno de debate internacional: Ecología política. N. 34.35-46
- Schallenberg, J., Piernavieja, G., Hernández, C., Unamunzaga, P., García, R., Díaz, M., Cabrera, D., Gilberto M., Pardilla, J. y Subiela, V. 2008. Energías renovables y eficiencia energética. Instituto Tecnológico de Canarias, S.A.
- SENER-BID- GTZ.2006. Pontenciales y viabilidad del uso de Bioetanol y Biodiesel para el transporte en México. SENER-BID- GTZ, 600p.
- SERRAGO CONSULTORES. 2013. Situación actual de demanda de energía a partir de la biomasa. SERRAGO CONSULTORES. 38 p. Disponible en: <file:///C:/Users/Pc/Downloads/4.%202013%2005%2005%20Infor%20VM.pdf> / [acceso en 29.11.16]
- Servicio de Administración Tributaria. Salarios mínimos 2016. Disponible en: http://www.sat.gob.mx/informacion_fiscal/tablas_indicadores/Paginas/salarios_minimos.aspx [acceso en 29.11.16]
- Sociedad Internacional de Forestales Tropicales. 2009. Manejo de plantaciones de la teca para productos sólidos. ISTF NOTICIAS. Disponible en:

- http://www.istf-bethesda.org/specialreports/teca_teak/teca.pdf [acceso en 01.04.15]
- Soluciones Bioenergéticas Integrales. Norma EN 14961-2 "Biocombustibles sólidos. Disponible en: http://www.sbi.cat/documentos/Comparativa_Norma_DIN_Plus.pdf [acceso en 27.11.16]
- Souza, C.R., Rossi, B.M., Azevedo, C.P., Lima, B.R.M. 2004. Comportamento da *Acacia mangium* e de clones de *Eucalyptus grandis* x *E. Urophylla* em plantios experimentais na Amazônia Central. *SCIENTIA FORESTALIS*, 65:95-101
- Suárez, V. 2009. ¿Comestibles o combustibles en la agricultura mexicana? Periódico la jornada del campo. Disponible en: <http://www.jornada.unam.mx/2009/06/18/mexico.html> [acceso en 29.11.16]
- Tao, L. y Aden, A. 2009. The economics of current and future biofuels. *In Vitro Cellular and Developmental Biology – Plant*. 45: 199-217.
- Telmo C., Lousada J. y Moreira N. Proximate analysis, backwards stepwise regression between gross caloric value, ultimate and chemical analysis of wood. *Bioresource Technology* 101 (2010): 3808-3815
- Toro, P., García, A., Aguilar, C., Acero, R., Perea, J. y Vera, R. s/f. Modelos Econométricos para el desarrollo de funciones de producción. Universidad de Córdoba. España. 59 p.
- Transporte. Mx. Como calcular la tarifa de autotransporte de carga. Disponible en: <http://www.transporte.mx/como-calculas-tarifas-de-autotransporte-de-carga/> [acceso en 29.11.16]
- Universidad Nacional de Colombia, Teca. Medellin, Colombia. Disponible en: <http://www.unalmed.edu.co/~lpforest/PDF/Teca.pdf> [acceso en 15.12.14]
- Valle, A. (2014). 3ª Fira de Biomassa Forestal de Catalunya. Clúster de biomasa de Catalunya. 34 p. Disponible en: http://www.firabiomassa.cat/wp-content/uploads/2013/06/20140221_AlvaroValle_CostosExplotacioPellets.pdf [acceso en 10.01.16]
- Varian, H. R. 2006. Microeconomía intermedia. Antoni Bosch editor. España. 789 p.

- Venelogia. 2013. Reservas probadas de petróleo a nivel mundial (informe OPEP). Disponible en: <http://www.venelogia.com/archivos/9714/> [acceso en 27.11.16]
- Weart, S. 2003. The Discovery of Global Warming. Harvard University Press, Cambridge, MA. 240 p.
- Werbos, Paul J. 1990. Econometric Techniques: Theory Versus Practice. Energy, 15 (3), 213-236.

ANEXOS

▪ Anexo 1. Descripción de variables del modelo.

Variable	Descripción
Oferta de Madera Biomasa.	En México la producción de astilla de madera proviene principalmente de madera de coníferas y de plantaciones forestales comerciales, se cuenta con registros de volumen de producción y precios de 34 años, en el modelo se considera la producción promedio anual en miles de m ³ r a nivel nacional. Inicialmente la madera solo provenía de bosque natural, pero a partir del año 2004 se empezó a producir astilla de plantaciones forestales comerciales, información que también se anexo al modelo.
Precio de la Madera para Biomasa.	Es el precio de la astilla de madera, la cual es empleada como principal materia prima para la fabricación de tablero de madera, papel y biocombustibles, y partiendo de los principios de economía, a mayor precio mayor oferta por tanto se espera que se tenga una relación directa, se expresa el precio en m ³ r.
Precio de la Madera en rollo.	Es el precio de la madera para aserrío, que se obtiene de los bosques naturales y se usa como principal materia prima para obtener madera aserrada. Debido a que este producto es un bien sustituto se espera que para el modelo un aumento en el precio disminuya la oferta de la astilla de madera por tener mejores márgenes en la venta de madera para aserrío.
Producción de madera en rollo.	Se considera la producción en miles de m ³ r de este bien sustituto de la madera para biomasa.
Producción de Crudo.	Se refiere a la producción de petróleo crudo a nivel nacional en miles de barriles diarios, se consideró por ser el petróleo el insumo base de todos los sistemas de producción.
Producción de combustóleo.	El combustóleo es un producto derivado del petróleo que se utiliza en la industria de las calderas, es un bien sustituto de la biomasa de madera para la producción de energía en la industria. Se expresa en miles de barriles diarios corresponde a la producción nacional.
Consumo de combustóleo.	Se considera la cantidad en miles de barriles diarios que se destinó como combustible en la industria.
Valor de consumo de combustóleo.	Es el valor anual de su consumo en la industria expresado en millones de pesos.
Precio del combustóleo.	Es el precio del bien sustituto de la biomasa, expresado en pesos por litro.
Precio de la gasolina.	La gasolina al igual que la mano de obra son los principales insumos empleados en el aprovechamiento, sin embargo, es difícil poder decir si tendrá una relación directa o inversa a priori, pues, aunque es indispensable, no es un factor que se demande en grandes cantidades. Se considera el precio anual por litro.
Consumo de la gasolina.	Al no contar con la información específica de consumo en el sector forestal. Se incluyó en el modelo el consumo total de gasolina a nivel nacional.

Valor del consumo de la gasolina.	Es el valor del consumo nacional en millones de pesos anuales.
Precio del diesel.	El diesel es el principal combustible e insumo empleado por las maquinas como tractores y motores en general por el rendimiento que los motores diesel presentan, por tanto, se espera que se tenga una relación inversa, es decir que para un aumento en el precio se espera una reducción en la producción. Así mismo este insumo se relaciona con los costos de transporte pues el principal insumo de los camiones son los combustibles y por tanto el costo de los mismos se relaciona directamente, por tanto, se espera una fuerte relación inversa para esta variable, dado que en México los centros de aprovechamiento y transformación se encuentran alejados entre sí.
Consumo de diesel.	Se considera el consumo de manera general a nivel nacional en miles de barriles diarios.
Valor del consumo de diesel.	Se considera el valor del consumo nacional en millones de nuevos pesos.
Tipo de cambio del dólar. .	Para un país con una economía abierta, el tipo de cambio es crucial e influye en el precio de los insumos de los procesos de producción
Salario mínimo general.	El salario mínimo general es el indicador más empleado para poder estimar los costos de mano de obra, pues la mayoría de las empresas en México toman en cuenta este criterio como base para estimar los rangos de costos por concepto mano de obra y en el caso de la industria forestal se espera que tenga una relación inversa, pues la madera requiere una gran cantidad de mano de obra pues en la actualidad las actividades de aprovechamiento son altamente demandantes de labores manuales debido a la poca tecnología disponible en estas actividades. Por tanto, se espera que el modelo arroje un numero negativo, lo cual indicará que mientras más elevado el costo de mano de obra, menor producción se tendrá.
Tasa de interés real anual.	Se considera la tasa de interés real anual en porcentaje.
Tasa de interés en porcentaje anual.	Se refiere al TIIE en porcentaje a 28 días.
Índice Nacional de Precios al Consumidor.	Se consideró IPC con año base en 2010.

▪ Anexo 2. Matriz de varianza – covarianza del modelo econométrico.

```

> fmGen <- lm(prodstill ~ precastill + prodcrudo + prodcmbustleo +
+           cnsmcmbustleo + valcnsmcmbustleo + precmbustleo +
+           prodmader + precmader + precdiesel + precgasol +
+           consdieseldia + consdiesel + consgasoldia + consgasol +
+           tipcamdolar + tipcamdolar + tasaintreal + TIIE28dias +
+           baseINPC, data = datosdiego)
> summary(fmGen) #obtiene matriz de covarianzas
> vcov(fmGen) # Matriz de varianza – covarianza

```

	(Intercept)	precastill	proderudo	prodembustleo	cusmembustleo	valcsmembustleo	precombustleo	prodmaeder	premaeder	prediesel	pregasol	consdieseldia	consdiesel	consgasoldia	consgasol	tipcamdolar	tasaintreal	TME28dias	baseIVPC
(Intercept)	2.7E+08	3.1E+04	1.2E+04	-1.5E+05	-1.9E+05	1.6E+01	5.1E+06	9.3E+03	-2.0E+04	-2.2E+07	1.7E+07	-1.0E+06	1.4E+03	3.3E+05	-7.9E+02	-5.2E+06	3.0E+05	4.0E+05	-2.7E+05
precastill	3.1E+04	1.6E+01	6.2E+00	-3.9E+01	-1.4E+01	-3.2E-02	5.0E+02	3.1E-01	-2.2E+00	-3.4E+01	1.0E+03	-1.1E+02	2.0E-01	5.4E+01	-1.1E-01	-1.1E+03	1.3E+01	1.1E+02	-2.8E+02
proderudo	1.2E+04	6.2E+00	5.6E+00	-1.2E+01	-2.3E+01	2.2E-02	-2.0E+02	3.2E-01	-2.9E+00	8.7E+02	-5.5E+01	-4.2E+01	1.1E-01	3.1E+01	-7.1E-02	-8.3E+02	6.1E+01	8.3E+01	-2.0E+02
prodembustleo	-1.5E+05	-3.9E+01	-1.2E+01	3.7E+02	-1.6E+02	4.5E-01	-4.5E+03	4.6E+00	-5.4E+00	-1.3E+04	2.6E+03	1.6E+02	5.6E-02	-1.3E+02	3.7E-02	2.3E+03	6.8E+02	-1.0E+02	1.7E+03
cusmembustleo	-1.9E+05	-1.4E+01	-2.3E+01	-1.6E+02	4.8E+02	-6.3E-01	1.4E+02	-1.7E+01	4.0E+01	3.5E+04	-2.5E+04	1.2E+03	-2.1E+00	-3.8E+02	1.1E+00	6.0E+03	-1.2E+03	-7.1E+02	-4.9E+02
valcsmembustleo	1.6E+01	-3.2E-02	2.2E-02	4.5E-01	-6.3E-01	1.6E-03	-1.6E+01	1.3E-02	-4.8E-02	-2.7E+01	1.8E+01	-4.8E-01	1.8E-03	2.5E-01	-1.1E-03	-5.3E+00	2.0E+00	6.7E-01	7.5E-01
precombustleo	5.1E+06	5.0E+02	-2.0E+02	-4.5E+03	1.4E+02	-1.6E+01	4.2E+05	2.8E+02	-8.1E+01	-6.5E+05	4.5E+05	-2.8E+04	1.6E+01	4.2E+03	-6.9E+00	4.6E+03	-1.1E+04	2.9E+03	2.2E+04
prodmaeder	9.3E+03	3.1E-01	3.2E-01	4.6E+00	-1.7E+01	1.3E-02	2.8E+02	9.5E-01	-1.3E+00	-1.7E+03	1.0E+03	-5.9E+01	7.5E-02	1.2E+01	-3.9E-02	-1.5E+02	2.9E+01	2.1E+01	6.4E+01
premaeder	-2.0E+04	-2.2E+00	-2.9E+00	-5.4E+00	4.0E+01	-4.8E-02	-8.1E+01	-1.3E+00	5.5E+00	2.9E+03	-2.3E+03	1.1E+02	-1.7E-01	-3.7E+01	9.7E-02	5.7E+02	-8.3E+01	-7.2E+01	-3.5E+01
prediesel	-2.2E+07	-3.4E+01	8.7E+02	-1.3E+04	3.5E+04	-2.7E+01	-6.5E+05	-1.7E+03	2.9E+03	5.9E+06	-4.2E+06	1.6E+05	-2.3E+02	-4.0E+04	1.1E+02	2.1E+05	-5.1E+04	-5.5E+04	-1.6E+05
pregasol	1.7E+07	1.0E+03	-5.5E+01	2.6E+03	-2.5E+04	1.8E+01	4.5E+05	1.0E+03	-2.3E+03	-4.2E+06	3.6E+06	-1.2E+05	1.8E+02	3.9E+04	-8.8E+01	-2.2E+05	2.4E+04	5.7E+04	2.7E+04
consdieseldia	-1.0E+06	-1.1E+02	-4.2E+01	1.6E+02	1.2E+03	-4.8E-01	-2.8E+04	-5.9E+01	1.1E+02	1.6E+05	-1.2E+05	5.8E+03	-7.9E+00	-1.6E+03	4.0E+00	1.7E+04	-1.5E+03	-2.5E+03	-1.8E+03
consdiesel	1.4E+03	2.0E-01	1.1E-01	5.6E-02	-2.1E+00	1.8E-03	1.6E+01	7.5E-02	-1.7E-01	-2.3E+02	1.8E+02	-7.9E+00	1.4E-02	2.8E+00	-7.6E-03	-3.8E+01	4.1E+00	4.6E+00	-3.7E-01
consgasoldia	3.3E+05	5.4E+01	3.1E+01	-1.3E+02	-3.8E+02	2.5E-01	4.2E+03	1.2E+01	-3.7E+01	-4.0E+04	3.9E+04	-1.6E+03	2.8E+00	6.6E+02	-1.5E+00	-8.5E+03	5.2E+02	1.1E+03	-1.2E+03
consgasol	-7.9E+02	-1.1E-01	-7.1E-02	3.7E-02	1.1E+00	-1.1E-03	-6.9E+00	-3.9E-02	9.7E-02	1.1E+02	-8.8E+01	4.0E+00	-7.6E-03	-1.5E+00	4.1E-03	2.2E+01	-2.5E+00	-2.5E+00	7.2E-01
tipcamdolar	-5.2E+06	-1.1E+03	-8.3E+02	2.3E+03	6.0E+03	-5.3E+00	4.6E+03	-1.5E+02	5.7E+02	2.1E+05	-2.2E+05	1.7E+04	-3.8E+01	-8.5E+03	2.2E+01	2.0E+05	-1.6E+04	-1.6E+04	2.9E+04
tasaintreal	3.0E+05	1.3E+01	6.1E+01	6.8E+02	-1.2E+03	2.0E+00	-1.1E+04	2.9E+01	-8.3E+01	-5.1E+04	2.4E+04	-1.5E+03	4.1E+00	5.2E+02	-2.5E+00	-1.6E+04	8.6E+03	6.9E+02	1.5E+03
TME28dias	4.0E+05	1.1E+02	8.3E+01	-1.0E+02	-7.1E+02	6.7E-01	2.9E+03	2.1E+01	-7.2E+01	-5.5E+04	5.7E+04	-2.5E+03	4.6E+00	1.1E+03	-2.5E+00	-1.6E+04	6.9E+02	2.6E+03	-2.0E+03
baseIVPC	-2.7E+05	-2.8E+02	-2.0E+02	1.7E+03	-4.9E+02	7.5E-01	2.2E+04	6.4E+01	-3.5E+01	-1.6E+05	2.7E+04	-1.8E+03	-3.7E-01	-1.2E+03	7.2E-01	2.9E+04	1.5E+03	-2.0E+03	2.2E+04

- 1 Si $Cov(x,y)>0$ hay dependencia directa (positiva), es decir, a grandes valores de x corresponden grandes valores de y.
- 2 Si $Cov(x,y)=0$ se interpreta como la no existencia de una relación lineal entre las dos variables estudiadas.
- 3 Si $Cov(x,y)<0$ hay dependencia inversa o negativa, es decir, a grandes valores de x corresponden pequeños valores de y

▪ Anexo 3. Base de datos de empresas productoras de pellet en España.

Empresa	Dirección	Teléfono	E-mail y página electrónica
Mancomunidad Forestal Ansó (Afpurna)	Travesía del Aserradero, nº 8 - 22728 ANSÓ (Huesca)	974 37 02 51	http://www.afpurna.com/oficinatecnica@afpurna.com
Amatex	Polígono Industrial "La Nava" N-234, 42146. Cabrejas del Pinar, Soria.	Tel.: 975373049 Fax: 975373173	http://www.amatex.es/contacto amatex@amatex.es
Aprovechamientos Energéticos del Campo S.L.	Aldeaquemada, Jaén	902 430 930 / 649 099 560	www.aprovechamientosenergeticos.es/ administracion@aprovechamientosenergeticos.es
Biomasa Forestal, SL	As Pontes, A Coruña Rua República Checa (Pol. Ind. Costa Vella), 40 15707 Santiago de Compostela	981 897 555	bioforestal.es
Biomasa Forestal, S.L.	Polígono Industrial de Penapurreira, Parcela C3 A, 15.320 As Pontes de García Rodríguez. A Coruña	+34 981 702 867; +34 981 758 519 y +34 981 455 114	http://www.bioforestal.es/ info@bioforestal.es tienda@bioforestal.es
Bioterna	Pol. Ind. de Rocaforte, 31400 Sangüesa, Navarra	948 87 04 18	www.bioterna.com comercial@bioterna.com
Burpellets	Hijos de Tomás Martín, S.L. C/Carretera S/N Doña Santos 09631 Burgos - España	Teléfono: +34 947 388 078 Fax: +34 947 388 701	http://burpellet.com/ www.maderashtm.com info@burpellet.com
CalorPel	Polígono Industrial Comarca I (Agustinos), c/ L Nave 11 31160 Orkoien, Navarra	948 355 267 y 681 02 18 18	www.calorpel.com calorpel@calorpel.com comercial@comercial.com
Caryse	Mirasierra 5, 28220 - Majadahonda, MADRID.	Tel: 91 638 25 96 y Fax: 91 638 47 96	http://caryse.com/ caryse@caryse.com

Ebaki/EBEPELLET	Muxika, Bizkaia	Tel.: 902 540 411 y Fax: 946 250 150	http://www.ebepellet.es/ pellet@ebaki.es
ECOFOGO/Mosquera Villavidal S. I.	Villavidal nº 17 · Concello de Ramirás, Ourense	988 479 328	http://www.mosqueravillavidal.es/ info@mosqueravillavidal.com
Ecoforest	Carretera C - 402, 0 , km 94 , 500, 45860 Villacañas, Toledo	925 56 03 23	
Ecowarm de Galicia S.L.	Coruxido s/n Bastavales 15865 Brión A Coruña, España	981 88 85 25	www.ecowarm.es info@ecowarm.es
ERTA, S.A.	Ctra. CM-220 km 28.5 02100 · Tarazona de la Mancha ALBACETE	967480907	http://www.ertasa.net/
Galapellet	Trado, 32235 Pontedeva, Grupo Saraitsa, Trado, Ourense	Teléfono: 981 776 208 Fax: 981 796 459	http://www.gruposaraitsa.com
	Parque Empresarial de Coirós, Parcela 12-14, Subparcela 2. 15316 Coirós (A Coruña)		
García Varona	Ctra Medina-Villarcayo Km 6, 09550 VILLARCAYO - Burgos Almacén: Ctra. Burgos – Santander km. 136, 39612 Parbayón CANTABRIA	0034 947 132 049	http://www.garciavarona.com info@garciavarona.com
Grans Del Llucanes S.I.	SL Crta.Sta. Eulàlia de Puig-oriol, km.7 08515 Sant Martí d'Albars (Barcelona)	Teléfono: 93 812 90 11 Fax: 93 812 90 46	http://www.gransllucanes.com/ info@gransllucanes.com
Magina Energía NaturFoc	Mancha Real - Jaén Carrer Alfarrasi, 6, 46892 Montaverner, Valencia	626 724 676	http://www.naturfoc.com/ info@naturfoc.com

Pelets combustibles de la Mancha	Vía Circunvalar de Socuéllamos – Paraje El Cerro, Socuéllamos, Ciudad Real, C.P.13630	Teléfono:677 53 70 05 Fax: 91 308 67 40	info@naturfoc.com
			http://www.peletsdela mancha.com/
			eferrano@peletsdela mancha.es
		+34 900 844 002	info@peletsdelamanc ha.com
			info@athisa.es
Pellets Asturias	Tineo, Asturias Polígono industrial La Curiscada. 33877 Tineo. Asturias	Teléfono 984.107.093	http://www.pelletsastu rias.com/es/intro.asp
			info@pelletsasturias.c om
Reciclatges Tamayo	CTRA DE BARCELONA A PUIG-CERDA 35, 2. 08530, LA GARRIGA, BARCELONA		
Recicladados Lucena	Cerro San Cristobal s/n. 553 Lucena 14900 Córdoba	Telf. 957 59 02 39	http://recicladoslucena .com/www.recicladosl ucena.com/index.html
			info@recicladoslucen a.com
Recuperaciones Ortin	Calle Tejeras nº 4 (Junto a plaza de toros) 30510 Yecla (Murcia)	Teléfono: 968 790 087 (C.A) 968 796 800 Fax: 968 750 750	http://www.ortinpellets .com/
			recuperacionesortin@ yahoo.es
Ribsa	Calle de Arias de Miranda, 09430 Huerta de Rey, Burgos	Telefono:947 38 81 35 Fax: 947388397	www.ribpellet.com
			ribpellet@ribpellet.co m

SCA Nuestro Padre Jesús	C/ Nuestro Padre Jesus, 66 23712 Jabalquinto Jaén	953 617 031	http://www.aceite-oliva.com/ administra@aceite-oliva.com
Vivero Central de la Junta de Castilla y León	C/Cañada Real, s/n 47008 Valladolid (administración pública).	Teléfonos: 983 410 500, 983 410 542	
		Fax: 983 410 541	
Biomassas Herrero	Travesía de España nº 48 - Pedrajas de san esteban (Valladolid)	983 60 54 34	http://www.biomassasherrero.com/ biomassasherrero@biomassasherrero.com y joseantonioherrero@biomassasherrero.com
Arkea Pellets	Ultzama, Navarra (pequeña producción) ARKEA / CARPINTERÍA BUBEA - Pol. Ind. Elordi, C/ A, 26 - 31797 Iraizotz, Navarra.	Tfno/Fax: 948331679	http://www.arkea.es/ arkea@arkea.es y ibubea@terra.es
Probiomassa-Electra Caldense/Nexus Renovables	Pl. Catalunya, 6, 08140 - Caldes de Montbui (Barcelona)	900181776	info@probiomassa.com
Biomasa Sostenible de Valdaracete S.L.	BIOVALD, Plaza de Manolete 2, 28020 Madrid	91 715 25 87	http://www.biovald.es/ info@biovald.es
Nordcon-Combustibles naturales	C/San Luis 17 39010 Santander Cantabria	Teléfono: +34 942 37 36 88 Móvil: +34 606 13 91 50 Fax: +34 942 37 36 43	http://combustiblesnaturales.com/ info@combustiblesnaturales.com
Naparpellet	Ctra. Pamplona km. 40 31820 Etxarri- Aranzatz, Navarra.	Tel: 948 46 00 89 Fax: 948 46 02 91	http://www.naparpellet.com/ bitalia@bitalia.es

Uxue Bioenergía	Av/ independencia, 8 5º - d y e. zaragoza, zaragoza	976233866	
Accuore	Ribesalbes, Castellón. C/ Musgo, nº 2, 2º H, Edificio Europa II, La Florida (Aravaca) - 28023 - Madrid		http://accuore.es/ accuore@accuore.es
Evercast	C/ Carraquintanar, 4 Polígono Industrial 40551 Campo de San Pedro, Segovia	921 556 491	http://www.avebiom.org/es/nuestros-asociados/List/show/energia-verde-de-castilla-evercast-633 www.evercast.es
SERPAA-Accuore	Villazopeque, Burgos		
ACG Gestion Biomasa, S.L.	Baeza, Jaén		
Coprosol	C/ Eras, S/N; cp. 16145; Ribatajada (Cuenca)		
Madridpellet	Arcillex, S.A. Ctra, M-300 KM 18, 28813 Torres de la Alameda, Madrid	918868322 918868100	y
Pallet Tama Naturpellet S.L.-	Ctra. Segovia a Valladolid, Km 58, 40297 Sanchonuño, Segovia	921 16 03 11 Tel.: 921 16 03 11 Fax: 921 16 00 27	www.pallettama.com comercial@pallettama.com
Novalia Sinergie SI	Carrer Arbres del Papa, 08787 Pobla De Claramunt (La), Barcelona.	938 08 77 05 938086152	http://www.groupeprenerbio.com/novalia-siner gie/ ventas@novaliasiner gie.com info@novaliasiner gie.com
Echeveste Hnos SI-Beropel	Lugar Barrio Otsango, 16 Ad U 16, 31770 Otsango Auzoa. Pol. Industrial Frain, S/N 31770-Lesaka (Navarra)	948 63 77 23 948637232 948637250	http://www.echevestehermanos.com/ info@echevestehermanos.com
Teruel Pellets	Ctra. A-2511 , km 19, 44492 Bea, Teruel	607 277 191 665 994 307 650 390 962	http://www.teruelpellets.com/ info@teruelpellets.com
Tresmasa	Calle Martiago, 37510 Cespedosa de Agadones, Salamanca. Paseo Castellana 153, 28046 Madrid.		http://www.tresmasa.com/ biomasa @ energiberia.com

Lesmar Pellet, S.L.	Calle en proyecto nº 3, 20, 46119 Moixent, Valencia.	962 26 00 50 962 26 00 50	http://www.lesmarpellet.es/ info@lesmarpellet.es
	LESMAR PELLET S.L. Xaloc, 10 - 46640 Mogente - Valencia		
Agrícola Agropellet	Santiago- Calle Miguel Servet, 9, 22260 Grañén, Huesca	974 39 00 12 974 390 014	info@agropelletsl.es
ENERGIA SEGURA SL	SIERRA Calle Pg. Ind. Romica, Avda B esquina c/ 4 bis 02220 Albacete	967 25 43 86 Telf:967 25 43 86 Fax: 967 25 44 75	www.energiaserrasegura.com info@energiaserrasegura.com
EBINOR	Polígono de La Rad Parcela B-1 26371 Sotés (La Rioja)	941 050 013	http://ebinor.com/sobre-ebinor/
Biomasa del Aneto SL	Biomasa del Aneto S.L. Partida de Estrada s/n 22450 Campo, (Huesca)	974 55 02 23	www.biomasadelaneto.es info@biomasadelaneto.es
Gestión de Biomasa SL	Polígono Industrial La Torrecilla. Avenida de la Torrecilla nº 16, planta 2, oficina 11, CP 14013 - Córdoba.	957 42 99 45 Tel./Fax: 957 48 34 52	www.gesbi.es info@gesbi.es

▪ Anexo 4. Encuesta sobre panorama de producción de pellet

1 - ¿En qué año se fundó la empresa?

2 - ¿Cuál es el origen del capital de la empresa?

- a. Nacional.
- b. Extranjero.
- c. Mixto

3 - ¿Qué tipo de materia prima usa en el proceso de producción de pellet?

- a. Madera proveniente del monte y plantaciones forestales.
- b. Residuos agrícolas de procesos industriales.
- c. Residuos de aprovechamientos agrícolas.
- d. Madera usada.
- e. Residuos de madera de procesos industriales.
- f. Otro, favor de especificar

4 - ¿Qué especies agrícolas y forestales usa para la producción de pellet?

- a. Madera de pino.
- b. Madera de cítricos.
- c. Madera de encina y otros quercus.
- d. Residuos leñosos de vid.
- e. Madera de olivo.
- f. Otro, favor de especificar.

5 - Para el caso de especies arbóreas, ¿De qué parte del árbol proviene la madera que usan?

- a. Árboles completos.
- b. Fuste.
- c. Ramas.
- d. Otro, favor de especificar.

6 - ¿De dónde proviene la materia prima?

- a. Nacional.
- b. Importada.
- c. Nacional e importada.

7 - En caso de ser importada, ¿Qué porcentaje del total de la materia prima es importada?

- a. Menor a 10%.
- b. De 10-25%.
- c. De 25-50%.
- d. De 50-70%.
- e. Mayor a 70%.

8 - ¿Qué pruebas de control de calidad a la materia prima realiza antes del proceso de producción?

- a. Contenido de humedad.
- b. Densidad.
- c. Poder calorífico.
- d. Otro, favor de especificar:
- e. Contenido de cenizas.
- f. Ninguna.

9 - ¿La materia prima cuenta con algún tipo de certificación?

- a. FSC (Forest Stewardship Council).
- b. PEFC (Pan-European Forest Certification).
- c. Otro, favor de especificar.
- d. Ninguna.

10 - ¿A qué contenido de humedad (C.H.) se compra la madera?

- a. 10-15 %.
- b. 15-30 %.
- c. 30-50%.
- d. 50-100%.

11 - ¿Cuál es el coste de la materia prima por tonelada?

- a. < 35 euros/t.
- b. De 35-55 euros/t.
- c. De 55-75 euros/t.
- d. Otro, favor de especificar:

12 - ¿En promedio cuántas toneladas de madera requiere para producir una tonelada de pellet?

- a. Menos de 1.5 t.
- b. De 1.5-2 t.
- c. De 2-3 t.
- d. Mayor a 3 t.

13 - ¿Qué tipo de pellet produce?

- a. Pellet industrial.
- b. Pellet doméstico.
- c. Pellet industrial y doméstico.

14 - ¿Qué tipo de peletizadora utiliza?

- a. Peletizadora de matriz plana.
- b. Peletizadora de matriz anular cilíndrica.
- c. Las dos anteriores.

15 - ¿Con cuantas peletizadoras trabaja su planta?

- a. De 1-2.
- b. De 3-4
- c. Mayor a 5

16 - ¿El pellet cuenta con algún tipo de certificación?

- a. ENplus.
- b. DINplus.
- c. FSC (Forest Stewardship Council).
- d. PEFC (Paneuropean Forest Certification).
- e. Otro, favor de especificar:
- f. Ninguno

17 - ¿Cuántos turnos de producción opera la planta al día?

- a. Un turno.
- b. Dos turnos.
- c. Tres turnos.

18 - La producción actual de su empresa depende de:

- a. Los pedidos del cliente.
- b. Pronostico de la demanda.
- c. Mantenimiento de un inventario mínimo.
- d. Por la capacidad de producción que se tiene.

19 - ¿Cuál de los siguientes problemas se han presentado en el proceso de producción del pellet?

- a. Dificultad en el abastecimiento de materia prima.
- b. Fallos en la maquinaria.
- c. Alto coste de reparación de la maquinaria.
- d. Otro, favor de especificar:

20 - ¿Qué productos producía su empresa en los primeros años de su fundación?

- a. Únicamente pellet de madera.
- b. Pellet de madera y otros productos de la industria de la madera.
- c. No se producía pellet de madera.

21 - En caso de que inicialmente no se producía pellet de madera, ¿qué productos se producían?

- a. Astilla de madera.
- b. Chapa de madera.
- c. Madera tratada.
- d. Otro, favor de especificar:
- e. Madera aserrada.

22 - ¿Cuáles de los siguientes motivos lo impulsaron a la producción de pellet?

- a. Porque existe una elevada demanda.
- b. Porque es una alternativa para usar los desperdicios maderables.
- c. Porque es un biocombustible no toxico que no contamina y es renovable.

23 - ¿Cuáles de los siguientes factores cree que ha influido en la aceptación del pellet para los consumidores?

- a. Porque es económico.
- b. Por su alto poder de combustión.
- c. Es un producto no toxico y que no contamina.
- d. Otro, favor de especificar:

24 - ¿Considera que el mercado consumidor de pellet se encuentra desarrollado o necesita más crecimiento?

- a. Si, el mercado se encuentra desarrollado.
- b. No, es necesario un mercado de mayor tamaño.

25 - ¿Aproximadamente cuál fue la inversión bruta para el establecimiento de la planta?

- a. Menor 1 millón
- b. 5-8 millones de euros.
- c. 1-2 millones de euros.
- d. Más de 8 millones de euros.
- e. 2-5 millones de euros.

26 - ¿Cuáles de las siguientes dificultades se han presentado en la comercialización del pellet?

- a. Competencia con otro tipo de combustibles.
- b. Falta de conocimiento de los consumidores sobre el uso del pellet.
- c. Altos costos de transporte.
- d. Exigencia del consumidor de pellet certificado.
- e. Otro, favor de especificar:

27 - ¿Cuáles de las siguientes dificultades se presentaron en los primeros dos años de establecimiento de la planta?

- a. Inversión inicial elevada.
- b. Demanda de pellet certificado.
- c. Altos costos de producción.
- d. Falta de difusión sobre el uso del pellet.
- e. Otra, favor de especificar:

28 - ¿Cuál es la capacidad de producción de la planta?

- a. < 10 mil t/año.
- b. 10-20mil t/año.
- c. 20 -30 mil t/año.
- d. 30-40 mil t/año.
- e. 40-50 mil t/año.
- f. 50-80 mil t/año.
- g. 80-100 mil t/año.
- h. 100-150 mil t/año.
- i. >150 mil t/año.

29 - ¿Cuál fue el volumen de producción en los primeros dos años de operación de la planta?

- | | |
|---------------------|---------------------|
| a. < 5 mil t/año | b. 5-10 mil t/año |
| c. 10-15 mil t/año. | d. 15-20 mil t/año. |
| e. 25-30 mil t/año. | f. 35-40 mil t/año. |
| g. 40-50 mil t/año. | h. >50 mil t/año. |

30 - ¿Cuál fue el volumen de producción en el último periodo anual?

- | | |
|----------------------|---------------------|
| a. < 10 mil t/año. | b. 10-25 mil t/año. |
| c. 25-40 mil t/año. | d. 40-55 mil t/año. |
| e. 55-70 mil t/año. | f. 70-85 mil t/año. |
| g. 85-100 mil t/año. | h. >100 mil t/año. |

31 - ¿Cuál fue el precio promedio de venta del pellet a granel por tonelada, en los primeros dos años de operación de la planta?

- | | |
|--------------------------------|---------------------|
| a. < 50 euros/t. | b. 50-100 euros/t. |
| c. 100-130 euros/t. | d. 130-160 euros/t. |
| e. 160-190 euros/t. | f. 190-210 euros/t. |
| g. 210-230 euros/t. | h. 230-250 euros/t. |
| i. Otro, favor de especificar: | |

32 - ¿Cuál fue el precio promedio por tonelada del pellet a granel en el último periodo anual?

- | | |
|---------------------|--------------------------------|
| a. < 200 euros/t. | b. 200-220 euros/t. |
| c. 220-230 euros/t. | d. 230-240 euros/t. |
| e. 240-250 euros/t. | f. 250-260 euros/t. |
| g. 260-270 euros/t. | h. Otro, favor de especificar: |

a. 33 - ¿Cuál fue el precio promedio por tonelada del pellet en saco de 15 kg en los primeros dos años de operación de la planta?

- | | |
|---------------------|--------------------------------|
| a. < 100 euros/t. | b. 100-150 euros/t. |
| c. 150-200 euros/t. | d. 200-250 euros/t. |
| e. 250-300 euros/t. | f. Otro, favor de especificar: |

34 - ¿Cuál fue el precio promedio por tonelada del pellet en saco de 15 kg en el último periodo anual?

- | | |
|--------------------------------|---------------------|
| a. < 250 euros/t. | b. 250-260 euros/t. |
| c. 260-270 euros/t. | d. 270-280 euros/t. |
| e. 280-290 euros/t. | f. 290-300 euros/t. |
| g. Otro, favor de especificar: | h. |

35 - ¿Cuál fue el número total de empleados en los primeros dos años de operación de la planta?

- | | |
|--------------|--------------|
| a. < 10. | b. De 10-25. |
| c. De 26-40. | d. De 40-55. |
| e. >55. | |

36 - ¿Cuál fue el número total de empleados en el último periodo anual?

- | | |
|--------------|--------------|
| a. < 20. | b. De 20-35. |
| c. De 35-50. | d. De 50-65. |
| e. >65. | |

37 - ¿Cuál fue el volumen de ventas en el mercado interno en los primeros dos años de operación de la planta?

- | | |
|---------------------|---------------------|
| a. < 5 mil t/año. | b. 5-10 mil t/año. |
| c. 10-15 mil t/año. | d. 15-25 mil t/año. |
| e. 25-30 mil t/año. | f. 30-45 mil t/año. |
| g. 45-50 mil t/año. | h. >50 mil t/año. |

38 - ¿Cuál fue el volumen de ventas en el mercado interno en el último periodo anual de operación de la planta?

- | | |
|----------------------|---------------------|
| a. < 10 mil t/año. | b. 10-25 mil t/año. |
| c. 25-40 mil t/año. | d. 40-55 mil t/año. |
| e. 55-70 mil t/año. | f. 70-85 mil t/año. |
| g. 85-100 mil t/año. | h. >100 mil t/año. |

39 - ¿Cuál fue la inversión en maquinaria y equipo en euros en los primeros dos años de operación de la planta?

- | | |
|---------------|-----------------|
| a. < 1 millón | b. 1-2 millones |
|---------------|-----------------|

- c. 2-5 millones
- d. 5-8 millones
- e. >8 millones

40 - ¿Cuál fue la inversión en maquinaria y equipo en euros en el último periodo anual de operación de la planta?

- a. Cero.
- b. < 500 mil
- c. 500 mil - 1 millón.
- d. 1-2 millones.
- e. 2-3 millones.
- f. 3-5 millones.
- g. >5 millones.

41 - ¿Cuál fue el coste promedio por tonelada de pellet a granel, en los primeros dos años de operación de la planta?

- a. < 35 euros/t.
- b. 35-70 euros/t.
- c. 70-90 euros/t.
- d. 90-110 euros/t.
- e. 110-130 euros/t.
- f. 150-170 euros/t.
- g. >170 euros/t.

42 - ¿Cuál fue el coste promedio por tonelada de pellet a granel, en el último periodo anual de operación de la planta?

- a. < 140 euros/t.
- b. 140-150 euros/t.
- c. 150-160 euros/t.
- d. 160-170 euros/t.
- e. 170-180 euros/t.
- f. 180-190 euros/t.
- g. >190 euros/t.

43 - ¿Cuál fue el coste promedio por tonelada del pellet en saco de 15 kg en los primeros dos años de operación de la planta?

- a. < 70 euros/t.
- b. 70-105 euros/t.
- c. 105-140 euros/t.
- d. 140-175 euros/t.
- e. 175-210 euros/t.
- f. >210 euros/t.
- g.

44 - ¿Cuál fue el coste promedio por tonelada del pellet en saco de 15 kg en el último periodo anual?

- a. < 170 euros/t.
- b. 170-180 euros/t.
- c. 180-190 euros/t.
- d. 190-200 euros/t.
- e. 200-210 euros/t.
- f. >210 euros/t.

45 - ¿Realiza exportación de pellet?

- a. Si
- b. No

46 - En caso de exportar, ¿A qué países exporta?

- | | |
|---------------------------------|-----------------|
| a. Italia. | b. Reino unido. |
| c. Francia. | d. Rusia. |
| e. Alemania. | f. Japón. |
| g. Japón. | h. Corea |
| i. Otros, favor de especificar: | |

47 - ¿Qué tipo de pellet exporta?

- a. Pellet industrial.
- b. Pellet industrial.
- c. Pellet industrial.

48 - ¿Qué porcentaje del total de su producción destina a la exportación?

- | | |
|---------------|---------------|
| a. < 10%. | b. De 10-25%. |
| c. De 25-50%. | d. De 50-70%. |
| e. >70%. | |

49 - ¿Cuál fue el porcentaje de exportación del volumen total en los primeros dos años de operación de la planta?

- | | |
|-------------|-------------|
| a. Cero. | b. < 10 %. |
| c. 10-20 %. | d. 20-30 %. |
| e. 30-40 %. | f. >40 %. |

50 - ¿Cuál fue el porcentaje de exportación del volumen total en el último periodo anual de operación de la planta?

- | | |
|-------------|-------------|
| a. < 15 %. | b. 15-30 %. |
| c. 30-45 %. | d. 45-60 %. |
| e. 60-75 %. | f. >75 %. |

51 - ¿Ha recibido subvenciones por parte de la administración local, estatal o Europea para la creación y puesta en marcha de la planta?

- a. Si
- b. No

52 - ¿Qué porcentaje de la inversión inicial fue subvencionada?

- | | |
|-------------|------------|
| a. < 15 % | b. 15-30 % |
| c. 30-45 % | d. 45-60 % |
| e. 60-75 % | f. 75-90% |
| g. 90-100 % | |

53 - ¿Recibe o ha recibido alguna subvención por parte de la administración local, estatal o Europea a la producción?

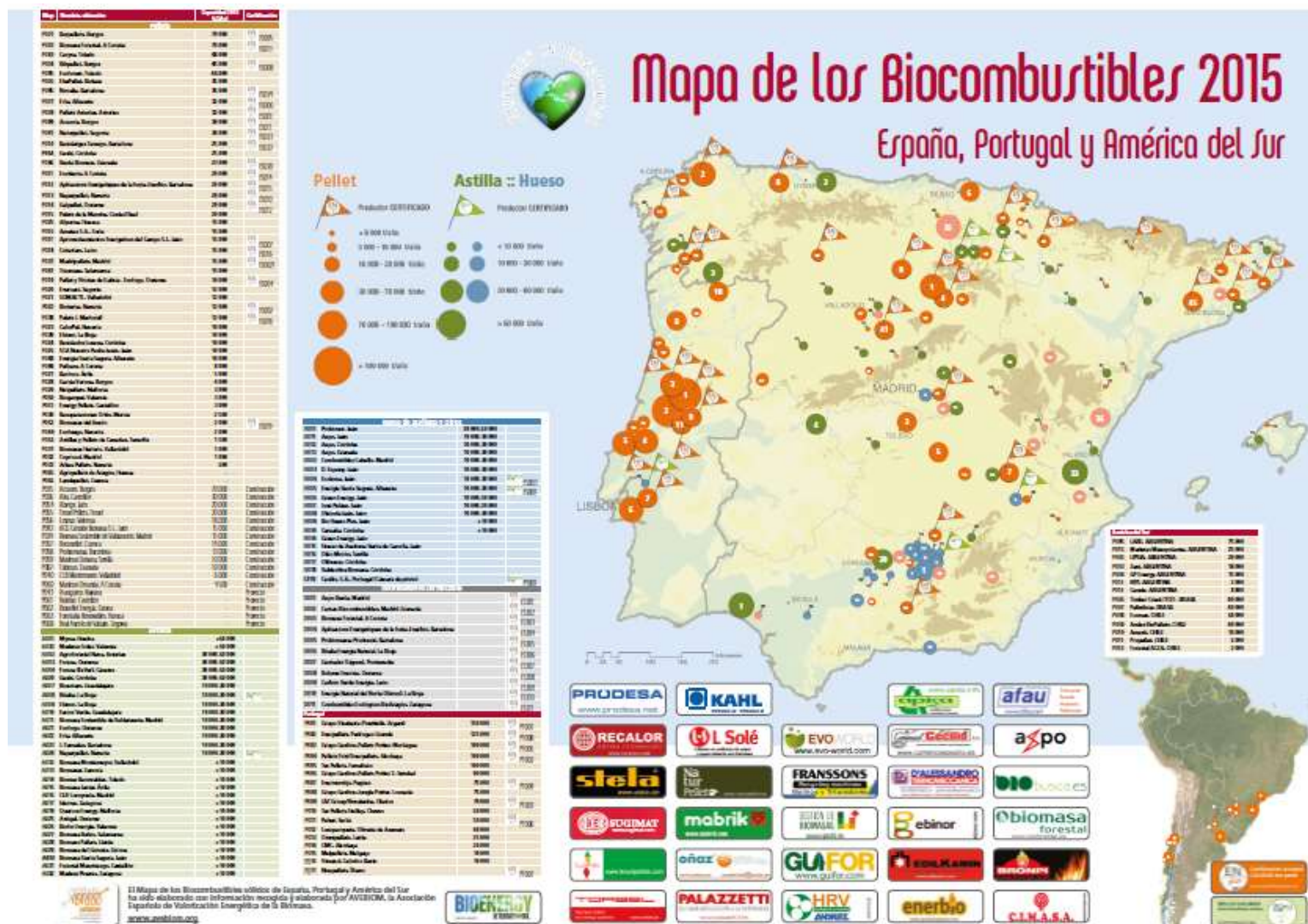
- a. Si
- b. No

54 - ¿Qué porcentaje de la de la producción fue o es subvencionada?

- | | |
|------------|------------|
| a. < 10 % | b. 10-25 % |
| c. 25-50 % | d. 50-75 % |
| e. >75 % | |

55 - Comentarios que desee añadir:

- ANEXO 5. Mapa de distribución de fábricas productoras de pellet en España.



Fuente: AVEBIOM

- ANEXO 6. Artículos presentados en congresos y publicados.

XIV CONGRESO FORESTAL MUNDIAL
Durban (Sudáfrica), 7-11 de septiembre de 2015

**El uso de madera de plantaciones forestales comerciales
como una alternativa para biocombustible de combustión
directa en México**

*Imelda Vargas Abasolo¹, Arturo Perales Salvador², Diego Ernesto Lira González³,
Eliseo Sosa Montes⁴*

¹Universidad Autónoma Chapingo, imeldavargas.a@hotmail.com,+5215951069451

²Universidad Autónoma Chapingo, adelin21@hotmail.com

³Universidad Autónoma Chapingo, diegoe.lira@hotmail.com

⁴Universidad Autónoma Chapingo, esosamontes@yahoo.com.mx

Resumen

Debido al inevitable agotamiento del petróleo y a los problemas de contaminación que éste ha generado, es necesaria la búsqueda de nuevas alternativas de energía, así este estudio se enfoca al uso de biocombustibles forestales a base de astilla para combustión directa en la industria. La cual podría ser una alternativa más de producción sustentable para las empresas plantadoras forestales de México. El sitio de muestreo se localiza en los estados de Veracruz y Tabasco. Se trabajó con cuatro de las principales especies de madera de plantaciones de entre 7 y 8 años de edad, se cortaron 10 árboles por especie de los cuales se extrajo una muestra de viruta. Se realizó un análisis proximal de la astilla, que consistió en la obtención del poder calorífico, densidad, contenido de humedad y cenizas. Los resultados fueron para el caso de la madera de *Gmelina arborea* de 4585 cal/g, *Acacia mangium* de 4616 cal/g, *Tectona grandis* de 4533 cal/g y *Eucalyptus urophylla* de 4430 cal /g. La primera especie a pesar de ser una madera suave, su poder de combustión se debe a su elevado contenido de sustancias químicas, al igual que *Acacia mangium* que presentó resultados similares. La madera de teca es de densidad alta pero esta característica si es prioritaria para generar un poder calorífico elevado. El poder de combustión del eucalipto es aceptable y también es una buena opción para biocombustible. Estos datos son la base para determinar que especies son económicamente rentables y más aptas para su uso como biocombustible, porque a partir del poder calórico se podrá estimar el costo de producción por kilocaloría y los precios. De esta manera se conocerá que especie es más eficiente y sustentable como biocombustible de combustión directa. Se considera que el uso de estos biocombustibles tendrá influencia significativa en las empresas plantadoras de México, porque son de rápido crecimiento y generarán un impacto ambiental, social y económico de forma positiva.

Introducción

A nivel mundial los biocombustibles que más se producen son el bioetanol y el biodiesel. Se estima que para 2022 la producción de bioetanol llegará a 168 miles de millones de litros y para el biodiesel será de 14 miles de millones de litros (OCDE-FAO 2013). Para el caso de México, el desarrollo de sistemas de producción de biocombustibles a escalas industriales es reciente, para la producción de bioetanol y biodiesel los costos aún son elevados, debido a la escasez y costosa materia prima, ello también repercute en la seguridad alimentaria porque tanto el bioetanol como el biodiesel y biogás se producen a partir de cultivos agrícolas llamados de primera generación que se destinan para el consumo humano (SENER-BID-GTZ 2006). Por tal motivo este estudio se enfoca a especies que no tienen impacto significativo en la producción de alimentos, ya que las plantaciones forestales del Sureste Mexicano se establecen en terrenos que tienen poco valor agrícola. Además, que a diferencia del petróleo el uso de astilla de madera como biocombustible genera menos impacto ambiental, porque reduce la emisión de gases efecto invernadero al ser los árboles fuentes de captura de carbono y fuente de energía renovable.

Alcance

Este estudio permitirá asignarle un uso alternativo a la astilla de madera de plantaciones forestales. Y tendrá influencia positiva en la sostenibilidad de los biocombustibles en México. El uso de astilla de madera en la industria generará menor impacto ambiental que los combustibles fósiles y gradualmente se irá reduciendo la dependencia a ellos.

Objetivos principales

1. Proponer las especies de plantaciones forestales más aptas para la producción de biomasa en México.
2. Hacer un análisis proximal de las principales especies de plantaciones forestales, el cual consiste en determinación de poder calorífico, contenido de humedad y porcentaje de cenizas.
3. Que las empresas plantadoras del Sureste Mexicano tomen la decisión de que especies plantar para la producción de astilla para biomasa en función de este estudio.
4. Se pretende que gradualmente la astilla de madera vaya sustituyendo el uso del petróleo en la industria que trabaja con calderas en México.
5. Reducir la emisión de gases efecto invernadero a causa del consumo del petróleo.
6. Generar más empleos en las regiones plantadoras.
7. Dar un uso alternativo a los suelos que tienen bajo valor agrícola.

Metodología/enfoque

Obtención de muestras en campo

Las muestras de madera se obtuvieron de cuatro plantaciones de los estados de Veracruz y Tabasco del Sureste Mexicano. Se trabajó con *Gmelina arborea*, *Tectona grandis*, *Acacia*

mangium y *Eucalyptus urophylla*, de entre 7 y 8 años de edad. Se usó el diseño completamente al azar para la toma de las muestras.

Se cortaron 10 árboles por especie, para obtener una rodaja de madera a la altura de 1.30 m, las rodajas se astillaron y se mezclaron, para obtener cuatro muestras por especie con su repetición y se guardaron en bolsas de plástico para su traslado al laboratorio.

Análisis de laboratorio

En laboratorio se determinó poder calorífico, contenido de humedad y contenido de cenizas de cada muestra. Primero en laboratorio la astilla fue molida para facilitar la manipulación del material.

Contenido de humedad: las muestras de madera se colocaron en cajas de papel (fig. 1). Primero en una balanza digital se pesó cada caja. Posteriormente se le añadió la muestra de madera y fue pesada nuevamente para ser colocada en una estufa a 50°C durante 72 horas. Una vez transcurrido el tiempo de secado se retiraron las muestras de la estufa y se volvieron a pesar. Y finalmente se aplicó la siguiente fórmula:

$$CH = ((PCMh - PCMS) / 100) / (PCMh - PC)$$

Donde:

CH=Contenido de Humedad; PCH= Peso de la caja con muestra húmeda; PCMS= Peso de la caja con muestra seca; y PC= Peso de la caja.



Fig. 1: Astilla molida vs astilla sin moler para la prueba de contenido de humedad.

Poder calorífico: para la determinación del poder de combustión se usó un calorímetro (fig. 2), se trabajó con la muestra seca de 0.25-0.35g por prueba, cantidad suficiente que fue colocada en las capsulas de la bomba calorimétrica.



Fig. 2: a) Calorímetro usado para determinar el poder de combustión y b) bomba calorimétrica donde se colocó la muestra de astilla para su combustión.

Contenido de cenizas: para el contenido de cenizas se utilizó aproximadamente 1g de muestra (fig.3). Las muestras fueron quemadas hasta obtener cenizas, después se introdujeron a la mufla durante dos horas a 500 °C. Las cenizas se midieron en relación al porcentaje de madera seca, se pesó el residuo de los crisoles después de la combustión en la mufla. Se aplicó la fórmula siguiente:

$$CC = ((PCC - PC) * 100) / (PCMA - PC)$$

Donde:

CC=Contenido de cenizas; PCC=Peso del crisol con cenizas; PC= Peso del crisol; PCMA= Peso del crisol con muestra de astilla.



Fig. 3: Crisoles con la muestra de astilla para la prueba de cenizas.

Análisis de la información

De los resultados obtenidos se realizó un análisis de varianza de un factor, para comparar los resultados de poder calorífico de cada especie y un análisis de comparación de medias con la prueba de Tukey.

También se calculó la cantidad de kilocalorías que se generan por ha por año en función del incremento medio anual (IMA) de cada especie.

Resultados

El promedio de contenido de humedad de la astilla de las cuatro especies una vez secada en la estufa fue de 6%.

Para el caso del contenido de cenizas las maderas que generan menos residuos son *Acacia mangium* y *Eucalyptus urophylla* con un promedio de 0.46% y 0.49%, respectivamente. La madera de *Gmelina arborea* presentó un promedio de cenizas del 1.33% y *Tectona grandis* un 3.47%.

El análisis de varianza mostró que existen diferencias entre los promedios de poder calorífico de cada especie, indicados en el cuadro 1 y 2.

Cuadro 1: Resumen del análisis de varianza de un solo factor, para el poder calorífico

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
<i>Acacia mangium</i>	8	36932.4844	4616.56055	4191.56407
<i>Gmelina arborea</i>	8	36680.5348	4585.06685	5619.96897
<i>Eucalyptus urophylla</i>	8	35444.6431	4430.58039	995.686851
<i>Tectona grandis</i>	8	36270.3422	4533.79277	2816.46659

Cuadro 2: Análisis de varianza de un solo factor, para el poder calorífico

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	159157.743	3	53052.5809	15.5765713	0.0004%	2.94668527
Dentro de los grupos	95365.8054	28	3405.92162			
Total	254523.548	31				

En la prueba de Tukey del cuadro 3 y 4 se hizo el análisis para identificar en que especies existe diferencia en el poder de combustión.

El poder calorífico de *Gmelina arborea* y *Acacia mangium* son estadísticamente similares, pero diferente a las otras dos especies. También se presentó similitud entre *Eucalyptus urophylla* y *Tectona grandis*.

Cuadro 3: Comparación entre especies respecto al poder calorífico con la prueba de tukey

Comparaciones	<i>Gmelina arborea</i>	<i>Eucalyptus urophylla</i>	<i>Tectona grandis</i>
<i>Acacia mangium</i>	Igual	Diferente	Igual
<i>Gmelina arborea</i>		Diferente	Igual
<i>Eucalyptus urophylla</i>			Igual

Cuadro 4: Comparación entre promedio de poder calorífico con la prueba de tukey

Resumen	Promedio (cal/g)	Diferencia
<i>Acacia mangium</i>	4617	ac
<i>Gmelina arborea</i>	4585	ac
<i>Eucalyptus urophylla</i>	4431	ab
<i>Tectona grandis</i>	4534	ab

Con el poder calorífico obtenido por especie, se determinó el incremento medio anual en kilocalorías, en función de la densidad básica y el IMA expresado en volumen. Por lo tanto en el cuadro 5 se observa que *Acacia mangium* es la especie que generará mayor poder calorífico expresado en miles de kilocalorías/ha/año con un total de 69.17, le sigue *Eucalyptus urophylla* con 57.0, *Gmelina arborea* con 27.84 y finalmente *Tectona grandis* con 24.02.

Cuadro 5: Cantidad de kilocalorías generadas por ha para cada especie en relación al incremento medio anual (IMA)

Especie	Densidad Básica	Densidad Básica	Poder Calorífico (cal/g)	IMA Ton	IMA Kcal(Miles de kcal)
<i>Acacia mangium</i>	0.450	0.450	4,616.56	14.99	69.17915982
<i>Gmelina arborea</i>	0.337	0.337	4,585.07	6.07	27.84602801
<i>Eucalyptus urophylla</i>	0.512	0.512	4,430.58	12.87	57.00632842
<i>Tectona grandis</i>	0.530	0.530	4,533.79	5.30	24.0291017

Discusión

En general las cuatro especies de madera tienen poder calorífico similar, pero existen diversos factores a considerar para destinarlas a biocombustibles. Estas características se explican a continuación.

Para el caso del contenido de humedad la madera recién cortada disminuye el rendimiento calórico, ya que gran parte de la energía se pierde en evaporar el agua.

La densidad de la madera es otro factor importante, se observa en los resultados que, a mayor densidad, mayor poder de combustión. Eucalipto, teca y acacia son maderas densas. Gmelina es la especie con la densidad más baja, pero presenta un poder calorífico elevado debido al contenido de sustancias orgánicas.

El porcentaje de cenizas generado de la combustión en la madera también es una característica que se debe considerar. El contenido de cenizas en la madera es generalmente del 1%, algunas especies de biocombustibles pueden tener un contenido de cenizas muy elevado, lo que genera menos energía. Acacia y eucalipto tienen un contenido de cenizas menor al 1%. En cambio, gmelina y teca sobrepasan el 1% de contenido de cenizas, teca genera un 3.47%.

A nivel de calorías generadas por gramo, acacia tiene un alto potencial para ser usada como biocombustible y eucalipto es la especie con el valor más bajo. Pero al calcular la cantidad de kilocalorías que cada especie produce por hectárea por año en función de su IMA, acacia es la especie que se mantiene en primer lugar, le sigue eucalipto, gmelina y finalmente la especie de menor crecimiento es teca.

Conclusiones/perspectivas

Finalmente, de las cuatro especies estudiadas la más apta para la producción de biocombustibles es *Acacia mangium* ya que genera el mayor IMA en kilocalorías, lo que indica que es una madera de rápido crecimiento. Que además de presentar una densidad básica elevada, tiene un contenido de cenizas menor al 1%.

La madera de *Eucalyptus urophylla* también es idónea para la producción de astilla para biomasa, su IMA en kilocalorías ocupa el segundo lugar de las cuatro especies evaluadas, lo que también es indicador de crecimiento rápido y poder calorífico aceptable.

La madera de *Gmelina arborea* y *Tectona grandis* no son recomendables para la producción de biomasa, debido a que son especies de crecimiento lento, pero también son especies que producen un elevado porcentaje de cenizas.

Estos resultados pueden ser la base para estimar precios de la astilla de madera y para comparar el poder calorífico entre la madera y el combustible fósil y de esta manera determinar cuanta biomasa se requiere para generar la misma cantidad de energía que cierta cantidad de petróleo, considerando el nivel de contaminantes que genera cada producto.

Fuentes de financiación

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)

Las opiniones expresadas en este producto informativo son las de su(s) autor(es), y no reflejan necesariamente los puntos de vista o políticas de la FAO.

Bibliografía

1. Núñez C. 2007. Relaciones de conversión entre densidad básica y densidad seca de madera. Revista ciencia tecnológica, 9:44-50.
2. OCDE/FAO.2013.OCDE-FAO Perspectivas Agrícolas 2013-2022, Texcoco, Estado de México, Universidad Autónoma Chapingo. 335p.
Disponble en: http://dx.doi.org/10.1787/agr_outlook-2013-es [acceso en 02.02.15]
3. Prueba de diferencias de medias o comparaciones múltiples, Colegio de Posgraduados, México. Disponible en; Marques M. 2003.
Disponble en:
<http://colposfes.z.galeon.com/disenos/teoria/cap13bmj/cap13bmj.htm>[acceso en 08.04.15]

4. SENER-BID-GTZ.2006. Pontenciales y viabilidad del uso de Bioetanol y Biodiesel para el transporte en Mexico. SENER-BID-GTZ, 600pp.
5. Sociedad Internacional de Forestales Tropicales. 2009. Manejo de plantaciones de la teca para productos sólidos. ISTF NOTICIAS.
Disponible en: http://www.istf-bethesda.org/specialreports/teca_teak/teca.pdf
[acceso en 01.04.15]
6. Souza, C.R.; Rossi, B.M.; Azevedo, C.P.;Lima, B.R.M.2004. Comportamento da *Acacia mangium* e de clones de *Eucalyptus grandis* x *E. Urophylla* em plantios experimentais na Amazônia Central. *SCIENTIA FORESTALIS*, 65:95-101
7. Universidad Nacional de Colombia, Teca. Medellin, Colombia.
Disponible en: <http://www.unalmed.edu.co/~lpforest/PDF/Teca.pdf> [acceso en 15.12.14]

DIAGNÓSTICO DE LA PRODUCCIÓN DE PELLET DE MADERA PARA BIOCOMBUSTIBLE EN ESPAÑA

Imelda Vargas¹, Arturo Perales², Pilar Fernández³ y Diego Ernesto Lira⁴.

ABSTRACT

A diagnosis was made through the gathering of information by applying a survey pellet in the production plants in Spain, to know the production outlook, market and the evolution of this industry considering the barriers and constraints that have arisen. The use of wood pellets in Spain is cheaper than heating fuel oil, up to 40% lower. In Spain the initial investment for the establishment of a pellet production plant is high, it is between one and two million euros, but the European Union subsidizes a percentage for the establishment. Mainly domestic pellet is produced, but it is possible to focus on production for industrial use. The wood pellet is considered a complementary good even no have impact on consumption, the consumer market is not economically affect if the consumers stop using pellet, it is irrelevant, because the market have preference to the fuel oil.

KEYWORDS: fuel oil, domestic pellet, complementary good.

INTRODUCCIÓN

La demanda del petróleo se encuentra en ascenso a nivel mundial por el continuo crecimiento económico, al ser un recurso no renovable es necesaria la búsqueda de energías alternativas que lo vayan sustituyendo. En el mundo aun existen reservas probadas de petróleo, pero cada vez es más difícil su extracción porque requiere de tecnología más avanzada y de mayor consumo de energía. Lo que también genera costos ambientales por la liberación de gases efecto invernadero.

Las principales fuentes de energía renovable son la eólica, solar, geotérmica y la biomasa. De la biomasa se obtienen diferentes tipos de biocombustibles, estos pueden ser líquidos, gases y sólidos. Dentro de los combustibles sólidos se encuentran los pellets que son porciones de material comprimido de madera que se usan para la combustión directa en calderas, su composición puede ser de diferentes especies de madera con corteza y biomasa con contenido de clorofila, restos de podas y tallos de cultivos agrícolas como cereales (García, 2011, p 26).

En España el sector doméstico es el principal consumidor de pellet de madera. Las empresas que lo producen obtienen el aserrín de desperdicios de industrias de la madera como la del aserrío. Compactan el aserrín, lo empaquetan y distribuyen a las entidades consumidoras.

El consumo de este biocombustible ha ido en aumento, debido al interés en el ahorro generado con la instalación de estufas y calderas. Es más económico que el uso de combustible fósil y ofrece seguridad y sostenibilidad en el suministro. También ha influido el acuerdo del protocolo de Kioto de reducir las emisiones de gases efecto invernadero, firmado por la Unión Europea, con el propósito final de disminuir los estragos que ha venido ocasionando el cambio climático. Cada país de la Unión Europea adoptó medidas para cumplir ésta política. Entre ellas sustituir el uso del petróleo por el uso de biomasa como el pellet de madera (Bioenergy International, 2013).

En este estudio se hizo un diagnóstico sobre coste y evolución de la producción y consumo del pellet de madera en España, con el objetivo de conocer las barreras y limitantes que se han presentado en torno a todo el proceso desde su producción hasta el consumidor final y de esta manera plantear posibles estrategias para su solución. Se hizo un levantamiento de información a través de una encuesta a las plantas productoras. Este estudio también se hizo como base para conocer las alternativas de producción de pellet de madera en México para estudios posteriores.

METODOLOGÍA

Para la elaboración del estudio se aplicó una encuesta a las fábricas productoras de pellet de madera en España. Se contactó a la Asociación Española de Valorización Energética de la Biomasa (AVEBIOM), para obtener la base de datos del total de plantas existentes en España, considerando ambos tipos de plantas, de pellet certificado y no certificado.

El tamaño de muestra se determinó con la fórmula siguiente:

$$n = \frac{P*Q*Z^2*N}{N*E^2 + Z^2*p*Q} \quad (1)$$

Donde:

Z= Valor normal; E= error; N= Población; P=Proporción; Q= 1-P

En la encuesta se consideró información cualitativa y cuantitativa para comprender el panorama de producción, los factores que influyeron en la implementación del proceso de producción del pellet, las limitantes y barreras que se han presentado.

Se construyeron gráficos sobre costes de producción y precios del pellet, se consideró el tipo de maquinaria que se usa en las plantas, el tipo de mercado donde se distribuye el producto y se hizo un análisis de debilidades, amenazas, fortalezas y oportunidades del panorama del pellet y planteando posibles estrategias de solución.

Para apreciar de una manera más clara la variación precios, estos se deflactaron con respecto al índice de precios al consumidor (IPC) de España, usando como año base el 2011. Los cuales se muestran en la tabla siguiente.

Figura 1: El mapa de distribución de las fabricas de pellet en España.



Fuente: Asociación Española de Valorización Energética de la Biomasa (AVEBIOM).

RESULTADOS

Del 100% de las plantas productoras de pellet, el 40% respondió satisfactoriamente, el 18% de los encuestados ha dejado de producir y se dedican exclusivamente a la distribución. Las plantas son de creación reciente, el periodo de fundación oscila entre los años 2010-2015, el 86% trabaja con capital nacional y el resto maneja capital mixto nacional y extranjero.

Aspectos básicos del proceso de producción del pellet

La materia prima proviene de diferentes tipos de aprovechamiento, es una mezcla entre madera proveniente de bosque y plantaciones, residuos de aprovechamientos agrícolas y de la industria maderera. De esta última proviene la materia prima del 80% de las fábricas encuestadas, el 50% trabaja con madera de bosque y plantaciones. La madera de pino es la fuente principal de materia prima, todas las plantas la incluyen en su proceso, se usa en menor porcentaje madera de abedul, chopo, roble y castaño, toda se encuentra certificada ya sea por Pan European Forest Certification (PEFC) o por Forest Stepwarship Council (FSC).

Figura 2. Astilla para la producción de pellet en fábrica de la provincia de Jaén, España.



Fuente: Compendio fotográfico Imelda Vargas

Los residuos de aprovechamientos agrícolas se incorporan al proceso en menor porcentaje, solo el 7% de las empresas lo utilizan, las exigencias en las normas de certificación del pellet es la razón por la que se usen exclusivamente materiales leñosos como materia prima. Las empresas que no están certificadas, no son rigurosas en este aspecto.

Para el pellet se realizan pruebas de control de calidad, se analiza la densidad, el contenido de humedad, contenido de cenizas, análisis visual y porcentaje de finos.

Figura 3. Pellet de madera con certificación ENPLUS.



Fuente: Compendio fotográfico Imelda Vargas

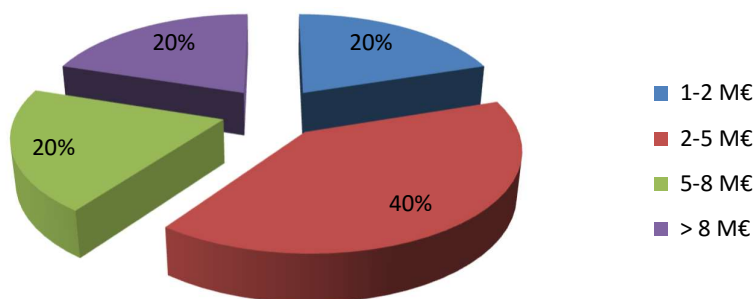
El coste de la materia prima es muy variable, desde los 35€/t y supera los 100 €/t. En promedio se llega a requerir de 1.5-2 toneladas de madera sólida para producir una tonelada de pellet. Sólo el 17 % de las empresas encuestadas utilizan materia prima con un coste superior a 100 €/t.

La producción de las plantas de pellet depende principalmente de los pedidos del cliente y de la capacidad de producción que tienen. El 9% de los encuestados mantiene un inventario mínimo de producción y el 18% se basa en el pronóstico de la demanda del pellet.

Los principales problemas que se presentan en el proceso de producción son dificultad en el abastecimiento de la materia prima y altos costes de reparación de maquinaria. Un 30 % reportó fallos en la maquinaria como las principales dificultades. Y un 10% reportó que la ausencia de problemas en el proceso de producción. Dentro de problemas ajenos al proceso productivo, también existen problemas en el precio de venta del pellet al ser precios muy bajos.

El 91% de las empresas encuestadas ha producido pellet desde su fundación, únicamente el 9 % cambió el tipo de producción de madera aserrada a pellet de madera.

Gráfico 1. Inversión bruta requerida para el establecimiento de las plantas.

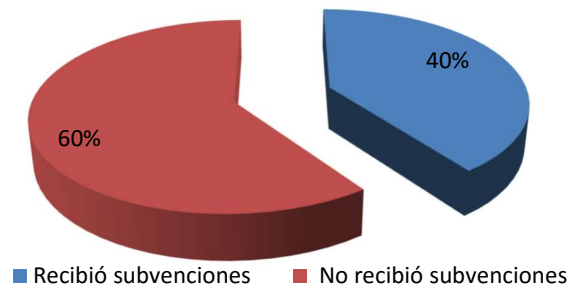


Fuente: Datos obtenidos de levantamiento de información.

La inversión bruta es el gasto total de bienes de capital considerando la amortización y la depreciación, el 40% de las empresas invirtió entre 5-8 millones de euros. El 20% entre 1-2 millones de euros y entre 5-8 millones de euros, el 20% restante tiene una inversión superior a los 8 millones.

Ninguna empresa recibe subvenciones a la producción, sin embargo, han recibido para el establecimiento y puesta en marcha de las plantas. El 60% de las fábricas obtuvieron ayuda económica, los montos fueron variables, representando hasta el 60% de la inversión total inicial.

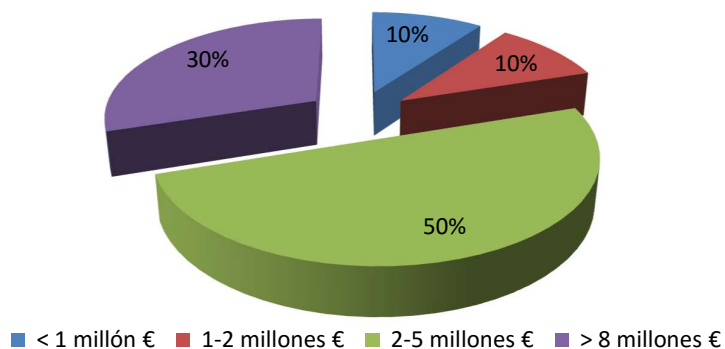
Grafico 2. Empresas que han recibido subvenciones por parte de la administración española o europea, para la creación y puesta en marcha de la planta.



Fuente: Datos obtenidos de levantamiento de información.

Respecto a la inversión en maquinaria y equipo el 50% de las plantas han invertido en maquinaria entre 2-5 millones de euros y el 30% con inversiones superiores a los 8 millones de euros. Se usan dos tipos de pelletizadoras, de matriz plana y de matriz anular cilíndrica. Se trabaja principalmente con esta última de 1-2 máquinas, porque su producción es a gran escala de 0.8-2 ton/h, para que sea rentable se tiene que laborar mínimamente dos turnos.

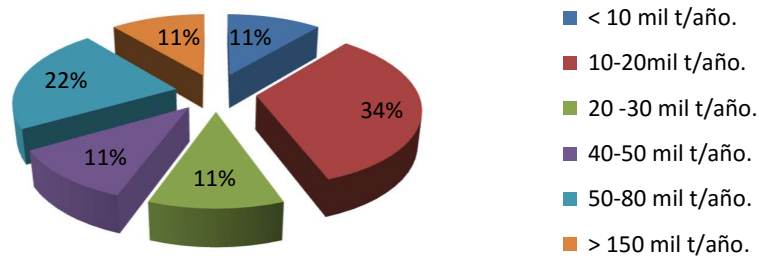
Grafico 3. Inversión en maquinaria y equipo para el establecimiento de las plantas.



Fuente: Datos obtenidos de levantamiento de información.

La capacidad de producción de las plantas es muy variable de hasta más de 150 mil t/año, el mayor porcentaje que corresponde a 34% representa las empresas con una capacidad de producción de entre 10-20 mil t/año.

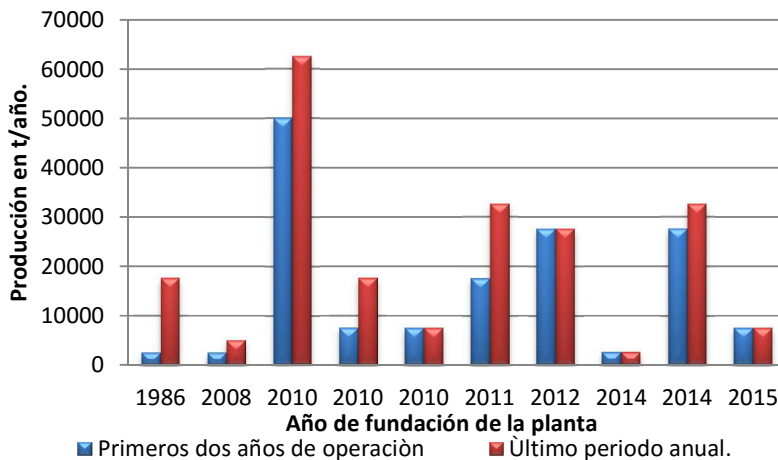
Gráfico 4. Capacidad de producción de las plantas.



Fuente: Datos obtenidos de levantamiento de información.

El volumen de producción de las empresas ha aumentado a más del doble de la cantidad de los primeros dos años. Las empresas que son de creación reciente han mantenido su nivel de producción.

Gráfico 5. Evolución en el volumen de producción de las plantas desde el primer año de operación al último periodo anual.



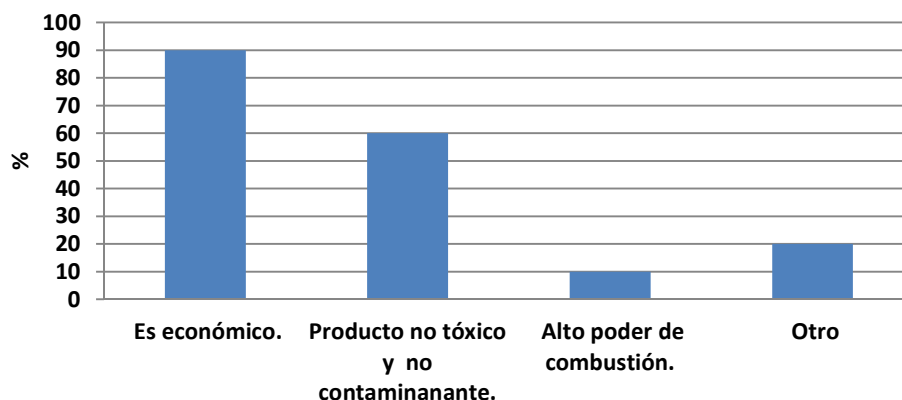
Fuente: Datos obtenidos de levantamiento de información.

Mercado del pellet de madera

El mercado de pellet en España se enfoca principalmente a la producción de pellet doméstico, al ser el más demandado para la calefacción de espacios cerrados en hogares y espacios públicos. El 73 % de las empresas encuestadas se dedican a su producción y el 27% producen ambos tipos de pellet industrial y doméstico.

Los motivos que han impulsado a la producción de pellet es fundamentalmente porque es más económico y el cliente busca rentabilidad, aunque también está la parte medioambiental al ser una alternativa para usar los desperdicios maderables y ser un producto no tóxico que no contamina y es renovable.

Gráfico 6. Factores que han influido en la aceptación del pellet por los consumidores.



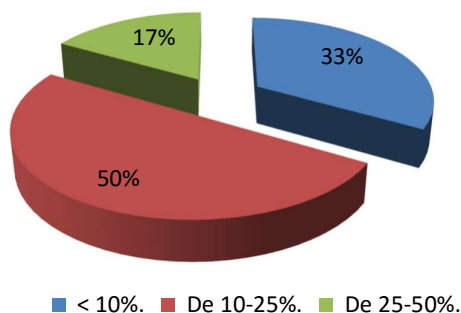
Fuente: Datos obtenidos de levantamiento de información.

Los consumidores de pellet son muy exigentes con la calidad, el 80% de las empresas están certificadas con ENPLUS, que es la certificadora más reconocida en Europa.

El 70% de las empresas señalaron que es necesario un mercado más grande para distribuirlo y el 30% está conforme con el tamaño de mercado.

El 60% de las plantas produce pellet para exportación. El 17% de las plantas exportan menos del 10% del total de su producción, el 50% exporta entre el 10-25% y el 33% restante exporta entre el 25-50%.

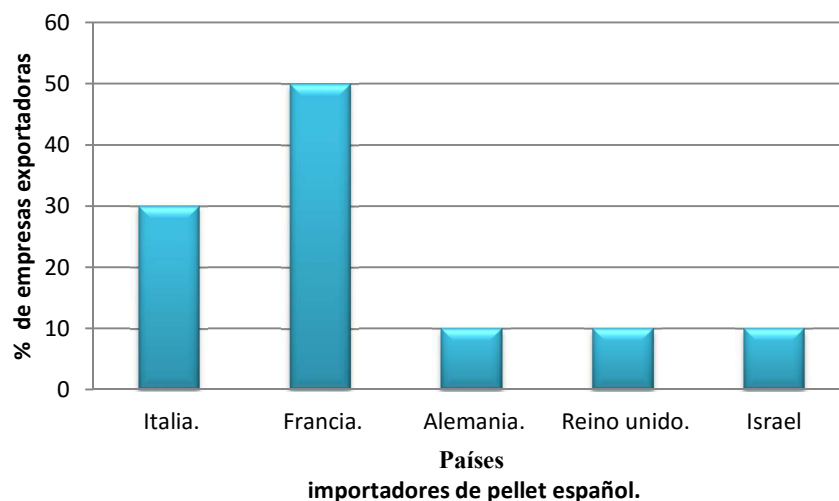
Gráfico 7. Porcentaje de la producción destinada a la exportación.



Fuente: Datos obtenidos de levantamiento de información.

El pellet se exporta principalmente a Francia e Italia, con el 50 y 30 % de las empresas exportadoras respectivamente, y finalmente el 10% de las empresas exportan a Alemania, Reino Unido e Israel.

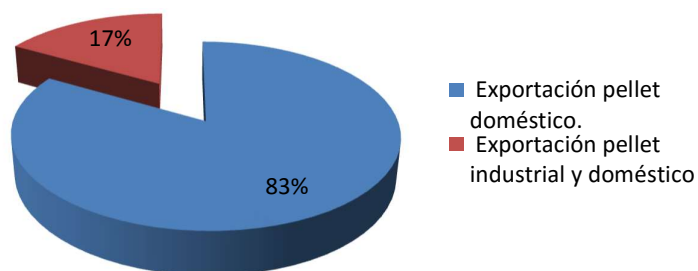
Gráfico 8. Países importadores de pellet de España.



Fuente: Datos obtenidos de levantamiento de información.

Se exporta principalmente pellet domestico correspondiente al 83% de las empresas, y el 17% exporta ambas presentaciones, pellet doméstico e industrial.

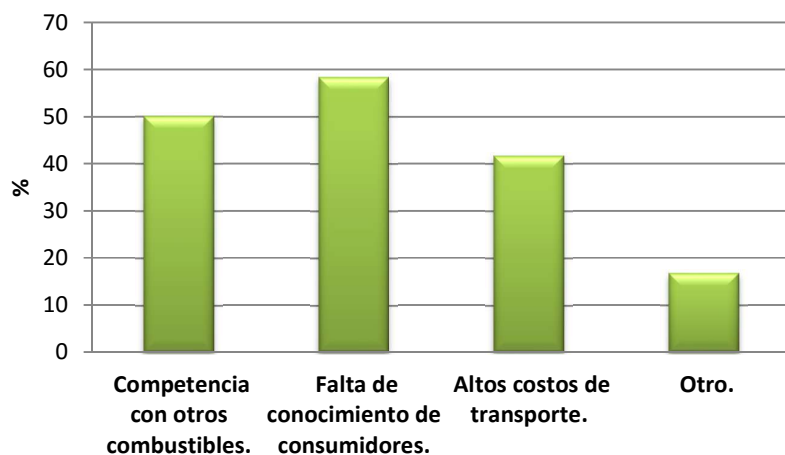
Gráfico 9. Clase de pellet exportado por España.



Fuente: Datos obtenidos de levantamiento de información.

Dentro de las dificultades para la comercialización del pellet el 58% de las empresas encuestadas señalan que los consumidores no tienen el conocimiento sobre la existencia y ventajas del uso del pellet de madera. También la competencia con otros combustibles principalmente los fósiles es otra limitante en el mercado.

Gráfico 10. Dificultades en la comercialización del pellet.



Fuente: Datos obtenidos de levantamiento de información.

Costes y precios del pellet

El precio promedio actual del pellet a granel se encuentra en los 175 euros/t y el precio del pellet en saco de 15 kg en promedio 180 euros/ton.

El coste de producción del pellet a granel por tonelada, ha aumentado del 5 al 35% desde el establecimiento de las plantas productoras hasta el último periodo anual. Únicamente en el 12.5 % de las plantas el coste disminuyó en un 5%, para el 37.5% el coste se ha mantenido, correspondiente a plantas creadas entre el periodo anual de 2008-2014.

Para el caso del pellet en saco de 15 kg el coste ha aumentado del 7-38% con base en el coste de los primeros dos años de operación. Para empresas creadas entre el año 2012 y 2015 el coste de producción se ha mantenido.

El alto costo de transporte del pellet también influye en el precio, lógicamente a mayor precio el consumidor opta por otras alternativas. Otros aspectos que también influyen en el volumen de comercialización son la baja demanda durante los inviernos cálidos.

Tabla 1. Precios constantes del pellet en España.

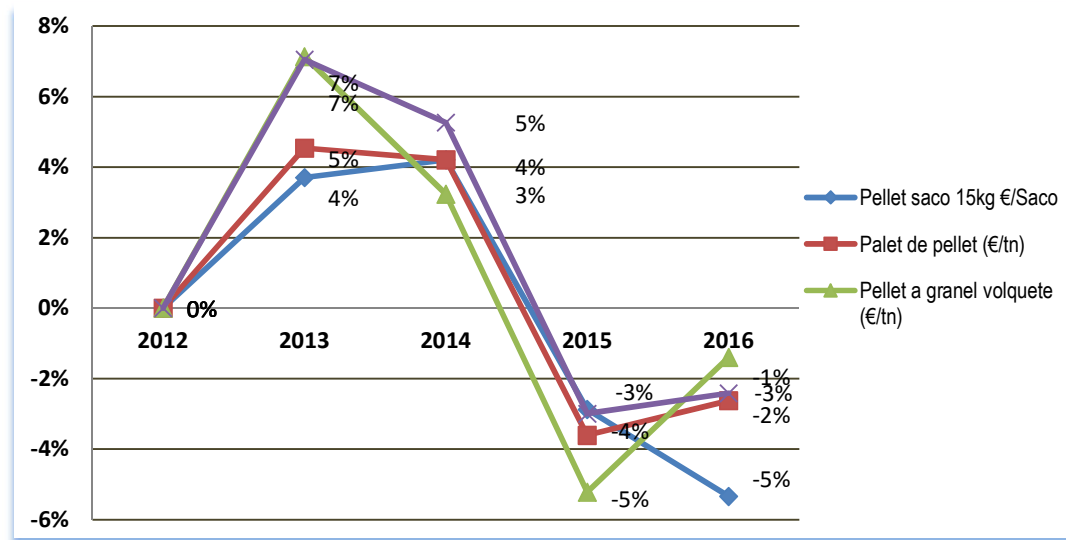
Precios constantes del pellet.						
Año	IPC	IPC PARA DEFLACTAR	PMB (Pellet sacos 15kg) €/Saco	Palet de pellet (€/tn)	Pellet a granel volquete (€/tn)	Pellet a granel cisterna (€/tn)
2012	2,45	102,45	4,03	258,28	223,81	225,27
2013	1,425	101,425	4,18	270,01	239,77	241,15
2014	-0,1416666	99,85	4,36	281,38	247,53	253,86
2015	-0,5	99,5	4,23	271,24	234,61	246,27
2016 (Primer trimestre)	-0,63333333	99,36	4,01	264,10	231,34	240,33

Fuente: Elaboración propia con datos de AVEBIOM del año 2016.

En general los precios se mantienen volátiles en un muy bajo porcentaje, varían entre 3-4%, en la siguiente gráfica se aprecia de manera más clara la variación de los precios, sin considerar la inflación.

Estos precios incluyen 21% de IVA y un transporte promedio de 100 km en formato a granel.

Gráfico 11. Variación del precio del pellet del periodo 2012-2015.



Fuente: Elaboración propia con datos de AVEBIOM.

De acuerdo a la información proporcionada por AVEBIOM, en la siguiente tabla se señala el consumo de pellet en España a partir del año 2012 con el estimado del año 2016. También se indican los precios del combustóleo tipo B para calefacción y el consumo en España. Los precios están deflactados, a partir de esto, se estimó la elasticidad cruzada, la elasticidad precio de la demanda del petróleo y pellet.

Tabla 2. Precios y consumo en España del pellet y combustóleo B.

AÑO	Pellet		Combustóleo	
	CONSUMO (T)	PRECIO	CONSUMO (T)	PRECIO (T)
2012	175000	225,27	3.810.961	\$ 1.332,36
2013	380000	241,15	3.706.014	\$ 1.338,92
2014	430000	253,86	3.631.261	\$ 1.304,85
2015	450000	246,27	3.784.805	\$ 1.119,60
2016	480000	240,33	1.353.740	\$ 957,06

Fuente: elaboración propia con información que proporcionó la oficina técnica de AVEBIOM.

Tabla 3. Elasticidad cruzada del pellet-combustóleo, elasticidad del combustóleo y elasticidad del pellet.

Elasticidad cruzada		elasticidad combustóleo		elasticidad pellet	
237,81	0,00	-5,59	0,00	16,61	0,07
-5,17	-0,03	0,79	-0,03	2,50	0,05
-0,33	-0,14	-0,30	-0,14	-1,56	-0,03
-0,46	-0,15	4,42	-0,15	-2,76	-0,02

Fuente: elaboración propia con información que proporcionó la oficina técnica de AVEBIOM.

De acuerdo a las elasticidades obtenidas del pellet de madera con el combustóleo B para calefacción, el pellet de madera es considerado como un bien complementario, es decir aun no existe gran impacto en su consumo en España, al mercado consumidor no le afecta económicamente si deja de consumir pellet, es indiferente, ya que hay preferencia hacia el combustible fósil.

Análisis FODA para España

Con los resultados de la encuesta se obtuvo el diagnóstico de la situación actual de la producción y comercialización del pellet en España, se plantean estrategias usando las fortalezas y aprovechando las oportunidades del panorama del pellet.

Tabla 3. Análisis Fortaleza-Oportunidad de la producción de pellet en España.

Análisis FO			
No.	Fortaleza	Oportunidad	Estrategia
1.	El pellet tiene elevada demanda.	Mercado nacional de pellet domestico emergente.	Nuevos canales de marketing, para que el mercado consumidor conozca la existencia y beneficios del uso del pellet
2.	Es de menor costo comparado con los combustibles fósiles, hasta 40% más bajo. Su uso no depende de la volatilidad de precios de los combustibles fósiles.	En España domina la producción de pellet doméstico, la producción de pellet industrial se hace en muy baja escala.	Se puede gestionar la exportación de pellet industrial hacia Inglaterra que está cambiando la infraestructura de su industria para el uso de biomasa.
3.	Apoyo económico de la unión europea con un determinado porcentaje para la instalación de las plantas productoras.	Hay oportunidad de expansión hacia el mercado extranjero, hacia países europeos y resto del mundo.	Gestionar la exportación a mercados asiáticos e ingleses, ya que Inglaterra es el principal consumidor a nivel mundial.
4.	Tiene un poder calorífico más elevado que la astilla, es fácil de manipular y almacenar.	Sustitución gradual de los derivados del petróleo como el combustóleo usado para producir calor y electricidad.	Mayor divulgación sobre los beneficios del uso del pellet contra el uso de los combustibles fósiles, haciendo énfasis en que el uso del pellet es más económico.
5.	Es un recurso renovable y menos contaminante que los combustibles fósiles, su uso es más seguro, las emisiones de CO ₂ son neutrales. Las cenizas que se producen no son tóxicas.	La certificación del pellet garantiza y da seguridad al cliente de la buena calidad del producto para su consumo.	Inclusión de las ventajas del uso del pellet certificado en el plan de marketing.
6.	Reduce la dependencia energética de los combustibles fósiles.	Se aprovechan los residuos de madera de la industria y del bosque, reduciendo el	

		riesgo de incendios forestales.	
--	--	---------------------------------	--

Fuente: Datos obtenidos de levantamiento de información.

En la tabla siguiente se presentan las estrategias, con el fin de minimizar la debilidad y evitar la amenaza.

Tabla 4. Análisis debilidad-amenaza de la producción de pellet en España

Análisis DA			
No.	Debilidad	Amenaza	Estrategia
1.	Inversión inicial Elevada.	Competencia con otras clases de biomasa de menor precio como el hueso de aceituna y cascara de almendra	El pellet tiene la ventaja de no ser corrosivo para las calderas, a diferencia de los materiales con los que compite, esto se puede incluir al plan de marketing.
2.	Parte del posible mercado consumidor de pellet no tiene conocimiento de las ventajas de su uso.	Competencias con otros combustibles, principalmente los fósiles.	Incluir en el plan de marketing las ventajas ambientales y económicas del uso del pellet
3.	Mayor exigencia de pellet certificado.		El tipo de certificadora a usar depende del mercado consumidor. La certificadora ENPLUS es la más reconocida en la unión europea por European Pellet Council (EPC). DINPLUS se basada en las normas de la industria alemana. Se usa también por productores de Francia, Bélgica y Suiza.
4.	Costes de transporte elevado y altos costes de producción del pellet	Competencia con otros países productores de la unión europea y América de Norte	Aumentar la eficiencia en las empresas con la gestión de inventarios, para evitar almacenar la producción por largo tiempo, gestionar los cobros y pagos, analizar el proceso y actividades administrativas para evitar desperdicios de tiempo e insumos. Para

			tener una producción ajustada.
5.	Fallos en la maquinaria y altos costes de reparación.		Llevar un programa de mantenimiento preventivo de la maquinaria, con revisiones periódicas.
6.	Dificultades en el abastecimiento de la materia prima.		Se debe establecer bajo parámetros muy específicos la ubicación precisa de la industria, que cuente con buenas vías de comunicación por carretera, cercana a los asentamientos urbanos para la distribución del pellet.
7.	En inviernos cálidos la demanda de pellet disminuye.		
8.	Venta del pellet sin IVA. Precio de venta del pellet, bajo.		

Fuente: Datos obtenidos de levantamiento de información.

CONCLUSIONES

El uso de pellet de madera en España es más económico que el combustóleo de calefacción, hasta 40% más bajo. Sin embargo, es necesaria mayor difusión de la existencia, uso y ventajas ambientales y económicas hacia el mercado consumidor.

En España la inversión inicial para el establecimiento de una planta productora de pellet es elevada, se encuentra entre uno y dos millones de euros, sin embargo, la Unión Europea ha llegado a otorgar subsidios que cubre cierto porcentaje del establecimiento.

El mercado de pellet en España se enfoca principalmente al consumo doméstico, por lo tanto cuando existen inviernos cálidos, la demanda disminuye. Sin embargo, existe la posibilidad de enfocar la producción de pellet hacia el consumo industrial.

De acuerdo a las elasticidades obtenidas del pellet de madera con el combustóleo B para calefacción, el pellet de madera es considerado como un bien complementario, es decir aún no existe gran impacto en su consumo en España, al mercado consumidor no le afecta económicamente si deja de consumir pellet, es indiferente, ya que hay preferencia hacia el combustible fósil.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue financiado por el Proyecto EULALinks de la Fundación Erasmus Mundus con apoyo de la Universidad de Córdoba, España y la Universidad Autónoma Chapingo, México.

REFERENCIAS

Agencia Andaluza de la Energía, (s/f). Política Europea y Nacional. Consultado el 11 de febrero de 2016, página de la Junta de Andalucía: <https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/ciudadania/energia-andalucia/planificacion-energetica/politica-europea-nacional>

Alakangas, E. (s/f). New European Pellets Standard-EN 14961-1. EUBIONET III. Finlandia.

Asociación Española de Valorización Energética de la Biomasa (AVEBIOM). (2011). Spain, Pellet Report. AVEBIOM, España.

Asociación Española de Valorización Energética de la Biomasa (AVEBIOM) y European Pellet Council (EPC) (2015). Manual ENplus, Parte 3- requisitos de calidad de los pellets. AVEBIOM y EPC. Valladolid, España.

BIOENERGY INTERNATIONAL, (2013). ¿Cuánto pellet consumiremos y de dónde llegará? Consultado el 11 de febrero de 2016. Página web de la sección de noticias de la revista Bioenergy Internacional: <http://www.bioenergyinternational.es/noticias/News/show/cuanto-pellet-consumiremos-y-de-donde-llegara-587>

BIOENERGY INTERNATIONAL, (2015). Más pellet Americano. Consultado el 11 de febrero de 2016, página de la revista Bioenergy Intertational, sección noticias: <http://www.bioenergyinternational.es/noticias/News/show/mas-pellet-americano-693>

Castro, C. A., Gutiérrez, A. J., Paredes, J.P. (s/f). El pellet como recurso energético en el sur de Europa. El caso de España y Portugal. Universidad de Oviedo.

Centro Español de Meteorología. (2014). Informe de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en 2013. Centro español de meteorología, Madrid.

Comisión Europea. (2013). El Régimen de Comercio de Derechos de Emisión de la UE (ETS). Oficina de Publicaciones de la Unión Europea.

De la cuesta, M., Viñuela, J. R. y Venegas, J.M. (2013). Huelva: 50 MWe de Biomasa en la mayor planta del sur de Europa. Bioenergy Internacional Español, 21 (4), 6-8.

Department for Enviroment Food and Rural Affairs, Greenhouse Gas Conversion Factor Repository. Consultada el 11 de noviembre de 2015. Página web del gobierno de Reino Unido: <http://www.ukconversionfactorscarbonsmart.co.uk/>

García, M. (2011). El sector de las energías renovables en México. Junta de Andalucía, Agencia Andaluza de Promoción Exterior. México, D.F. 56 p

Huang, J. (2015). Wood Pellet Global Market Report 2014. Consultado el 11 de febrero de 2016, página web de maquinaria para biocombustibles de GEMCO ENERGY: <http://www.biofuelmachines.com/wood-pellet-global-market-report-2014.html>

Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). (2012). Mapa Tecnológico: Calor y Frío Renovables. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. España.

Jesús Fernández. Energías renovables: biomasa. (s/f). IBERDROLA y Fundación de la energía de la comunidad de Madrid. Madrid.

▪ Anexo 7. Glosario

Biocarburante:	Biocombustible líquido que se utiliza como sustituto de los combustibles derivados del petróleo.
Heterocedasticidad:	Perturbación que se presenta en los modelos de regresión lineal cuando la varianza de los errores no es constante.
Elasticidad:	Medida de la sensibilidad ya sea de la cantidad demandada u ofertada de un bien que señala su cambio ante la oferta o demanda ante cambios en cada una de las variables independientes de la ecuación, en tanto que el resto se mantendrán constantes.
Densificación de la madera:	Transformación de la madera a mayor densidad.
Inflación:	Es la variación porcentual del IPC entre dos periodos de tiempo.
Elasticidad cruzada:	Elasticidad que mide la respuesta de la demanda para un bien al cambio en el precio de otro bien.
Incremento Medio Anual:	Es el crecimiento total que registran los arboles a cierta edad.
Poder calorífico inferior:	Es el calor producido sin considerar la energía de la condensación del agua.
Índice de precios al consumidor (IPC):	Es el índice que mide la evolución del costo promedio de una canasta de bienes y servicios representativa del consumo final de los hogares, expresado en relación con un año base.
Tasa de interés real anual:	Es la tasa de interés que considera la pérdida de valor del dinero por causa de la inflación.
Correlación:	Relación lineal entre dos variables aleatorias cuantitativas.
Estimador insesgado:	Un estimador es insesgado si el valor esperado del mismo es igual al parámetro a estimar.
Modelo no lineal:	Son modelos matemáticos donde en los parámetros aparecen divisiones, multiplicaciones y otras operaciones distintas a la resta.

▪ Anexo 8. Salidas de operaciones del modelo econométrico

Se consideran a cada variable independiente por separado.

```
> fm1 <- lm(prodastill ~ precastill, data = datosdiego)
> summary(fm1)
```

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-398.06	-247.77	-35.03	172.53	903.67

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	1500.4665	395.4564	3.794	0.00114 **
precastill	-0.2479	1.1704	-0.212	0.83439

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 305.1 on 20 degrees of freedom

(13 observations deleted due to missingness)

Multiple R-squared: 0.002238, Adjusted R-squared: -0.04765

F-statistic: 0.04487 on 1 and 20 DF, p-value: 0.8344

```
> fm2 <- lm(prodastill ~ prodcruco, data = datosdiego)
> summary(fm2)
```

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-1120.6	-570.1	-167.5	663.2	1382.5

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	4134.7014	1262.6718	3.275	0.00249 **
prodcruco	-0.7782	0.4479	-1.737	0.09167 .

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 763.6 on 33 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.08379, Adjusted R-squared: 0.05603

F-statistic: 3.018 on 1 and 33 DF, p-value: 0.09167

```
> fm3 <- lm(prodastill ~ prodcmbustleo, data = datosdiego)
> summary(fm3)
```

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-823.2	-585.9	-361.0	682.0	1459.7

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	276.241	853.477	0.324	0.7482
prodcmbustleo	4.493	2.262	1.986	0.0553 .

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 753.9 on 33 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.1068, Adjusted R-squared: 0.07974

F-statistic: 3.946 on 1 and 33 DF, p-value: 0.05534

```
> fm4 <- lm(prodastill ~ cnsmcumbustleo, data = datosdiego)
> summary(fm4)
```

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-863.7	-555.1	-344.5	653.3	1375.5

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	968.689	443.699	2.183	0.0362 *
cnsnmcmbustleo		2.781	1.203	2.311 0.0272 *

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 740.1 on 33 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.1393, Adjusted R-squared: 0.1133

F-statistic: 5.342 on 1 and 33 DF, p-value: 0.0272

```
> fm5 <- lm(prodastill ~ valcnsnmcmbustleo, data = datosdiego)
```

```
> summary(fm5)
```

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-966.0	-371.7	-43.2	268.4	858.6

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	2.895e+03	1.558e+02	18.576	< 2e-16 ***
valcnsnmcmbustleo	-2.872e-02		3.997e-03	-7.185 3.1e-08 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 498.2 on 33 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.61, Adjusted R-squared: 0.5982

F-statistic: 51.62 on 1 and 33 DF, p-value: 3.098e-08

```
> fm6 <- lm(prodastill ~ precmbustleo, data = datosdiego)
```

```
> summary(fm6)
```

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-967.13	-543.63	-54.98	504.31	1007.66

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	2536.98	148.50	17.084	< 2e-16 ***
precmbustleo	-230.16	43.52	-5.288	7.88e-06 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 586.9 on 33 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.4587, Adjusted R-squared: 0.4423

F-statistic: 27.96 on 1 and 33 DF, p-value: 7.883e-06

```
> fm7 <- lm(prodastill ~ prodmader, data = datosdiego)
```

```
> summary(fm7)
```

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-1157.68	-268.68	-56.42	468.81	1002.00

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	-2162.2060		782.7478	-2.762 0.00931 **
prodmader	0.7332	0.1384	5.300	7.62e-06 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 586.3 on 33 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.4598, Adjusted R-squared: 0.4434

F-statistic: 28.09 on 1 and 33 DF, p-value: 7.622e-06

```
> fm8 <- lm(prodastill ~ precmader, data = datosdiego)
```

```
> summary(fm8)
```

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-1195.08	-387.69	-43.73	366.17	1412.84

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	3673.9021		320.7312	11.455 4.86e-13 ***
precmader	-2.0069	0.3567	-5.627	2.90e-06 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 569.9 on 33 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.4896, Adjusted R-squared: 0.4742

F-statistic: 31.66 on 1 and 33 DF, p-value: 2.901e-06

```
> fm9 <- lm(prodastill ~ precdiesel, data = datosdiego)
```

```
> summary(fm9)
```

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-1030.62	-396.04	-33.94	367.88	1220.14

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	3226.54	216.51	14.902	3.26e-16 ***
precdiesel	-239.46	37.05	-6.463	2.49e-07 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 530 on 33 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.5586, Adjusted R-squared: 0.5453

F-statistic: 41.77 on 1 and 33 DF, p-value: 2.486e-07

```
> fm10 <- lm(prodastill ~ precgasol, data = datosdiego)
```

```
> summary(fm10)
```

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-1260.3	-445.3	-148.1	413.5	1245.5

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	3896.83	509.44		7.649 8.34e-09 ***
pregasol	-282.55	72.24	-3.911	0.000433 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 659.4 on 33 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.3167, Adjusted R-squared: 0.296
F-statistic: 15.3 on 1 and 33 DF, p-value: 0.0004327

```
> fm11 <- lm(prodastill ~ consdieseldia, data = datosdiego)
> summary(fm11)
```

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-934.51	-330.16	90.66	333.60	740.99

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	4433.527	323.636	13.699	3.60e-15 ***
consdieseldia	-9.064	1.146	-7.906	4.07e-09 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 468.9 on 33 degrees of freedom
Multiple R-squared: 0.6545, Adjusted R-squared: 0.644
F-statistic: 62.51 on 1 and 33 DF, p-value: 4.07e-09

```
> fm12 <- lm(prodastill ~ consdiesel, data = datosdiego)
> summary(fm12)
```

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-984.74	-496.16	3.08	454.61	863.42

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	2.581e+03	1.352e+02	19.086	< 2e-16 ***
consdiesel	-1.045e-02	1.664e-03	-6.282	4.22e-07 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 538.4 on 33 degrees of freedom
Multiple R-squared: 0.5446, Adjusted R-squared: 0.5308
F-statistic: 39.46 on 1 and 33 DF, p-value: 4.223e-07

```
> fm13 <- lm(prodastill ~ consgasoldia, data = datosdiego)
> summary(fm13)
```

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-852.81	-206.60	54.07	249.65	693.83

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	2783.0296	104.8293	26.55	< 2e-16 ***
consgasoldia	-2.4511	0.2401	-10.21	9.62e-12 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 391.2 on 33 degrees of freedom
Multiple R-squared: 0.7595, Adjusted R-squared: 0.7522
F-statistic: 104.2 on 1 and 33 DF, p-value: 9.623e-12

```
> fm14 <- lm(prodastill ~ consgasol, data = datosdiego)
> summary(fm14)
```

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-1003.0	-391.0	25.7	372.6	848.5

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	2.503e+03	1.190e+02	21.025	< 2e-16 ***
consgasol	-5.629e-03	8.299e-04	-6.783	9.82e-08 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 515.6 on 33 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.5823, Adjusted R-squared: 0.5697

F-statistic: 46.01 on 1 and 33 DF, p-value: 9.817e-08

```
> fm15 <- lm(prodastill ~ tipcamdolar, data = datosdiego)
> summary(fm15)
```

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-793.1	-392.5	-248.0	144.5	1584.0

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	-116.79	497.41	-0.235	0.815809
tipcamdolar	138.05	32.39	4.263	0.000159 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 640.6 on 33 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.3551, Adjusted R-squared: 0.3356

F-statistic: 18.17 on 1 and 33 DF, p-value: 0.0001587

```
> fm16 <- lm(prodastill ~ salmin, data = datosdiego)
> summary(fm16)
```

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-813.9	-530.2	-216.4	513.0	1646.8

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	573.04		503.32	1.139	0.26310
salmin	22.54		7.98	2.824	0.00799 **

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 715.9 on 33 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.1946, Adjusted R-squared: 0.1702

F-statistic: 7.974 on 1 and 33 DF, p-value: 0.007985

```
> fm17 <- lm(prodastill ~ tasaintreal, data = datosdiego)
> summary(fm17)
```

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-760.0	-501.0	-261.7	464.1	1665.7

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	1752.59		143.13	12.245	3.36e-13 ***

```
tasaintreal    17.14    13.28    1.291  0.207
```

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 714.6 on 30 degrees of freedom

(3 observations deleted due to missingness)

Multiple R-squared: 0.05261, Adjusted R-squared: 0.02103

F-statistic: 1.666 on 1 and 30 DF, p-value: 0.2066

```
> fm18 <- lm(prodastill ~ TIIE28dias, data = datosdiego)
```

```
> summary(fm18)
```

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-375.9	-196.1	-29.8	132.9	872.6

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	1277.020		97.874	13.048
TIIE28dias	10.000		5.381	1.859

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 292.5 on 18 degrees of freedom

(15 observations deleted due to missingness)

Multiple R-squared: 0.161, Adjusted R-squared: 0.1144

F-statistic: 3.454 on 1 and 18 DF, p-value: 0.07953

```
> fm19 <- lm(prodastill ~ baseINPC, data = datosdiego)
```

```
> summary(fm19)
```

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-935.00	-197.34	50.33	256.37	634.10

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	2796.200		109.779	25.471
baseINPC	-16.551		1.688	-9.804

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 403.3 on 33 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.7444, Adjusted R-squared: 0.7367

F-statistic: 96.11 on 1 and 33 DF, p-value: 2.654e-11
